

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.016

基于归一化冠层覆盖系数的玉米果穗发育动态估算

贾彪 贺正 王锐 孙权 王掌军 刘根红

(宁夏大学农学院, 银川 750021)

摘要: 为解析宁夏滴灌玉米冠层图像参数与果穗形态参数间的内在联系,提出了一种采用作物冠层图像特征参数拟合玉米果穗生长发育动态的数学方法,建立玉米灌浆期果穗发育动态估算模型,实现了基于作物冠层数字图像处理技术的玉米果穗形态无损监测。用手机相机获取不同氮素处理下滴灌玉米灌浆期的冠层图像,提取玉米灌浆期冠层图像特征参数,测定玉米穗长、穗粗和穗体积等形态参数;运用 R 语言进行相关性分析,其中归一化冠层覆盖系数(C_c)与玉米果穗形态参数相关性高,运用 Origin 软件建立 C_c 与果穗形态参数间的估测模型,通过 R^2 、RMSE 和 nRMSE 评价估测模型的精度。结果表明, C_c 与玉米穗长、穗粗、穗体积等形态参数均满足指数函数关系,其中 C_c 与穗长的预测精度最高,决定系数 R^2 达到 0.714,与穗粗的预测精度次之, R^2 为 0.601,与穗体积的 R^2 为 0.575。由模型检验与评价结果可知, C_c 与玉米果穗形态各参数间精度较高,其中 R^2 均不小于 0.523,穗体积 RMSE 的值均不大于 68.986 cm³, nRMSE 均不大于 33.621%。这表明基于冠层图像归一化覆盖系数的玉米果穗生长发育动态的估算具有一定的实用性,可为果穗形态参数估算和大面积玉米无损监测提供参考。

关键词: 玉米; 冠层图像; 穗形态参数; 氮素; 估算模型; 归一化冠层覆盖系数

中图分类号: S25; S127 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)03-0138-08

OSID:



Estimation of Ear Development Dynamics of Maize Based on Normalized Canopy Cover

JIA Biao HE Zheng WANG Rui SUN Quan WANG Zhangjun LIU Genhong

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

Abstract: The main objective was to analyze the relationship between canopy image parameters and ear morphology parameters of drip irrigated maize in Ningxia. A mathematical method for fitting the growth characteristics of corn ear with crop canopy image parameters was proposed. The dynamic estimation model of ear development during corn filling stage was established to realize the non-destructive monitoring of corn ear morphology based on crop canopy digital image processing technology. The mobile phone camera technology was used to obtain the canopy image of the drip irrigated maize under different nitrogen treatments, and the canopy image parameters of maize filling stage were extracted to determine the morphological parameters such as ear length, ear diameter and ear volume. Correlation analysis was carried out by using R language to find out the normalized canopy cover factor (C_c) as the image feature parameter with high correlation between maize and ear morphological parameters. The Origin software was used to establish an estimation model between C_c and ear morphological parameters, and the accuracy of the model was estimated by R^2 , RMSE and nRMSE. The results showed that the morphological parameters of C_c and ear length, ear diameter and ear volume of maize satisfied the exponential function, and the prediction accuracy of C_c and ear length was the highest, the coefficient of determination R^2 was 0.714, and the prediction accuracy of ear diameter was the second with R^2 of 0.601 and R^2 of ear volume was 0.575. From the model test and evaluation results, it can be seen that the accuracy of C_c and maize ear morphology parameters was higher, and the R^2 was no less than 0.523, the ear volume RMSE value did not exceed 68.986 cm³, and nRMSE was no more than 33.621%. Therefore, the estimation results

收稿日期: 2019-07-18 修回日期: 2019-10-12

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2019AAC03068)、宁夏区重点研发计划项目(2019BBF03009、2018BBF02004)、国家自然科学基金项目(31560339)和西夏区科技局项目(2018XXKJ01)

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

of maize ear growth and development based on canopy image normalized coverage coefficient C_c had certain practicality, which can provide reference for estimation of ear shape parameters and non-destructive monitoring of large area maize.

Key words: maize; canopy images; ear phenotype parameters; nitrogen; estimation model; normalized canopy cover

0 引言

穗长、穗粗和穗体积等果穗形态参数是玉米栽培和育种中重要的分析指标,与籽粒产量紧密相关^[1-2]。通常对玉米果穗分析主要通过人工进行测算^[3],对果穗破坏性强,测算时效性差,难以满足玉米信息化栽培管理和发展的需求^[4]。目前,我国在玉米栽培关键技术创新和栽培理论应用等方面已取得一系列突破^[5],基于图像处理技术的作物果穗生长动态自动监测,可迅速、准确得出果穗表型参数^[6-7],很大程度降低了人工成本,可获得难以通过人工直接测定的参数值,如穗体积等^[8-9]。MAKANZA等^[10]开发了一种低成本的数字成像设备,采用图像处理技术自动监测玉米穗长与穗粗,其 R^2 均达到0.97以上。杜建军等^[11]提出一种利用玉米果穗全景图像,批量测定穗长、穗粗的数字化系统,其测定结果 R^2 均达到0.91。以上方法的监测时期一般为收获期的玉米果穗,对果穗灌浆动态的形态变化则很难记录^[12-13],然而在规模化种植与信息管理过程中,掌握玉米果穗表型灌浆动态是其产量形成的关键环节^[14-16]。李娜娜等^[17]利用 Logistic 方程对郑单 958 和陕单 902 玉米吐丝后的穗长等形态参数进行了动态模拟和定量分析,取得了较高的预测精度($R^2 > 0.929$)。

