

## 基于无人机可见光谱平台的烤烟氮素营养诊断

孙志伟<sup>1</sup>, 王晓琳<sup>1</sup>, 张启明<sup>2</sup>, 苑举民<sup>2</sup>, 张爽<sup>1</sup>, 闫慧峰<sup>1\*</sup>, 王树声<sup>1\*</sup>

1. 中国农业科学院烟草研究所/农业农村部烟草生物学与加工重点实验室, 山东 青岛 266101

2. 江西省烟草科学研究所, 江西 南昌 330025

**摘要** 利用不同氮肥用量田间试验, 分析基于无人机平台的可见光谱诊断技术对烟草氮素营养进行无损评估预测的可行性, 明确该技术的最佳颜色参数和方程模型。2018年在江西省安福县开展田间试验, 设置不同氮肥用量, 分别为0, 45, 90, 135, 180和300 kg N·ha<sup>-1</sup>, 于移栽后47 d(团棵期)、移栽后83 d(旺长后期)和移栽后116 d(下部叶成熟期), 利用无人机获取冠层RGB色彩数字图像, 同时采集植株样品分析地上部生物量、叶片生物量、地上部氮浓度、叶片氮浓度、叶片SPAD值等氮营养状况指标, 对冠层数字图像进行数字化分析, 获得颜色指标值, 通过颜色指标与烟草氮营养状况指标的相关性分析, 筛选适宜的颜色指标并建立氮营养诊断方程。利用不同地块的氮肥用量试验, 对氮营养诊断方程拟合精度进行验证。试验结果表明, 旺长后期各处理间冠层图像的颜色标准值存在显著差异, 团棵期与下部叶成熟期不存在显著差异。在10个颜色指标中, NRI, NGI, G/R, G/(R+B), (G-R)/(R+G+B)和ExG与5个烤烟氮素营养指标均达到极显著相关( $p < 0.01$ )。在归一化颜色指标体系、比颜色指标体系和归一化差分颜色指标体系中选择潜在的最佳颜色参数指标分别为NGI, G/R和ExG。根据不同类型的回归分析结果, 确定指数回归作为地上部生物量和叶片生物量的预测模型, 线性回归作为地上部氮浓度、叶片氮浓度及叶片SPAD值的预测模型。对潜在的最佳指标进行验证性筛选, G/R对地上部氮浓度和叶片氮浓度的RMSE值分别为0.375 1%和0.249 1%, 明显低于NGI和ExG, 预测精度最高。用G/R值表示的地上部生物量、叶片生物量、地上部氮浓度、叶片氮浓度、SPAD值预测方程分别为 $Y = 21.785e^{1.3502G/R}$ ,  $Y = 4.0579e^{1.9373G/R}$ ,  $Y = 5.0399G/R - 3.3332$ ,  $Y = 4.2814G/R - 3.8029$ ,  $Y = 40.168G/R - 28.188$ 。因此, 基于无人机平台的可见光谱诊断技术在烤烟氮素营养诊断方面具有应用潜力, 评估最佳时期为旺长后期, 最佳预测参数为G/R值。

**关键词** 烤烟; 冠层可见光谱; 氮营养诊断; 颜色指标; 方程模型; 生育期

**中图分类号:** O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)02-0586-06

### 引言

氮素对烟草生长、品质及产量的影响极大。想要实时把握氮肥用量从而得到理想的烟叶产质, 田间氮素的快速诊断成为关键。传统的烤烟田间氮素诊断方法需要破坏性取样, 实时性差, 耗时长, 方法滞后。近年来, 非破坏性诊断工具在氮素快速诊断中应用越来越广泛。

无人机遥感具有方便灵活、使用成本低、响应快速、厘米级数据获取等优点<sup>[1]</sup>, 随着无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)技术在农业领域的广泛应用, 使用无人机遥

感(unmanned aerial vehicle remote sensing, UA CRS)对农作物进行大规模的氮素营养监测成为热点和趋势。毛智慧等证明玉米冠层植被指数与SPAD值有很强的相关性, 利用无人机多光谱技术可以进行高精度的叶绿素含量预测。大量研究显示, 农作物冠层氮质量分数与光谱反射率之间存在着显著的相关性<sup>[2]</sup>。王远等<sup>[3]</sup>利用图像分割技术提取的水稻红光标准化值NRI与SPAD值、叶片氮含量之间的相关性达到极显著水平。红光标准化值NRI可作为水稻和冬油菜氮素营养诊断的最佳冠层图像色彩参数指标<sup>[4-5]</sup>。李红军等<sup>[6]</sup>发现返青期小麦反光叶面的G/R与NRI色彩参数与小麦的氮素营养状况相关性较好。刘昌华等<sup>[7]</sup>研究也表明植被指数可以用

