

# 数字图像技术在夏玉米氮素营养诊断中的应用\*

张立周<sup>1,2</sup> 王殿武<sup>1</sup> 张玉铭<sup>2\*\*</sup> 程一松<sup>2</sup> 李红军<sup>2</sup> 胡春胜<sup>2</sup>

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院 保定 071000; 2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050021)

**摘要** 基于6个不同水平的氮肥田间试验,采用数码相机获取夏玉米6叶期和10叶期的冠层图像,分析了不同供氮水平下夏玉米冠层图像色彩参数指标与施氮量、叶片SPAD值、植株硝酸盐浓度、植株全氮含量、0~90 cm土壤硝态氮含量之间的关系。结果表明:在6叶期,玉米冠层数字图像色彩参数指标 $B/(R+G+B)$ 、 $G/B$ 、 $R/B$ 、 $B/L$ 均与施氮量、叶片SPAD值、植株硝酸盐浓度、植株全氮含量、0~90 cm土壤硝态氮含量存在极显著的线性相关关系,其中 $B/(R+G+B)$ 与各营养参数的相关关系最好,其次是 $B/L$ 。因此,运用数字图像技术进行玉米的氮素营养诊断是可行的。夏玉米6叶期冠层图像色彩参数指标与上述营养参数间的相关性明显高于10叶期,可作为应用数字图像技术进行氮素营养诊断的关键时期,而蓝光标准化值 $[B/(R+G+B)]$ 是进行夏玉米氮素营养诊断的最佳冠层图像色彩参数指标。

**关键词** 夏玉米 冠层图像 色彩参数 数字图像技术 氮素营养诊断

中图分类号: S126; S513 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2010)06-1340-05

## Diagnosis of N nutrient status of corn using digital image processing technique

ZHANG Li-Zhou<sup>1,2</sup>, WANG Dian-Wu<sup>1</sup>, ZHANG Yu-Ming<sup>2</sup>, CHENG Yi-Song<sup>2</sup>, LI Hong-Jun<sup>2</sup>, HU Chun-Sheng<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China; 2. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract** Canopy images of summer corn were taken in the 6-leaf and 10-leaf stages in a field experiment with six N application levels. And the relationships between color parameter indexes of corn canopy images and N application level, leaf SPAD, stem sap nitrate concentration, plant total N content and nitrate N content in 0~90 cm soil were determined. The results show that in the 6-leaf stage, color parameter indexes of  $B/(R+G+B)$ ,  $G/B$ ,  $R/B$ ,  $B/L$  are significantly linearly correlated with N application level, leaf SPAD, stem sap nitrate concentration, plant total N content and nitrate N content in 0~90 cm soil ( $P < 0.01$ ). And  $B/(R+G+B)$  presents most significant correlation, and  $B/L$  is next to it. In 10-leaf stage, the correlations are not so significant as those in 6-leaf stage. The results suggest that it is feasible to use digital image processing technique to diagnose N nutrient statuses of summer corn. The 6-leaf stage is crucial period with  $B/(R+G+B)$  as the index for the N nitrogen diagnosis using digital image processing technique.

**Key words** Summer corn, Canopy image, Color parameter, Digital image processing technique, Nitrogen status diagnosis

(Received June 30, 2010; accepted Sept. 25, 2010)

玉米在生长发育中对氮素的需求较大,缺氮将直接影响玉米的生长和产量,然而氮肥施入过多又会造成肥料利用率下降<sup>[1]</sup>、作物品质降低<sup>[2]</sup>,导致地下水污染<sup>[3]</sup>,增加温室气体排放。因此,准确把握植株的营养状况,才能更合理地进行肥料投入,防止肥料浪费和对环境的污染。在以往氮素营养诊断进

行推荐施氮的研究过程中,已建立了一些诊断方法,如土壤无机氮测试和植株全氮测试、叶绿素仪测试、反射仪测试叶柄硝酸盐浓度等<sup>[4-8]</sup>,这些方法虽然在一定程度上改善了经验施肥带来的盲目性和氮肥过量的问题,但操作复杂、费时费力,仍不能简便、快速、准确地进行氮素营养诊断并推荐施肥。因此,

