

基于手机图像反演的滴灌玉米光响应曲线特征参数研究

贾彪 贺正

(宁夏大学农学院, 银川 750021)

摘要: 为研究利用手机图像预测玉米光响应曲线特征参数的可行性,通过自主设计的便携式图像采集装置,获取不同施氮量下滴灌玉米大喇叭口期冠层图像,提取其冠层图像特征参数,计算玉米光响应特征参数表观量子效率(α)、最大净光合速率(P_{max})、光补偿点(LCP)和暗呼吸速率(R_d),找出与光响应特征参数相关性高的归一化冠层覆盖系数(C_c)作为自变量,建立 C_c 与玉米光响应曲线特征参数间动态模型,并根据模型评价指标 R^2 、RMSE 和 nRMSE 筛选出各参数的最优模型。结果表明, C_c 与 α 的最优模型为有理函数模型,与 P_{max} 最优模型为幂函数模型,与 LCP 最优模型为指数函数模型,与 R_d 以二次多项式模型为最优;各反演模型的 R^2 均不小于 0.876, RMSE 介于 $0.002 \sim 3.673 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间, nRMSE 不超过 9.071%,且各模型验证集的 R^2 均不小于 0.833, RMSE 均不大于 $5.989 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, nRMSE 不超过 9.659%。将数字图像特征参数与作物光响应曲线特征参数有机结合,可为玉米光响应曲线特征参数的快速获取提供一定的理论依据。

关键词: 玉米; 手机图像; 光响应曲线参数; 归一化; 冠层覆盖系数

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0229-08

Inversion of Light Response Curve Characteristic Parameters of Maize Based on Cellphone Images

JIA Biao HE Zheng

(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The characteristic parameters of light response can indicate the process of photosynthesis, capacity of photosynthesis, and response of adversity stress in crops. In order to explore the feasibility of using cellphone photos to predict the light response characteristic parameters of maize, canopy images at the big flare stage of the drip irrigation maize under different nitrogen levels were obtained by the self-developed portable image acquisition device. Feature parameters were extracted from the canopy image, and the photosynthetic physiological characteristics parameters were calculated, such as apparent quantum efficiency (α), dark respiration rate (R_d), light compensation point (LCP) and maximum net photosynthesis rate (P_{max}). A normalized canopy cover factor (C_c) was highly correlated with the light response characteristic parameters, as an independent variable was used to predict these parameters. The optimal model was selected according to the model evaluation indicators such as R^2 , RMSE and nRMSE. The results showed that the optimal model of C_c and α was the rational function model, the optimal model of P_{max} was the power function model, the optimal model of LCP was the exponential function model and the optimal model of R_d was the quadratic polynomial model. The R^2 values of each model were greater than 0.876, the values of RMSE were between $0.002 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ and $3.673 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, and the nRMSE was no more than 9.071%. Meanwhile, the R^2 values of each model validation set were greater than 0.833, the RMSE values were less than $5.989 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, and the nRMSE values were no more than 9.659%. Combining the digital image feature parameters with the maize light response curve characteristic parameters method, it was recommended to quickly acquire characteristic parameters of maize light response curve, which provided a theoretical basis for the light response.

Key words: maize; cellphone photos; light response curve parameters; normalized; canopy cover coefficient

收稿日期: 2019-01-11 修回日期: 2019-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31560339)、宁夏高等学校科研项目(NGY2017025)、宁夏回族自治区科技重大专项(2018BBF0200404)、宁夏区重点研发计划项目(2018BBF02018)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD22B01)

作者简介: 贾彪(1979—),男,副教授,博士,主要从事农业信息技术与精准农业研究,E-mail: jiabiao2008@163.com

0 引言

作物光响应曲线特征参数是其光合作用过程中最重要的指标^[1-3],也是表征作物冠层叶片养分利用和生理特性的重要参数^[1],能充分反映作物氮素营养分配及其对光合作用的影响^[1-2,4-5]。适量施氮可提高作物叶片对光的响应能力,调节光响应曲线特征参数,进而提高净光合速率 P_n (Net photosynthetic rate)^[6-9],通过分析光合有效辐射和 P_n 间的特性,可得到表观量子效率 α (Apparent quantum efficiency)、最大净光合速率 P_{nmax} (Maximum net photosynthetic rate)、光补偿点 (Light compensation point, LCP)、暗呼吸速率 R_d (Dark respiration rate)等光响应曲线特征参数^[1-3]。通常,作物光响应的特征参数需要通过光响应曲线测算得出^[1-3],此方法较为通用,但耗时费力,测算过程长,难以满足大面积快速测定的需求。

目前,随着各种成像监测设备精度的提高及光谱分析技术的日益成熟,国内外学者使用农业遥感技术对作物进行光合生理监测^[10-17]。然而光谱仪和热成像仪价格高昂、普及性差。随着数字图像处理技术的日趋成熟,采用数码相机获取作物数字图像在水稻^[18]、小麦^[19]、棉花^[20-22]、玉米^[23-24]长势监测等领域已广泛应用,而利用手机图像对作物的光响应特征参数进行监测的研究较少。

