

基于冠层数码图像的玉米长势和氮素营养状态分析

周华杰¹, 刘亚东¹, 付金东², 隋方功³, 崔日鲜¹

(1. 青岛农业大学农学与植物保护学院/山东省旱作农业技术重点实验室, 山东 青岛 266109;
2. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081; 3. 青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109)

摘要: 5个施氮水平的田间试验条件下,在玉米9叶期前,分3次采集玉米冠层图像,同步进行破坏性取样,测定玉米地上部干物质质量、叶面积指数和地上部氮积累量;分析了通过玉米冠层图像分析软件计算的冠层覆盖度和10种色彩指数与玉米地上部干物质质量、叶面积指数和地上部氮积累量的关系,以逐步回归和非线性回归方法,构建了玉米长势估算模型。结果表明,玉米地上部干物质质量、叶面积指数和地上部氮积累量与冠层覆盖度和大部分色彩指数间呈显著相关,其中冠层覆盖度与长势指标间的相关性最强,且大部分色彩指数与长势指标间呈非线性相关。通过逐步回归方法和非线性回归方法建立的两个系列模型均能较准确地预测玉米地上部干物质质量、叶面积指数和地上部干物质质量,以逐步回归方法建立的估算模型的预测效果,除地上部干物质质量的预测值与实测值的回归系数外,其余指标均好于基于冠层覆盖度的非线性回归模型,但差异较小。

关键词: 玉米;冠层图像;冠层覆盖度;色彩指数;长势;诊断

中图分类号: S126;S513

文献标识码: A DOI: 10.3969/J. ISSN. 1674-148X. 2015. 01. 001

Analysis of Maize Growth and Nitrogen Nutrition Status Based on Digital Camera Image

ZHOU Huajie¹, LIU Yadong¹, FU Jindong², SUI Fanggong³, CUI Rixian¹

(1. College of Agronomy and Plant Protection, Shandong Provincial Key Laboratory of Dryland Farming Techniques, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 2. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;
3. College of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: Digital images of maize canopies grown under five level of nitrogen treatment were taken with a digital camera for three times before 9-leaf stage and at the same time four plants were sampled to measure shoot dry weight, leaf area index, and shoot nitrogen accumulation in 2013. Canopy cover and 10 color indices were calculated from corn digital images by image analysis program (developed in Microsoft Visual Basic). Correlation analysis were carried out to identify the relationships between canopy cover, 10 color indices and corn growth and nitrogen nutrition parameters, such as leaf area index, and shoot nitrogen accumulation etc. Stepwise multiple linear regression method and nonlinear regression method were used to establish the models to determine maize growth and nitrogen status. The results showed that canopy cover and all color indices except r and Hue showed significant correlations with shoot biomass, leaf area index, and shoot nitrogen accumulation. Canopy cover revealed the highest correlations with maize growth and nitrogen nutrition parameters. Canopy cover and more than 8 color indices were nonlinearly related to maize growth and nitrogen nutrition parameters. Stepwise multiple linear regression models, constituting canopy cover and one color index, and nonlinear regression models with the independent variable of canopy cover were constructed to estimate shoot biomass, leaf area index, and shoot nitrogen accumulation. The valida-

收稿日期: 2014-08-27

基金项目: 农业部“948”项目(2012-Z5); 山东省旱地作物水分高效利用科研创新团队资助

作者简介: 周华杰(1989-), 女, 宁夏石嘴山人, 硕士研究生, 研究方向: 玉米生理生态

通讯作者: 崔日鲜, E-mail: chis@qau.edu.cn

tion results indicate that two series regression models had good ability to estimate shoot dry mater, leaf area index, and shoot nitrogen accumulation using canopy cover and color indices of color digital camera image. The validation results also indicate that the models using stepwise multiple regression method had better performance compared with the nonlinear regression model with independent variable of canopy cover.