收稿日期: 2019-12-27, 修订日期: 2020-03-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0201100), 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610232019004), 中国烟草总公司江西省公司科技项目(2016.01.006)资助

作者简介: 孙志伟, 1995年生, 中国农业科学院烟草研究所硕士研究生 e-mail: 732667191@qq.com

\* 通讯作者 e-mail: yanhuifeng@caas.cn; wangshusheng@caas.cn

来准确地估测冬小麦地上部生物量和植株吸氮量。

目前,将无人机图像技术应用在烤烟氮素诊断的相关研究尚少,本文旨在探讨通过无人机在田间能否进行氮素营养诊断,确定烤烟快速诊断的最佳时期,以及能否通过相关性分析筛选出具有代表性的图像色彩参数指标,最终确定烤烟氮素营养快速诊断的方程模型,为烤烟氮素营养无损诊断建立理论基础。

## 1 实验部分

### 1.1 试验设计

试验于 2018 年在江西省安福县进行。

进行氮营养诊断方程构建的试验地块位于 E: 114.378, N: 27.380, 基础土壤地力为: 土壤 pH 值 6.74, 有机质含量  $35.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 碱解氮含量  $228.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 有效磷(P)含量  $137.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效钾(K)含量  $76.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。烤烟品种为云烟 87。设置 6 个不同氮肥用量的处理, 分别为 N0:  $0 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ , N1:  $45 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ , N2:  $90 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ , N3:  $135 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ , N4:  $180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ , N5:  $300 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ 。每个处理的磷肥用量和钾肥用量均为  $135 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1}$  和  $405 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$ , 分别使用硝酸铵钙(15.5-0-0)、钙镁磷肥(0-12-0)和硫酸钾(0-0-50)做氮磷钾肥。试验设置 3 次重复, 每个小区 4 行  $\times$  15 m, 行距 1.2 m, 株距 0.45 m。肥料做基肥一次性施入。移栽时间为 3 月 3 日、移栽的株行距分别为 1.2 和 0.45 m。其他田间管理措施均按照当地实际生产一致。

进行方程验证的试验地块位于 E: 114.348, N: 27.337。烤烟品种为云烟 87。设置 5 个不同氮肥用量的处理, 分别为 0, 45, 90, 135 和  $180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ 。每个处理的磷肥用量和钾肥用量均为  $135 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1}$  和  $405 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$ 。每个处理 2 行  $\times$  15 m, 行距 1.2 m, 株距 0.45 m。肥料做基肥一次性施入。肥料种类、移栽时间、移栽的株行距和其他田间管理措施均和进行氮营养诊断方程构建的试验地块相同。

### 1.2 测定项目

#### 1.2.1 烤烟氮营养状况指标

取样的时期分别为移栽后 47 d(团棵期)、移栽后 83 d(旺长后期)和移栽后 116 d(下部叶成熟期)。每次取样每个小区选取具有代表性的 2 株, 分为叶片和茎两部分, 分别在  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  下杀青 30 min 后烘干, 记录干重, 计算地上部生物量和叶片生物量。样品粉碎后采用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  消化, 利用全自动凯式定氮仪(Foss, Kjeltec8400)测定含氮量, 计算地上部氮浓度与叶片氮浓度。

每小区固定 5 株, 每次取样时测定所有叶片的 SPAD 值。平均后为叶片 SPAD 值。

#### 1.2.2 冠层图像的获取

在晴天上午 10 点, 使用无人机(DJI, Phantom 3 Standard)在距地面 30 m 高度垂直拍摄整个试验地块的冠层图像。拍摄图像的分辨率为  $4\ 000 \times 3\ 000$ , 储存格式为 JPEG。

#### 1.2.3 数字图像的处理

获得的数字图像根据小区分布进行分割, 分割后的图像

采用 Adobe Photoshop CC(14.0  $\times$  32)软件, 使用直方图程序获取各小区的冠层图像的红光值 R(redness intensity)、绿光值 G(greenness intensity)和蓝光值 B(blueless intensity)。选取 3 类颜色指标类型的 15 个颜色指标, 颜色指标分类及计算方法如表 1 所示。