利用手机相机对作物进行监测具有便于携带、易操作、普及性强、分辨率和性价比高等优势。本文以宁夏引黄灌区滴灌水肥一体化玉米为研究对象,在平吉堡农场开展不同氮素处理试验。采用手机相机获取玉米冠层图像,利用 LI-6400XT 光合测定系统测定大喇叭口期玉米叶片光响应曲线,并计算光响应曲线的特征参数,分析玉米冠层数字图像特征参数与光响应特征参数间的相关关系,建立基于手机相机的玉米光响应特征参数关系模型,并通过独立试验数据和相关评价指标对模型进行评价。利用手机冠层图像特征参数反演玉米光响应曲线的特征参数,为作物光合生理机制与作物信息学的交叉研究提供方法和思路。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年在宁夏回族自治区平吉堡农场 (106°01'45"E, 38°26'42"N) 开展,田间土壤类型为淡灰钙土,质地是壤土,肥力中等。0~20 cm 耕层土壤有机质质量比为 12.82 g/kg、全氮质量比为 0.75 g/kg、全磷质量比 0.48 g/kg、碱解氮质量比

36.82 mg/kg、速效磷质量比 17.37 mg/kg、速效钾质量比 95.31 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,6 个氮素处理,分别为 N0 (0 kg/hm², 绝对对照 CK)、N1 (90 kg/hm²)、N2 (180 kg/hm²)、N3 (270 kg/hm²)、N4 (360 kg/hm²)、N5 (450 kg/hm²), 3 次重复,共 18 个小区,小区面积为 67.5 m² (长 15 m, 宽 4.4 m), 采用宽窄行机播模式,宽行 70 cm,窄行 40 cm,株距 20 cm,密度约为 9 × 10⁴ 株/hm²。供试玉米品种为天赐 19 (TC19), 该品种生育期 137 d 左右,株型半紧凑,属中晚熟型杂交种。

供试氮肥为尿素 (NPK 46-0-0), 磷肥为磷酸二氢钾 (NPK 0-52-34), 钾肥为硫酸钾 (NPK 0-0-52), 均为水溶性肥料,其中磷肥 138 kg/hm²、钾肥 120 kg/hm² 为常规用量,作为基肥播前一次性施入,肥料用量均以元素态计算。氮肥随水施入,采用水肥一体化滴灌模式,共施肥 8 次,分别为苗期 1 次、拔节期 3 次、抽雄期 1 次、灌浆期 3 次。各生育时期施肥量分别占总量的 10%、45%、20%、25%。其他管理措施与当地大田生产相同。玉米于 4 月底播种,9 月底收获。

1.3 玉米叶片光响应曲线特征参数计算

于大喇叭口期,采用 LI-6400XT 型便携式气体交换测量系统 (LI-Cor, 美国) 测定,天气晴朗,观测时间为 09:00—12:00 与 14:30—16:30,每个处理随机选取 6 株长势一致、上层第 1 片完全展开叶片进行测定 (图 1a)。选择红蓝光源,气体流速设置为 500 μmol/s,叶室内 CO₂ 浓度控制在 (380 ± 2) μmol/mol、空气相对湿度为 (45 ± 5) % , 叶片温度控制为 (30 ± 3) °C,测定 13 个梯度的 PAR 玉米叶片净光合速率,依次递减为 2 000、1 700、1 400、1 100、800、600、400、200、110、80、50、20、0 μmol/(m² · s), 系统自动记录并保存光合数据,最小等待时间和最大等待时间分别为 120 s 和 180 s。选择 YE 等^[25-26]提出的直角双曲线模型对光响应曲线进行拟合。

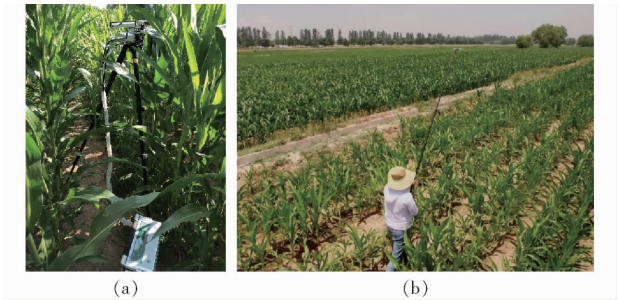


图 1 田间数据获取

Fig. 1 Field data collection

1.4 玉米冠层图像获取

在玉米大喇叭口期,天气晴朗,太阳高度角相对稳定的 11:00—12:00 之间,利用手机相机 (iPhone, 1 200 万像素) 获取玉米冠层图像。采用自主设计的便携式图像采集系统,主要由大疆灵眸 (Osmo Mobile 2) 防抖手持云台手机稳定器、碳素纤维伸缩杆、固定支架、蓝牙遥控器组成,伸缩范围 0.6 ~ 3 m,能自由调节伸缩杆角度来获取冠层图像。拍摄时,将手机固定于云台手机稳定器,点击云台开机键,使用手机 DIG GO 4 软件通过蓝牙连接手机和云台。进入拍照界面,使用云台位置遥感键调整手机与玉米冠层垂直后拍摄,点击云台模式 (M) 键将云台 Y 轴 (垂直设定) 锁定,指示灯由绿变黄,可保证手机恒定垂直于玉米冠层。将相机镜头距离地面 3.2 m 垂直高度 (距玉米冠层约 1.0 m),同时将相机调至 Auto 模式,以自动曝光控制色彩平衡。图像以 JPEG 格式存储,分辨率为 3 024 像素 × 4 032 像素,试验均采用图 1b 设备获取冠层图像。

1.5 玉米归一化冠层覆盖系数提取

作物冠层图像的 RGB 像元其本质是对 R、G、B 3 个波段反射光强的量化表达^[27],以此来反映作物冠层叶片对光的反射特性^[27],本文利用手机相机获取玉米冠层图像,包括玉米冠层和土壤部分,如果对