Key words: Maize; Canopy image; Canopy cover; Color index; Growth status; Diagnosis

玉米是我国重要的粮食和经济作物之一,因其高产、稳产、适应性广、抗逆性强的特点,在我国作物生产中占有重要的地位。建国以来,我国玉米生产取得了长足的发展,这种发展主要得益于单产的大幅度提高,而具有高产、优质和耐肥等特征的大批杂交种的先后育成和推广以及化肥(主要是氮肥)、农药等农资的大量投入是玉米高产的主要原动力。然而玉米的氮肥利用率较低,未被作物吸收而流失的氮素会造成地下水和大气严重污染^[1-4]。因此,适时准确地掌握玉米长势和体内氮素营养状态,根据玉米生长发育和产量形成的需要实施精确施肥,进而提高氮肥利用率和减少环境污染是玉米生产中亟待解决的问题。

作物长势是指作物生长的状况与趋势^[5],其优劣可通过叶面积指数、叶倾角、叶片颜色、株高、茎粗和地上部干物质质量等特征来衡量^[6-7]。其中,叶面积指数(LAI)、地上部干物质质量、体内氮素浓度和地上部氮素积累量等是表征作物生长和氮素营养状态的重要指标,也是作物生长季节实施精确施肥和产量预测等的可靠依据^[7-10]。传统的作物长势和氮素营养状态监测一般依靠田间植株取样和室内分析测试,虽具有数据可靠的特征性,但效率较低,且消耗过多的时间和资源^[11-12]。地面遥感通过高光谱辐射仪、叶绿素仪、手持式主动遥感器光谱仪(Green Seeker)等装置测定作物叶片、冠层反射率或吸收率的变化来监测作物长势和氮素营养状态^[9-12],因其快速、无损等特点被广泛应用于多种作物的生长和氮素营养状态的监测^[10,12-14],且已有很多有关基于遥感技术的作物田间氮肥管理措施显著提高氮肥利用率的研究结果^[15]。

近年来数码相机因其经济、高效等特点,在作物长势和氮素营养状态监测方面正得到广泛的应用^[16-21]。Pagola等^[17]利用基于大麦叶片图像分析的色彩指数拟合出叶绿素含量的预测模型。Jia等^[18]指出冬小麦孕穗期和开花期冠层图像绿光亮度值(Greenness intensity)与小麦冠层氮素浓度和叶片 SPAD 值呈显著负相关。王远等^[19]指出水稻

冠层图像中提取的色相(H)和红光标准化值(NRI)与叶片 SPAD 值、叶片含氮量等指标间具有良好的相关关系。Li 等^[21]从冬小麦冠层图像中提取冠层覆盖度(CC, canopy cover),并得出了冠层覆盖度与小麦的叶面积指数和地上部干物质质量及小麦地上部氮素浓度显著相关的结论。但玉米方面,在冠层水平上探讨基于冠层数码图像分析的冠层图像色彩指数与玉米长势和氮素营养状态相互关系的研究报道较少。

本研究拟在建立非破坏性及快速准确的玉米冠层图像分割及分析方法,并通过由玉米冠层图像分析获取的色彩指数与长势和体内氮素营养状态的相关关系,建立玉米长势和体内氮素营养状态无损诊断技术。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2013 年在青岛农业大学科技示范园试验站进行,试验站位于青岛市胶莱镇,属暖温带季风气候。试验地 0~20 cm 土壤有机质含量 18.6 g/kg,碱解氮 82.47 mg/kg,速效磷 36.87 mg/kg,速效钾 126.54 mg/kg。

1.2 试验设计

供试品种为郑单 958,试验设 5 个施氮量处理,处理水平分别为 0 kg/hm²(N₀)、45 kg/hm²(N₄₅)、90 kg/hm²(N₉₀)、135 kg/hm²(N₁₃₅)、180 kg/hm²(N₁₈₀)纯氮。磷肥、钾肥以 100 kg/hm² P₂O₅ 和 100 kg/hm² K₂O,全部作为基肥一次性施入,氮、磷和钾肥分别为尿素、过磷酸钙和硫酸钾。小区面积为 50 m²(5 m×10 m),试验采用随机区组设计,3 次重复。于 2013 年 6 月 27 日播种,行距和株距分别为 60 cm 和 23 cm,其他管理按常规方法进行。

