中国生态农业学报 2018 年 4 月 第 26 卷 第 4 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Apr. 2018, 26(4): 538−546

**DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180184**

夏莎莎, 张聪, 李佳珍, 李红军, 张玉铭, 胡春胜. 基于手机相机获取冬小麦冠层数字图像的氮素诊断与推荐施肥研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(4): 538−546

XIA S S, ZHANG C, LI J Z, LI H J, ZHANG Y M, HU C S. Study on nitrogen nutrition diagnosis and fertilization recommendation of winter wheat using canopy digital images from cellphone camera[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(4): 538−546

# 基于手机相机获取冬小麦冠层数字图像的氮素诊断与推荐施肥研究*

夏莎莎[1], 张 聪[3], 李佳珍[2], 李红军[2], 张玉铭[2**], 胡春胜[2]

(1. 中国科学院生态环境研究中心 北京 100085; 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/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 3. 华北制药集团爱诺有限公司 石家庄 050000)

**摘 要:** 本文利用不同型号手机、通过不同拍摄角度获取冬小麦拔节期冠层图像, 并对其图像进行色彩参数的提取、处理与分析, 与传统小麦氮素营养指标进行相关性分析, 筛选出敏感色彩参数, 对二者进行拟合建模, 建立了冬小麦氮素营养诊断指标体系和推荐施肥指标体系, 为作物精准施肥提供参考。研究结果表明, 在获取冬小麦冠层图像时, 适宜从逆光俯视的角度拍摄, 不同型号的手机拍照获取的冠层图像色彩参数没有明显差异, 冠层图像色彩参数中可见光大气阻抗植被指数(VARI)及红光标准化值[R/(R+G+B)]与传统诊断指标叶片 SPAD 值、茎基部硝酸盐浓度均有显著的相关关系; 其中 VARI 最为敏感, 可作为冬小麦氮素营养诊断的色彩参数指标, 诊断方程为冬小麦茎基部硝酸盐浓度=$1.481\times10^{6}\times\mathrm{VARI}^{4.987}$, 依据此给出了不同 VARI 值下的冬小麦营养状况以及推荐施氮量。并基于此研究成果进行了手机软件开发, 建立了一款针对冬小麦氮素营养诊断与推荐施肥的软件, 为基于手机相机开展冬小麦氮素营养诊断与推荐施肥技术的推广与应用提供了技术支撑。

**关键词:** 冬小麦; 精准施肥; 手机相机; 冠层图像; 色彩参数; 氮素营养诊断

**中图分类号:** S126; S512 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)04-0538-09

# Study on nitrogen nutrition diagnosis and fertilization recommendation of winter wheat using canopy digital images from cellphone camera*

XIA Shasha[1], ZHANG Cong[3], LI Jiazhen[2], LI Hongjun[2], ZHANG Yuming[2**], HU Chunsheng[2]

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Water-saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China; 3. North China Pharmaceutical Group Aino CO., LTD, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** Digital cameras have been successfully used in nutrition diagnosis of crops. Few researches were reported on the

* 国家重点研发计划项目(2016YFD0200307)、河北省科技计划项目(14227423D)和渤海粮仓现代农业区域科技示范项目(KFJ-STS-ZDTP-001)资助

** 通信作者: 张玉铭, 研究方向为农田生态系统养分循环。E-mail: ymzhang@sjziam.ac.cn
夏莎莎, 研究方向为分析化学。E-mail: ssxia@rcees.ac.cn

收稿日期: 2017-12-15 接受日期: 2018-02-01

* This study was supported by the National Key Research and Development Plan of China (2016YFD0200307), the Science and Technology Project of Hebei Province (14227423D), and the Science and Technology Demonstration of Modern Agriculture in Bohai Granary Region of China (KFJ-STS-ZDTP-001).

** Corresponding author, E-mail: ymzhang@sjziam.ac.cn

Received Dec. 15, 2017; accepted Feb. 1, 2018

application of cellphone cameras on nutrition diagnosis and precision fertilization of crops, though the cellphone cameras have various advantages, such as portability, handleability and universality. In this study, we used Samsung and Xiaomi smart cellphones to photograph winter wheat canopy at jointing stage from four shooting angles, frontlighting looking down, frontlighting overlooking, backlighting looking down and backlighting overlooking. The color parameters of achieved winter wheat canopy images were extracted, processed and analyzed. And their correlations with traditional nitrogen nutrition indexes were analyzed. According to the statistical analysis of the correlation, appropriate color parameters were selected, and the nutrition diagnosis model was established with color parameters and nitrogen nutrition index. Then the model was fitted to establish indicator systems of diagnosis of nitrogen nutrition and recommendation system of fertilization for winter wheat. The aim of the study was to provide references for application of smart cellphone on precision fertilization of crops. The results showed that there was no remarkable difference in the color parameters of canopy images taken with different types of smart cellphones. However, a certain difference was observed in color parameters of canopy images taken from different shooting angles. More than half of color parameters of canopy images taking from the view of backlighting overlooking were significantly correlated with traditional nutrient indexes. Furthermore, the results indicated that the color parameters VARI [(G−R)/(G+R−B)] and R/(R+G+B) both had outstanding correlations with leaf SPAD and stem nitrate concentration. And VARI was found to be the best, and therefore, selected as the sensitive color parameter for winter wheat nitrogen nutrition diagnosis. The diagnosis model was stem nitrate concentration = $1.481\times10^{6}\times\mathrm{VARI}^{4.987}$. According to the equation, the nitrogen nutrition status of winter wheat was normal when VARI was between 0.201 3 and 0.250 9. The nitrogen application rates under different VARI values were calculated for different target yields of winter wheat. The results were applied to develop cellphone software for nitrogen nutrition diagnosis and fertilization recommendation of winter wheat. In summary, it was possible and applicable to take photographs of canopy from the view of backlighting overlooking with smart cellphone and extract VARI color parameter to diagnosis nitrogen nutrition status. The results provided technical support for the diagnosis of nitrogen nutrition and recommendation of fertilization of winter wheat based on cellphone camera.