玉米果穗生长受氮肥影响明显^[18-22],施氮量不同,玉米冠层叶片长势表现出一定差异^[23],从而影响叶片对光的吸收与反射^[24-25],进而影响果穗灌浆动态。在玉米灌浆过程中,通过冠层图像的差异动态反映不同施氮量下玉米果穗形态变化或果穗参数变化规律,可为基于冠层数字图像特征参数的玉米穗形态参数估算提供理论参考^[26]。基于此,本文用手机相机获取不同施氮量下玉米灌浆过程中冠层动态图像,同步测定玉米果穗形态参数,利用数字图像处理技术提取并筛选冠层参数,找出与玉米果穗形态参数相关的冠层图像参数,建立基于冠层图像特征参数的玉米果穗形态参数动态模拟模型,以期实现对宁夏滴灌玉米灌浆过程中果穗生长发育动态的快速拟合,为大面积快速监测玉米果穗形态提供新思路。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2017 年 4—9 月和 2018 年 4—9 月在宁夏农垦平吉堡农场(106°1'45"E,38°26'42"N)进行,土壤类型为淡灰钙土,质地为壤土,土壤肥力中等,试验田 0~20 cm 土层基础肥力见表 1。试验地海拔 1 100 m,多年平均温度、降雨量和蒸发量分别为 8.6℃、272.6 mm 和 2 325 mm,其中 2017—2018 年玉米生育期日均温度和降雨量如图 1 所示。

表 1 试验地土壤基础肥力
Tab.1 Basic fertility of soil in experimental fields

年份	pH 值	有机质质量比/ (g·kg ⁻¹)	全氮质量比/ (g·kg ⁻¹)	全磷质量比/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮质量比/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷质量比/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾质量比/ (mg·kg ⁻¹)
2017	8.12	11.45	0.80	0.51	37.37	19.04	102.52
2018	7.65	12.82	0.75	0.48	36.82	17.37	95.31

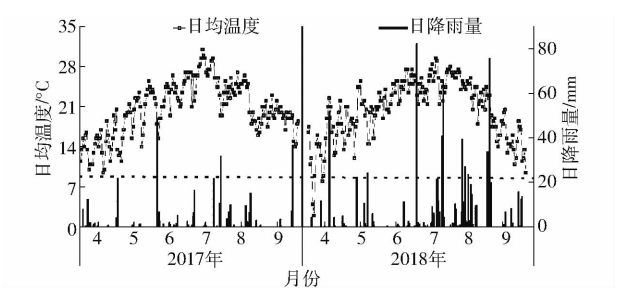


图 1 玉米生育期日均温度和降雨量

Fig.1 Average daily temperature and rainfall during growth period of maize

1.2 试验设计

试验为随机区组设计,共设 6 个氮素处理,3 次重复,共 18 个小区,小区面积是 66 m²(长 15 m,宽 4.4 m)。各处理对应施氮量分别为 0 (CK)、90、180、270、360、450 kg/hm²,依次用 N0、N1、N2、N3、N4、N5 表示。宽窄行种植模式(宽行 70 cm,窄行 40 cm),株距 20 cm,种植密度约为 9 万株/hm²,机械点播。试验品种为天赐 19,生育期 137 d 左右,株型为半紧凑型。

试验选用水溶性肥料,氮磷钾肥分别为尿素

(含 46% 总氮)、磷酸二氢钾(含 52% P_2O_5 和 34% K_2O)、硫酸钾(含 52% K_2O)、磷肥(138 kg/hm^2)、钾肥(120 kg/hm^2)作为基肥播前一次性施入,肥料用量计算方式为元素态。氮肥随水施入,共施 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%。其他栽培措施同当地高产田。玉米均于 4 月下旬播种,9 月下旬收获。

