

# 数字图像技术估测冬油菜氮素营养 拍摄参数标准化研究

魏全全<sup>1,2</sup>, 李岚涛<sup>1,2</sup>, 任涛<sup>1,2</sup>, 王振<sup>3</sup>, 王少华<sup>3</sup>,  
李小坤<sup>1,2</sup>, 丛日环<sup>1,2</sup>, 鲁剑巍<sup>1,2\*</sup>

(1 华中农业大学微量元素研究中心, 武汉 430070; 2 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070;  
3 湖北省武穴市农业局, 湖北武穴 435400)

**摘要:** 【目的】数字图像技术可以用来快速无损地预测冬油菜的氮素营养, 建立标准化的拍摄参数获取方法, 可为不同作物、不同型号相机间结果的互用提供依据。【方法】以冬油菜为试验材料, 设置不同氮肥水平 (N: 0、90、180、270 和 360 kg/hm<sup>2</sup>) 田间试验, 于苗期 (移栽后 79~83 天), 利用数码相机 (Nikon-D7000, 1620 万像素) 以不同光照强度、时间、高度、角度、照片像素尺寸和拍摄模式进行拍摄, 并以不同储存格式进行保存。比较了不同拍摄条件下获取的冠层数字图像信息差异显著性, 同时测定植株地上部生物量、叶片氮浓度和叶绿素浓度, 分析冠层图像数字化指标 (红光标准化值, NRI) 与测定的氮素营养指标之间的相关性。【结果】晴天与阴天获取的冠层 NRI 均可较好的表达冬油菜冠层数字信息, 晴天效果稍好于阴天; 中午获取的冠层 NRI 与叶片氮浓度相关系数为 -0.802\*\*, 优于上午和下午; 1.5、2.0 和 2.5 m 拍摄高度获取的冠层 NRI 差异不显著; 30°、60°和 90°拍摄角度下获取的冠层 NRI 与地上部生物量、叶片氮浓度和叶绿素浓度的相关性均达到极显著水平, 30°~60°时获取冠层数码信息可操作性较强; 拍摄模式为自动曝光模式获取冠层 NRI 与叶片氮浓度的相关系数为 -0.802\*\*, 高于其他拍摄模式; 三种照片像素尺寸 (4928 × 3264、3696 × 2448 和 2464 × 1632) 下获取的冠层 NRI 差异不大; 储存格式为 JPEG 精细格式时获取的冠层 NRI 优于其他储存格式。【结论】综合分析认为, 数字图像技术估测冬油菜氮素营养指标最佳操作范围为拍摄时间为晴天太阳高度角相对较大的中午; 拍摄高度为近地面均可; 拍摄角度为易于操作的 30°~60°; 相机拍摄模式为自动曝光模式; 照片像素尺寸为图片相对较为清晰的高分辨率; 存储格式为压缩格式且占用空间较小的 JPEG 精细格式。本研究为无人机低空遥感的氮素营养无损诊断技术提供了理论技术基础。

**关键词:** 冬油菜; 数码相机; 冠层图像; 拍摄参数

中图分类号: S126; S565 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2016)06-1701-09

## Standardization of shooting parameters of digital image technique to estimate nitrogen concentration of winter rapeseed

WEI Quan-quan<sup>1,2</sup>, LI Lan-tao<sup>1,2</sup>, REN Tao<sup>1,2</sup>, WANG Zhen<sup>3</sup>, WANG Shao-hua<sup>3</sup>,  
LI Xiao-kun<sup>1,2</sup>, CONG Ri-huan<sup>1,2</sup>, LU Jian-wei<sup>1,2\*</sup>

(1 Microelement Research of Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2 Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtse River), Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China;  
3 Wuxue Bureau of Agriculture, Wuxue, Hubei 435400, China)

**Abstract:** 【Objectives】 Digital image technique is useful for rapid and non-destructive prediction of nitrogen concentration of winter rapeseed. The establishment of the standardization of the shooting parameters can provide the basis for the interaction of different crops and camera models. 【Methods】 Winter rapeseed was used in

收稿日期: 2015-09-10 接受日期: 2016-01-26

基金项目: 国家自然科学基金 (31471941); 国家油菜产业技术体系建设专项 (CARS-13); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201103003) 资助。

