中国生态农业学报 2011 年 1 月 第 19 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2011, 19(1): 155−159

DOI: 10.3724/SP.J.1011.2011.00155

应用数字图像进行小麦氮素营养诊断中图像分析方法的研究*

李红军[1] 张立周[2] 陈曦鸣[3] 张玉铭[1] 程一松[1] 胡春胜[1]

(1. 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;
2. 河北农业大学资源与环境科学学院 保定 071001; 3. 石家庄市第 24 中学 石家庄 050051)

摘 要 简便、快速、经济地诊断作物氮素营养状况是实施氮肥用量调控的关键。利用数码相机对作物冠层进行拍照，通过图像处理软件获得作物色彩参数，根据色彩参数与作物氮素营养状况的关系可以对其氮素丰缺进行诊断。针对作物数字图像色彩参数的获取方法，结合小麦多水平氮肥试验，采用遥感软件 PCI Geomatics 的非监督分类功能，将小麦图像分为土壤、反光叶面和不反光叶面，与 Adobe Photoshop 软件普通图像处理方法对照，比较分析了小麦图像不同类别叶片的 8 种色彩参数与 SPAD 值及植株全氮的相关性。结果表明，返青期小麦反光叶面的 G/R 与 R/(R+G+B)色彩参数能较好地反映小麦的氮素营养状况；拔节期不反光叶面和反光叶面的 R/(R+G+B)色彩参数与植株全氮相关性较好。利用普通图像处理软件获得色彩参数的方法有待改进，图像分类后能够提高其色彩参数对作物氮素营养诊断的准确性。

关键词 冬小麦 氮素营养诊断 数字图像 图像分类 色彩参数
中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2011)01-0155-05

Image analysis method in application of digital image on diagnosing wheat nitrogen status

LI Hong-Jun[1], ZHANG Li-Zhou[2], CHEN Xi-Ming[3], ZHANG Yu-Ming[1], CHENG Yi-Song[1], HU Chun-Sheng[1]

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China; 3. Shijiazhuang No. 24 High School, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract Easy, fast and cheap diagnosis of crop nitrogen status is a key to optimize nitrogen fertilization. Crop nitrogen status can be measured by relating it to color parameters retrieved form digital images. In this paper, color parameters of digital image of winter wheat under different levels of nitrogen supply were analyzed by using Adobe Photoshop and PCI Geomatics remote sensing image processing software and the results compared. Based on color differences, winter wheat image was divided into three parts (soil, leaves with and without reflection). Correlations among eight color parameters retrieved by PCI and Photoshop, SPAD values and total nitrogen content of wheat were analyzed. The results showed that G/R and R/(R+G+B) ratios of leaves with reflection were significantly correlated with wheat SPAD at reviving stage. R/(R+G+B) ratio of leaves with and without reflection was significantly correlated with wheat total nitrogen content at jointing stage. It was noted that improvements in image processing for getting color parameters of software were required. Color parameters obtained via image classification could increase the diagnosis accuracy of wheat nitrogen status.

Key words Winter wheat, Nitrogen status diagnosis, Digital image, Image classification, Color parameter
(Received July 7, 2010; accepted Sept. 8, 2010)

* 国家自然科学基金项目(40971025)、国家科技支撑计划项目(2008BADA4B02-04, 2006BAD17B05)和中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX-WY-09)资助
李红军(1972~)，男，博士，副研究员，主要研究方向为信息农业与生态水文。E-mail: lhj@sjziam.ac.cn
收稿日期: 2010−07−07 接受日期: 2010−09−08

施用氮肥是农业生产中最快、最有效和最重要的增产措施，但大量氮肥的施用却造成了严重的环境污染，硝酸盐淋失成为农田面源污染的主要成分[1]。在保障粮食产量的前提下进行氮肥的调控施用，需加强作物氮素营养诊断和推荐施肥技术的研究。长期以来，植物氮素营养诊断大都采用室内分析方法，通过测定植株或土壤中各形态氮素(如全氮、碱解氮、硝态氮等)的含量进行推荐施肥[2−4]。该测试方法耗时费力，成本高且时效性差，很难满足大面积农田生产的需求[5]。因此无损快速的作物氮素状态诊断与推荐施肥技术如便携式叶绿素仪(SPAD)[6]、遥感技术(包括高广谱、可见光及高空遥感)[7−9]等越来越受到关注并获得深入研究和应用。