1.3 果穗形态参数测定

取样时间:玉米吐丝期开始第 1 次取样,然后每隔 10 d 取样 1 次,共取 5 次。

穗体积:玉米果穗用相同大小的保鲜膜包裹,完全置于注水烧杯,读取烧杯水位差,计算容积,转换为玉米果穗体积,各处理测量 3 次取平均值。

穗长与穗粗:玉米果穗长为基部至顶部距离,用直尺测量;穗粗为果穗中部直径,用游标卡尺测量,各处理测量 3 次取平均值。

1.4 冠层图像获取

在取样当天,天气晴朗无风,图像获取时间段为 11:00—12:00,该时间段太阳光辐射强度相对稳定,可降低太阳高度角造成的阴影对影像质量的影响^[23,27-28]。通过便携式作物冠层图像采集系统^[26]搭载手机(iPhone 7)相机获取玉米冠层垂直拍摄图像(图 2a),该系统主要由大疆灵眸(Osmo Mobile)防抖手持云台手机稳定器(图 2b)、碳素纤维伸缩杆、固定支架、蓝牙遥控器组成。其中碳素纤维伸缩杆伸缩范围 0.6~3 m,防抖手持云台安装在手机与伸缩杆之间,能自由调节手机与地面的垂直角度,不受伸缩杆倾斜度的影响。相机采用光圈优先(AV)模式,光圈设置为 2.2,ISO 设置为 100,曝光设为 0,快门设为 1/200 s,分辨率设置为 1 200 万像素。相机镜头距地面垂直高度 4.0 m,图像分辨率为 3 024 像素×4 032 像素,以 JPG 格式存储。各试验小区定点获取 3 幅冠层图像,每个处理共 9 幅图像,拍摄方式为对准宽行(宽 70 cm)中间位置,每幅图像可获取 4 行玉米冠层原始图像(图 3a)。拍摄时,将手机固定于 Osmo Mobile 防抖手持云台上,可避免人工擎举支撑杆晃动和与地面夹角不稳定等问题,从而获取玉米冠层垂直图像,不影响玉米冠层图像拍摄质量。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,通过云台位置遥感键调整至手机与玉米冠层垂直后进行拍摄,点击云台模式(M)键使云台斜轴(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。



图 2 便携式作物冠层图像采集系统
Fig. 2 Data acquisition of portable canopy image acquisition system of maize

1.5 归一化冠层覆盖系数提取

玉米冠层图像 R 、 G 、 B 值的本质是 R 、 G 、 B 3 波段反射率, R 、 G 、 B 分别为红、绿、蓝光波段, R 、 G 、 B 值用 4 位二进制数表示,可反映玉米冠层叶片对光的响应,本文通过手机获取的冠层图像包含土壤和玉米冠层部分,若直接对图像 R 、 G 、 B 值进行提取,则由于土壤的存在,导致提取结果会影响图像参数对果穗表型参数监测的准确性,为避免土壤干扰,本文采用 JIA 等^[28]第 1 种图像处理方法(式(1))来计算玉米归一化冠层覆盖系数(Canopy cover, C_c)。

玉米归一化冠层覆盖系数提取过程:将手机采集的玉米冠层图像传输至计算机,使用基于 Visual Studio 平台、Visual C++ 和 Matlab 软件开发的数字图像分析系统,将玉米冠层原始图像(图 3a)与土壤分割,提取分割后图像的 R 、 G 、 B 通道的像元均值^[28],分割去除土壤背景后的玉米冠层图像(图 3b),通过数字图像分析系统软件提取的结果如图 3c 所示,将玉米冠层图像分割为 4 层。

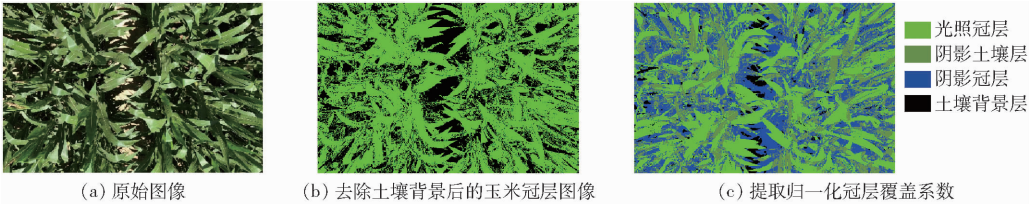


图 3 玉米归一化冠层覆盖系数提取

Fig. 3 Extraction of normalized canopy cover factor of maize

1.6 冠层图像敏感参数选取

基于前人研究成果^[29-31],筛选与农学参数相关性较高的归一化冠层覆盖系数 C_c ^[30],红、绿、蓝光归一化标准值(r 、 g 、 b)^[31]和超绿值(E_{xG})^[32]作为玉米冠层图像敏感参数,建立基于玉米冠层图像敏感参数与果穗形态参数的动态模型,其表达式为

$$C_c = \frac{(1+L)(G-R)}{G+R+L}$$
 (1)

$$r = \frac{R}{R+G+B}$$
 (2)

$$g = \frac{G}{R+G+B}$$
 (3)

$$b = \frac{B}{R+G+B}$$
 (4)

$$E_{xG} = 2g - r - b$$
 (5)

式中 L ——土壤基值,取 0.5^[28]

1.7 数据处理与模型评价

本试验采用 2018 年田间试验数据进行建模,样本数 n 为 90,2017 年试验数据进行模型检验,样本

数 n 为 90;利用 Excel 2016 整理数据,R3.5.2 对图像参数和果穗形态参数进行相关性分析,Origin 8.5 进行模型拟合。为评价模型准确性,采用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和标准均方根误差(nRMSE)计算模型误差。其中 R^2 越接近 1、RMSE 和 nRMSE 越小,模型精度越高。