作者简介: 魏全全 (1987—), 男, 山东济宁人, 硕士, 主要从事作物营养与现代施肥技术研究。

E-mail: weiquan0725@webmail.hzau.edu.cn. \* 通信作者 E-mail: lunm@mail.hzau.edu.cn

field experiment with five nitrogen application rates (N: 0, 90, 180, 270 and 360 kg/hm<sup>2</sup>). The canopy pictures of winter rapeseed were obtained in different light intensities, times, heights, angles, pixels, modes and image formats by using digital camera (Nikon-D7000, 1620 million pixels) at the seedling stage (79–83 days after transplanting). Significant analyses of canopy digital normalized redness intensity (NRI) were also made in different imagery modes. Other conventional diagnosis parameters, such as aboveground biomass, leaf nitrogen and leaf chlorophyll concentration were determined to reveal their correlations to NRI. **【 Results 】** Canopy NRI acquired either at sunny or cloudy days could interpret digital information of canopy well, however, it was slightly better in sunny days than cloudy days. The correlation coefficient between NRI and leaf nitrogen concentration was  $-0.802^{**}$  at noon, better than those in the morning and afternoon. No significant difference was observed among three image height of 1.5, 2.0 and 2.5 m. It showed very prominent relationships between NRI obtained in three image angles (30°, 60° and 90°) and aboveground biomass, leaf nitrogen concentration and chlorophyll concentration, however, it was more convenient to get canopy NRI at 30°–60°. The correlation coefficient between NRI and leaf nitrogen concentration was  $-0.802^{**}$  at auto exposure mode, higher than other exposal models. No significant difference was observed among three photo pixels (4928 × 3264, 3696 × 2448 and 2464 × 1632). NRI in JPEG fine format was superior to other image formats. **【 Conclusions 】** Overall, the optimal operating range of digital image technique to estimate nitrogen nutrition index of winter rapeseed was followed: the best shooting time is sunny noon because of its relatively greater solar elevation angle and stable light, the image can be taken at any height near the ground, it is easy to operate at the image angle of 30°–60°, the shooting mode should be automatic exposure mode, the photo pixel is better in relatively clear and high resolution, and the images saved in compressed JPEG accurate format with less space occupying is recommended. Our study provides a theory and technique foundation of digital image technique on non-destructive nitrogen diagnostic using low-altitude unmanned aerial vehicles remote sensing.

**Key words:** winter rapeseed; digital camera; canopy image; shooting parameter

油菜是我国重要的油料作物之一，发展油菜生产对促进国民经济发展和维持国家食用油安全有重要意义<sup>[1]</sup>。氮素是油菜重要养分限制和产量影响因素<sup>[2]</sup>，油菜生育期内氮素吸收不均，主要集中在营养生长阶段，苗期需要较多的氮素营养以形成强大的叶片群体<sup>[3]</sup>，蕾薹期氮素营养分配中心则转移至地上部<sup>[4]</sup>。因而冬油菜氮素营养的诊断应具备诊断结果可靠、操作简单易行、数据获取迅速等基本要点，及时诊断氮素营养的丰缺，进而可以快速准确地追肥。传统的作物氮素营养诊断主要以实验室分析为主，结果准确但过程繁琐且具有破坏性和延时性，不利于快速诊断<sup>[5]</sup>，难以满足大面积农田精准农业实时、准确和便捷的测试要求。数码相机作为可见光遥感最便捷的工具之一，以其快速、无损和准确等优点得到快速的发展和广泛的应用<sup>[6–9]</sup>。然而应用数码相机进行作物氮素营养诊断受气象因素<sup>[10–11]</sup>和相机拍摄参数等多方面影响，作物冠层图像估测参数主要沿用固定或原有技术获取，对相机拍摄参数的研究相对较少。如何获得较为准确的作物冠层信息是