表 1 颜色指标分类及计算方法  
Table 1 Classification and calculation of color indexes

颜色指标类型	颜色指标及计算方法	参考文献
归一化颜色指标	$\text{NRI} = \text{R}/(\text{R} + \text{G} + \text{B})$	[8]
	$\text{NGI} = \text{G}/(\text{R} + \text{G} + \text{B})$	[4]
	$\text{NBI} = \text{B}/(\text{R} + \text{G} + \text{B})$	[9]
比颜色指标	$\text{G}/\text{R}$	[8]
	$\text{G}/\text{B}$	[5]
	$\text{G}/(\text{R} + \text{B})$	[10]
	$(\text{G} - \text{R})/(\text{R} + \text{G} + \text{B})$	[11]
	$(\text{R} - \text{B})/(\text{R} + \text{G} + \text{B})$	[10]
归一化差分颜色指标	$(\text{G} - \text{B})/(\text{R} + \text{G} + \text{B})$	[12]
	$\text{ExG} = (2\text{G} - \text{R} - \text{B})/(\text{G} + \text{R} + \text{B})$	[11]

### 1.3 数据分析方法

#### 1.3.1 氮营养诊断方程模型验证方法

通过方程计算验证地块的氮营养诊断指标预测值, 选择均方根误差(root mean square error, RMSE)评价预测值和实测值的拟合效果。均方根误差计算公式为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}$$

式中  $y'_i$  为样本  $i$  用标准方法测定的实际值。

#### 1.3.2 数据处理

数据的处理采用 Microsoft Excel 2016 及 SPSS 19。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同时期烤烟冠层图像色彩参数指标差异

不同时期不同处理的冠层图像的颜色标准值如表 2 所示。团棵期(移栽后 47 d)和下部叶成熟期(移栽后 116 d), 各处理冠层图像 R, G 和 B 值均没有显著差异, 这与视觉观察结果一致。旺长后期(移栽后 83 d), 各处理间冠层图像的颜色标准值存在显著差异, 其中 R 值和 G 值随着氮肥施用量的增加逐步减小, B 值在不同处理间差异不大; 在旺长后期时, 冠层图像在视觉观察上也存在叶色的明显差别。因此, 旺长后期(移栽后 83 d)为利用无人机拍摄冠层图像进行烤烟氮素营养诊断的最佳时期。

### 2.2 烤烟冠层图像色彩参数指标的筛选

对旺长后期烤烟冠层 3 类 10 个色彩指标与烤烟氮素营养指标分别做相关性分析, 结果如表 3 所示。在平均颜色指标体系中, NRI 和 NGI 分别与 5 个烤烟氮素营养指标极显著负相关和极显著正相关, NBI 与地上部生物量和叶片生物量无显著相关性, 与地上部氮浓度、叶片氮浓度和叶片 SPAD

值显著正相关。在比颜色指标体系中, G/R 和 G/(R+B) 与 5 个氮素营养指标均为极显著正相关; G/B 与氮素营养指标相关性不高。在归一化差分颜色指标体系中, (G-R)/(R+G+B) 和 ExG 与 5 个氮素营养指标均为极显著正相关; (R

-B)/(R+G+B) 与 4 个烤烟氮素营养指标极显著相关, 而 (G-B)/(R+G+B) 与氮素营养指标相关性不高。根据相关性, 在 3 类色彩指标体系中选择 NGI, G/R 和 ExG 作为潜在的最佳色彩参数指标。

表 2 不同生育期各处理冠层图像颜色标准值的差异性分析

Table 2 Difference analysis of canopy image color standard values in different growth stages

处理	团棵期			旺长后期			下部叶成熟期		
	红光值 R	绿光值 G	蓝光值 B	红光值 R	绿光值 G	蓝光值 B	红光值 R	绿光值 G	蓝光值 B
N0	98.63 a	125.66 a	109.99 a	120.52 a	146.63 a	85.81 a	95.64 a	113.94 a	66.32 a
N1	97.13 a	126.08 a	108.37 a	104.21 b	141.53 a	78.42 b	118.28 a	133.26 a	79.70 a
N2	93.85 a	124.55 a	105.93 a	93.96 c	133.71 b	75.10 c	104.57 a	120.59 a	66.57 a
N3	95.15 a	124.20 a	107.41 a	88.02 cd	128.93 bc	74.61 c	105.65 a	122.38 a	66.79 a
N4	94.61 a	124.67 a	106.42 a	81.46 de	123.62 cd	73.85 c	108.54 a	124.75 a	67.60 a
N5	94.53 a	124.96 a	107.11 a	80.60 e	122.18 d	74.00 c	96.23 a	111.95 a	64.51 a