**Keywords:** Winter wheat; Precision fertilization; Cellphone camera; Canopy image; Color parameters; Diagnosis of nitrogen nutrition

施用氮肥是农业生产中最快、最有效以及最重要的增产手段，因此氮肥成为化学肥料中使用量最大的一类，但是过量施用不仅增加成本还会降低养分利用率，而且过剩的氮肥流失到环境中，也会对生态环境造成严重污染[1-3]。粮食是关系到国计民生的重大问题，生态环境污染也是人们日益关注的焦点，如何协调二者的矛盾，农业部提出了《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》，将精准施肥作为优化氮肥施用量的重要手段之一[4]。精准施肥的顺利开展离不开对作物营养诊断技术的研究。传统的作物营养诊断采用田间采样、实验室化验的方法，成本高且时效性差，难以满足随时监测作物及田间追肥的需求，也难以在广大农村推广普及。近年来，随着数字图像技术的日益成熟，越来越多的研究开始聚焦在应用数字图像分析技术对作物进行氮素营养诊断方面[5-7]。利用作物冠层图像色彩参数分析其氮素营养状态的方法已经被应用到了多种作物上。张立周等[7-8]研究了基于数码相机获取冬小麦(*Triticum aestivum*)、夏玉米(*Zea mays*)冠层图像的色彩参数与传统氮素营养指标之间的相关性，筛选出了绿光标准化值和蓝光标准化值分别作为诊断其氮素营养状态的敏感色彩参数。王连君等[9]在对葡萄(*Vitis vinifera*)的研究分析中发现了绿光与蓝光的比值可作为葡萄氮素营养诊断的指标。诸多研究表明了数字图像分析技术在作物氮素营养诊断方面的可行性。但是，目前在实际应用中，基于数字图像分析的农作物氮素营养诊断与推荐施肥技术仍然存在无法大范围推广与普及的不足，如何实现随时随地、快速准确地获取作物的营养状况并进行精量推荐施肥，是该技术进一步发展过程中面临的阻碍。已有的研究中，数码相机已经被频繁地应用到对作物进行营养诊断的技术方法中[7,10-12]，但却缺乏利用手机相机的便携性、易操作性以及普遍性等优点。

因此，基于上述研究基础和应用需求，本研究利用不同型号的手机相机，通过不同拍摄角度获取冬小麦冠层数字图像，分析手机相机拍照方式对冠层数字图像色彩参数的影响，结合传统氮素营养指标的检测，筛选出适宜的敏感色彩参数，建立反演小麦氮素营养指标的拟合模型，确立营养诊断指标并提供施肥推荐,从而实现通过智能手机拍照对作物的精准推荐施肥。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验设计

试验在中国科学院栾城农业生态系统试验站(37.88°N, 114.68°E)开展，该站海拔高度 50.1 m，属于暖温带半湿润季风气候，土壤为潮褐土，种植制

度以冬小麦-夏玉米轮作制为主。为了研究不同程度氮素缺乏对小麦叶片颜色上的影响差异，选择自1997 年开始的肥料定位试验地，供试小麦种植品种为‘科农 199’。试验设定 4 个氮肥水平：0 kg(N)·hm$^{-2}$·a$^{-1}$、200 kg(N)·hm$^{-2}$·a$^{-1}$、400 kg(N)·hm$^{-2}$·a$^{-1}$和 600 kg(N)·hm$^{-2}$·a$^{-1}$; 3 个磷肥水平: 0 kg(P)·hm$^{-2}$·a$^{-1}$、32.5 kg(P)·hm$^{-2}$·a$^{-1}$和 64 kg(P)·hm$^{-2}$·a$^{-1}$; 2 个钾肥水平: 0 kg(K)·hm$^{-2}$·a$^{-1}$和 150 kg(K)·hm$^{-2}$·a$^{-1}$。试验采用正交不完全设计共选出 16 个处理，每个处理 3 次重复，共计 48 个样区。因为考虑到磷肥严重短缺给作物带来的影响，本研究只选择了施用磷肥的样区，共计 33 个。

### 1.2 分析测试项目

所有测试项目于小麦拔节期(2016 年 4 月 8 日)进行，包括叶片叶绿素含量(SPAD 数值)和茎基部硝酸盐浓度。每个样区随机选定 30 株小麦，利用 SPAD-502 叶绿素仪测定小麦第 1 片完全展开叶中部的 SPAD 值，取其平均值作为该样区的 SPAD 数值；同样每个样区选择 30 株小麦，采用反射仪和硝酸盐试纸测定小麦茎基部硝酸盐浓度。

### 1.3 冠层图像获取方法

本研究采用手机相机拍照获取冬小麦冠层数字图像。为研究不同型号手机从不同角度拍摄的冠层图像中色彩参数的差异，以及这些色彩参数对不同氮素营养水平下小麦叶片色彩变化反映的敏感程度，设计了对比试验:

1)手机型号：选用三星和小米这两款具有拍照功能的智能手机，依次对所有试验处理的小麦冠层进行拍照。

2)拍摄角度：采取了顺光垂直向下、顺光俯视(与冠层呈 60°夹角)、逆光垂直向下、逆光俯视(与冠层呈 60°夹角)4 个角度分别对每一选定小区进行拍照，拍照高度距冠层 1 m。