应用数字图像技术估测作物氮素营养之关键，获取高质量的数字图像是建立作物氮素营养参数和估测模型的前提和保障。前人研究证明数字图像技术对作物的氮素营养估测诊断是可行的，并且对小麦、蔬菜和棉花等的拍摄参数的规范做了系统讨论。贾良良<sup>[12]</sup>通过对冬小麦的冠层图像信息的研究，认为拍摄角度、光照强度、相机分辨率和储存格式不影响冬小麦数字图像的色彩参数及其对冬小麦的氮素营养诊断。张立周等<sup>[13]</sup>利用数码相机以不同角度获取冬小麦冠层数字图像信息，证明拍摄角度不会对色彩参数有显著影响。Huang 等<sup>[14]</sup>对小麦叶绿素含量进行估测，研究表明  $\pm 20^\circ$  和  $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$  和  $\pm 40^\circ$ 、 $\pm 50^\circ$  和  $\pm 60^\circ$  分别可以作为底层、中层和上层叶绿素的反演角度。王秀峰<sup>[15]</sup>对番茄和黄瓜的研究表明，拍摄角度、光照强度和拍摄时间对田间作物冠层数码信息的获取影响不大，都能够准确的反映田间氮素供应水平。王娟等<sup>[16]</sup>在不同拍摄角度、天气和高度下获取的棉花冠层特征光谱参数值没有显著性差异。明确不同拍摄参数获取冬油菜冠层数字图像的

方法, 为不同作物冠层图像获取方法的研究提供可操作性参考。本试验以冬油菜为试验材料, 通过系统研究数码相机不同光照强度、拍摄时间、拍摄高度、拍摄角度、拍摄模式、相机分辨率和储存格式等拍摄参数对冬油菜植株生长和氮素营养指标估测的影响, 明确可操作的冬油菜冠层图像获取方法, 为不同作物的类似研究提供可操作性参考, 并且为冬油菜大区域、大尺度的无人机低空遥感氮素快速无损诊断技术提供理论与实践基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验于 2014 年 9 月至 2015 年 5 月在湖北省武穴市梅川镇进行。试验田块土壤为水稻土, 基本理化性状为: pH 5.13、全氮 1.56 g/kg、有机质 27.22 g/kg、速效磷 12.48 mg/kg、速效钾 149.09 mg/kg、有效硼 0.25 mg/kg。

供试油菜品种为‘华油杂 9 号’, 种植方式为移栽种植。试验田块前茬作物为水稻。

供试肥料品种分别为尿素 (N 46%)、过磷酸钙 ( $P_2O_5$  12%)、氯化钾 ( $K_2O$  60%)、硼砂 (B 11%)。

### 1.2 试验设计

试验共设 5 个处理, 施氮量分别为 0、90、180、270 和 360 kg/hm<sup>2</sup>, 分别用 N0、N90、N180、N270 和 N360 表示。小区面积 30 m<sup>2</sup> (15.0 × 2.0 m), 3 次重复, 随机区组排列。整个生育期内其它肥料施用量均保持一致, 分别为  $P_2O_5$  90 kg/hm<sup>2</sup>、 $K_2O$  120 kg/hm<sup>2</sup> 和硼砂 15 kg/hm<sup>2</sup>。为保证油菜生长过程中连续观测与测定参数不受因施肥时间及量的影响, 本研究所有肥料均做基肥一次性施用。

冬油菜于 2014 年 9 月 23 日播种育苗, 10 月 24 日移栽, 密度为  $1.125 \times 10^4$  plant/hm<sup>2</sup>, 于 2015 年 5 月 6 日统一收获。除种植方式和施肥措施不同外, 试验进程及其他田间生产管理均采用当地农业技术推广部门的推荐技术。

### 1.3 测定项目

课题组已有研究结果表明, 数字图像技术估测冬油菜氮素营养的最佳时期为蕾薹期前均可, 最佳冠层数码光谱参数为红光标准化值 NRI, 最佳氮素营养估测方程模型为直线方程函数<sup>[7]</sup>。基于此, 本试验选取苗期(移栽后 79~83 天)作为观测时期, 同时选取冠层红光标准化值 NRI 进行研究, 以直线方程函数为氮素估测方程模型。

1.3.1 地上部生物量的测定 取上述时期各小区有代表性冬油菜 6 株, 105℃ 下杀青 30 分钟, 60℃ 烘箱烘至恒重, 记录干重, 依次折算地上部生物量。

1.3.2 叶绿素浓度的测定 分别于上述时期内各小区选取代表性冬油菜 6 株, 取新鲜叶片, 用化学方法 80% 丙酮和 95% 乙醇 2 : 1 混合液法浸提叶绿素, 分光光度计测定叶绿素浓度<sup>[18]</sup>。