原始图像直接进行 R、G、B 波段信息的提取,由于土壤干扰,其结果会影响到玉米冠层参数对光响应参数诊断的准确性^[28]。因此,采用文献 [20, 27, 29] 冠层图像修正方法,通过土壤调整植被指数 (Soil adjusted vegetation index, SAVI_{green}) 计算玉米归一化冠层覆盖系数 (C_c)。具体计算公式与来源见表 1。

表 1 玉米冠层图像特征参数选取		
Tab.1 Canopy image characteristic parameter of maize		
冠层图像特征参数	公式	文献序号
归一化冠层覆盖系数 (C_c)	$C_c = \frac{(1+L)(G-R)}{G+R+L}$	[29]
红光通道归一化标准值 (r)	$r = \frac{R}{R+G+B}$	[30]
绿光通道归一化标准值 (g)	$g = \frac{G}{R+G+B}$	[30]
蓝光通道归一化标准值 (b)	$b = \frac{B}{R+G+B}$	[30]
超绿值 (E_{xG})	$E_{xG} = 2g - r - b$	[31]

表 1 玉米冠层图像特征参数 C_c 提取过程为:将手机采集的玉米冠层图像传输至计算机,使用 Visual Studio 平台、Visual C++ 和 Matlab 软件的数字图像分析系统^[20, 22],将玉米冠层图像与土壤进行分割^[29],提取分割处理后图像的 R、G、B 通道的像元均值,结果如图 2 所示。

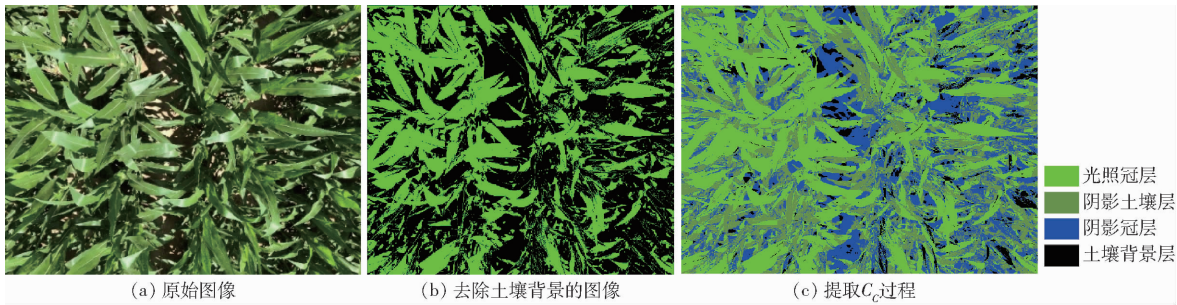


图 2 玉米归一化冠层覆盖系数 C_c 提取过程

Fig. 2 Extraction process of normalized canopy cover factor of maize

1.6 玉米冠层图像其他特征参数筛选

对作物冠层图像特征参数标准化、归一化和组合计算,可筛选出多种有用的图像特征参数^[22, 27, 30, 32],本文筛选与作物农学参数具有较高相关性的归一化特征参数 r 、 g 、 b 、 C_c 和 E_{xG} 作为玉米冠层特征参数^[20, 22, 27, 29-32] (表 1),来建立玉米冠层图像特征参数与光响应过程特征参数的关系模型。

1.7 数据处理与模型评价

本试验数据来自 2 个区,在玉米大喇叭口期每个区采集 18 组数据,选择其中 1 个区的试验数据进行建模,另 1 个区的试验数据进行模型检验;采用 Excel 2016 进行数据整理与分析,运用 R3. 5. 2 进行

相关性分析,运用 Origin 8. 5 进行模型拟合。为检验模型准确性,选取决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 及标准均方根误差 (nRMSE) 对模型进行评价^[19-21],计算公式见表 2。计算模型误差以判别观测值与模拟值间的差异, RMSE 和 nRMSE 越小、 R^2 越接近于 1,模型精度越高。

2 结果与分析

2.1 施氮对手机图像特征参数的影响

由图 3 可知,在玉米大喇叭口期,通过手机获取的玉米冠层图像中,各 N 素处理间提取的玉米冠层图像特征参数随着施氮量的不同,差异比较明显,其

表 2 模型评价指标
Tab.2 Model evaluation indices

评价指标	公式	参数说明
R^2	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}}$	O_i 是观测值, S_i 是模拟值, $\bar{O}$ 是平均观测值, n 是样本数
nRMSE	$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100\%$	

中特征参数 C_c 与 b 随着施氮量的增加均呈正态分布,且未出现异常;随着施氮量的增加 C_c 与 b 的动态变化趋势相似,均呈先增加后下降趋势,且处理 N5 降幅较低(图 3a、3d);其他 3 个图像特征参数 r 、 g 和 E_{xg} 随施氮量的增加其动态变化趋势与 C_c 相反,随着施氮量的增加先减小后增加,处理 N5 升幅较小(图 3b、3c、3e)。

2.2 施氮对光响应曲线特征参数的影响

由图 4 可知,在不同施氮量下,玉米大喇叭口期各光响应特征参数随施氮量的增加产生差异性,光响应特征参数 α 、 P_{nmax} 、LCP 和 R_d 等指标与 C_c 动态分布相似,均呈正态分布,且未出现异常,各氮素处理间差异也比较明显,随着施氮量的增加呈先增加后降低趋势,且处理 N5 降幅较低。