2 结果与分析

2.1 施氮对果穗形态参数的影响

从吐丝开始,玉米整个灌浆过程中,果穗形态参数随施氮量增加呈现出相似的变化趋势(图 4),不施氮(N0)条件下,各参数值显著低于其他处理,过量施氮(N5)处理后期,果穗生长出现低于 N4 处理的情况,但降幅较小,表现出抑制雌穗生长发育现象;果穗形态参数值以 N4 处理时最高,可以看出 N4 处理下灌浆状况最好。由图 4 可知,在整个灌浆期,N3、N4 和 N5 处理的果穗形态参数无显著差异;各处理果穗形态参数随灌浆进程呈现先迅速增加后缓

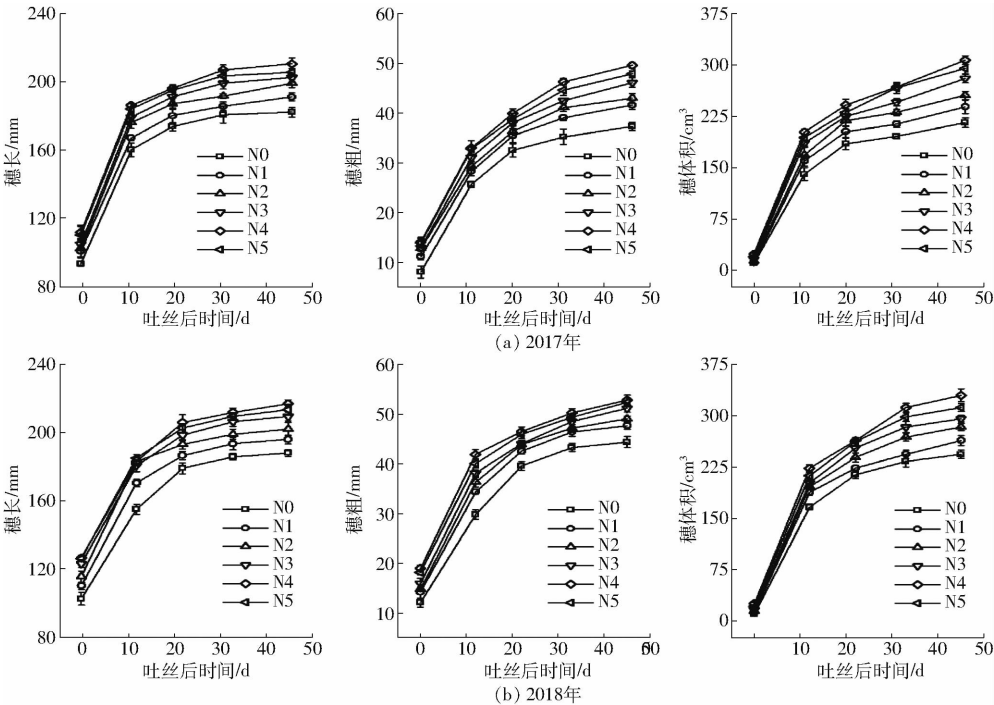


图 4 不同施氮量下玉米果穗形态参数动态变化曲线

Fig.4 Phenotypic developmental dynamic curves of maize ear phenotype at different nitrogen rates

慢增加的趋势,在成熟期均达到最大值。

2.2 图像参数与果穗形态参数间相关性分析

玉米穗长、穗粗和穗体积的相关性最好,相关系数均不小于 0.98(图 5)。由图 5 可知,本文所选的玉米冠层图像敏感参数中, C_c 、 g 、 E_{xG} 与灌浆全程玉米果穗形态参数具有显著相关性,而参数 r 和 b 与果穗形态参数无显著相关。其中, C_c 和 b 与果穗形态参数呈现正相关, r 、 g 和 E_{xG} 则呈现负相关,且 C_c 与

果穗形态参数相关性最好,与穗长的相关系数最高,为 0.68,与穗粗和穗体积的相关系数相对较低,均为 0.61; E_{xG} 与果穗形态参数相关性次之,与穗长、穗粗和穗体积的相关系数均不小于 0.34; g 与果穗形态参数相关性最低,与穗长、穗粗和穗体积的相关系数在 0.26~0.36 之间。