1.3.3 叶片氮浓度的测定 取用上述试验剩余的代表性叶片, 105℃ 下杀青 30 min, 60℃ 烘箱中烘至恒重, 用  $H_2SO_4-H_2O_2$  法消化, AA3 流动注射分析仪测定叶片氮浓度<sup>[19]</sup>。

1.3.4 数字图像数据的获取与处理 于上述时期, 采用数码相机 (Nikon-D7000, 1620 万像素) 在不同光照强度 (除阴天拍摄外, 其他拍摄均在晴天进行)、拍摄时间、拍摄高度、拍摄角度、拍摄模式、照片像素尺寸和储存格式下获取冬油菜冠层数字信息, 获取方法如下:

1) 光照强度 在冬油菜相同生长期晴天 (移栽后 79~81 天) 和阴天 (移栽后 83 天), 距冠层垂直高度为 1.5 m, 将数码相机与地面调节为 60°, 设置照片像素尺寸为 4928 × 3264, 以自动曝光模式在每个小区各拍摄 3 张照片, JPEG 精细格式保存。

2) 拍摄时间 距冠层垂直高度为 1.5 m, 将数码相机与地面调节到 60°, 设置照片像素尺寸为 4928 × 3264, 于上午 (9:00 ~ 10:00)、中午 (12:00 ~ 13:00) 和下午 (15:00 ~ 16:00) 以自动曝光模式对每小区各拍摄 3 张照片, JPEG 精细格式保存。其中, 上午和下午拍摄时分别从不同太阳光入射方向 (顺光和逆光) 进行拍摄, 获取不同太阳入射角度的冬油菜冠层 NRI。

3) 拍摄高度 设定拍摄高度距冠层分别为 1.5 m、2 m 和 2.5 m, 将数码相机与地面调节到 60°, 设置照片像素尺寸为 4928 × 3264, 以自动曝光模式在每个小区各拍摄 3 张照片, JPEG 精细格式保存。

4) 拍摄角度 距冠层垂直高度为 1.5 m, 将数码相机与地面调节为 30°、60° 和 90°, 设置照片像素尺寸为 4928 × 3264, 以自动曝光模式在每个小区各拍摄 3 张照片, JPEG 精细格式保存。

5) 拍摄模式 距冠层垂直高度为 1.5 m, 将数码相机与地面调节到 60°, 设置照片像素尺寸为 4928 × 3264, 以自动曝光模式、场景 (风景) 模式和场景 (近摄) 模式对每个小区各拍摄 3 张照片, JPEG 精细格式保存。

6) 照片像素尺寸 距冠层垂直高度为 1.5 m, 将数码相机与地面调节到 60°, 设定相机照片像素尺寸

分别为  $4928 \times 3264$ 、 $3696 \times 2448$  和  $2464 \times 1632$ ，以自动曝光模式在每个小区各拍摄 3 张照片，JPEG 精细格式保存。

7) 储存格式 距冠层垂直高度为 1.5 m，将数码相机与地面调节到  $60^\circ$ ，设置照片像素尺寸为  $4928 \times 3264$ ，设定图像储存格式分别为 NEF(RAW)格式、JPEG 精细格式和 JPEG 标准格式，以自动曝光模式在每个小区各拍摄 3 张照片。

数码相片获取时，每个小区拍摄 3 张照片，每张数码照片覆盖面积约为  $4 \text{ m}^2$ ，总计覆盖面积约为  $12 \text{ m}^2$ 。本试验条件下冬油菜(移栽后 79~83 天)植株相对较大，且种植密度也较高，其冠层基本覆盖土壤背景，土壤背景对结果影响较小。图像色彩信息的获取采用 Adobe Photoshop 7.0 软件，具体步骤为：将照片直接导入 Adobe Photoshop 7.0 软件，依次点击“图像”、“直方图”，获取冠层图像的红光值 R(redness intensity)、绿光值 G(greenness intensity)和蓝光值 B(blueness intensity)。红光标准化值(NRI)计算如下：

红光标准化值(NRI, normalized redness intensity):

$$\text{NRI} = R / (R + G + B)$$

#### 1.4 数据处理与分析

数据处理与分析采用 Microsoft Excel 2003 及 SPSS 17.0 进行，LSD 法检验  $P < 0.05$  水平上的差异显著性；制图采用 Origin 8.0 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮肥施用对冬油菜生长和氮素营养指标的影响