从图 4 的结果看,各特征参数均以 N0 处理表现最低,N4 处理最高。高氮处理(N3、N4、N5)的光响应参数明显高于低氮处理(N0、N1、N2),故合理

施氮可提高玉米的光响应特征参数值进而提高玉米的光合作用能力,然而过量施氮肥不一定能促进玉米光合作用。

2.3 手机图像特征参数与光响应特征参数间相关性分析

运用 R3.5.2 统计软件对玉米大喇叭口期冠层图像特征参数 C_c 、 r 、 g 、 b 、 E_{xg} 与光响应曲线特征参数 α 、 P_{nmax} 、LCP 和 R_d 进行了相关性分析,如图 5 所示(***)表示 $P < 0.001$),对角线上部表示各参数间 Pearson 相关系数;对角线下部为各参数间散点关系。由图 5 可知,本研究筛选出的 5 个数字图像特征参数与 4 个玉米光响应特征参数呈显著相关性,且各参数均在 $P < 0.001$ 水平下呈极显著相关。其中冠层图像特征参数 C_c 和 b 与玉米光响应曲线的特征参数 α 、 P_{nmax} 、LCP、 R_d 间呈极显著正相关,其他图像特征参数 r 、 g 和 E_{xg} 与 α 、 P_{nmax} 、LCP、 R_d 间呈极显著负相关。玉米冠层图像特征参数中, C_c 与玉米的 4 个光响应曲线的特征参数相关性最好,与 P_{nmax} 的相关系数最高,达到 0.93,与 LCP 的相关系数相对较低,为 0.83; b 与玉米光响应曲线的特征参数的相关系数较 C_c 次之,与 P_{nmax} 的相关系数最高,达到 0.75,与 R_d 最低,为 0.68;其余的图像特征参数均与光响应参数呈极显著相关, E_{xc} 最低,相关系数都在 0.52 以上。

2.4 基于 C_c 的玉米光响应特征参数动态模型

在玉米大喇叭口期, C_c 与光响应特征参数均在 $P < 0.001$ 水平显著相关,且高于其他图像特征参数(图 5)。随着施氮量的增加, C_c 与各光响应参数呈

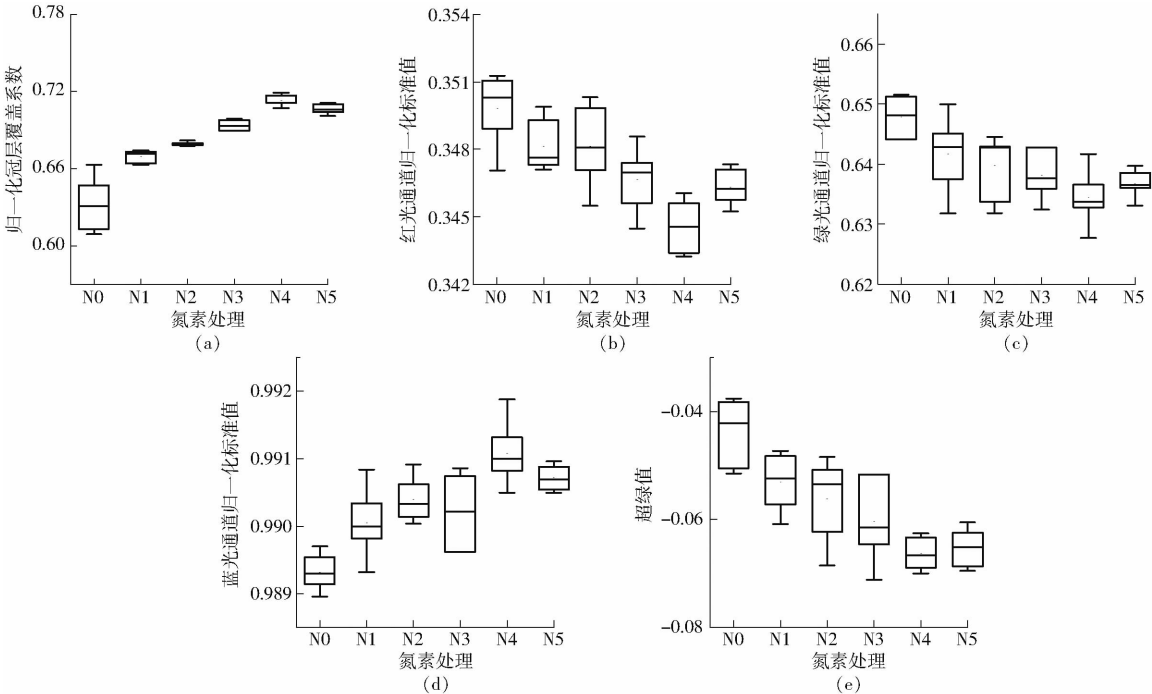


图 3 冠层图像特征参数随施氮量变化箱线图

Fig.3 Box diagrams of canopy-image characteristic parameters at different nitrogen rates