2.3 基于图像参数 C_c 的玉米果穗生长动态模拟

在玉米灌浆过程中, C_c 与 3 个果穗形态参数显

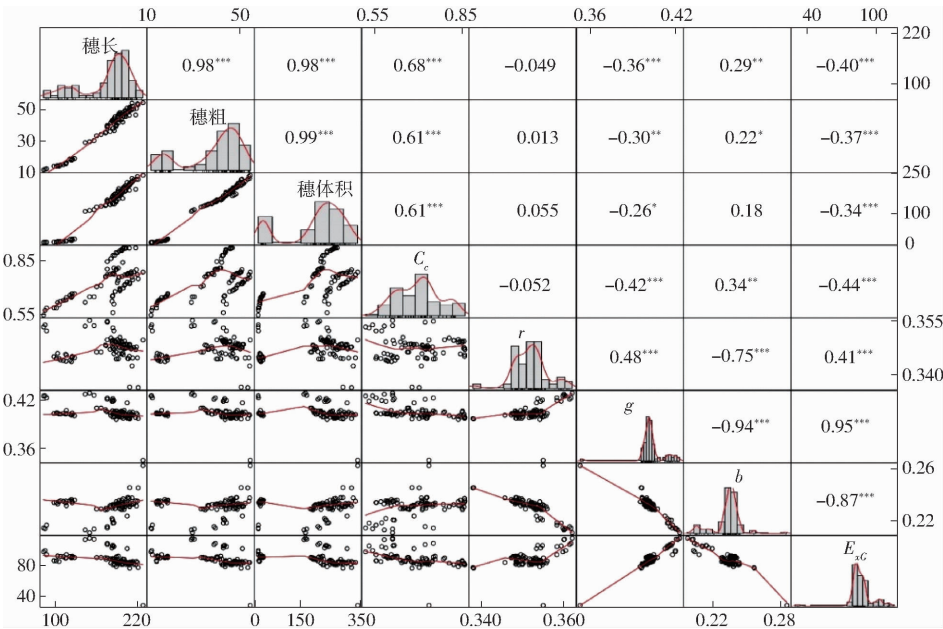


图 5 玉米图像参数和果穗形态参数相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of maize image parameters and ear phenotype parameters

注:对角线上部表示各参数间 Pearson 相关系数,*表示 $P < 0.05$ 、**表示 $P < 0.01$ 、***表示 $P < 0.001$;对角线下部为各参数间散点关系图。

著相关,相关系数不小于 0.61(图 5),这为基于归一化 C_c 为自变量的玉米果穗形态参数估算提供了依据(图 3),故采用 Origin 8.5 对 C_c 和 3 个果穗形态参数进行拟合,结果如图 6 所示, C_c 与果穗形态参

数可用指数函数来表达,其中 C_c 与穗长的预测精度最高, R^2 达到 0.714,对穗粗的预测精度次之, R^2 为 0.601,对穗体积的预测精度最小, R^2 为 0.575。因此,图像参数 C_c 可估算玉米果穗生长发育动态。

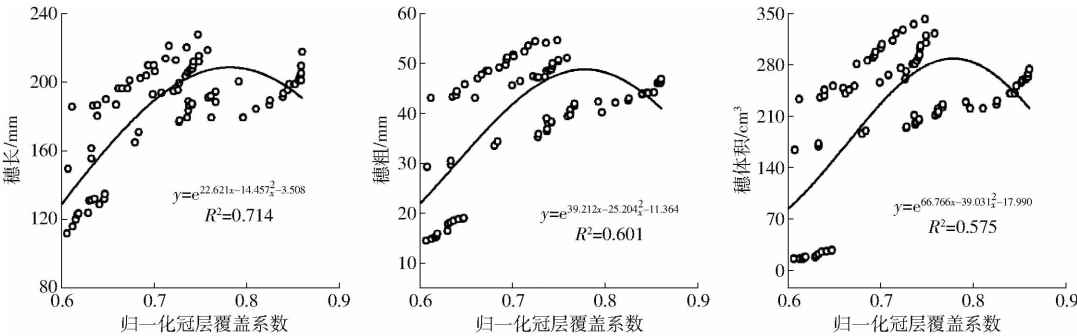


图 6 基于归一化冠层覆盖系数的玉米果穗生长发育动态模拟

Fig. 6 Modeling of maize ear phenotype parameters based on normalized C_c

2.4 拟合度评价

采用 R^2 、RMSE 和 nRMSE 评价指标,运用 2017 年采样数据对 2018 年拟合的基于 C_c 的玉米果穗形态参数变化动态进行评价与检验。由表 2 可知,基于 C_c 的玉米果穗形态参数精度较高,其中 R^2 不小于 0.523、

RMSE 不大于 68.986 cm^3 、nRMSE 不大于 33.621%。由图 7 可知,穗长、穗粗和穗体积的 R^2 均不小于 0.523,穗长的 R^2 最高,穗体积次之,穗粗最低。由此可见,通过手机相机获取的玉米冠层图像归一化覆盖系数 C_c 对果穗形态参数的估算结果具有一定可靠性。

表 2 模型验证

Tab. 2 Model verification

自变量 x	因变量 y	建模集 ($n = 90$)			验证集 ($n = 90$)		
		R^2	RMSE	nRMSE/%	R^2	RMSE	nRMSE/%
归一化冠层覆盖系数	穗长	0.741	16.734 mm	9.140	0.659	21.349 mm	11.844
	穗粗	0.601	8.109 mm	20.868	0.523	8.865 mm	22.878
	穗体积	0.575	66.628 cm^3	32.577	0.603	68.986 cm^3	33.621