作物冠层颜色与其氮素营养状况密切相关，因此，可见光光谱分析技术在作物氮素营养诊断中的应用受到重视，特别是随着数码相机和具有照相功能手机的普及，应用数字图像技术进行氮素营养诊断成为可能[10−11]。王晓静等[12]利用数码相机获取棉花冠层图像，研究发现图像的绿光值(G)及绿光与红光比值(G/R)可作为棉花氮素营养的诊断指标；李井会等[10]利用数字图像的绿光与蓝光比值(G/B)对马铃薯的氮素营养进行诊断；贾良良[11]对利用数字图像进行小麦氮素营养诊断进行了系统研究，认为相机拍摄时与冠层的角度、太阳光照强度、图像存储格式及分辨率、农田灌溉与否等都不会影响到利用照片的色彩参数对小麦氮素营养的诊断。

在诸多利用数字图像进行作物氮素营养诊断的研究中，数字图像的处理方法均是利用 Adobe Photoshop 软件，通过直方图程序读取图像红、绿、蓝 3 个通道的中间值然后进行相关参数计算[9−12]。由于作物具有不同的冠层空间几何结构[13]，不同结构的叶片会引起可见光谱的很大差异。Adobe Photoshop 软件的直方图程序无法将不同叶片加以区分，通过其获得的是混合叶面的光谱信息，用其诊断作物氮素状态必然存在一定误差。因此，本研究在利用数字图像进行冬小麦氮素营养诊断的研究中，尝试将图像中的不同叶片进行分类，分别研究不同叶面光谱信息对冬小麦氮素营养状况的反映，并与 Adobe Photoshop 软件的处理结果比较，以提高对冬小麦氮素营养诊断的准确性。

1 材料与方法

1.1 试验设置

试验在中国科学院栾城农业生态系统试验站(N37°50′, E114°40′)进行。该试验站位于华北太行山前平原，土壤为潮褐土。种植制度以冬小麦–夏玉米轮作为主，且实施了秸秆还田。为研究不同供氮水平下作物冠层的颜色反应，结合该试验站已有的多年氮肥试验，增加设置了多个施氮水平[kg(N)·hm^{-2}·$季^{-1}$]的对比试验。试验设置包括自 1997 年开始的 0、100、200、300，2004 年开始的 0、50、100、150、200、300 以及 2008 年开始的 0、50、100、150、200、250 各施氮水平处理。每组试验的每个处理磷肥用量相同[65 kg(P)·hm^{-2}]，于小麦播种前施用。

1.2 测试项目与方法

于 2009 年冬小麦返青期(4 月上旬)和拔节期(4 月下旬)分别观测小麦叶片 SPAD 值和植株全氮含量。其中 SPAD 值用 SPAD-502 叶绿素仪测定，在每个处理田块随机测定 30 株小麦完全展开叶的 SPAD 值，并计算获得其平均值。在每个处理田块随机选取 30 株小麦，用半微量凯氏法测定植株全氮含量，取得其平均值。

1.3 数字图像获取

参照文献[10−11]，在晴天太阳高度角相对稳定的 12:00~13:00 之间，用佳能 EOS400D 数码相机进行拍照。拍照时距离地面 1.2 m，通过手动调节使相机与地面冠层约呈 60°角，以自动曝光模式拍照。图像采用 1 024×768 分辨率以 JPEG 格式保存。