1.3 测定项目

于 2013 年 7 月 18 日、7 月 25 日和 8 月 2 日进行玉米冠层图像采集,之后测定数码图像采集区域内的玉米进行破坏性取样。样本按部位分样(叶、茎),测叶面积后,在 105 ℃ 杀青 30 min 后于 72 ℃

下烘干至恒重,称叶片、茎质量后粉碎,用凯氏定氮法测定叶片和茎的含氮量。图像采集前,用 SPAD 分析仪 (SPAD-502, 日本 Konica Minolta 产) 测定每小区 15 株玉米最上位完全展开叶的 SPAD 值,操作时避开叶脉,在叶片长度 1/2 处进行测定。

1.4 冠层图像采集及处理

1.4.1 冠层图像采集

把数码相机 (佳能 60D 相机) 固定在距玉米冠层顶部 1 m 处,与地面垂直进行拍摄,拍摄到的玉米冠层范围为 100 cm×67 cm,能拍摄到 6 株玉米。事先自制的 100 cm×67 cm 长方形方格,将其置于田间,与玉米冠层保持相同高度。操作时数码相机取景范围对准自制长方形方格进行拍摄,拍摄时间为 11:00—13:00。相机设置为自动曝光模式,采用多点自动对焦及自动白平衡,ISO 设定为 400,图像分辨率设定为 800 万像素 (3 456×2 304),以 JPEG (Joint photographic expert group) 格式保存冠层图像。

1.4.2 冠层图像处理

数码彩色图像提供每一个像素的红 (red)、绿 (green)、蓝 (blue) 波段的光谱信息^[19],各波段的光谱信息以亮度 (intensity) 的方式存储在对应的通道。数码图像的 RGB 各有 256 级亮度,分别用 0 到 255 的整数表示,RGB 三个通道各 256 级色彩总共能组合成 1 678 万种 (256³) 色彩,其中 (0,0,0) 代表黑色, (255,255,255) 代表白色^[22]。

本研究通过自制作物冠层图像分析软件 (玉米冠层图像分析系统,用微软 Visual Basic 编写) 从玉米冠层图像中分割玉米图像 (图 1),读取玉米图像每个像素点的 R 、 G 、 B 亮度值,进而计算冠层覆盖度^[21]及玉米图像色彩指数。玉米图像色彩指数包括红光标准化值 (r)、绿光标准化值 (g)、蓝光标准化值 (b)、归一化差值指数 (NDI , normalized difference index)^[22]、色调 (Hue)^[23-24]、饱和度 (SAT)^[23-24]和亮度 (INT)^[23-25]。

冠层覆盖度及 7 种色彩指数的计算公式为:

$$CC = \frac{\text{玉米图像像素数}}{\text{冠层图像总像素数}} \quad (1)$$

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

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

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

$$NDI = \frac{r-g}{r+g+0.01} \quad (5)$$

$$Hue = \begin{cases} \arccos\left\{\frac{[(R-G)+(R-B)]/2}{[(R-G)^2+(R-B)(G-B)]^{1/2}}\right\} & \text{if } B \leq G \\ 2\pi - \arccos\left\{\frac{[(R-G)+(R-B)]/2}{[(R-G)^2+(R-B)(G-B)]^{1/2}}\right\} & \text{if } B > G \end{cases} \quad (6)$$