图 1 为 4 幅不同拍摄角度获取的小麦冠层图像。从视觉效果上可以看出不同角度下同一麦田图像在色调、叶片状态、阴影分布等方面存在较大差异。

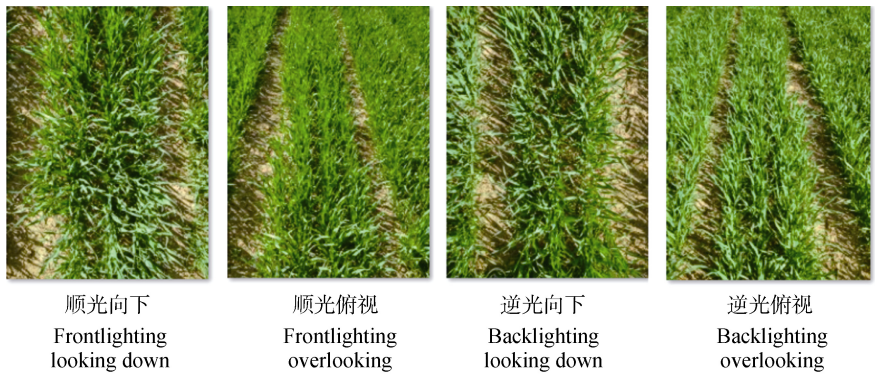


**图 1 不同拍摄角度智能手机拍摄的冬小麦冠层图片**

Fig. 1 Illustrations of winter wheat canopy photographs taken from different angles with smart cellphone

### 1.4 作物冠层图像处理与色彩参数分析

作物冠层数字图像中存在红(R)、绿(G)、蓝(B)3 个色彩通道，不同色彩反映了小麦叶片差异，因而可作为作物营养状况的诊断指标。但实际拍摄过程中，存在日照强弱和非作物图像的干扰，例如土壤、落叶、叶片遮挡形成的阴影等，为了提高获取的色彩参数的精确度，在色彩参数分析过程中需要剔除这些干扰因素。我们利用遥感图像分析功能通过建模的方法对图像的色彩参数进行自动化处理：首先，考虑到日照强弱对照片成像色彩的影响，初步对红绿蓝 3 色光进行标准化处理，如绿光(G)标准化为 G/(R+G+B)，其他以此类推；其次剔除非作物图像干扰，通过对比分析，确立剔除非植被像素的指标，选择绿光标准化值[G/(R+G+B)]、红光标准化值[R/(R+G+B)]以及红光(R)3 个色彩参数对图像中的非植被像素进行过滤剔除，过滤规则为：G/(R+G+B)>0.37 AND R/(R+G+B)<0.42 AND R>20，其中 R>20 用于剔除阴影，剔除由于遮挡造成光线过弱、图像特别偏暗的像素。

通过对干扰因素的剔除，只留下正常小麦叶片的色彩像素，然后再次进行各个像素 R、G、B 色彩参数的标准化值计算，并引入可见光大气阻抗植被指数[(G−R)/(G+R−B)，VARI]，最后进行整幅图像各色彩参数的平均值统计，用于供筛选作物氮素营养诊断的色彩参数指标。

## 2 结果与分析

### 2.1 拍摄方式与手机型号对冠层图像色彩参数的影响

在冬小麦冠层图像的获取过程中，可能存在着拍摄角度和手机相机种类不同引起图像色彩参数差

异的因素。依照基本的光学原理, 光线在单一介质中沿直线传播, 会在遇到的物体表面发生反射和折射, 同理适用在作物的冠层表面。当从不同的角度进行拍摄时, 作物冠层被拍摄到的部位有所不同, 从而导致获得的图像中色彩参数有可能存在差异。不同手机相机由于像素性能等参数的不同, 获得图像的分辨率也会有差异。因此研究不同拍摄方式和不同性能手机是否会对作物冠层图像的色彩参数造成影响, 有利于更加充分地了解和建立作物营养诊断指标体系, 为该技术的推广应用与普及提供科学依据。

拍摄方式对冬小麦冠层图像色彩参数影响的分析结果见表 1。统计表明, R、G、B 受不同拍摄方式的影响较大, 各拍摄方式间存在显著性差异($P$<0.05)。将单色光色彩参数进行比值运算后特别是标准化后可大大降低色彩参数在不同拍摄姿态间的差异性, R/(R+G+B)在 4 个拍摄方式间均无显著差异($P$>0.05), 表现最为稳定; 而 G/(R+G+B)、B/(R+G+B)和 G/R 只是在逆光向下时显著有别于其他姿态, 顺光向下、顺光俯视和逆光俯视 3 种姿态间无显著性差异。VARI 亦受到拍摄姿态的影响, 表现为不受光线方向的影响, 只受拍摄角度的影响, 即: 无论是逆光还是顺光, 只要选择垂直向下或者是与冠层成 60°夹角的俯视拍摄, VARI 就会相对稳定。这些结果说明, 拍摄冬小麦冠层图像时, 不是所有角度的结果都一致, 应尽量维持在同一拍摄姿态, 从而保证所获取的数字图像色彩参数数据的稳定性, 减少随机误差; 另外, 色彩参数通过比值运算后能够在一定程度上减弱单色彩通道变化的影响。在利用手机相机拍照进行冬小麦氮素营养诊断选择色彩参数时, 可以优先考虑 R/(R+G+B), 其次为其他比值运算后的参数。

**表 1　智能手机的拍摄方式对冬小麦冠层图像色彩参数的影响**

Table 1　Color parameters of winter wheat canopy photographs taken from different shooting angles with smart cellphone