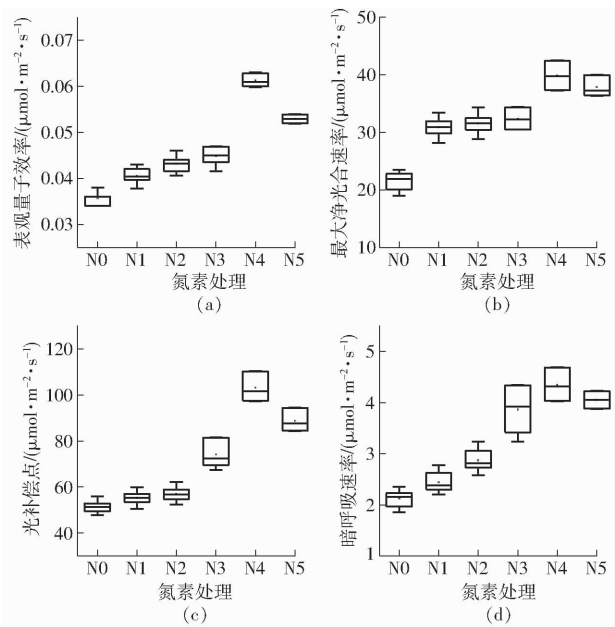


图 4 光响应曲线特征参数随施氮量变化箱线图
Fig. 4 Box diagrams of light response curve characteristic parameters at different nitrogen rates

现相似的变化趋势(图 3),因此,以 C_c 为自变量,运用 Origin 软件建立 C_c 与 α 、 P_{nmax} 、LCP、 R_d 等光响应特征参数非线性回归函数关系模型,并根据模型评价指标 R^2 、RMSE 和 nMRSE 筛选出评价指标较高和具有生物学意义的最优动态模型。如图 6 所示, C_c 与表观量子效率 α 的最优模型为有理函数,其决定系数 R^2 为 0.943;与最大净光合速率 P_{nmax} 最优模型为幂函数模型,其 R^2 为 0.891;与光补偿点 LCP 的最优模型为指数函数模型,其 R^2 为 0.915;与暗呼吸速率 R_d 的最优模型为二次函数多项式,其 R^2 为 0.876。与 α 的决定系数最高,与 R_d 的决定系数最

低。故由模型的拟合结果看,通过手机获取玉米冠层图像,提取的冠层图像特征参数 C_c 能较好地拟合光响应特征参数,能实现对玉米光响应过程进行快速无损监测。

2.5 模型评价与检验

本文选用决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 及标准均方根误差 (nRMSE) 等指标对玉米图像特征参数 C_c 与光响应特征参数间的动态模拟模型进行了评价和验证,其评价和检验结果如表 3 所示。由表 3 可以看出,模型的模拟效果均较好,决定系数由大到小依次为 LCP、 α 、 P_{nmax} 、 R_d ,其中 C_c 与 LCP 拟合效果最好,其建模集与验证集的决定系数 R^2 分别为 0.915、0.911, RMSE 分别为 3.673、5.989 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,标准均方根误差 (nRMSE) 分别为 5.062%、8.495%。

由图 7 可知,不论是建模集的拟合值与实测值,还是验证集的拟合值与观测值,利用手机获取的玉米冠层图像特征参数 C_c 对光响应曲线的特征参数反演,具有一定的准确性和可靠性。

3 讨论

叶片是作物获取光合作用的主要器官^[6-7],合理施氮可增加玉米的叶面积^[8],进而提高图像归一化冠层覆盖系数^[20,27],提高玉米的光合能力^[9],从而影响光合生理过程^[6-8]以及光响应生理参数^[5]。本文得出玉米冠层图像特征参数和光响应曲线特征参数均与各氮素处理间存在着明显的差异性,冠层图像特征参数随施氮量的变化由大到小依次是 C_c 、 r 、 E_{cg} 、 g 、 b (图 3)。随着施氮量的增加,玉米光响应

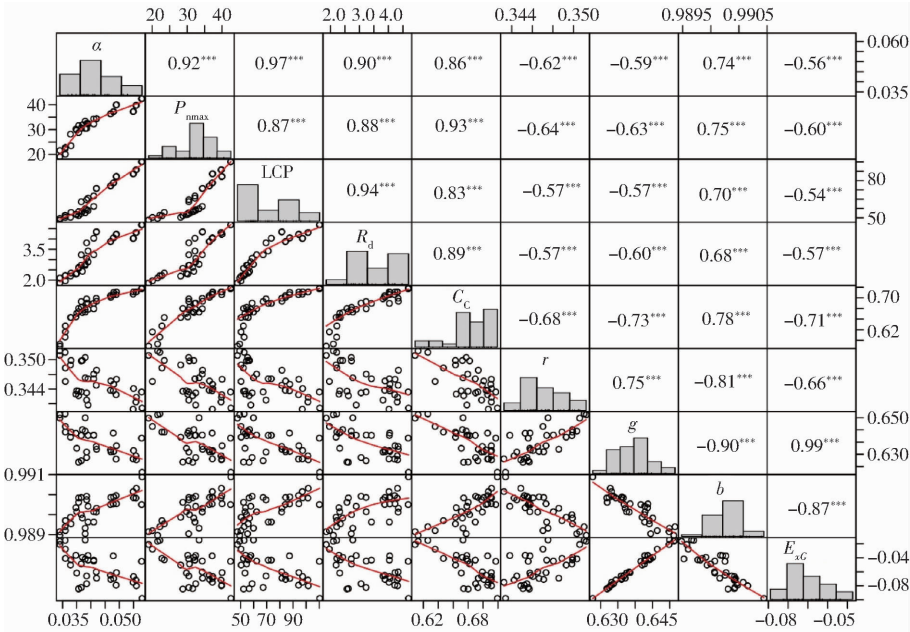


图 5 玉米冠层叶片图像特征参数和光响应特征参数相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between image parameters and light response parameters of maize canopy leaves