$$SAT = 1 - \frac{3}{(R+G+B)}[\min(R,G,B)] \quad (7)$$

$$INT = \frac{1}{3}(R+G+B) \quad (8)$$

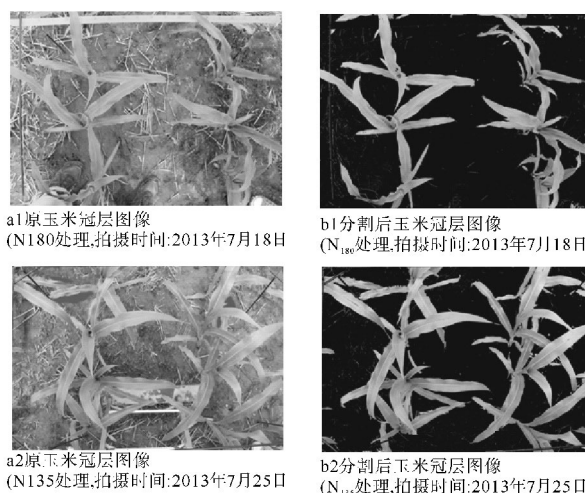


图 1 玉米冠层图像及分割后的玉米图像

1.5 数据处理

本研究 45 组玉米冠层图像色彩指数和对应的长势及氮营养状态 (5 个施氮量处理×3 次重复×3 次取样时期) 数据中,随机选取 30 个样本数据用于建立估算地上部干物质质量、叶面积指数和地上部氮积累量的回归模型,其余 15 个样本数据用于验证模型。利用相关系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE)、相对均方根误差 (RRMSE),对回归模型进行拟合优度的考察及验证。玉米长势估算模型的建立、验证采用 Excel2007 和 SAS9.1 软件。

2 结果与分析

2.1 玉米长势和氮营养状态指标与冠层覆盖度及图像色彩指数间的相关性

表 1 为玉米地上部干物质质量、叶面积指数、地上部氮积累量、SPAD 值和叶片氮素浓度与冠层覆盖度及其他色彩指数的相关分析结果。由表 1 可知,玉米长势指标与冠层覆盖度和大部分色彩指数间呈显著相关,其中,地上部干物质质量、叶面积指

数和地上部氮积累量,除 r 和 Hue 外,与冠层覆盖度和其余色彩指数间的相关均达到了极显著水平,且与冠层覆盖度间的相关性最显著(图 2)。SPAD 值与 r 的相关性最高,与 R 、 G 、 NDI 和 INT 呈极显著负相关。叶片氮素浓度和茎氮素浓度与 r 的相关性最高,与 R 、 G 呈显著负相关,而与 Hue 呈极显著

正相关。相关分析结果表明,在作物长势指标中,地上部干物质质量、叶面积指数和地上部氮积累量与基于玉米冠层图像分析获取的冠层覆盖度和其他大部分色彩指数间呈极显著相关,这也表明利用冠层覆盖度和其他色彩指数对玉米地上部干物质质量、叶面积指数和地上部氮积累量进行估算具有可行性。

表 1 玉米图像色彩指数与玉米生育指标间的相关系数

	地上部生物量	叶面积指数	地上部氮积累量	叶片氮素浓度	茎氮素浓度	SPAD 值
CC	0.951**	0.954**	0.939**	-0.024	0.152	0.470**
R	-0.643**	-0.665**	-0.648**	-0.367*	-0.459**	-0.512**
G	-0.589**	-0.611**	-0.602**	-0.395**	-0.469v	-0.507**
B	-0.721**	-0.693**	-0.679**	-0.063	-0.175	-0.231
r	-0.174	-0.261	-0.238	-0.505**	-0.544**	-0.579**
g	0.814**	0.788**	0.765**	-0.020	0.134	0.251
b	-0.684**	-0.622**	-0.610**	0.233	0.106	0.012
NDI	-0.764**	-0.784**	-0.753**	-0.231	-0.377*	-0.487**
SAT	0.682**	0.622**	0.608**	-0.286	-0.146	-0.062
Hue	-0.044	0.047	0.026	0.387**	0.419**	0.378*
INT	-0.679**	-0.685**	-0.671**	-0.287	-0.384**	-0.435**