1.4 数字图像处理方法

数字图像的处理采用 2 种方法。一种是不考虑小麦叶片结构差异对成像的影响，利用 Adobe Photoshop 软件进行处理。首先选中没有土壤背景的小麦冠层图像，通过选择“选取相似”功能剔除图像中的土壤背景，利用软件的直方图功能读取红、绿、蓝 3 个通道的图像平均值，用于计算其他色彩参数。另一种方法是利用遥感图像处理软件 PCI Geomatics 进行处理。首先将图像转存成 pix 格式，同时增加 1 个空的通道用于图像分类结果的存放。利用该软件提供的图像分类功能，采用非监督分类的方法，将图像分为 3 类：土壤、反光叶面和不反光叶面。以分类结果作为掩模，将土壤图像抛弃，通过编程分别计算反光叶片和不反光叶片图像的红、绿、蓝 3 个通道的平均值。

1.5 图像色彩参数与小麦氮素营养关系分析方法

利用不同图像处理方法可以获得小麦叶片的红光值 R、绿光值 G 和蓝光值 B。通过这 3 个色彩参数的组合运算，可以获得多种色彩参数。参考同类研究对色彩参数的选择，本文选取红光值 R、绿光值 G、蓝光值 B、绿光与红光比值 G/R、绿光与蓝光比值 G/B、红光标准化值 R/(R+G+B)、绿光标准化值 G/(R+G+B)和蓝光标准化值 B/(R+G+B) 8 种色彩参数对其与作物氮素状态的相关性进行研究。

结合不同数字图像处理方法，将 8 种色彩参数分别与同时测得的小麦叶片 SPAD 值、植株硝酸盐浓度与全氮含量进行相关性分析，通过回归方程决定系数(R^2)的高低选择可以诊断小麦氮素营养的色彩参数，并对 2 种数字图像处理方法进行比较。

2　结果与分析

2.1　小麦数字图像分类

在一定的光照条件下，处于不同姿态的小麦叶片会对光线产生不同的反射，因而在图像中表现为不同的亮度和色调。图 1a 为随机选择的 1 幅小麦图片，图中包括土壤和小麦冠层，其中小麦叶片在亮度与色调上表现出很大差异，部分叶片因反光表现出较高的亮度，而其他叶片颜色则较暗。PCI Geomatics 是专业的遥感图像处理软件，本文利用其非监督分类功能，自动将图像分为土壤、反光叶面(亮度较高)和不反光叶面(亮度较暗)3 类(图 1b)。利用数字图像进行小麦氮素营养诊断的依据是叶片颜色的差异，而小麦叶片姿态不同会在图像中表现出不同的颜色。利用分类结果作为掩膜，分别提取不反光叶片和反光叶片图像，计算红、绿、蓝色彩参数的平均值。同时利用 Adobe Photoshop 软件获得混合叶片的红、绿、蓝色彩参数(表 1)。不同类别叶片间色彩参数存在较大差异，其中反光叶片的数值最高，不反光叶片的数值最低，而利用 Adobe Photoshop 软件处理的结果居中。

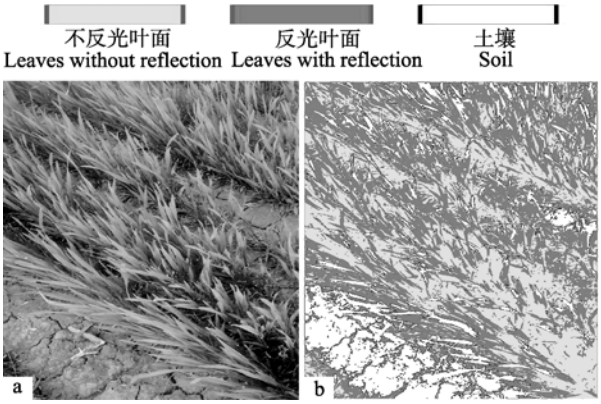

图 1　利用 **PCI** 软件进行分类前**(a)**、后**(b)**的小麦图像
Fig. 1　Wheat digital images before (a) and after (b) classification by using PCI software

表 **1**　不同图像处理方法获得的小麦图像红**(R)**、绿**(G)**、蓝**(B)**色彩参数比较
Tab. 1　Values of R, G and B of wheat digital images processed with different methods

叶片类型 Leaves class	色彩参数 Color parameter		
	R	G	B
不反光叶片 Leaves without reflection	56.56	103.18	64.75
反光叶片 Leaves with reflection	99.98	143.98	104.02
混合叶片 All leaves[1)]	79.99	125.20	85.94

1) Adobe Phototshop 处理的小麦图像的叶片 Leaves of wheat images were processed with Adobe Photoshop. 下同 The same below.