表 3 烤烟冠层图像色彩参数指标与烟株氮素营养指标的相关系数

Table 3 Interdependency between canopy color indexes and tobacco nitrogen indexes

色彩指标	地上部生物量	叶片生物量	地上部氮浓度	叶片氮浓度	叶片 SPAD 值
NRI	-0.560 **	-0.693 **	-0.828 **	-0.870 **	-0.930 **
NGI	0.672 **	0.703 **	0.672 **	0.701 **	0.673 **
NBI	0.274	0.454 *	0.691 **	0.732 **	0.851 **
G/R	0.606 **	0.720 **	0.822 **	0.862 **	0.899 **
G/B	0.092	-0.076	-0.350	-0.375	-0.520 **
G/(R+B)	0.672 **	0.700 **	0.673 **	0.699 **	0.669 **
(G-R)/(R+G+B)	0.631 **	0.731 **	0.810 **	0.849 **	0.878 **
(G-B)/(R+G+B)	0.300	0.158	-0.088	-0.102	-0.236
(R-B)/(R+G+B)	-0.465 *	-0.622 **	-0.804 **	-0.847 **	-0.934 **
ExG	0.672 **	0.703 **	0.672 **	0.701 **	0.673 **

注: \* 和 \*\* 分别表示  $p < 0.05$  和  $p < 0.01$  水平显著相关

Note: \* and \*\* mean significant correlations at  $p < 0.05$  and  $p < 0.01$ , respectively

### 2.3 烤烟氮素营养诊断方程构建

构建冠层色彩参数指标与氮营养指标的关系方程是烤烟氮素营养诊断的核心问题。采用线性和非线性模型(对数、二次、幂和指数), 对潜在的最佳色彩参数与氮素营养指标进行回归分析(图 1)。结果表明, 五种回归模型下冠层图像色彩参数指标 NGI, G/R 和 ExG 与氮素营养指标间均表现出良好的相关性, 达到极显著水平。其中 NGI 和 ExG 与地上部生物量及叶片生物量的回归结果优于 G/R 的回归结果, 且幂函数回归和指数函数回归优于线性回归、二次回归和对数函数回归; G/R 与地上部氮浓度、叶片氮浓度和叶片 SPAD 值的回归结果优于 NGI 和 ExG 的回归结果。根据相关系数的比较, 分别选择指数回归做为地上部生物量和叶片生物量的预测模型, 线性回归作为地上部氮浓度、叶片氮浓度及叶片 SPAD 值的预测模型。

### 2.4 烤烟氮素营养诊断方程模型检验

选择相同生育期的不同地块进行氮营养诊断方程的验证分析, 不同图像色彩指标验证分析的结果如图 2 所示。验证结果表明, 基于颜色指标 G/R 建立的诊断方程模型, 地上部氮浓度及叶片氮浓度的真实检测值与方程预测值均较吻合, 重合度高。经计算 NRI, G/R, ExG 与地上部氮浓度的

RMSE 值分别为 0.789 9%, 0.375 1% 和 0.788 1%, 与叶片氮浓度的 RMSE 分别为 0.549 2%, 0.249 1% 和 0.549 0%。RMSE 反映了预测数据偏离真实值的程度, 值越小, 表示该模型预测精度越高。三个颜色指标中以 G/R 的 RMSE 值为最小, 预测精度最高, 应用 G/R 为参数的氮营养诊断方程的相比 NRI 与 ExG 更具有说服力。故选择 G/R 作为烤烟氮素营养指标预测的最佳图像色彩指标具有较高的代表性。

氮素作为影响烤烟生长发育和产量形成的必需元素之一, 在生产实际中, 氮肥施用过量仍然非常普遍。当地农民氮肥施用量一般在 120~165 kg N · ha<sup>-1</sup> 之间<sup>[13]</sup>, 本研究设置了 6 个不同氮肥用量的处理(0, 45, 90, 135, 180 和 300 kg N · ha<sup>-1</sup>), 通过分析不同氮素处理下各颜色指标与烤烟地上部生物量、叶片生物量、地上部氮浓度、叶片氮浓度、SPAD 值之间的关系, 筛选了 NRI, G/R 和 ExG 为无人机诊断烤烟氮素营养状况的备选指标, 继而通过对比不同方程模型间差异及 RMSE 值, 建立了基于 G/R 的烤烟旺长后期氮素营养指标线性方程模型。对“缺氮-氮优化-氮过剩”之间应用无人机图像技术进行烤烟氮素营养诊断提供了一种方法和思路。本研究结果是在其他条件相同(磷钾肥用量充足且一致、拍照时间统一、拍摄高度角度保证一致等)的情况下