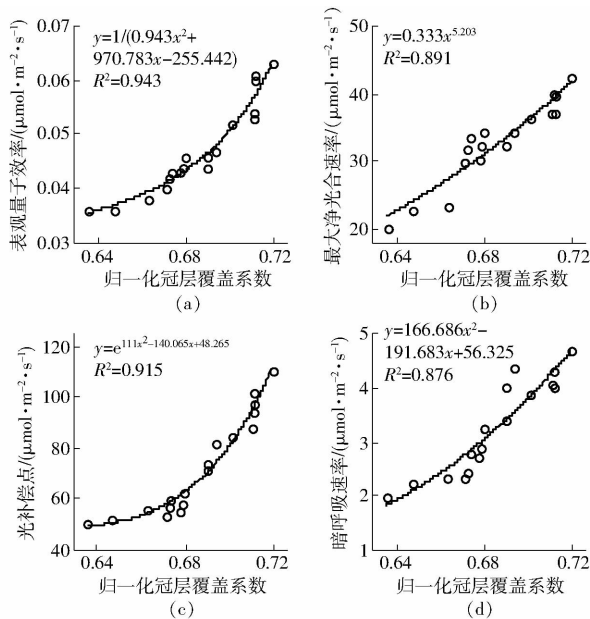


图 6 基于 C_c 的玉米大喇叭口期光响应特征参数模型

Fig.6 Models of light response curve characteristic parameters at big flare stage based on normalized canopy cover factor

特征参数 α 、 P_{nmax} 、LCP 和 R_d 所呈现出的动态变化规律与 C_c 相似(图 4),先升高后降低。相关性分析表明,宁夏引黄灌区滴灌玉米大喇叭口期冠层图像特征参数 C_c 与其光响应特征参数具有最高的相关性(图 5),其他的玉米冠层图像特征参数与光响应特征参数的相关性也较高,如红光通道归一化标准值(r)与光响应特征参数间呈显著负相关,其原因是随着施氮量的增加,叶片的叶绿素含量增加,绿色程度增强^[20,29,32],光合能力也增强^[9],而红光则在叶片中的比例减少,造成 r 值降低^[30]。由于农学参数较大的变化会引起变异范围较小的作物冠层图像特征参数变化,所以在选择最佳冠层参数时要同时考虑相关性高和变异范围较大的参数,因此,本文选取玉米冠层数字化图像特征参数 C_c 来反演光响应特征参数 α 、 P_{nmax} 、LCP 和 R_d 。

本文通过手机相机获取玉米冠层图像,建立的基于归一化冠层覆盖系数的宁夏滴灌玉米光响应生理参数反演模型(图 6)中未涉及 LSP,其他参数最佳反演模型的 R^2 都达到了 0.876 以上, RMSE 的值

表 3 模型评价与检验

Tab.3 Model evaluation and verification

光响应特征 参数	建模集 ($n = 18$)			验证集 ($n = 18$)		
	R^2	RMSE/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	nRMSE/%	R^2	RMSE/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	nRMSE/%
α	0.943	0.002	4.102	0.884	0.003	6.693
P_{nmax}	0.891	1.938	5.902	0.874	2.244	7.051
LCP	0.915	3.673	5.062	0.911	5.989	8.495
R_d	0.876	0.302	9.071	0.833	0.344	9.659

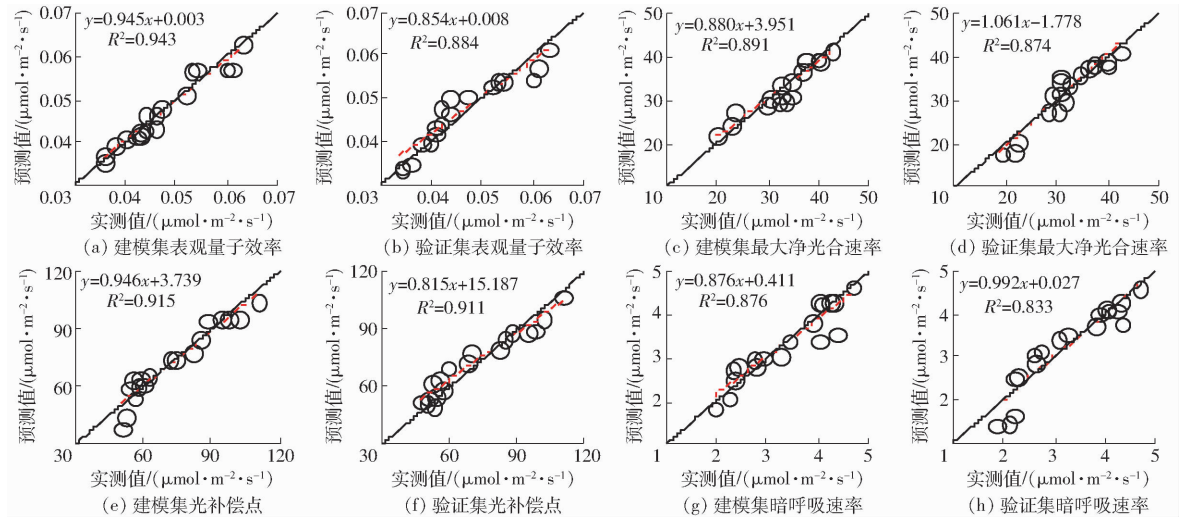


图 7 光响应曲线的特征参数

Fig.7 Fitting diagrams of light response curve characteristic parameters

为 $0.002 \sim 3.673 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, nRMSE 的值为 $4.102\% \sim 9.071\%$ (表 3),且通过独立的数据对模型进行检验,结果表明各模型的 R^2 均不小于 0.833, RMSE 的值均不大于 $5.989 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, nRMSE