2.2　返青期小麦色彩参数分析

由于植株叶绿素含量与其氮素营养状况密切相关，叶绿素测定仪作为一种简便、非破坏性测定叶片相对叶绿素含量的仪器在植株氮素诊断中得到广泛应用。本研究在冬小麦返青期对叶片 SPAD 值进行测量，同时利用上述 2 种方法对小麦数字图像进行处理，获得小麦不同类别叶片的 8 种色彩参数。将 SPAD 值分别与这 8 种色彩参数进行线性相关分析，以各色彩参数与 SPAD 值线性回归方程的决定系数(R^2)为评价其相关性的指标，不同图像处理方法各参数对小麦氮素营养反映的差异如图 2 所示。

图 2 表明，在由数字照片获得的小麦叶片 8 种色彩参数中，与小麦叶片 SPAD 值相关性较好的 3 种参数为 B、G/R 与 R/(R+G+B)。不同图像处理方法获得的色彩参数与小麦叶片 SPAD 值的相关性也存在差异。在相关性较好的 3 种参数中，反光叶片的 G/R(R^2=0.774)、R/(R+G+B) (R^2=0.773)及混合叶片的 R/(R+G+B)(R^2=0.735)与 SPAD 值的相关性最强。整体看，反光叶片的色彩参数与 SPAD 值相关性最好，其次是利用 Adobe Photoshop 软件处理获得的

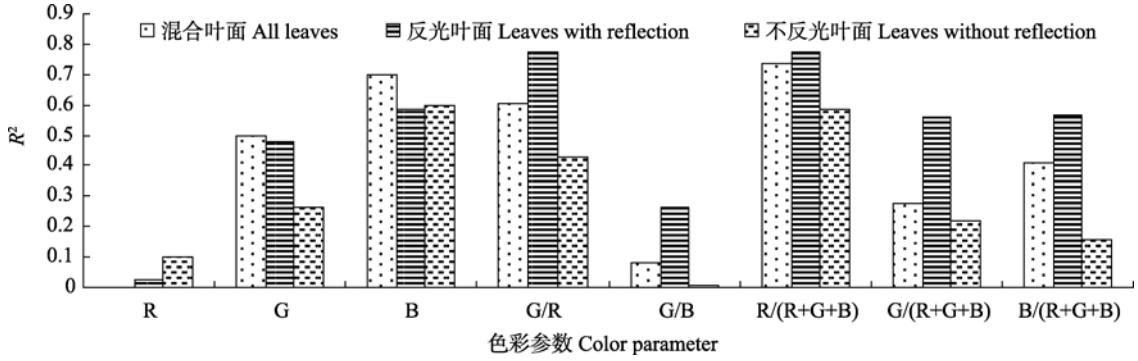

图 **2**　小麦返青期不同类别叶片 **SPAD** 值与 **8** 种色彩参数的相关性
Fig. 2　Correlation coefficients between color parameters and SPAD values of wheat in reviving stage

混合叶片，而不反光叶片对植株氮素营养的反映最差。从图 3 可以看出，反光叶片 G/R 与 SPAD 值极显著相关(P<0.01)，表明利用该色彩参数可以较好地替代 SPAD 进行小麦氮素营养诊断。

2.3 拔节期小麦色彩参数分析

将小麦拔节期所测得的 SPAD 值与植株硝酸盐浓度和全氮含量进行相关性分析，发现 SPAD 值与二者相关性较差(R^2 分别为 0.085 与 0.13)，表明 SPAD 值不再能很好地反映小麦的氮素营养状况。本研究选择植株全氮作为小麦氮素营养状况的指标与各类色彩参数进行相关性分析，其相关方程的决定系数如图 4 所示。