得出的，而烤烟不同生育期冠层颜色变化受很多因素影响，如生长环境、养分类型及用量等，因此，探索不同条件下烤烟冠层颜色指标的差异机理及可行性成为今后工作的重点。同时，本试验所有氮肥均做基肥一次性施用，作物氮素营养无损诊断的核心是建立推荐追肥体系，并以此进行施肥推

荐。因此，建立基于上述试验结果的不同生育期临界 G/R 值及推荐施氮量，继而以追肥的方式提供氮肥，仍需要更多、更广泛的试验来验证。相信随着精准农业和先进农业机械的快速发展，该技术的应用将是作物无损营养诊断与推荐施肥的重要发展方向。

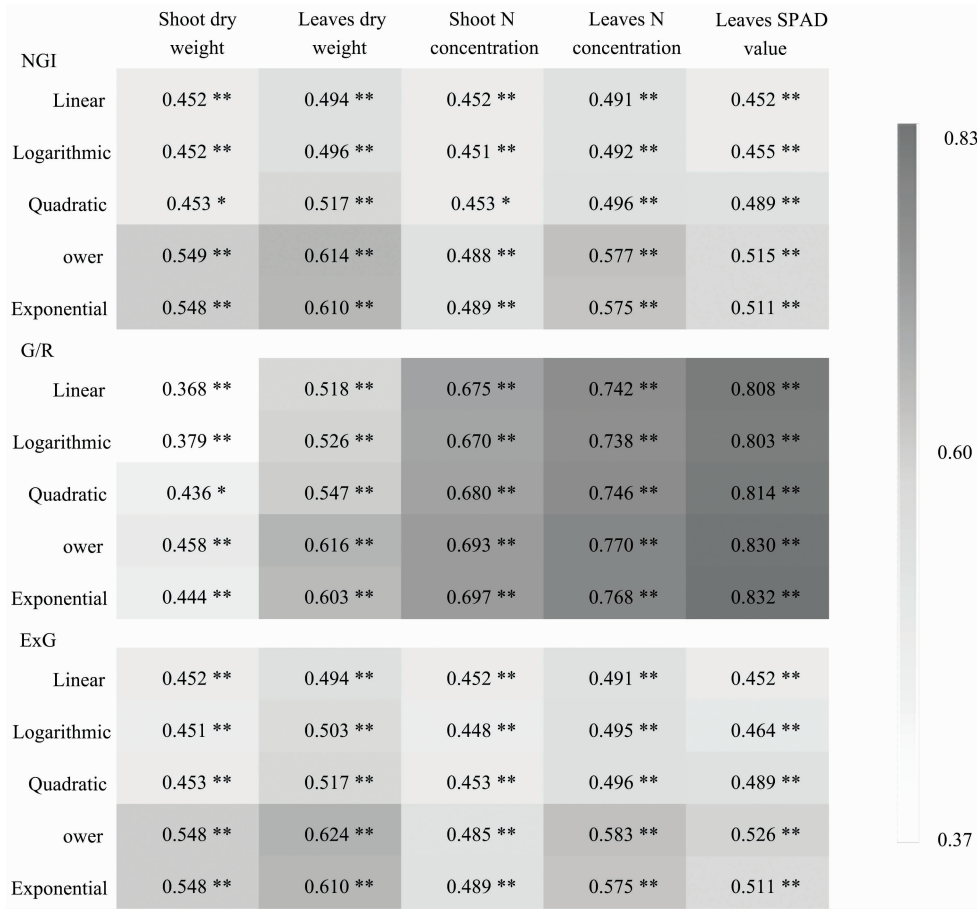


图 1 冠层色彩参数指标与氮营养指标的回归分析

Fig. 1 Regression analysis between canopy color indexes and tobacco nitrogen indexes