施氮能显著提高冬油菜地上部生物量、叶片氮浓度和叶绿素浓度(表 1)。与对照(N0)相比，随施氮量增加，地上部生物量呈现先增加后降低趋势，且在 N270 处理达到最大值；叶片氮浓度和叶绿素浓度则随着施氮量的增加呈现升高趋势，均在 N360 处理达到最大值。

### 2.2 不同拍摄参数对冬油菜冠层光谱参数的影响

2.2.1 光照强度对数字图像处理结果的影响 晴天与阴天拍摄的图像所得到的冠层 NRI 之间达到极显著直线相关关系(图 1)，其相关系数为  $r = 0.977^{**}$ ，说明在两种天气条件下，利用数码相机获取的冠层数字图像都能很好的表达田间冬油菜冠层的数码信息，没有较大差异。

进一步分析晴天和阴天与叶片氮浓度之间的相关性(图 2)，两种天气下冠层 NRI 与叶片氮浓度之间

表 1 不同氮素水平冬油菜地上部生物量，叶片氮浓度和叶绿素浓度

Table 1 Aboveground biomass and the N and chlorophyll content in leaves of winter rapeseed as affected by nitrogen treatments

处理 Treatment	生物量 Biomass (kg/hm <sup>2</sup> )	氮浓度 N content (g/kg)	叶绿素浓度 Chl. content (mg/g)
N0	505 cB	23.67 cB	0.82 cC
N90	1386 bAB	23.99 cB	0.96 bBC
N180	2153 aA	28.07 bcAB	1.27 aAB
N270	2235 aA	30.08 abAB	1.25 aAB
N360	1725 abA	34.91 aA	1.36 aA

注 (Note): 不同的小写字母和大写字母分别表示达到 5% 和 1% 差异显著水平 Different lowercase letters or capital letters within the same column indicate significant differences at the 5% and 1% probability, respectively.

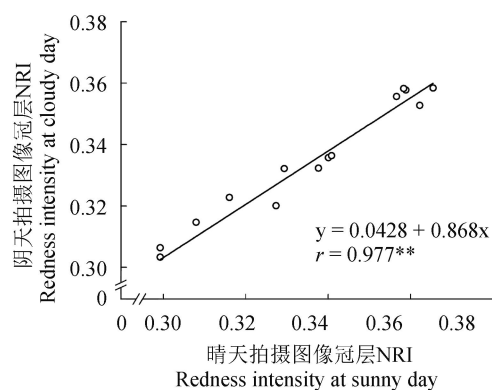


图 1 晴天与阴天时拍摄图片冠层 NRI 的关系( $n = 15$ )

Fig. 1 Correlations of canopy NRI at sunny and cloudy day

均达到极显著水平，且晴天的相关系数稍大于阴天；考虑到晴天条件下阳光较为稳定，易获取质量较高的数码图像，以及获取数码图像的方便性，故选取晴天获取数字图像信息为宜。

2.2.2 不同氮素营养水平下最佳拍摄时间的探究 不同的太阳光照射角(顺光和逆光)可能会对冬油菜冠层 NRI 的获取造成影响。图 3 结果表明，不同时间内，顺光和逆光获取的冬油菜冠层 NRI 之间均达到极显著水平，其相关系数分别为  $0.866^{**}$  和  $0.846^{**}$ ，说明利用数码相机在不同太阳光入射角均可以获取冬油菜冠层 NRI，其相关性达到极显著水平。

通过对一天之间不同时刻冬油菜冠层 NRI 与叶片氮浓度的相关性研究得出，不同时刻之间冠层 NRI 与叶片氮浓度之间的回归方程的相关系数均达到极显著水平，分别达到  $-0.782^{**}$ 、 $-0.802^{**}$  和  $-0.766^{**}$ ，