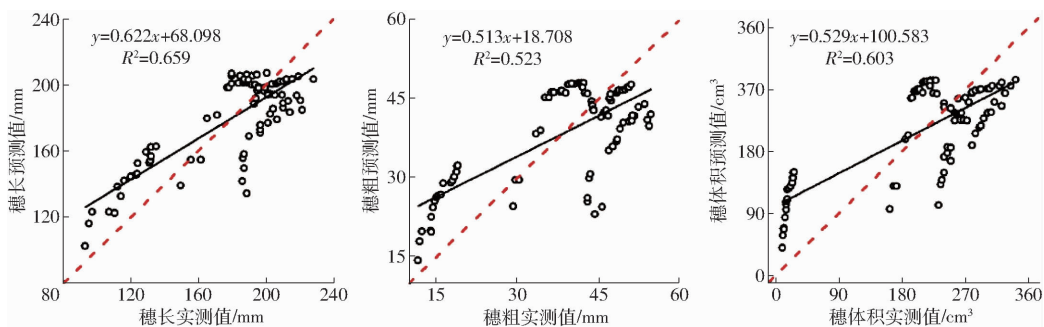


图7 实测值与预测值 1:1 关系图

Fig.7 Relationship between measured and predicted values of C_c and ear phenotype parameters models

3 讨论

在玉米生产中,其生长发育与果穗形成过程受氮肥影响很大^[21]。适量施氮可提高玉米叶面积、光合能力^[18]和干物质积累^[33],为玉米高产提供前提与基础^[22]。施氮对玉米果穗的影响研究多集中在施氮对玉米产量的影响^[22],较少关注对果穗形态和籽粒灌浆变化过程的动态分析与拟合。本研究通过2年间田间试验与玉米果穗形态的跟踪观测,探讨施氮对玉米果穗动态变化的影响,找出不同施氮水平下玉米果穗生长发育的动态变化规律。本研究结果表明,玉米果穗形态参数穗长、穗粗和穗体积受氮素影响显著,随施氮的增加呈现增加趋势(图4),但N5处理在玉米生长后期低于N4,N4处理的果穗形态参数值最高。这说明施氮可促进玉米穗长和穗粗发育,进而促进穗体积增大。但过量施氮效果欠佳,适量施氮方可达到高产目的^[16,18]。由此可见,在玉米果穗形成过程与籽粒建成期,合理的控制氮肥用量是获得理想果穗形态的关键,也是形成玉米高产的重要因素。

不同施氮量下玉米长势和营养状况存在一定差异^[21-22],从而影响玉米冠层对光的吸收与反射作用^[25],使得玉米冠层叶片颜色存在差异,其冠层图像参数也出现差异^[24],这为利用冠层图像参数拟合与估算玉米生长发育过程提供了理论依据^[27]。大量研究表明,作物冠层图像参数与农学农艺参数具有一定相关性^[9,12,14,28],基于前人研究基础,本文通过手机相机获取玉米吐丝以后各氮素处理的冠层图像,选取与农学参数相关性高的敏感图像参数与玉米穗长、穗粗、穗体积等参数进行相关性分析^[30-32],相关系数由大到小依次为 C_c 、 E_{sc} 、 g 、 b 、 r ,各参数之间均达到了显著相关,且相关系数均不小于0.61(图5),这为基于作物冠层数字图像处理技术的玉米果穗形态参数拟合与估算提供了理论依据。

本研究结果发现,天赐19玉米品种冠层图像归一化覆盖系数与玉米果穗形态参数(穗长、穗粗和

穗体积)存在非线性指数函数关系(图6);由建模集与验证集的 R^2 、RMSE 和 nRMSE 值(表2)可以看出, C_c 可作为玉米果穗形态参数的一个评价指标,且 C_c 是玉米冠层图像中较易获取的参数,也是图像处理中较为有效的方法,实用性强,可用于实际生产过程中果穗形态的估算或预测。然而 C_c 与玉米果穗形态参数的拟合精度相对来说并不是很高(表2),其原因是各氮素处理下玉米果穗形态参数随生育期的推进都呈增加趋势,而玉米到生育后期冠层绿叶面积恰好在不断减小,随果穗生育进程的不断推进, C_c 与果穗形态参数变化趋势相反,使得二者动态拟合的精度降低。但图像参数 C_c 降低趋势与果穗形态参数增加趋势不能反映施氮量对 C_c 和果穗形态参数的影响,所以二者相关性分析结果依然呈正相关(图5)。因此,本研究采用手机相机获取玉米冠层图像,从而计算得到玉米冠层图像归一化覆盖系数,为解决玉米果穗生长发育动态提供了一个快速有效的方法。但是本研究仅对宁夏引黄灌区近年来主要种植的单一玉米品种天赐19的冠层图像采集、试验数据获取和参数进行分析,探讨了其冠层叶片图像参数与果穗形态参数的动态函数关系,存在一定的局限性。由于不同品种收获指数差异较大,下一步研究需要增加至少5种不同年代主要种植品种作为试验对象进行分析研究,解析不同品种冠层叶片色差等,归纳整理多品种玉米冠层图像特征,建立地域范围内不同品种玉米冠层叶片图像参数与果穗形态参数数据库,以增加玉米果穗形态参数动态拟合的应用范围,同时对玉米籽粒及苞叶动态发育也需进行深入探讨,系统地研究基于数字图像参数的玉米果穗形态监测^[7,9,12],提高模型的通用性和实用性。