注:“*”、“**”分别表示在 5%和 1%水平下显著相关。

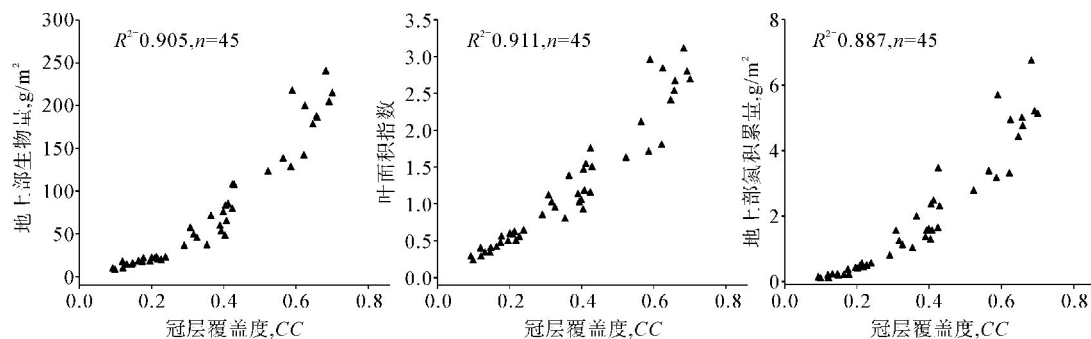


图 2 玉米地上部干物质质量、叶面积指数和地上部氮积累量与冠层覆盖度的关系

2.2 玉米长势估算模型的建立

鉴于玉米长势指标与冠层覆盖度和大部分色彩指数间呈极显著相关的分析结果,以冠层覆盖度和其他色彩指数为自变量,以地上部干物质质量、叶面积指数等三个长势指标为因变量,采用多元线性回归分析中的逐步回归方法建立了估算长势指标的回归模型。多元线性回归是在各个自变量与因变量间的线性相关的基础上,研究两个或两个以上自变量对一个因变量的影响^[30-31]。而本研究中大部分色彩指数与长势指标间呈非线性相关,故对因变量和自变量进行自然对数转换。经过数据转换之后,采用逐步回归方法建立了估算玉米长势指标的回归模型。在变量选择上,以 $\alpha=0.05$ 作为剔除或入选变量的显著性水平。除逐步回归分析外,考虑到冠层覆盖度与长势指标间的极显著相关,以冠层覆盖度

为自变量,分别建立估算地上部干物质质量、叶面积指数和地上部氮积累量的指数、对数和幂函数回归模型,并以 R^2 最大作为选择标准,选择非线性回归模型。表 2 为逐步回归和以冠层覆盖度为自变量的非线性回归分析结果,从表 2 中可以看出,两个系列估算玉米地上部干物质质量、叶面积指数和地上部氮积累量的回归模型的决定系数均为 0.9 以上。逐步回归模型,除叶面积指数估算模型的均方根误差、相对均方根误差稍大外,其余指标均好于基于冠层覆盖度为自变量的非线性回归模型,表明逐步回归方法对提高玉米长势估算精度方面起到了一定的作用。

2.3 玉米长势估算模型的验证

为验证本研究中所建立的两个系列玉米长势及氮素营养状态估算模型的估算精度,首先利用估算模型计算了地上部干物质质量、叶面积指数和地上

部氮积累量,并拟合了经过截距为零的实测值与估算值的一元线性回归方程,最后以决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和相对均方根误差(RRMSE)及实测值与预测值的1:1关系图来评价模型的表现,其结果示于表3和图3。由表3可以看出,两个系列模型所估算的预测值与实测值的回归关系达到极显著水平,且由逐步回归模型预测值与实测值拟

合的一元线性回归方程的决定系数稍大于非线性回归模型。逐步回归模型的均方根误差和相对均方根误差均小于非线性回归模型,表明,逐步回归模型的长势估算精度高于基于冠层覆盖度的非线性回归模型。图3的散点表示玉米长势指标实测值所对应的预测值,除叶面积指数、地上部干物质质量等较大时的估算误差较大以外,两个玉米长势估算模型均表

表2 基于玉米图像冠层覆盖度及色彩指数的估算玉米地上部干物质质量、叶面积指数和地上部氮积累量的回归模型及其统计参数

长势指标	估算模型	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE	相对均方根误差 RRMSE(%)
地上部干物质质量	$DW = e^{11.144} \times CC^{1.743} \times r^{4.769}$	0.960	13.610	18.344
$DW, g/m^2$	$DW = 330.762 \times CC^{1.668}$	0.958	14.852	20.018
叶面积指数	$LAI = CC^{1.221} \times G^{0.266}$	0.938	0.209	17.145
LAI	$LAI = 3.872 \times CC^{1.961}$	0.940	0.205	16.806
地上部氮积累量	$NUP = CC^{2.083} \times r^{-2.167}$	0.924	0.479	26.439
$NUP, g/m^2$	$NUP = 11.319 \times CC^{2.116}$	0.921	0.488	26.941