\* 中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX-YW-09)和国家科技支撑计划项目(2008BADA4B02)资助

\*\* 通讯作者: 张玉铭,女,副研究员,主要研究方向为农田生态系统养分循环与平衡及其环境效应研究。E-mail: ymzhang@sjziam.ac.cn  
张立周,男,硕士研究生,主要研究方向为土壤物理与水资源。E-mail: zhanglizhou201@126.com

收稿日期: 2010-06-30 接受日期: 2010-09-25

建立一个简便、快速、准确的营养诊断方法已成为当务之急。

氮素营养状况直接影响到植物叶绿素的组成和含量,而这与植株的冠层颜色紧密相关。缺氮的植物比施氮的植物在整个可见光波段反射的光多<sup>[9-10]</sup>。因此,可用植株冠层光反射来反映植株的氮素营养状况。

遥感技术提供了一种快速诊断作物生长过程中氮营养状况的检测手段。航拍或地面拍摄的植物冠层彩色或红外图像已经成功应用于作物冠层氮营养状况诊断和氮肥推荐<sup>[11-13]</sup>。不同氮营养状况下的植物冠层数字图像的红、绿、蓝光(R、G、B)被用来表征作物的氮营养状况。研究认为基于数字图像的参数如绿光与红光的比值(G/R)<sup>[14]</sup>等与植株氮含量、叶片叶绿素仪读数等都有很好的相关关系。运用数字图像技术对小麦的氮素营养状况的诊断,已取得一定的成果。如肖焱波等<sup>[15]</sup>研究冬小麦拔节期氮素营养状况,认为红光标准化值 $[R/(R+G+B)]$ 是较好地表征冬小麦拔节期氮素营养状况的指标。然而,数字图像技术在玉米氮素营养诊断中应用的相关研究报道并不多。本研究旨在通过应用数字图像技术进行玉米氮素营养诊断可行性分析,找出玉米氮素营养诊断关键生育期和最适合玉米氮素营养诊断的色彩参数,探索应用数字图像技术进行玉米氮素营养诊断的方法,为玉米合理推荐施肥提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2009 年在中国科学院栾城农业生态系统实验站进行。该站位于北纬 37°50', 东经 114°40', 海拔高度 50.1 m, 属暖温带半湿润季风气候, 年平均气温 12.2℃, 年降雨量 536.8 mm, 年无霜期 200 d 左右。土壤类型为潮褐土, 土壤有机质 12 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮 0.9 g·kg<sup>-1</sup>。种植制度为小麦-玉米两熟。

### 1.2 试验设计

试验在 2005 年开始的肥料定位试验地中进行。试验设 6 个氮处理, 每年氮肥用量分别为: 0、100 kg(N)·hm<sup>-2</sup>、200 kg(N)·hm<sup>-2</sup>、300 kg(N)·hm<sup>-2</sup>、400 kg(N)·hm<sup>-2</sup>、600 kg(N)·hm<sup>-2</sup>, 小麦、夏玉米季各施入全年用量的 1/2, 小麦季于播种和拔节期分两次施入, 每次施入量为全季用量的 1/2; 夏玉米季于大喇叭口期一次性追施。全年只在小麦底肥施用 1 次磷肥, 用量为 65 kg(P)·hm<sup>-2</sup>, 不施钾肥。供试夏玉米品种为“郑单 958”, 种植密度为 67 500 株·hm<sup>-2</sup>。夏玉米于播前灌水, 以保证夏玉米正常出苗, 大喇叭期灌水施肥, 其他采用田间常规管理。试验采取随机区组排列, 各处理重复 3 次, 小区面积 149.85 m<sup>2</sup>。

### 1.3 测试项目

所有项目测试于夏玉米 6 叶期(2009 年 7 月 19 日)和 10 叶期(2009 年 7 月 28 日)进行。

叶片叶绿素含量(SPAD): 利用 SPAD-502 叶绿素仪测定夏玉米最上部第 1 片完全展开叶的中部, 每小区随机选取 20 个叶片测试, 记录平均值。

植株硝酸盐浓度和全氮含量: 取夏玉米最上部第 1 片完全展开叶的中部叶脉 1 cm 左右, 挤压汁液, 用反射仪和硝酸盐试纸测试植株硝酸盐浓度。每个小区取 3 株代表性植株, 杀青, 烘干, 粉碎, 用凯氏定氮法测定植株全氮含量。