随着手机用途不断拓展、成本不断降低,应用手机相机提取农作物冠层图像的应用前景广阔,且手机便于携带易操作。然而,本研究在提取玉米冠层图像参数时,由于拍摄时段和拍摄过程中光照强度差异较大,造成参数间相关系数下降。如何消除不

同时段不同光强对手机图像的影响,筛选作物最佳拍摄时间段是下一步研究的关键。

4 结论

(1)应用手机相机获取宁夏滴灌玉米在不同施氮量下吐丝后的冠层图像,同步测定果穗形态参数,分析基于冠层图像参数的玉米果穗形态参数生长发育动态,结果表明,施氮可显著提高玉米果穗形态参数值,穗长、穗粗和穗体积在 N4 处理下最大。

(2)玉米冠层图像敏感参数 C_c 、 E_{cg} 、 g 与果穗形态参数显著相关,其中 C_c 与果穗形态参数相关性最高,相关系数均不小于 0.61, r 、 b 与果穗形态参数无显著相关。

(3)拟合了冠层图像归一化覆盖系数与玉米果穗形态参数的动态函数关系,并用 2017 年田间数据对函数关系进行评价,结果表明,精度相对较高,其拟合集和验证集 R^2 均不小于 0.523,穗体积 RMSE 均不大于 68.986 cm³,nRMSE 均不大于 33.621%。

参 考 文 献

- [1] PENG B, LI Y X, WANG Y, et al. QTL analysis for yield components and kernel-related traits in maize across multi-environments[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2011,122(7):1305-1320.
- [2] 岳海旺,魏建伟,卜俊周,等. 河北省春播玉米品种产量和主要穗部性状 GGE 双标图分析[J]. 玉米科学, 2018, 26(4): 28-35.
YUE Haiwang, WEI Jianwei, BU Junzhou, et al. GGE-biplot analysis of grain yield and main ear characteristics for spring maize in Hebei Province [J]. Journal of Maize Sciences, 2018,26(4):28-35. (in Chinese)
- [3] LIU Y, WANG L W, SUN C L, et al. Genetic analysis and major QTL detection for maize kernel size and weight in multi-environments[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2014,127(5):1019-1037.
- [4] 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.
- [5] 李少昆,赵久然,董树亭,等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017,50(11):1941-1959.
LI Shaokun, ZHAO Jiuran, DONG Shuting, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017,50(11):1941-1959. (in Chinese)
- [6] MILLER N D, HASSE N J, LEE J Y, et al. A robust, high-throughput method for computing maize ear, cob, and kernel attributes automatically from images[J]. The Plant Journal, 2017,89(1):169-178.
- [7] 张帆,李绍明,刘哲,等. 基于机器视觉的玉米异常果穗筛分方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015,46(增刊):45-49.
ZHANG Fan, LI Shaoming, LIU Zhe, et al. Screening method of abnormal corn ears based on machine vision [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(Supp.):45-49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2015S008&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.008. (in Chinese)
- [8] GRIFT T E, ZHAO W, MOMIN M A, et al. Semi-automated, machine vision based maize kernel counting on the ear[J]. Biosystems Engineering, 2017, 164: 171-180.
- [9] 王传宇,郭新宇,吴升,等. 基于计算机视觉的玉米果穗三维重建方法[J/OL]. 农业机械学报, 2014,45(9):274-279,253.
WANG Chuanyu, GUO Xinyu, WU Sheng, et al. Three dimensional reconstruction of maize ear based on computer vision [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(9):274-279,253. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140944&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.044. (in Chinese)
- [10] MAKANZA R, ZANAN B A M, CAIRNS J E, et al. High-throughput method for ear phenotyping and kernel weight estimation in maize using ear digital imaging[J]. Plant Methods, 2018,14(1):1-13.
- [11] 杜建军,郭新宇,王传宇,等. 基于全景图像的玉米果穗流水线考种方法及系统[J]. 农业工程学报, 2018,34(13):195-202.
DU Jianjun, GUO Xinyu, WANG Chuanyu, et al. Assembly line variety test method and system for corn ears based on panoramic surface image[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 195-202. (in Chinese)
- [12] 赵三琴,李毅念,丁为民,等. 稻穗结构图像特征与籽粒数相关关系分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 323-328.
ZHAO Sanqin, LI Yinian, DING Weimin, et al. Relative analysis between image characteristics of panicle structure and spikelet number[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 323-328. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141246&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.046. (in Chinese)
- [13] 柳冠伊,杨小红,白明,等. 基于线阵扫描图像的玉米果穗性状检测技术[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 276-280.
LIU Guanyi, YANG Xiaohong, BAI Ming, et al. Detecting techniques of maize ear characters based on line scan image [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 276-280. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131147&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.047. (in Chinese)
- [14] 汪顺生,刘慧,孟鹏涛,等. 不同沟灌方式下夏玉米穗部性状与产量相互关系的试验研究[J]. 节水灌溉, 2015(12): 31-34.