| 色彩参数 Color parameter | 顺光向下 Frontlighting looking down | | | 顺光俯视 Frontlighting overlooking | | | 逆光向下 Backlighting looking down | | | 逆光俯视 Backlighting overlooking | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 平均值 Average | 标准差 Std. | 变异系数 CV | 平均值 Average | 标准差 Std. | 变异系数 CV | 平均值 Average | 标准差 Std. | 变异系数 CV | 平均值 Average | 标准差 Std. | 变异系数 CV |
| R | 105.131b | 7.999 | 0.076 | 100.671a | 14.686 | 0.146 | 89.23c | 11.023 | 0.124 | 98.65a | 15.611 | 0.158 |
| G | 146.933b | 8.028 | 0.055 | 134.35a | 13.461 | 0.100 | 135.661a | 6.769 | 0.050 | 134.044a | 12.804 | 0.096 |
| B | 77.830b | 15.244 | 0.196 | 71.142a | 5.955 | 0.084 | 48.169c | 12.593 | 0.261 | 68.48a | 6.259 | 0.091 |
| R/(R+G+B) | 0.314a | 0.024 | 0.076 | 0.324a | 0.025 | 0.078 | 0.318a | 0.027 | 0.086 | 0.321a | 0.025 | 0.078 |
| G/(R+G+B) | 0.475a | 0.032 | 0.068 | 0.472a | 0.023 | 0.048 | 0.532b | 0.044 | 0.082 | 0.48a | 0.025 | 0.052 |
| B/(R+G+B) | 0.212a | 0.046 | 0.219 | 0.205a | 0.032 | 0.154 | 0.15b | 0.05 | 0.334 | 0.198a | 0.032 | 0.159 |
| G/R | 1.573a | 0.134 | 0.085 | 1.528a | 0.161 | 0.105 | 1.767b | 0.233 | 0.132 | 1.574a | 0.172 | 0.109 |
| VARI | 0.244a | 0.051 | 0.208 | 0.212b | 0.058 | 0.271 | 0.268a | 0.060 | 0.225 | 0.223b | 0.059 | 0.262 |

同行中平均值后不同字母表示不同拍摄角度下获得的数字图像色彩参数差异显著($P$<0.05)。Different lowercase letters in the same line after the average values mean significant differences among the color parameters of photograph taking from different shooting angles ($P$ < 0.05).

为了进一步印证拍摄方式和手机相机性能是否对图像的色彩参数产生影响, 在 4 个不同拍摄角度(顺光向下、顺光俯视、逆光向下、逆光俯视)下, 对两种型号手机的图像色彩参数进行了比较, 结果列于表 2。统计分析表明, 逆光向下拍摄获取的图像中, 两款手机间无显著性差异($P$>0.05)的色彩参数有 3 个: R、R/(R+G+B)和 VARI; 顺光俯视和逆光俯视角度的数据中 R/(R+G+B)和 VARI 2 个色彩参数均不存在显著性差异; 顺光向下角度中 R 和 VARI 无显著性差异。4 种拍摄方式下 VARI 在两款手机相机间均无显著性差异($P$>0.05), 表明该参数具有很好的稳定性; R/(R+G+B)除了在顺光向下姿态拍摄时两款手机相机间达到了统计学上的显著性差异外, 其他拍摄姿态下两款手机相机间亦均无显著性差异, 这表明, R/(R+G+B)也具有一定的稳定性。图 2 比较了不同拍摄姿态下两款手机相机获取的色彩参数相关性(在此只给出了具有显著相关性的色彩参数), 可以看出, 两种性能手机获取的色彩参数中, 不同拍摄姿态下 R、VARI 和 R/(R+G+B)均存在着极显著的正线性相关关系, 而 VARI 和 R/(R+G+B)两款手机相机间相关性显著优于单色光红光(R); 再次表明利用不同型号手机相机在不同拍摄姿态下获取的作物冠层数字图像的 VARI 和 R/(R+G+B)这两个色彩参数具有较好的稳定性。从拍摄姿态对两款手机相机获取的色彩参数的相关性影响来看, 以俯视拍摄时相关性较高, 特别是逆光俯视拍摄相关性最高。

尽管不同拍摄姿态和不同型号手机相机获取的数字图像色彩参数存在着高度的相关性，但在实际应用该技术进行作物氮素营养诊断时，拍摄姿态应尽量保持一致，宜选择距作物冠层 1 m 高度、成 60°夹角的逆光俯视拍摄；在色彩参数选择时，宜于选择 VARI 与 R/(R+G+B)这两个较稳定的参数。

**表 2 不同型号手机对冬小麦冠层图像色彩参数的影响**

Table 2 Color parameters of winter wheat canopy photographs taken with different types of smart cellphone

| 色彩参数平均值 Average of color parameter | 顺光向下 Frontlighting looking down | | 顺光俯视 Frontlighting overlooking | | 逆光向下 Backlighting looking down | | 逆光俯视 Backlighting overlooking | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 三星手机 Samsung | 小米手机 Xiaomi | 三星手机 Samsung | 小米手机 Xiaomi | 三星手机 Samsung | 小米手机 Xiaomi | 三星手机 Samsung | 小米手机 Xiaomi |
| R | 103.289a | 106.918a | 91.727a | 107.492b | 89.553a | 87.312a | 91.834a | 105.466b |
| G | 141.766a | 151.943b | 122.437a | 144.686b | 132.712a | 138.227b | 124.248a | 143.841b |
| B | 88.596a | 67.390b | 73.104a | 70.097b | 58.661a | 38.050b | 71.199a | 65.761b |
| R/(R+G+B) | 0.306a | 0.321b | 0.316a | 0.328a | 0.312a | 0.320a | 0.315a | 0.328a |
| G/(R+G+B) | 0.446a | 0.502b | 0.452a | 0.490b | 0.493a | 0.574b | 0.460a | 0.501b |
| B/(R+G+B) | 0.248a | 0.177b | 0.232a | 0.183b | 0.196a | 0.106b | 0.225a | 0.172b |
| G/R | 1.507a | 1.636b | 1.489a | 1.581b | 1.644a | 1.921b | 1.522a | 1.627b |
| VARI | 0.249a | 0.240a | 0.224a | 0.210a | 0.269a | 0.276a | 0.231a | 0.216a |

同一拍摄角度下同一行中不同字母表示两种手机间色彩参数存在显著差异($P$<0.05)。Different lowercase letters in the same line under the same shooting angle mean significant differences between color parameters of photograph took by two types of smart cellphones ($P$ < 0.05).