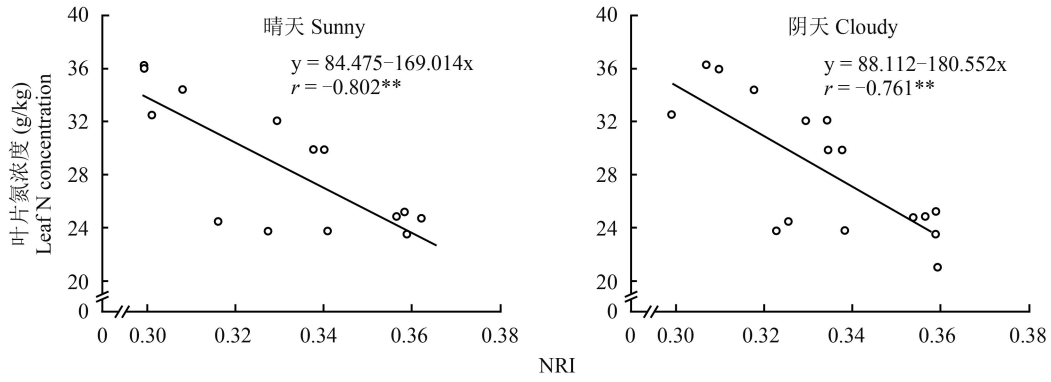


图 2 不同光照冬油菜冠层 NRI 与叶片氮浓度的关系(n = 15)

Fig. 2 The relationship between canopy NRI and leaf N concentration at different illuminations

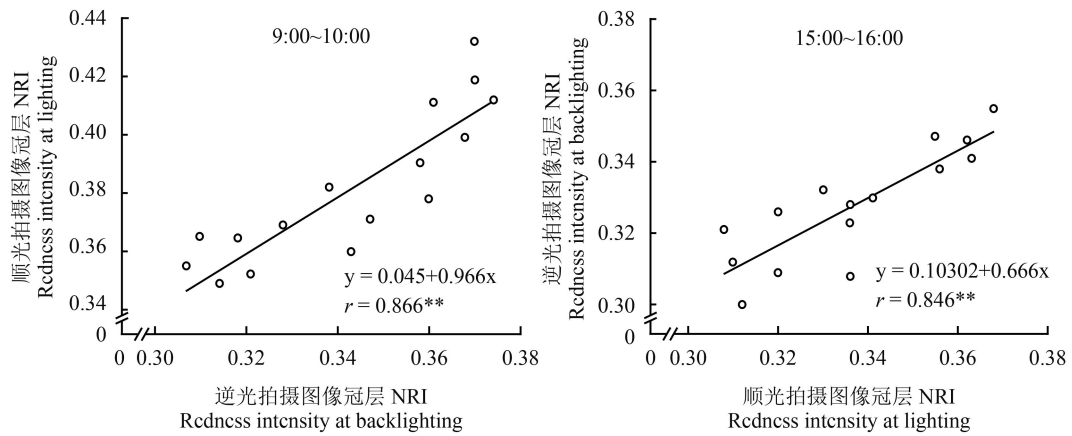


图 3 不同入射光场对冬油菜冠层 NRI 的影响(n = 15)

Fig. 3 Effect of different incident light field on canopy MRI of winter Rape

其中以中午 12:00~13:00 相关系数最大(图 4), 考虑到中午阳光的稳定性, 选取白天作为数码相机拍摄的最佳时间, 并以太阳高度角相对较大、光照相对稳定的中午 12:00~13:00 为宜。

2.2.3 拍摄高度对数字图像处理结果的影响 在拍摄冬油菜冠层数码图像时, 不同的拍照高度可能会对冠层图像的信息造成影响。表 2 结果表明, 不同的

高度下拍摄的冠层红光标准化值NRI之间没有显著差异, 均表现出良好的相关性。本研究模拟了低空无人飞机拍摄的高度, 并证明拍摄高度对冬油菜冠层数码信息没有太大影响, 不同拍摄高度均能获得较好的冠层NRI, 均可表征冬油菜氮素营养指标, 这也为低空无人飞机对冬油菜冠层图像信息的获取奠定理论基础。