表3 两个系列玉米长势估算模型的验证结果

长势指标	估算模型	R^2	均方根误差 RMSE	相对均方根误差 RRMSE(%)
地上部干物质质量	逐步回归模型	0.948	15.407	20.547
$DW, g/m^2$	非线性回归模型	0.938	17.624	23.504
叶面积指数	逐步回归模型	0.889	0.273	21.683
LAI	非线性回归模型	0.886	0.278	22.046
地上部氮积累量	逐步回归模型	0.972	0.311	16.647
$NUP, g/m^2$	非线性回归模型	0.967	0.323	17.337

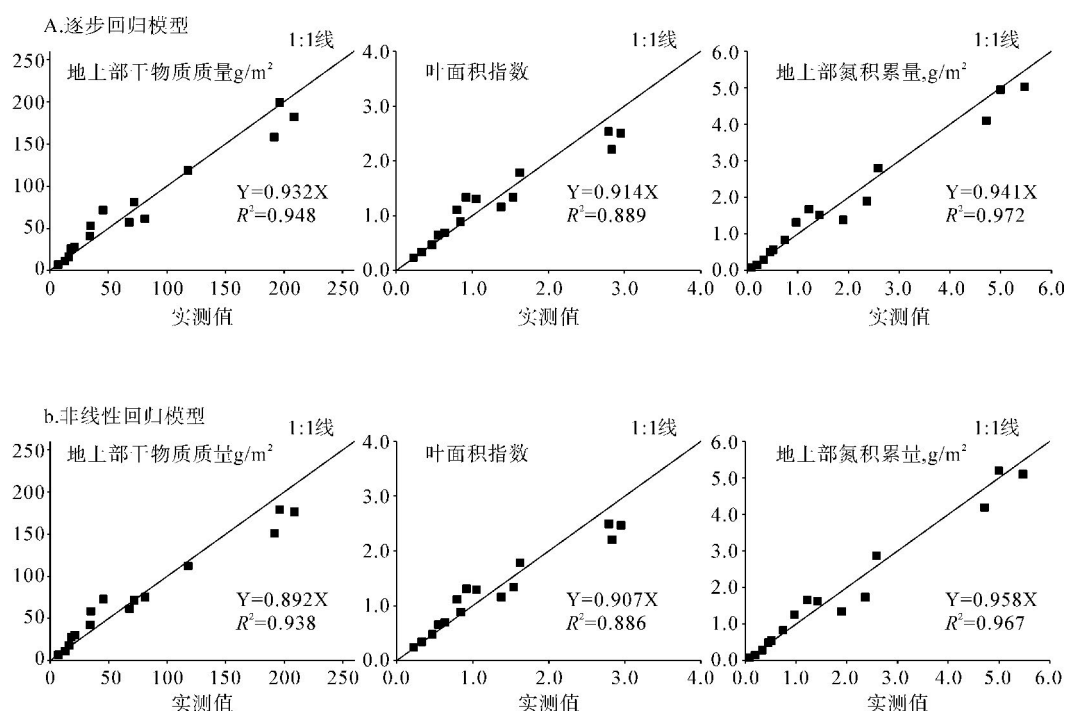


图3 玉米地上部干物质质量、叶面积指数和地上部氮积累量实测值与预测值的关系

现出较好的预测效果,即散点基本分布在 1:1 线附近。

3 结论与讨论

近年来基于作物冠层数码图像分析的作物长势监测技术,因其所具有的经济、快速等特点,在农田作物学研究领域得到了广泛的应用^[16-21]。冠层覆盖度及 10 种色彩指数与玉米长势指标间的相关分析结果表明,玉米长势指标与通过冠层图像分析获取的玉米冠层覆盖度和大部分色彩指数间呈显著相关,其中,冠层覆盖度与玉米地上部干物质质量、叶面积指数和地上部氮积累量间呈极显著正相关,这与 Behrens 等^[20]、Li 等^[21]、王远等^[19]、李荣春等^[29]的油菜、小麦、水稻和玉米冠层覆盖度与叶面积指数、地上部干物质质量等长势指标间呈显著相关的结论相一致。本研究结果表明,除 r 和 Hue 外,其余色彩指数均与长势指标间呈显著相关,其中, g 和 SAT 呈显著正相关,而 R 、 G 、 B 、 b 、 NDI 等呈显著负相关。Jia 等^[18]指出从冬小麦孕穗期和开花期冠层数码图像的绿光亮度值(G)与冬小麦冠层氮素浓度和叶片 SPAD 值呈极显著负相关。张立周等^[16]指出夏玉米 6 叶期和 10 叶期地上部氮素营养状态指标(SPAD 值、植株硝酸盐浓度和植株全氮)与冠层图像的红光标准化值(r)呈显著负相关,这与本研究的结论一致,但与绿光标准化值(g)呈显著负相关的结论^[16,33]与本研究结论及前人^[31-33]的一些研究结论不同,原因有待进一步探究。

玉米长势指标与冠层覆盖度和大部分色彩指数间呈显著相关,其中冠层覆盖度与长势指标间的相关性最强。以逐步回归方法和非线性回归方法构建的长势估算模型的验证结果表明,两个回归模型均能较准确地估算玉米地上部干物质质量、叶面积指数和地上部氮积累量。但 9 叶期的估算误差明显大于前期,且主要出现在叶面积指数、地上部干物质质量等比较大的处理。随着玉米生育进程的推移,叶面积指数的持续增大会引起叶片间的重叠,因此叶面积指数和干物质质量等虽继续增大,冠层覆盖度的增大速度会明显小于叶面积和干物质质量等的增大速度,即叶面积指数、生物量等较大时,冠层覆盖度的变化不能规律地反映作物叶面积指数、地上部干物质质量等的变化。这与基于高光谱分析的作物长势估算中的饱和现象相似^[34-35]。另外, Behrens 等^[20]、Li 等^[21]也指出基于冠层覆盖度的油菜和小麦叶面积指数和地上部干物质质量的预测只在

营养生长期可行,有关叶面积指数、地上部干物质质量等较大时的估算误差大的问题有待于进一步研究。

利用数码图像分析技术对玉米长势和氮素营养状态,对作物进行非破坏性监测具有一定的应用潜力。作物长势监测的目的是为实施田间管理和尽早获取作物产量信息提供依据,因此根据实时作物长势信息,如何为田间管理(包括施肥推荐)提供决策服务是后续研究中解决的问题。