土壤硝态氮含量: 分 3 层(0~30 cm、30~60 cm、60~90 cm)取 0~90 cm 土壤样品, 以 1 mol·L<sup>-1</sup>的 KCl 浸提, 用紫外分光法进行测定。

### 1.4 数字图像数据的获取与处理

在夏玉米 6 叶期和 10 叶期采用佳能 EOS400D 数码相机(最大像素 1 010 万), 选择晴天的 12:00~13:00 获得夏玉米冠层图像, 拍摄时相机距地面高度为 1.2 m, 与地面成 60°角, 以自动曝光模式控制曝光时间色彩平衡, 图像的分辨率采用 1 024×768。数码相机得到的图像为 RGB 真彩色图像, 图像以 TIFF 无损压缩格式转存入计算机。用 Adobe Photoshop®通过直方图程序获得冠层相关色彩参数。色彩参数包括红、绿、蓝光绝对值(R、G、B)的亮度(L), 在数据获取时均选取平均值; 为更好地描述色彩参数与植株营养参数之间的相关关系, 对色彩参数绝对值进行处理, 获取绿光与蓝光比值(G/B)、红光与蓝光比值(R/B)、绿光与红光比值(G/R)、蓝光与亮度比值(B/L)、绿光与亮度比值(G/L)、绿光标准化值 $[G/(R+G+B)]$ 、蓝光标准化值 $[B/(R+G+B)]$ 、红光标准化值 $[R/(R+G+B)]$ 。

试验数据用 Excel 和 SPSS 等统计软件进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 冠层图像色彩参数指标与施肥量、夏玉米氮素营养指标关系

选取色彩参数指标  $G/(R+G+B)$ 、 $B/(R+G+B)$ 、 $R/(R+G+B)$ 、 $G/B$ 、 $R/B$ 、 $G/R$ 、 $B/L$ 、 $G/L$  与施肥量、夏玉米氮营养指标叶片 SPAD 值、植株硝酸盐浓度和全氮含量、土壤 0~90 cm 硝态氮含量进行相关性分析。

从表 1 可知, 夏玉米 6 叶期  $G/(R+G+B)$ 、 $R/(R+G+B)$ 、 $G/B$ 、 $R/B$  与施氮量均呈极显著线性负相关, 而  $B/(R+G+B)$ 、 $B/L$  与施氮量呈极显著线性正相关,  $G/R$ 、 $G/L$  与施氮量相关性较差。  $G/(R+G+B)$ 、 $R/(R+G+B)$ 、 $G/B$ 、 $R/B$  与 SPAD 值均呈极显著负相关, 而  $B/(R+G+B)$ 、 $B/L$  与 SPAD 值呈极显著正相关,

表 1 夏玉米冠层图像色彩参数指标与施氮量、夏玉米氮素营养指标的关系

Tab. 1 Correlation coefficients between indexes of corn canopy image color parameter and nitrogen application level, corn nitrogen nutrient status parameters

夏玉米生长时期 Corn growth stage	色彩参数指标 Index of color parameter	施氮量 Nitrogen application level	SPAD	植株硝酸盐 Plant nitrate concentration	植株全氮 Plant total nitrogen content	0~90 cm 土壤硝态氮 Soil nitrate nitrogen content
6 叶期 6-leaf stage	G/(R+G+B)	-0.565 1**	-0.513 5**	-0.4857**	-0.492 3**	-0.205 7
	B/(R+G+B)	0.719 4**	0.779 5**	0.4155**	0.632 6**	0.499 3**
	R/(R+G+B)	-0.384 7**	-0.521 9**	-0.1985	-0.342 7*	-0.515 2**
	G/B	-0.681 4**	-0.762 1**	-0.3931**	-0.605 5**	-0.408 8**
	R/B	-0.633 7**	-0.780 2**	-0.4098**	-0.571 8**	-0.499 1**
	B/L	0.730 4**	0.770 5**	0.5297**	0.641 8**	0.484 0**
	G/L	-0.255 2*	-0.175 2	-0.1750	-0.217 4*	-0.021 4
10 叶期 10-leaf stage	G/R	0.000 0	0.013 7	0.0017	0.000 0	0.109 2
	G/(R+G+B)	-0.001 5	-0.029 6	-0.0364	-0.037 6	-0.256 2*
	B/(R+G+B)	0.199 6	0.305 6*	0.0421	0.285 7*	0.014 2
	R/(R+G+B)	-0.404 1**	-0.340 2*	-0.4036**	-0.269 1*	-0.416 9**
	G/B	-0.096 5	-0.188 9	-0.0042	-0.191 4	-0.076 6
	R/B	-0.390 2**	-0.478 5**	-0.1835	-0.431 1**	-0.025 8
	B/L	0.161 2	0.263 9*	0.0241	0.247 6*	0.030 0
G/L	-0.174 2	-0.000 0	-0.1107	-0.001 1	-0.375 0**	
G/R	0.104 9	0.040 5	0.2261*	0.024 4	0.480 7**	