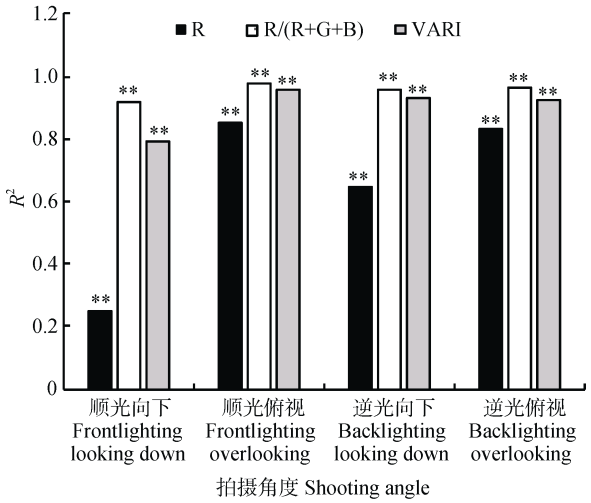


**图 2 三星和小米智能手机从不同拍摄角度获得的冬小麦冠层图像色彩参数的相关性**

Fig. 2 Correlations between Samsung and Xiaomi smart cellphones in color parameters of wheat canopy photographs taken from different shooting angles

**表示三星和小米手机图像的色彩参数间在 $P$<0.01 水平显著相关。"**" means significant correlations at $P$ < 0.01 between photographs taken with Samsung and Xiaomi smart cellphones.

## 2.2 小麦氮素营养诊断敏感色彩参数的选择

将所选择的 8 个色彩参数 R、G、B、R/(R+G+B)、G/(R+G+B)、B/(R+G+B)、G/R、VARI 分别与叶片 SPAD 值、冬小麦茎基部硝酸盐浓度进行相关性分析，结果见表 3。从表 3 可知，R、G/R、R/(R+G+B)以及 VARI 与传统诊断指标叶片 SPAD 和茎基部硝酸盐浓度无论是在何种拍摄方式下均呈现出显著或极显著相关关系；而 G、B、G/(R+G+B)、B/(R+G+B)与传统诊断指标间相关性较弱，只部分存在显著相关性。比较两种传统诊断指标与色彩参数的相关性，SPAD 与各色彩参数的相关性略优于小麦茎基部硝酸盐浓度；统观各色彩参数与传统诊断指标的相关性，以 VARI 及 R/(R+G+B)与传统诊断指标的相关性最高。因此，基于数字图像分析技术利用手机相机进行小麦氮素营养诊断时，这两个参数均可作为指标体系建立的备选参数。

营养诊断指标体系建立时，需以传统诊断指标作为参照，与色彩参数建立数量关系，从而获得基于数字图像分析技术的作物氮素营养诊断指标体系。叶片 SPAD 值一般通过手持式叶绿素仪测定，该仪器可以快速、无损、简便地对植物叶绿素相对含量进行测定，有着广泛的应用范围[13-15]。但是 SPAD 值的读取受光强的影响较大，需要通过多次多点测定取得平均值，以降低可能出现的变异性；SPAD 值还容易受到很多因素的影响，从而导致测试结果误差的增加[16-18]。而茎基部硝酸盐浓度为选取多株小麦主茎榨汁测得，具有相对较好的代表性和稳定性，因此本研究选择茎基部硝酸盐浓度作为参照指标参与营养诊断指标体系的确立。

在色彩参数指标选择时，除了考虑与传统诊断指标具有很好的相关性外，还应具备较宽泛的数据范围，以避免色彩参数发生微小的变化而引起较大的营养等级变化。VARI 和 R/(R+G+B)与茎基部硝酸

盐浓度均显著相关，以 VARI 略好；而且从表 1 可以看出，VARI 的变异系数远大于 R/(R+G+B)，故 R/(R+G+B)的数据离散度差于 VARI，从而出现不确定性的几率增高。所以 VARI 比 R/(R+G+B)更适合用于小麦氮素状态的反演。图 3 表明不同角度下 R/(R+G+B)与 VARI 均呈现极显著的相关关系，从两个色彩参数数据变幅来看，VARI 变幅宽于 R/(R+G+B)，进一步表明宜选择 VARI 作为营养诊断的指标参数。

在确定拍摄方式时，除了考虑所获取的色彩参数的稳定性外，还应与传统诊断指标具有很好的相关性。从表 3 可以看出，在逆光俯视拍摄方式下，超过半数的色彩参数与传统营养指标的相关性最好，其中包括 VARI。因此，在基于手机相机获取冬小麦冠层数字图像进行氮素营养诊断时，建议拍摄姿态选择逆光俯视，以 VARI 作为敏感色彩参数来反演小麦的茎基部硝酸盐浓度。

**表 3**　智能手机获得的不同拍摄方式下冬小麦冠层图像色彩参数与氮素营养指标的关系

Table 3　Correlation coefficients ($R^2$) between nitrogen nutrient indexes and color parameters of wheat canopy photographs taken from different shooting angles with smart cellphone

| 色彩参数 Color parameter | 顺光向下 Frontlighting looking down | | 顺光俯视 Frontlighting overlooking | | 逆光向下 Backlighting looking down | | 逆光俯视 Backlighting overlooking | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | SPAD | 植株硝酸盐 Plant nitrate concentration | SPAD | 植株硝酸盐 Plant nitrate concentration | SPAD | 植株硝酸盐 Plant nitrate concentration | SPAD | 植株硝酸盐 Plant nitrate concentration |
| R | 0.431** | 0.308** | 0.198** | 0.146* | 0.490** | 0.495** | 0.700** | 0.510** |
| G | 0.264* | 0.208* | 0.063 | 0.026 | 0.045 | 0.085 | 0.386** | 0.148 |
| B | 0.276** | 0.170 | 0.492** | 0.274* | 0.086 | 0.065 | 0.031 | 0.017 |
| R/(R+G+B) | 0.784** | 0.629** | 0.559** | 0.461** | 0.552** | 0.635** | 0.875** | 0.726** |
| G/(R+G+B) | 0.001 | 0.003 | 0.013** | 0.025 | 0.026 | 0.015 | 0.231* | 0.140 |
| B/(R+G+B) | 0.265** | 0.139 | 0.348** | 0.141 | 0.094 | 0.085 | 0.103 | 0.062 |
| G/R | 0.674** | 0.420** | 0.427** | 0.374** | 0.400** | 0.347** | 0.866** | 0.653** |
| VARI | 0.816** | 0.718** | 0.509** | 0.447** | 0.571** | 0.655** | 0.888** | 0.759** |