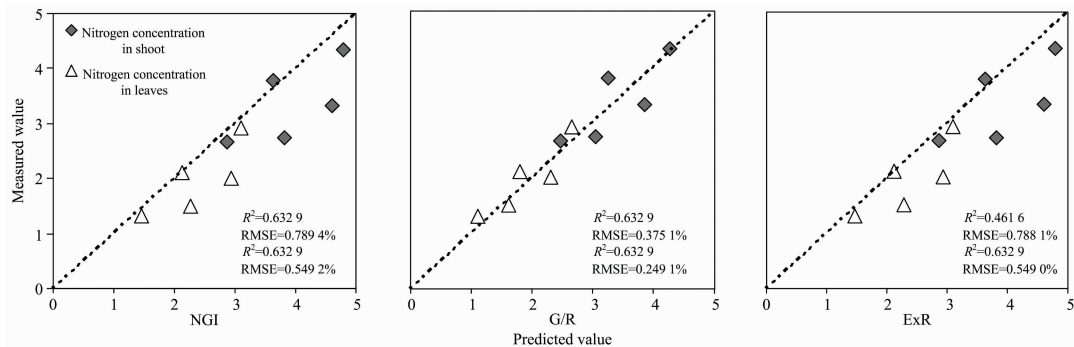


图 2 以颜色指标为自变量的烤烟地上部氮浓度和叶片氮浓度预测值与实际值的关系

Fig. 2 Relationship between predicted and actual nitrogen concentrations in shoot and leaf of flue-cured tobacco using color index as independent variables

### 3 结 论

通过无人机冠层图像分析监测烤烟氮素营养, 结果如下:

(1) 对不同生育期冠层图像分析表明, 氮素营养诊断最佳的生育期为旺长后期。(2) 三类指标中筛选出 NRI, G/R 和 ExG 作为备选指标, 与营养指标相关性达到极显著水平, 证明在烤烟中通过无人机数字图像指标来预测营养指标的状况成为可能。(3) 五种回归模型下, 指数回归作为地上部生

物量和叶片生物量的预测模型, 线性回归做为地上部氮浓度、叶片氮浓度及叶片 SPAD 值的预测模型。(4) 验证结果表明 G/R 对地上部氮浓度与叶片氮浓度的线性预测值与真实值更为接近, RMSE 值更小, 我们最终选择 G/R 作为烤烟无人机氮素营养预测的最佳色彩指标。地上部生物量、叶片生物量、地上部氮浓度、叶片氮浓度、SPAD 值的预测方程为  $Y=21.785e^{1.350 2G/R}$ ,  $Y=4.057 9e^{1.937 3G/R}$ ,  $Y=5.039 9G/R-3.333 2$ ,  $Y=4.281 4G/R-3.802 9$ ,  $Y=40.168G/R-28.188$ 。

### References

- [ 1 ] WANG Xiao-qin, WANG Miao-miao, WANG Shao-qiang, et al(王小钦, 王苗苗, 王绍强, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2015, 31(5): 152.
- [ 2 ] Yao Y, Miao Y, Huang S, et al. Agronomy for Sustainable Development, 2012, 32(4): 925.
- [ 3 ] WANG Yuan, WANG De-jian, ZHANG-Gang, et al(王 远, 王德建, 张 刚, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2012, 28(17): 131.
- [ 4 ] LI Lan-tao, ZHANG Meng, REN Tao, et al(李岚涛, 张 萌, 任 涛, 等). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer(植物营养与肥料学报), 2015, 21(1): 259.
- [ 5 ] WEI Quan-quan, LI Lan-tao, REN Tao, et al(魏全全, 李岚涛, 任 涛, 等). Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学), 2015, 48(19): 3877.
- [ 6 ] LI Hong-Jun, ZHANG Li-zhou, CHEN Xi-ming, et al(李红军, 张立周, 陈曦鸣, 等). Chinese Journal of Eco-Agriculture(中国生态农业学报), 2011, 19(1): 155.
- [ 7 ] LIU Chang-hua, MA Wen-yu, CHEN Zhi-chao(刘昌华, 马文玉, 陈志超). Journal of Henan University of Technology · Natural Science Edition(河南理工大学学报·自然科学版), 2018, 37(3): 45.
- [ 8 ] CHEN Jia-yue, YAO Xia, HUANG Fen, et al(陈佳悦, 姚 霞, 黄 芬, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2016, 32(4): 163.
- [ 9 ] ZHANG Ling, CHEN Xin-ping, JIA Liang-liang, et al(张 玲, 陈新平, 贾良良, 等). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer(植物营养与肥料学报), 2018, 24(1): 261.
- [10] LI Jin-wei, GUAN He-qing, LIAO Gui-ping(李锦卫, 管鹤卿, 廖桂平). Agriculture Network Information(农业网络信息), 2010, 12: 15.
- [11] Yao X, Si H, Chen T, et al. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1360.
- [12] LIU Hong-jian, ZENG Ai-ping, ZHENG Li-min(刘洪见, 曾爱平, 郑丽敏). Agriculture Network Information(农业网络信息), 2007, (12): 31.
- [13] TANG Xian-gan, LI Zu-zhang, HU Qi-feng, et al(唐先干, 李祖章, 胡启锋, 等). Chinese Tobacco Science(中国烟草科学), 2012, 33(3): 47.