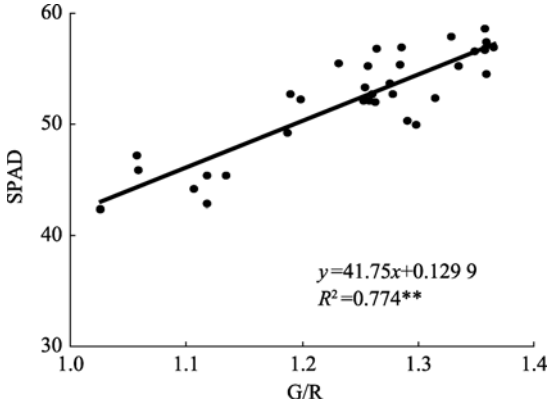

图 3 反光叶片 G/R 与 SPAD 值的关系

Fig. 3 Correlation between SPAD values and G/R of leaves with reflection

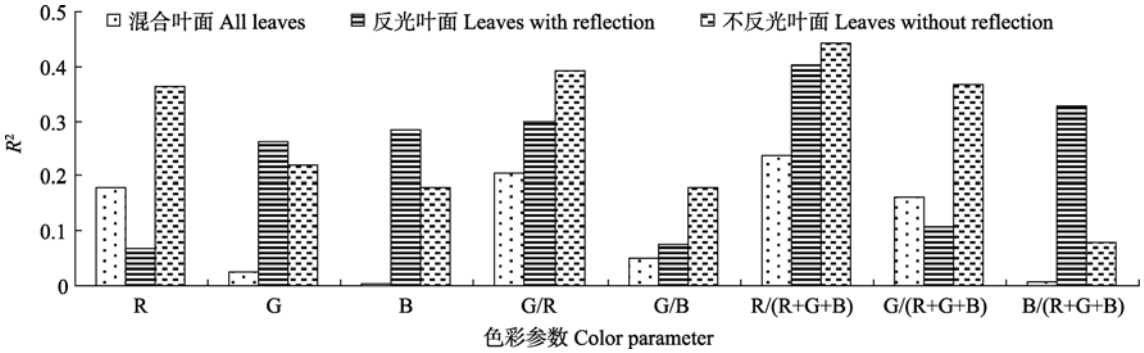

图 4 小麦拔节期植株全氮与 8 种色彩参数的相关性

Fig. 4 Correlation coefficients between color parameters and total nitrogen content of wheat in jointing stage

图 4 与图 2 相比，小麦拔节期 8 种色彩参数与小麦氮素营养状况的相关性普遍降低。不同图像处理方法得到的色彩参数中，混合叶面的色彩参数与植株全氮的相关性最差，而不反光叶面的色彩参数与植株全氮的相关性最好，反光叶面次之。在这些色彩参数中，不反光叶面的 R、G/R、R/(R+G+B)与 G/(R+G+B)与植株全氮相关性较好，其中决定系数最高的是 R/(R+G+B)(R^2=0.444)。反光叶面的 R/(R+G+B)参数与植株全氮也具有较好的相关性

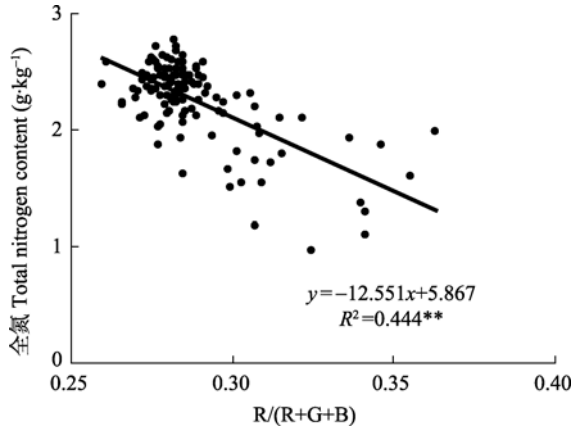

图 5 不反光叶片 R/(R+G+B)参数与植株全氮的关系

Fig. 5 Correlation between total nitrogen content and R/(R+G+B) of leaves with reflection