均不超 9.659% (表 3)。这充分说明冠层图像特征参数 C_c 能较好地反演玉米光响应曲线特征参数,可实现对玉米光响应曲线特征参数的大面积快速监测。

本文通过数字图像特征参数反演作物光响应特征参数,解决了玉米光合监测过程中遇到的难题,同时玉米作为高茎作物,其株高可达 3 m 以上,本文采用自主设计的便携式手机图像采集系统装置,便捷、易操作、普及性高、农户易接受,获取的冠层图像参数可快速反映作物的光合生理过程、光合能力,对了解作物生长发育具有重要意义^[22-23]。本文仅对玉米大喇叭口期的光响应特征参数进行了反演研究,对于玉米其他各生育时期的光响应特征参数动态变化规律是否可通过手机图像进行反演有待进一步研究。

4 结论

(1)施氮量对手机图像特征参数和光响应特征参数的影响不同,图像归一化冠层覆盖系数与光响应参数随着施氮量的增加具有相似的变化趋势。当施氮量不超过 360 kg/hm²时,施氮可提高 C_c 与光响应参数值;当施氮量达到 450 kg/hm²时则呈下降趋

势,但降幅较小,说明适量施氮可以提高玉米叶片光合作。

(2)不同氮素处理下,玉米大喇叭口期的冠层图像特征参数与光响应曲线特征参数相关性较高,相关系数由大到小依次为 C_c 、 b 、 g 、 r 、 E_{xc} ,其中 C_c 与光响应特征参数的相关性最高,说明 C_c 可反演玉米光响应特征参数。

(3)建立了基于 C_c 的滴灌玉米光响应特征参数关系模型,并根据模型评价指标 R^2 、RMSE 和 nRMSE 筛选出各光响应特征参数的最优模型。 C_c 与 α 的最优模型为有理函数模型,与 P_{nmax} 最优模型为幂函数模型,与 LCP 的最优模型为指数函数模型,与 R_d 的最优模型为二次多项式模型。各反演模型的 R^2 均不小于 0.876, RMSE 范围为 0.002 ~ 3.673 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, nRMSE 不超过 9.071%,且各模型验证集的 R^2 不小于 0.833, RMSE 均不大于 5.989 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, nRMSE 不超过 9.659%,模型拟合效果较好。

参 考 文 献

- [1] FANG L, ZHANG S Y, ZHANG G G, et al. Application of five light-response models in the photosynthesis of *Populus × Euramericana* cv. ‘zhonglin46’ leaves[J]. Applied Biochemistry & Biotechnology, 2015, 176(1): 86 – 100.
- [2] CHEN Z Y, PENG Z S, YANG J, et al. A mathematical model for describing light-response curves in *Nicotiana tabacum* L. [J]. Photosynthetica, 2011, 49(3): 467 – 471.
- [3] FAN Z, QUAN Q, LI Y, et al. Exploring the best model for describing light-response curves in two *Epimedium* species[J]. Technology and Health Care, 2015, 23(1): 9 – 13.
- [4] LAROCQUE G R. Coupling a detailed photosynthetic model with foliage distribution and light attenuation functions to compute daily gross photosynthesis in sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) stands[J]. Ecological Modelling, 2002, 148(3): 213 – 232.
- [5] 王帅,韩晓日,战秀梅,等. 不同氮肥水平下玉米光响应曲线模型的比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1403 – 1412. WANG Shuai, HAN Xiaori, ZHAN Xiumei, et al. The comparative study on fitting light response curve model of photosynthesis of maize under different nitrogen fertilizer levels[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(6): 1403 – 1412. (in Chinese)
- [6] LAMPTEY S, LI L, XIE J, et al. Photosynthetic response of maize to nitrogen fertilization in the semiarid western loess plateau of China[J]. Crop Science, 2017, 57(5): 2739 – 2752.
- [7] LI G, ZHANG Z S, GAO H Y, et al. Effects of nitrogen on photosynthetic characteristics of leaves from two different stay-green corn (*Zea mays* L.) varieties at the grain-filling stage[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2017, 92(4): 671 – 680.
- [8] ZHANG Y, WANG J, GONG S, et al. Nitrogen fertigation effect on photosynthesis, grain yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2016, 179: 277 – 287.
- [9] DING L, WANG K J, JIANG G M, et al. Effects of nitrogen deficiency on photosynthetic traits of maize hybrids released in different years[J]. Annals of Botany, 2005, 96(5): 925 – 930.
- [10] WALTER A, FINGER R, HUBER R, et al. Opinion: smart farming is key to developing sustainable agriculture[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(24): 6148 – 6150.
- [11] 陈俊英,陈硕博,张智韬,等. 无人机多光谱遥感反演花蕾期棉花光合参数研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 230 – 239. CHEN Junying, CHEN Shuobo, ZHANG Zhitao, et al. Investigation on photosynthetic parameters of cotton during budding period by multi-spectral remote sensing of unmanned aerial vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 230 – 239. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181026&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.026. (in Chinese)
- [12] MOUALEU-NGANGUE D P, CHEN T W, STÜTZEL H. A new method to estimate photosynthetic parameters through net assimilation rate intercellular space CO₂ concentration curve and chlorophyll fluorescence measurements[J]. New Phytologist, 2016, 213(3): 1543.