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

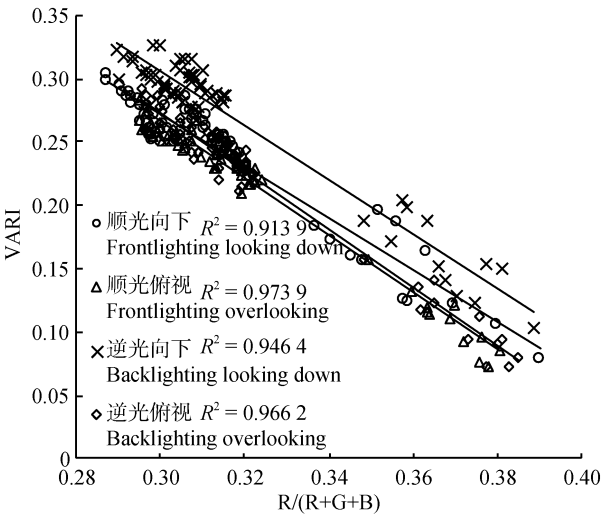


**图 3**　智能手机获得的不同拍摄方式下冬小麦冠层图像 **VARI** 与 **R/(R+G+B)**的线性相关性

Fig. 3　Linear correlation between VARI and R/(R+G+B) of winter wheat canopy photographs taken from different shooting angles with smart cellphone

### 2.3　氮素营养诊断模型及推荐施肥指标

将逆光俯视角度下的 VARI 数值与同步检测的冬小麦茎基部硝酸盐浓度进行回归建模，获得基于手机相机拍摄冬小麦冠层图像进行氮素营养诊断的数学模型，如图 4 所示。VARI 与茎基部硝酸盐浓度呈现较好的幂函数相关性，通过拟合得到的冬小麦手机拍照进行氮素营养诊断的方程为：冬小麦茎基部硝酸盐浓度=$1.481\times10^6\times\text{VARI}^{4.987}$。基于这一诊断方程，可利用小麦冠层图像的 VARI 值，计算冬小麦茎基部硝酸盐浓度，以此为依据，判断冬小麦的营养状况；同时，结合冬小麦的目标产量，以基于冬小麦茎基部硝酸盐浓度推荐施肥的指标体系为依据[19]，反演推算以 VARI 为诊断指标的推荐施肥量，建立基于数字图像分析的推荐施肥指标体系，从而实现精准施肥。表 4 给出了基于 VARI 的冬小麦氮素营养诊断指标和不同目标产量下氮肥追肥量，可以看出，通过手机获得的冬小麦冠层图像 VARI 值存在两个临界值，当 VARI<0.201 3 时，冬小麦处于供氮不足状态，VARI>0.250 9 时，冬小麦处于供氮过量状态。

### 2.4　氮素营养诊断的手机软件研发

目前智能手机在我国农村已经普及，为基于手机的农业信息化软件提供了推广基础。以上述研究结果为基础，设计开发了一套适用于安卓系统手机的软件系统，在河北省部分地区进行了推广和应用，

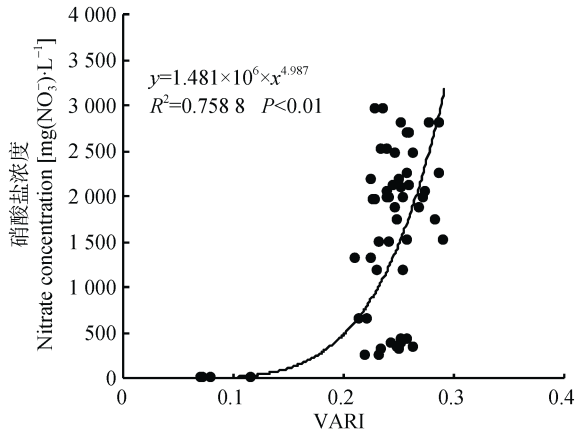


**图 4 智能手机逆光俯视角度拍摄的冬小麦冠层图像 VARI 与茎基部硝酸盐浓度的拟合曲线**

Fig. 4 Fitted curve of VARI of winter wheat canopy photographs taken at backlighting overlooking view with smart cellphone and stem sap nitrate concentration of winter wheat

受到用户的好评。系统采用 JAVA 语言进行开发，利用 SQLite 数据库将不同目标产量、不同 VARI 数值下的氮素推荐指标进行存储，同时采用插值方法获得连续的氮肥推荐量。系统开发完成后生成下载二维码，便于对用户进行推广。用户通过手机扫描二维码后完成在安卓系统智能手机的下载与安装，按照本研究推荐的方法(图 5)，在小麦拔节期对冠层在逆光俯视角度下进行拍照，点击“分析”按钮，系统会提示用户输入该田块的目标产量(单位：斤/亩)。系统获得目标产量后，利用上文提到的剔除非叶片像素的过滤规则对整幅图像的所有像素进行逐一判读，筛选出符合要求的叶片像素，形成 0 和 1 数据的掩码文件，其中 1 表示小麦叶片像素，0 表示其他地物。然后系统利用 R、G、B 3 个色彩通道的数据计算出各像素的 VARI，并对其进行累计求和然后计算出整幅图像叶片像素 VARI 的平均值。结合用户设定的目标产量，从推荐施肥指标库中查询出氮肥推荐量的计算方法，计算获得尿素追施量(图 5)。软件的操作较为简单，利用了用户智能手机自带的照相功能，便于农户在零成本条件下的使用。在培训中发现农户很容易按照软件提示学会使用，逐步操作即可实现在田间对小麦氮素营养状态的即时诊断，并据此即可实现对小麦的精准追肥，方便快捷。