(R^2=0.400)。通过比较，可以选择不反光叶面或反光叶面的 R/(R+G+B)作为拔节期小麦氮素营养状况的诊断指标。从图 5 可以看出，拔节期不反光小麦叶面 R/(R+G+B)与植株全氮的相关性达到极显著水平(P<0.01)，小麦拔节期可以通过该参数利用数字照片进行小麦氮素营养状况诊断。

3 结论与讨论

自古以来，我国农民就有依靠作物颜色深浅判断其营养状况的经验。近年来，利用可见光遥感进行作物生长状况和营养诊断成为研究热点，但受图像处理技术的限制，作物冠层照片色彩参数的获得方法多是采用普通图像处理软件，如 Adobe Photoshop、Paint Shop Pro、Micrografx Picture Publisher 等[12]。这些软件简单易用，但在处理手段上过于简单无法获得更为细节的色彩参数信息。与普通图像处理软件相比较，本研究利用专业遥感软件对小麦数字图像进行了简单分类，在剔除土壤图像的基础上能够将小麦叶面分为反光叶面与不反光叶面，结合返青期和拔节期对试验田小麦氮素营养状况的观测，比较了 8 种色彩参数与 SPAD 值、植株全氮的相关性。研究发现：返青期小麦反光叶面的 G/R 与

R/(R+G+B)能较好地反映小麦的氮素营养状况; 拔节期不反光叶面与反光叶面的 R/(R+G+B)与植株全氮相关性较好; 利用 Adobe Photoshop 软件处理后获得的混合叶面的 8 种色彩参数虽与小麦氮素状态存在相关性, 但因其决定系数偏低均未被选择作为诊断小麦氮素营养的指标。可见, 在利用数字图像进行作物氮素营养诊断中, 普通的图像处理方法有待改进, 图像分类后能够提高对作物氮素营养诊断的准确性。

随着数码相机和多功能手机的普及, 利用数字照片进行作物氮素诊断将有广阔应用前景, 但要达到实际应用的目标, 仍有许多问题需要解决, 如作物品种间色彩参数的差异、数字照片分析方法的程序化和仪器化、作物不同氮素营养状态判定指标的确定等, 都需要进一步的研究。

参考文献

[1] 张庆忠, 陈欣, 沈善敏. 农田土壤硝酸盐积累与淋失研究进展[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 233–238

[2] 赵俊晔, 于振文. 不同土壤肥力条件下施氮量对小麦氮肥利用和土壤硝态氮含量的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 815–822

[3] 于亮, 陆莉. 冬小麦氮素营养诊断的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(10): 2861–2863

[4] 冯伟, 朱艳, 姚霞, 等. 小麦氮素积累动态的高光谱监测[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 1937–1946

[5] 李桂娟, 朱丽丽, 李井会. 作物氮素营养诊断的无损测试研究与应用现状[J]. 黑龙江农业科学, 2008(4): 127–129

[6] 李刚华, 薛利红, 尤娟, 等. 水稻氮素和叶绿素 SPAD 叶位分布特点及氮素诊断的叶位选择[J]. 中国农业科学, 2007, 40(6): 1127–1134

[7] 程一松, 郝二波. 氮素胁迫下的冬小麦高光谱特征提取与分析[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 86–93

[8] 鲍艳松, 王纪华, 刘良云, 等. 不同尺度冬小麦氮素遥感监测方法及其应用研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 139–144

[9] 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

[10] 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

[11] 贾良良. 应用数字图像技术与土壤植株测试进行冬小麦氮营养诊断[D]. 北京: 中国农业大学, 2003

[12] 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

[13] 赵春江, 黄文江, 王纪华, 等. 用多角度光谱信息反演冬小麦叶绿素含量垂直分布[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 104–109