- [13] JIN P B, WANG Q, IIO A, et al. Retrieval of seasonal variation in photosynthetic capacity from multi-source vegetation indices[J]. *Ecological Informatics*, 2012, 7(1): 7–18.
- [14] GAMON J A, BOND B. Effects of irradiance and photosynthetic downregulation on the photochemical reflectance index in Douglas-fir and ponderosa pine[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 135: 141–149.
- [15] 武海巍,于海业,田彦涛,等. 基于核函数与可见光光谱的大豆植株群体净光合速率预测模型[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(6): 1831–1836.
- WU Haiwei, YU Haiye, TIAN Yantao, et al. Prediction model on net photosynthetic rate of soybean plant groups based on kernel function and visible light spectrum[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(6): 1831–1836. (in Chinese)
- [16] 张雨晴,于海业,刘爽,等. 玉米叶片净光合速率快速检测方法研究[J]. *农机化研究*, 2019, 41(4): 182–185.
- ZHANG Yuqing, YU Haiye, LIU Shuang, et al. Study on rapid detection method of net photosynthetic rate of maize leaves [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(4): 182–185. (in Chinese)
- [17] 程麒,黄春燕,王登伟,等. 基于红外热图像的棉花冠层水分胁迫指数与光合特性的关系[J]. *棉花学报*, 2012, 24(4): 341–347.
- CHENG Qi, HUANG Chunyan, WANG Dengwei, et al. Correlation between cotton canopy CWSI and photosynthesis characteristics based on infrared thermography[J]. *Cotton Science*, 2012, 24(4): 341–347. (in Chinese)
- [18] YUAN Y, CHEN L, LI M, et al. Diagnosis of nitrogen nutrition of rice based on image processing of visible light[C]//IEEE, 2016:228–232.
- [19] BARESEL J P, RISCHBECK P, HU Y, et al. Use of a digital camera as alternative method for non-destructive detection of the leaf chlorophyll content and the nitrogen nutrition status in wheat[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 140: 25–33.
- [20] JIA B, HE H H B, MA F Y, et al. Use of a digital camera to monitor the growth and nitrogen status of cotton[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014: 1–12.
- [21] 贾彪,马富裕. 基于机器视觉的棉花氮素营养诊断系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(3): 305–310.
- JIA Biao, MA Fuyu. Design and experiment of nitrogen nutrition diagnosis system of cotton based on machine vision[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3): 305–310. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160343&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.043. (in Chinese)
- [22] YANG P, JIA B, ZHENG Z. Modeling cotton growth and nitrogen status using image analysis[J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109(6): 2630–2638.
- [23] KOROBICHUK I, LYSENKO V, OPRYSKO O, et al. Crop monitoring for nitrogen nutrition level by digital camera[C]//Conference on Automation, 2018, 743: 595–603.
- [24] 牛庆林,冯海宽,杨贵军,等. 基于无人机数码影像的玉米育种材料株高和 LAI 监测[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(5): 73–82.
- NIU Qinglin, FENG Haikuan, YANG Guijun, et al. Monitoring plant height and leaf area index of maize breeding material based on UAV digital images[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(5): 73–82. (in Chinese)
- [25] YE Z P, SUGGETT D J, ROBAKOWSKI P, et al. A mechanistic model for the photosynthesis-light response based on the photosynthetic electron transport of photosystem II in C3 and C4 species[J]. *New Phytol*, 2013, 199(1): 110–120.
- [26] YE Z P, ROBAKOWSKI P, SUGGETT D J. A mechanistic model for the light response of photosynthetic electron transport rate based on light harvesting properties of photosynthetic pigment molecules[J]. *Planta*, 2013, 237(3): 837–847.
- [27] 贺英,邓磊,毛智慧,等. 基于数码相机的玉米冠层 SPAD 遥感估算[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(15): 66–77.
- HE Ying, DENG Lei, MAO Zhihui, et al. Remote sensing estimation of canopy SPAD value for maize based on digital camera [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(15): 66–77. (in Chinese)
- [28] 李红军,李佳珍,雷玉平,等. 无人机搭载数码相机航拍进行小麦、玉米氮素营养诊断研究[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(12): 1832–1841.
- LI Hongjun, LI Jiazhen, LEI Yuping, et al. Diagnosis of nitrogen nutrition of winter wheat and summer corn using images from digital camera equipped on unmanned aerial vehicle[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(12): 1832–1841. (in Chinese)
- [29] LI Y, CHEN D, WALKER C N, et al. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera[J]. *Field Crops Research*, 2010, 118(3): 221–227.
- [30] KAWASHIMA S, NAKATANI M. An algorithm for estimating chlorophyll content in leaves using a video camera[J]. *Annals of Botany (London)*, 1998, 81(1): 49–54.
- [31] WOEBBECKE D M, MEYER G E, VON BARGEN K, et al. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions[J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38(1): 259–269.
- [32] WANG Y, WANG D, SHI P, et al. Estimating rice chlorophyll content and leaf nitrogen concentration with a digital still color camera under natural light[J]. *Plant Methods*, 2014, 10(1): 36.