\*和\*\*分别表示  $P<0.05$  和  $P<0.01$  水平显著相关 \* and \*\* mean significant correlation at  $P<0.05$  and  $P<0.01$  respectively.

G/R、G/L 与 SPAD 值相关性较差。G/(R+G+B)、G/B、R/B 值与植株硝酸盐浓度、植株全氮含量呈极显著线性负相关，B/(R+G+B)、B/L 与植株硝酸盐浓度、植株全氮含量呈极显著线性正相关；R/(R+G+B)与植株全氮含量呈显著线性负相关，与植株硝酸盐浓度无显著相关性；G/R、G/L 与植株硝酸盐浓度和全氮含量的相关性不显著。B/(R+G+B)、B/L 与土壤 0~90 cm 硝态氮含量呈极显著线性正相关，G/B、R/(R+G+B)、B/L 与土壤 0~90 cm 硝态氮含量呈极显著线性负相关；而 G/(R+G+B)与土壤 0~90 cm 硝态氮含量的相关性不显著，但随土壤 0~90 cm 硝态氮含量升高呈下降趋势；G/R、G/L 与土壤 0~90 cm 硝态氮含量相关性较差。

从表 1 可以看到，与 6 叶期相比，夏玉米 10 叶期冠层色彩参数指标与施氮量、SPAD 值、植株硝酸盐浓度、植株全氮含量、土壤 0~90 cm 硝态氮含量的关系相关性较差。10 叶期冠层色彩参数与施氮量间只有 R/(R+G+B)、R/B 达极显著相关，其他指标均未达显著水平；与 SPAD 值之间只有 R/B 达极显著相关，B/(R+G+B)、R/(R+G+B)、B/L 达显著相关，其他指标均不存在显著相关；与植株硝酸盐浓度之间只有 R/(R+G+B)达到极显著相关，G/R 达到显著相关；与植株全氮含量之间 R/B 达极显著相关，B/(R+G+B)、R/(R+G+B)、B/L 为显著相关；与土壤 0~90 cm 硝态氮含量之间 R/(R+G+B)、G/L、G/R 达极显著相关，G/(R+G+B)达显著相关。综上所述，只有色彩参数 R/(R+G+B)与施氮量、SPAD 值、植株硝酸盐浓度、植株全氮含量、土壤 0~90 cm 硝态氮含

量均显著相关，可作为夏玉米 10 叶期的诊断指标。

上述分析表明，应用数字图像技术进行夏玉米氮素营养诊断是可行的，且 6 叶期冠层图像色彩参数与营养参数间的相关性明显高于 10 叶期，可作为应用数字图像技术进行氮素营养诊断的关键时期。蓝光标准化值[B/(R+G+B)]是进行夏玉米氮素营养诊断的最佳冠层图像色彩参数指标。

## 2.2 夏玉米植株氮素营养诊断与推荐施肥

所选取的 8 个色彩参数指标中，B/(R+G+B)与各营养参数间均呈极显著线性正相关，是应用数字图像技术进行夏玉米氮素营养诊断的最佳色彩参数指标之一。不同施氮处理下夏玉米冠层 6 叶期的 B/(R+G+B)见图 1。过量施氮 [ $>300 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$ ]下