# Diagnosis of Nitrogen Nutrition in Flue-Cured Tobacco Based on UAV Visible Spectrum Platform

SUN Zhi-wei<sup>1</sup>, WANG Xiao-lin<sup>1</sup>, ZHANG Qi-ming<sup>2</sup>, YUAN Ju-min<sup>2</sup>, ZHANG Shuang<sup>1</sup>, YAN Hui-feng<sup>1\*</sup>,  
WANG Shu-sheng<sup>1\*</sup>

1. Tobacco Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Tobacco Biology and Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao 266101, China
2. Jiangxi Institute of Tobacco Science, Nanchang 330025, China

**Abstract** The feasibility of non-destructive assessment and prediction of tobacco nitrogen nutrition based on visible spectrum diagnostic technology on UAV platform was analyzed by field experiments with different nitrogen dosage, and the optimum color parameters and model of the technology were defined. Field experiments were carried out in Anfu, Jiangxi Province in 2018. Different nitrogen dosages were set at 0, 45, 90, 135, 180 and 300 kg N · ha<sup>-1</sup>. At 47 days after transplantation (cluster stage), 83 days after transplantation (flourishing late stage) and 116 days after transplantation (mature stage of lower leaves), digital images of canopy RGB color were obtained by UAV. At the same time, plant samples were collected to analyze aboveground biomass and leaf biomass. Digital analysis of canopy images was carried out to obtain the value of color indices. Through correlation analysis between color indices and tobacco nitrogen nutrition indices, appropriate color indices were screened and nitrogen nutrition diagnosis equation was established. The fitting accuracy of the diagnostic equation of nitrogen nutrition was validated by the experiment of nitrogen consumption in different plots. The results showed that the standard color values of canopy images were significantly different between different treatments in the later stage of flourishing growth, and there was no significant difference between the clustering stage and the maturity stage of lower leaves. Among the 15 color indexes, NRI, NGI, G/R, G/(R+B), (G-R)/(R+G+B) and ExG were significantly correlated with nitrogen nutrition indexes of 5 flue-cured tobacco varieties ( $p < 0.01$ ). According to the screening method of canopy color index, NGI, G/R and ExG are the potential optimal color parameters in the normalized color index system, the ratio color index system and the normalized difference color index system. According to different types of regression analysis results, exponential regression was determined as the prediction model of aboveground biomass and leaf biomass, and linear regression as the prediction model of aboveground nitrogen concentration, leaf nitrogen concentration and leaf SPAD value. The RMSE values of G/R for aboveground nitrogen concentration and leaf nitrogen concentration were 0.375 1% and 0.249 1%, respectively, significantly lower than NGI and ExG, with the highest prediction accuracy. The prediction equations of above-ground biomass, leaf biomass, above-ground nitrogen concentration, leaf nitrogen concentration and SPAD value expressed by G/R value are  $Y = 21.785e^{1.350 2G/R}$ ,  $Y = 4.057 9e^{1.937 3G/R}$ ,  $Y = 5.039 9G/R - 3.333 2$ ,  $Y = 4.281 4G/R - 3.802 9$ ,  $Y = 40.168G/R - 28.188$ . Therefore, the UVAs platform-based visible spectrum diagnosis technology has application potential in the nitrogen nutrition diagnosis of flue-cured tobacco. The best evaluation period is the flourishing later stage, and the best prediction parameter is G/R value.

**Keywords** Flue-cured tobacco; Canopy visible spectrum; Nitrogen diagnosis; Color index; Equation model; Growth period

(Received Dec. 27, 2019; accepted Mar. 16, 2020)

\* Corresponding authors