**表 4 基于智能手机获得的冠层图像 VARI 的冬小麦氮素营养诊断指标与推荐追肥指标**

Table 4 Nitrogen diagnosis and recommended topdressing amounts of nitrogen fertilizer for winter wheat under different VARI ranges of canopy photographs of smart cellphone

| VARI | <0.201 3 | 0.201 3~0.218 4 | 0.218 4~0.231 3 | 0.231 3~0.241 9 | 0.241 9~0.250 9 | >0.250 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 营养状况 Nitrogen nutrition status | 极低 Very low | 低 Low | 中 Moderate | 高 High | 较高 Higher | 极高 Very high |
| 目标产量 Yield target (t·hm$^{-2}$) | 推荐施氮量 Recommended topdressing amount of nitrogen fertilizer [kg(N)·hm$^{-2}$] | | | | | |
| 7.50~8.25 | 178 | 139~178 | 99~139 | 60~99 | 21~60 | 21 |
| 6.75~7.50 | 162 | 126~162 | 90~126 | 55~90 | 19~55 | 19 |
| 6.00~6.75 | 153 | 119~153 | 84~119 | 50~84 | 17~50 | 17 |
| 5.25~6.00 | 146 | 114~146 | 81~114 | 50~81 | 15~50 | 15 |
| 4.50~5.25 | 104 | 80~104 | 56~80 | 31~56 | 7~31 | 7 |

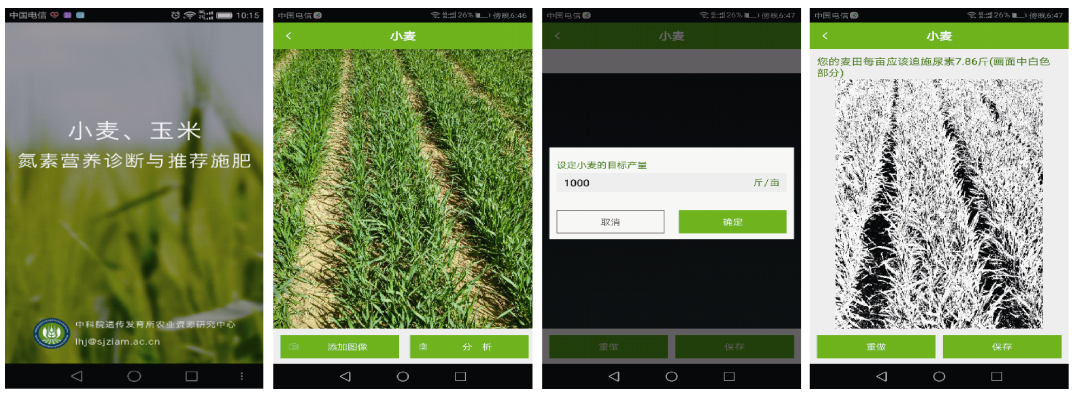


**图 5 小麦、玉米智能手机拍照进行氮素营养诊断与推荐施肥的软件界面**

Fig. 5 Interfaces of the smart cellphone software for diagnosis of nitrogen nutrition and recommended topdressing amount of nitrogen fertilizer based on wheat and corn canopy photographs taken with smart cellphone

## 3 结论

针对我国化肥过量施用问题, 农业部提出了《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》, 为了达到这一目标, 精准施肥是其中重要的技术手段之一。对作物进行准确、可操作性强的植株养分实时诊断, 并且推荐与之相适应的施肥量, 是实现精准施肥的重要保障。目前, 作物氮素营养诊断方法有很多种, 外观诊断法历史由来已久, 易操作, 但准确度不够, 易受人为因素影响; 叶绿素仪测定 SPAD 的方法虽然方便快捷, 但 SPAD 值受光照影响较大, 且需多次测量多个位点计算平均值, 并存在一定的饱和现象。而数码相机、手机相机的广泛使用, 使得应用数字图像技术对作物进行光谱学分析, 进而追踪作物氮素营养状态, 实现无损诊断的方式成为研究热点[20-23]。目前已经有不少通过数码相机等手段进行氮素营养分析、建模、建立推荐施肥体系等的研究, 但是通过手机相机随时随地在农田内进行拍照、获取作物营养状态和推荐施肥量等的研究尚不多见。

面对这样的需求, 本研究利用不同类型智能手机从不同拍摄角度在小麦拔节期对其冠层进行拍照, 针对冬小麦的冠层图像, 在敏感色彩参数和适宜传统氮素营养指标方面进行分析、筛选, 得出了以下结论: 在逆光俯视的角度下, 使用没有指向性选择的手机相机对冬小麦冠层进行拍照, 得到的冠层图像中的色彩参数 VARI 与作物的传统氮素指标相关性显著, 可以根据 VARI 与冬小麦茎基部硝酸盐浓度的拟合曲线, 通过图像的 VARI 值反演茎基部硝酸盐浓度, 从而最终得出植株营养状态以及氮肥推荐量。

对于目前应用数字图像分析技术实施氮素营养诊断的方法, 虽然取得了一系列的研究成果, 但仍然有一些亟待解决的问题, 比如针对不同作物品种的图像色彩参数的选取、图像色彩参数与传统营养指标的拟合建模、便捷方法的大范围推广与应用等等。对于本研究而言, 目前只针对冬小麦这一种作物的单一品种进行了研究, 尚未研究小麦其他品种间的差异性、以及不同作物间的相关性与区别。对于开发的手机软件, 尚需进一步优化, 并进行推广应用。本研究的后续工作将针对上述内容做深入研究, 进一步完善手机拍照在氮素营养诊断与精准施肥方面的应用。

## 参考文献 References


[1] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259−273
ZHU Z L, JIN J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition & Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259−273