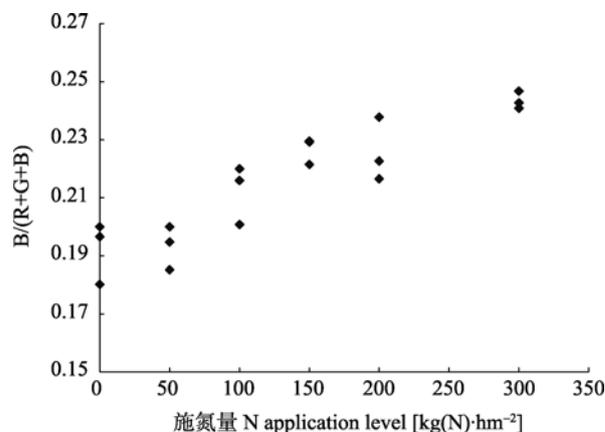


图 1 不同施氮处理下夏玉米 6 叶期冠层图像的标准化蓝色值[B/(R+G+B)]

Fig. 1 Relative blue intensity [B/(R+G+B)] of corn canopy at 6-leaf stage under different N treatments

$B/(R+G+B)$  大于 0.24, 明显高于适宜施氮[150~200  $\text{kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$ ]和氮素不足[施氮量 0~100  $\text{kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$ ]处理。供氮不足处理  $B/(R+G+B)$  明显低于适宜施氮处理。

不同施氮处理下  $B/(R+G+B)$  分布范围如表 2 所示。根据各处理  $B/(R+G+B)$  的分布情况, 建议氮素

供应过量情况下的  $B/(R+G+B)$  临界值为 0.240, 大于此值即表示夏玉米处于供氮过量状态; 当  $B/(R+G+B) < 0.200$  时, 认为夏玉米供氮严重不足;  $B/(R+G+B)$  在 0.201~0.218 之间时, 认为夏玉米供氮不足; 而  $B/(R+G+B)$  在 0.219~0.239 之间时, 则认为夏玉米前期的生长正常, 供氮量能满足夏玉米正常生长。

表 2 不同施氮处理条件下夏玉米蓝光值分布及氮素营养诊断

Tab. 2  $B/(R+G+B)$  value of summer corn under different N treatments and diagnosis of nitrogen nutrient status of corn

施氮量 Nitrogen application level [ $\text{kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$ ]	冠层蓝光标准化值 Canopy $B/(R+G+B)$ value	平均值 Average	蓝光标准化值范围 $B/(R+G+B)$ range	夏玉米氮素营养状况 Nitrogen nutrient status of corn
0~50	0.180~0.200	0.193	<0.200	供氮严重不足 Serious deficit of N supply
100	0.201~0.220	0.212	0.201~0.218	供氮不足 Deficit of N supply
150~200	0.216~0.237	0.226	0.219~0.239	供氮正常 Normal N supply
300	0.241~0.247	0.243	>0.240	供氮过量 Excessive N supply

根据夏玉米 6 叶期硝态氮含量, 建立了推荐施肥方程:  $y=701.94-2176.8x$ ,  $x$  为  $B/(R+G+B)$  值,  $y$  为每公顷需氮量。根据此方程可对夏玉米 6 叶期进行推荐施肥。

### 3 讨论

通过夏玉米 6 叶期冠层图像色彩参数指标与传统营养诊断参数的相关性分析, 建立了色彩参数指标与传统营养诊断参数间的数量化关系, 并初步建立了基于数字图像技术的夏玉米推荐施肥方案。结果表明, 夏玉米 6 叶期是应用数字图像技术进行氮素营养诊断的关键时期, 而蓝光标准化值 [ $B/(R+G+B)$ ] 是进行夏玉米氮素营养诊断的最佳冠层图像色彩参数指标。  $B/(R+G+B) > 0.240$ , 表示夏玉米处于供氮过量状态;  $B/(R+G+B) < 0.200$ , 夏玉米供氮严重不足;  $B/(R+G+B) = 0.201 \sim 0.218$ , 夏玉米供氮不足;  $B/(R+G+B) = 0.219 \sim 0.239$ , 供氮量能满足夏玉米正常生长。