参考文献:

- [1] Baligar V C, Fageria N K, He Z L. Nutrient use efficiency in plants[J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 2001, 32(7/8): 921-950
- [2] 赵斌,董树亭,王空军,等.控释肥对夏玉米产量及田间氮挥发和氮素利用率的影响[J].应用生态学报,2009,20(11):2678-2684
- [3] 范亚宁,李世清,李生秀.半湿润地区农田夏玉米氮肥利用率及土壤硝态氮动态变化[J].应用生态学报,2008,19(4):799-806
- [4] 易镇邪,王璞,张红芳,等.氮肥类型与施用量对夏玉米生长发育及氮肥利用的影响[J].华北农学报,2006,21(1):115-120
- [5] 杨邦杰,裴志远.农作物长势的定义与遥感监测[J].农业工程学报,1999,15(3):214-218
- [6] 梁栋,管青松,黄文江,等.基于支持向量机回归的冬小麦叶面积指数遥感反演[J].农业工程学报,2013,29(7):117-123
- [7] 李军玲,张弘,曹淑超.夏玉米长势卫星遥感动态监测指标研究[J].玉米科学,2013,21(3):149-153
- [8] Xue L, Cao W, Luo W, et al. Monitoring leaf nitrogen in rice with canopy spectral reflectance[J]. Agronomy Journal, 2004, 96: 135-142
- [9] Inoue Y, Moran M S, Horie T. Analysis of spectral measurements in paddy field for prediction rice growth and yield based on a simple crop simulation model[J]. Plant production science, 1998, 1(4): 269-279
- [10] 李映雪,朱艳,田永超,等.小麦叶片氮积累量与冠层反射光谱指数的定量关系[J].作物学报,2006,32(2):203-209
- [11] Pan G, Li F, Sun G. Digital camera based measurement of crop cover for wheat yield prediction[C]. Geoscience and remote sensing symposium, 2007: 797-800
- [12] 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
- [13] 李映雪,朱艳,田永超,等.小麦叶片氮含量与冠层反射光谱指数的定量关系[J].作物学报,2006,32(3):358-362
- [14] Rann W R, Solie J B, Johnson G V, et al. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application[J]. Agronomy journal, 2002, 94: 815-820
- [15] Dobermann A, Blackmore S, Cook S E, et al. Precision Farm-