[2] 赵荣芳, 陈新平, 张福锁. 基于养分平衡和土壤测试的冬小麦氮素优化管理方法[J]. 中国农学通报, 2005, 21(11): 211−225
ZHAO R F, CHEN X P, ZHANG F S. Study on nitrogen optimized management at different growing stage of winter wheat based on nutrient balance and soil test[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(11): 211−225

[3] CUI Z L, CHEN X P, MIAO Y X, et al. On-farm evaluation of winter wheat yield response to residual soil nitrate-N in North China Plain[J]. Agronomy Journal, 2008, 100(6): 1527−1534

[4] 中华人民共和国农业部. 到 2020 年化肥使用量零增长行动方案[J]. 青海农技推广, 2015(2): 3−5, 11
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. The action plan for zero-growth of fertilizer use by 2020[J]. Qinghai Agricultural Technology Promotion, 2015(2): 3−5, 11

[5] 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]. 农业信息科学, 2008, 24(8): 448−453
XIAO Y B, JIA L L, CHEN X P, et al. N status diagnosis of winter wheat by using digital image analysis technology[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(8): 448−453

[6] 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: 14−43
JIA L L. Diagnosis of N status of winter wheat using digital image processing and soil-plant testing techniques[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003: 14−43

[7] 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
ZHANG L Z, WANG D W, ZHANG Y M, et al. Diagnosis of N nutrient status of corn using digital image processing technique[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(6): 1340−1344

[8] 张立周, 侯晓宇, 张玉铭, 等. 数字图像诊断技术在冬小麦氮素营养诊断中的应用[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1168−1174
ZHANG L Z, HOU X Y, ZHANG Y M, et al. Diagnosis of the state of N in wheat via digital image processing technique[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1168−1174

[9] 王连君, 宋月. 应用数字图像技术对葡萄进行氮素营养诊断的研究[J]. 农业科技通讯, 2017(7): 186−189
WANG L J, SONG Y. Study on the nitrogen nutrition diagnosis of grape using digital image processing technique[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2017(7): 186−189

[10] 李井会, 朱丽丽, 宋述尧. 应用数字图像技术进行马铃薯氮素营养诊断的研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(6): 3303−3305
LI J H, ZHU L L, SONG S Y. Diagnosis of N status of potato using digital image processing technique[J]. Journal of Anhui

Agriculture Science, 2012, 40(6): 3303−3305

[11] 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
WANG J, LEI Y W, ZHANG Y S, et al. Diagnosis of cotton N status using digital image analysis technique[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(1): 145−149

[12] 魏全全, 李岚涛, 任涛, 等. 基于数字图像技术的冬油菜氮素营养诊断[J]. 中国农业科学, 2015, 48(19): 3877−3886
WEI Q Q, LI L T, REN T, et al. Diagnosing nitrogen nutrition status of winter rapeseed via digital image processing technique[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(19): 3877−3886

[13] 胡昊, 白由路, 杨俐苹, 等. 基于 SPAD-502 与 GreenSeeker 的冬小麦氮营养诊断研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 748−752
HU H, BAI Y L, YANG L P, et al. Diagnosis of nitrogen nutrition in winter wheat (*Triticum aestivum*) via SPAD-502 and GreenSeeker[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 748−752

[14] 党蕊娟, 李世清, 穆晓慧, 等. 施氮对半湿润农田夏玉米冠层氮素及叶绿素相对值(SPAD 值)垂直分布的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 54−59
DANG R J, LI S Q, MU X H, et al. Effect of nitrogen on vertical distribution of canopy nitrogen and chlorophyll relative value (SPAD value) of summer maize in sub-humid areas[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1): 54−59

[15] 李鹏程, 董合林. 叶绿素仪在棉花氮肥推荐中的研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(21): 92−97
LI P C, DONG H L. A review on chlorophyll meter application on nitrogen fertilizer recommendation for cotton[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(21): 92−97

[16] 李志宏, 张云贵, 刘宏斌. 叶绿素仪在夏玉米氮营养诊断中的应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6):764−768
LI Z H, ZHANG Y G, LIU H B. Application of chlorophyll meter on N nutritional diagnosis for summer corn[J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2005, 11(6): 764−768

[17] 金军, 徐大勇, 胡曙云, 等. 叶绿素仪穗肥诊断及其在水稻优质栽培中的应用[J]. 耕作与栽培, 2003(2): 14−15
JIN J, XU D Y, HU S Y, et al. Diagnosis of panicle fertilizer with chlorophyll meter and its application in high quality cultivation of rice[J]. Tillage and Cultivation, 2003(2): 14−15

[18] 童淑媛, 宋凤斌. SPAD 值在玉米氮素营养诊断及推荐氮肥中的应用[J]. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25(2): 233−238
TONG S Y, SONG F B. Application of SPAD value on N nutritional diagnosis and fertilization recommendation[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2009, 25(2): 233−238

[19] 张福锁. 测土配方施肥技术要览[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006
ZHANG F Q. A Review of Soil Testing and Fertilizer Recommendation Technique[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006

[20] TUMBO S D, WAGNER D G, HEINEMANN P H. Hyperspectral characteristics of corn plants under different chlorophyll levels[J]. Transactions of Asae, 2002, 45(3): 815−823

[21] 薛利红, 曹卫星. 基于冠层反射光谱的水稻群体叶片氮素状况监测[J]. 中国农业科学, 2003, 36(7): 807−812
XUE L H, CAO W X. Diagnosis of nitrogen status in rice leaves with the canopy spectral reflectance[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(7): 807−812

[22] JIA L L, CHENG X P. 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

[23] 刘宏斌, 张云贵, 李志宏, 等. 光谱技术在冬小麦氮素营养诊断中的应用研究[J]. 中国农业科学, 2004, 37(11): 1743−1748
LIU H B, ZHANG Y G, LI Z H, et al. Application of canopy spectral reflectance in monitoring nitrogen status of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(11): 1743−1748