本研究选取的 8 个色彩参数中,  $G/R$ 、 $G/L$  在两个调查时期与施肥量和氮素营养指标的相关性都很差, 故不适合作为营养诊断的色彩参数。  $R/(R+G+B)$  在夏玉米 6 叶期时与施氮量、夏玉米氮素营养指标的相关性相对较差, 而到 10 叶期  $R/(R+G+B)$  成为 8 个色彩参数指标中相关性最好的指标, 可能是夏玉米生长过程中冠层颜色变化所造成的, 还有待继续进行研究。

Lukina 等<sup>[16]</sup>应用数码相机获取田间小麦冠层图像, 并通过图像处理获得小麦冠层覆盖度, 估计了冬小麦冠层生物量。Adamsen 等<sup>[14]</sup>对数码相机获取的冬小麦冠层图像研究表明,  $G/R$  与叶绿素仪读数有极显著的相关关系。Adamsen 等<sup>[17]</sup>利用图像分析

技术研究了快速计算植物开花数量的方法。Jia 等<sup>[18]</sup>应用数码相机田间获取冬小麦冠层图像, 分别建立了拔节期和孕穗期冠层(G)与地上部植株全氮间的关系模型, 建立了冬小麦拔节期氮肥营养推荐体系, 取得了较好效果。肖焱波等<sup>[15]</sup>的研究也表明, 数字图像的  $R/(R+G+B)$  与冬小麦常规营养诊断指标如叶绿素仪读数、茎基部硝酸盐浓度、植株全氮含量和地上部生物量之间的相关系数达 0.809~0.946, 能较好地表征作物氮营养状况。王娟等<sup>[19]</sup>用数字图像技术对棉花的氮素营养进行了研究, 认为棉花在不同时期特征光谱参数与棉花含氮量及叶片含氮量呈显著相关, 其中盛蕾期棉花全氮含量与光谱参数的相关性最好, 盛花期棉花叶片含氮量与光谱参数的相关系数最高,  $G/(G+R+B)$  可作为氮素营养诊断的指标。王晓静等<sup>[20]</sup>研究指出在棉花铃期  $G$  和  $G/R$  与叶柄硝酸盐浓度、植株全氮和地上部生物量之间都有较大的相关性, 可较为灵敏地反映棉花氮素营养水平。贾良良等<sup>[21]</sup>用数字图像技术对水稻进行了氮素营养诊断, 发现数字图像  $R$ 、 $G$  和红光标准化值(NRI)与水稻氮营养状况常规诊断指标植株全氮含量、生物量和地上部吸氮量等都呈显著的线性负相关关系, 而  $G/(G+R+B)$  则与上述指标呈显著正相关关系。李井会等<sup>[22]</sup>研究了数字图像在马铃薯营养诊断中的应用, 研究表明在块茎形成期和块茎膨大期, 数码相机获取的数字图像分析得到的冠层  $G/B$  与其他描述马铃薯氮素营养状况的指标如土壤无机氮、植株全氮含量、叶柄硝酸盐浓度、叶绿素仪读数均有良好的负相关关系。王连君等<sup>[23]</sup>用数字图像技术对草莓的氮素营养诊断进行了研究, 认为  $G/(R+G+B)$  是较好的草莓氮素营养诊断指标。

从前人的研究可以看出, 不同作物反映氮素营

养指标的色彩参数不尽相同,但  $G/(R+G+B)$  在各种作物诊断中应用比较普遍,虽然  $G/(R+G+B)$  不一定是诊断该种作物最好的色彩参数,但它具有一定的普遍性。然而本研究表明,适用于夏玉米氮素营养诊断的色彩参数指标最好的为  $B/(R+G+B)$ , 与前人的研究有所不同,原因有待进一步研究。另外,前人研究中针对不同作物在不同时期进行的营养诊断差异较大,所以对诊断时期的把握很重要。本研究也进一步验证了这一结果,夏玉米 6 叶期冠层图像色彩参数指标与施氮量和氮素营养参数间的相关性明显高于 10 叶期,是应用数字图像技术进行氮素营养诊断的关键时期。