- ing: Challenges and Future Directions[C]. Proceedings of the 4th international crop science congress, 2004, Brisbane, Australia
- [16] 张立周,王殿武,张玉铭,等. 数字图像技术在夏玉米氮素营养诊断中的应用[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1340—1344
- [17] Pagola M, Oritiz R, Irigoyen I, et al. New method to assess barley nitrogen nutrition status based on image colour analysis: Comparison with SPAD-502[J]. Computers and electronics in agriculture, 2009, 65(2): 213—218
- [18] Jia L L, Chen X P, Zhang F S, et al. Use of digital camera to assess nitrogen status of winter wheat in the northern China plain[J]. Journal of plant nutrition, 2004, 27(3): 441—450
- [19] 王远,王德建,张刚,等. 基于数码相机的水稻冠层图像分割及氮素营养诊断[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 131—136
- [20] Behrens T, Diepenbrock W. Using digital image analysis to describe canopies of winter oilseed rape during vegetative developmental stages[J]. Journal of agronomy and crop science, 2006, 192(4): 295—302
- [21] Li Y, Chen D, Walker C N, et al. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera[J]. Field crop research, 2010, 118(3): 221—227
- [22] Mao W, Wang Y, Wang Y. Real time detection of between-row weeds using machine vision[C]. Paper number 031004, ASABE, St. Joseph, MI, USA, 2003
- [23] 田岩,彭复员. 数字图像处理与分析[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2009: 140—144
- [24] 何明一,卫保国. 数字图像处理[M]. 北京:科学出版社, 2008: 233—253
- [25] Ahmad I S, Reid J F. Evaluation of color representations for maize images[J]. Journal of agricultural engineering research, 1996, 63: 185—196
- [26] 张勤,黄小刚,李彬. 基于彩色模型和近邻法聚类的水田秧苗列中心线检测方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 163—171
- [27] 王云. 统计学[M]. 成都:四川大学出版社, 2010: 226—229
- [28] 陈全森. 统计学[M]. 郑州:郑州大学出版社, 2010: 156—162
- [29] 李荣春,陶洪斌,张竹琴,等. 基于图像技术的夏玉米叶面积指数估算方法研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(26): 12871—12872
- [30] 肖焱波,贾良良,陈新平,等. 应用数字图像分析技术进行冬小麦拔节期氮营养诊断[J]. 中国农学通报, 2008, 24(8): 448—453
- [31] 贾良良,范明生,张福锁,等. 应用数码相机进行水稻氮营养诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(8): 2176—2179
- [32] 王娟,雷咏雯,张永帅,等. 应用数字图像分析技术进行棉花氮素营养诊断的研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 145—149
- [33] 王连君,邢宇. 数字图像技术在草莓氮素营养诊断中的应用研究[J]. 华南农业大学学报, 2010, 31(2): 19—21
- [34] 付元元,王纪华,杨贵军,等. 应用波段深度分析和偏最小二乘回归的冬小麦生物量高光谱估算[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(5): 1315—1319
- [35] 宋开山,张柏,王宗明,等. 基于人工神经网络的大豆叶面积高光谱反演研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1138—1145