WANG Shunsheng, LIU Hui, MENG Pengtao, et al. Research on relationship between panicle traits and yield of summer corn under different furrow irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2015(12): 31 – 34. (in Chinese)

[15] MESSMER R, FRACHEBOUD Y, BÄNZIGER M, et al. Drought stress and tropical maize: QTL-by-environment interactions and stability of QTLs across environments for yield components and secondary traits[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2009, 119(5): 913 – 930.

[16] 周琦,张富仓,李志军,等. 施氮时期对夏玉米生长、干物质转运与产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 76 – 82.

ZHOU Qi, ZHANG Fucang, LI Zhijun, et al. Effects of nitrogen application at different stages on growth, yield, and dry matter transportation of summer maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(1): 76 – 82. (in Chinese)

[17] 李娜娜,郝科星,池宝亮,等. 玉米吐丝后的果穗生长动态研究[J]. 中国农学通报, 2014,30(27):234 – 240.

LI Nana, HAO Kexing, CHI Baoliang, et al. Study on growth dynamics of maize ear after anthesis based on image processing [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(27): 234 – 240. (in Chinese)

[18] 侯贤清,吴鹏年,王艳丽,等. 秸秆还田配施氮肥对土壤水肥状况和玉米产量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1928 – 1934.

HOU Xianqing, WU Pengnian, WANG Yanli, et al. Effects of returning straw with nitrogen application on soil water and nutrient status, and yield of maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(6): 1928 – 1934. (in Chinese)

[19] 任佰朝,高飞,魏玉君,等. 冬小麦-夏玉米周年生产条件下夏玉米的适宜熟期与积温需求特性[J]. 作物学报, 2018, 44(1): 137 – 143.

REN Baichao, GAO Fei, WEI Yujun, et al. Suitable maturity period and accumulated temperature of summer maize in wheat – maize double cropping system [J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(1): 137 – 143. (in Chinese)

[20] 陈涛,宋振伟,张明,等. 遮阴和种植密度对东北春玉米穗部发育和植株生产力的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10):3237 – 3246.

CHEN Tao, SONG Zhenwei, ZHANG Ming, et al. Effects of shading and plant density on ear development and plant productivity of spring maize in Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3237 – 3246. (in Chinese)

[21] CHILUNDO M, JOEL A, WESSTRÖMAN I, et al. Response of maize root growth to irrigation and nitrogen management strategies in semi-arid loamy sandy soil[J]. Field Crops Research, 2017, 200: 143 – 162.

[22] WASAYA A, TAHIR M, ALI H, et al. Influence of varying tillage systems and nitrogen application on crop allometry, chlorophyll contents, biomass production and net returns of maize (*Zea mays* L.) [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 170: 18 – 26.

[23] 张珏,田海清,李哲,等. 基于数码相机图像的甜菜冠层氮营养监测[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 157 – 163.

ZHANG Jue, TIAN Haiqing, LI Zhe, et al. Nitrogen nutrition monitoring of beet canopy based on digital camera image[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 157 – 163. (in Chinese)

[24] ZHOU B Y, SUN X F, DING Z S, et al. Multi-split nitrogen application via drip irrigation improves maize grain yield and nitrogen use efficiency[J]. Crop Science, 2017, 57(3): 1687.

[25] LEE K J, LEE B W. Estimation of rice growth and nitrogen nutrition status using color digital camera image analysis[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 48(3): 57 – 65.

[26] 夏莎莎,张聪,李佳珍,等. 基于手机相机获取玉米叶片数字图像的氮素营养诊断与推荐施肥研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(5): 703 – 709.

XIA Shasha, ZHANG Cong, LI Jiazhen, et al. Diagnosis of nitrogen nutrient and recommended fertilization in summer corn using leaf digital images of cellphone camera[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(5): 703 – 709. (in Chinese)

[27] 贾彪,钱瑾,苗芳芳,等. 基于机器视觉的农作物数字图像采集与生长监测装备:CN206772841U[P]. 2017 – 12 – 19.

[28] JIA B, HE 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, 2014,14(1): 1 – 12.

[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, 1998, 81(1): 49 – 54.

[31] VOL N. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions[J]. Transactions of the ASAE, 1995,38(1): 259 – 269.

[32] 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.