比传统氮素营养诊断方法相比,数字图像处理技术具有田间采样快,数据处理快,能迅速应用到生产的优势。但数字图像技术还不够成熟,它是利用土壤和植物冠层对光的吸收、反射与折射,而影响光吸收和反射的因素很多,如田间杂草、病害、虫害、水分胁迫、大气状况等。另外,农作物品种间冠层颜色的差异也需要注意。在以后研究中,应尽量减少误差,使数字图像技术做为氮素诊断方法更加准确,更好地应用于农作物和瓜果蔬菜的氮素诊断。

## 参考文献

- [1] 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科技出版社,1992
- [2] 陈新平,冀宏杰,张福锁. 过量施用氮肥对北京市蔬菜硝酸盐含量影响的综合评估[M]//李晓林,张福锁,米国华. 平衡施肥与可持续优质蔬菜生产. 北京:中国农业大学出版社,2000:225-231
- [3] Zhao R F, Chen X P, Zhang F S, et al. Fertilization and nitrogen balance in a wheat-maize rotation system in North China[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98: 938-945
- [4] Blackmer A M, Webb J. Correlations between soil nitrate concentrations in late spring and corn yields in Iowa[J]. *Journal of Production Agriculture*, 1989, 2: 103-109
- [5] Zhang H L, Smeal D, Arnold R N, et al. Potato nitrogen management by monitoring petiole level[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1996, 19: 1405-1412
- [6] Westcott M P, Rosen C J, Inskeep W P. Direct measurement of petiole sap nitrate in potato to determine crop nitrogen status[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1993, 16: 515-521
- [7] Minotti P L, Halseth D E, Sieczka J B. Field chlorophyll measurements to assess the nitrogen status of potato varieties[J]. *HortScience*, 1994, 29(12): 1497-1500
- [8] Fox R H, Piekielek W P, Macneal K M. Using a chlorophyll meter to predict nitrogen fertilizer needs of winter wheat[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1994, 25: 171-181
- [9] Blackmer T M, Schepers J S. Use of a chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertilization for corn[J]. *J Prod Agric*, 1994, 8(1): 56-60
- [10] Al-Abbas A H, Barr R, Hall J D, et al. Spectra of normal and nutrient-deficient maize leaves[J]. *Agronomy Journal*, 1974, 66: 16-20
- [11] Sripada P V, Heiniger R W, White J G, et al. Aerial color infrared photography for determining late-season nitrogen requirements in corn[J]. *Agron J*, 2005, 97(5): 1443-1451
- [12] Scharf P C, Lory J A. Calibrating corn color from aerial photographs to predict sidedress nitrogen need[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94: 397-404
- [13] Blackmer T M, Schepers J S. Aerial photography to detect nitrogen stress in corn[J]. *Journal of Crop Physiology*, 1996, 148: 440-444
- [14] Adamsen F J, Pinter P J, Barnes E M, et al. Measuring wheat senescence with a digital camera[J]. *Crop Science*, 1999, 39(7): 719-724
- [15] 肖焱波,贾良良,陈新平,等. 应用数字图像分析技术进行小麦拔节期氮素营养诊断[J]. *农业信息科学*, 2008, 24(8): 448-553
- [16] Lukina E, Stone M, Raun W. Estimating vegetation coverage in wheat using digital images[J]. *J Plant Nutri*, 1999, 22(2): 341-350
- [17] Adamsen F J, Coffelt T A, Nelson M, et al. Method for using images from a color digital camera to estimate flower number[J]. *Crop Sci*, 2000, 40: 704-709
- [18] Jia L, Chen X, Zhang F, et al. Low altitude aerial photography for optimum N fertilization of winter wheat on the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2004, 89: 389-395
- [19] 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
- [20] 王晓静,张炎,李磐,等. 地面数字图像技术在棉花氮素营养诊断中的初步研究[J]. *棉花学报*, 2007, 19(2): 106-113
- [21] 贾良良,范明生,张福锁,等. 应用数码相机进行水稻氮素营养诊断[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(8): 2176-2179
- [22] 李井会,朱丽丽,宋述尧. 数字图像技术在马铃薯氮素营养诊断中的应用[J]. *中国马铃薯*, 2006, 20(5): 257-260
- [23] 王连君,邢宇. 数字图像技术在草莓氮素营养诊断中的研究[J]. *华南农业大学学报*, 2010, 31(2): 19-21