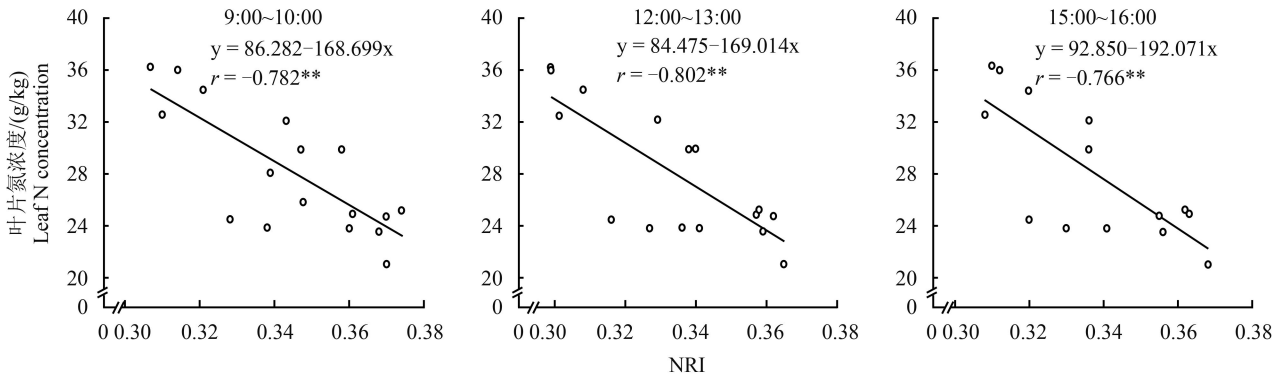


图 4 不同时间冬油菜冠层 NRI 与叶片氮浓度的关系(n = 15)

Fig. 4 The relationship between canopy NRI and leaf N concentration at different time of a day

表 2 不同拍摄高度对冠层 NRI 的影响( $n = 15$ )

Table 2 Effect of different image heights on canopy NRI

处理 Treatment	高度(m) Height	NRI	标准差 SD	CV (%)
N0	1.5	0.3607 aA	0.0061	1.68
	2.0	0.3587 aA	0.0026	0.72
	2.5	0.3600 aA	0.0029	0.81
N90	1.5	0.3484 aA	0.0105	3.00
	2.0	0.3475 aA	0.0139	3.99
	2.5	0.3466 aA	0.0123	3.56
N180	1.5	0.3299 aA	0.0062	1.89
	2.0	0.3364 aA	0.0029	0.87
	2.5	0.3328 aA	0.0078	2.36
N270	1.5	0.3253 aA	0.0102	3.15
	2.0	0.3264 aA	0.0097	2.98
	2.5	0.3242 aA	0.0137	4.22
N360	1.5	0.3073 aA	0.0027	0.89
	2.0	0.3100 aA	0.0038	1.24
	2.5	0.3111 aA	0.0027	0.87

注 (Note): 数值后不同的小、大写字母分别表示达到 5% 和 1% 差异显著水平 Values followed by different lowercase letters or capital letters within the same column indicate significant differences at the 5% and 1% probability, respectively.

2.2.4 不同氮素营养水平下最优拍摄角度探究 拍摄角度的不同导致作物叶片对阳光的吸收和反射不同, 数码相机获取的作物冠层吸收和反射的光不同, 叶片的数码图像信息可能也不同。研究发现, 在三种角度下获取冬油菜冠层数码信息, 其冠层 NRI 与地上部生物量、叶片氮含量和叶绿素浓度均达到极显著水平, 表明在三种角度下均可以用来拍摄冬油菜冠层数字图像 (表 3)。考虑到数码相机实际拍摄操作的简便性, 本研究认为拍摄角度为  $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$  为宜。

表 3 不同拍摄角度下冠层 NRI 与植株测定指标的相关性 ( $r$ ,  $n = 15$ )

Table 3 Correlation between canopy NRI and tested plant index at different image angles

拍摄角度 Angle	生物量 Biomass	叶片氮浓度 N content	叶绿素浓度 Chl. content
$30^{\circ}$	-0.643**	-0.715**	-0.867**
$60^{\circ}$	-0.657**	-0.802**	-0.862**
$90^{\circ}$	-0.702**	-0.799**	-0.881**

注 (Note): \*\*— $P < 0.001$ .

2.2.5 不同氮素营养水平下相机拍摄模式的差异性分析 从图 5 中可以看出, 不同的拍摄模式对冬油菜获取冠层数字图像信息影响不大, 自动曝光模式、场景风景模式和场景近摄模式所获得的冠层 NRI 与叶片氮浓度之间均呈现出极显著线性关系, 直线方程的相关系数分别为  $-0.802^{**}$ 、 $-0.752^{**}$  和  $-0.789^{**}$ , 其中以自动曝光模式的相关系数最大, 因此选取自动曝光模式为最佳拍摄模式。

2.2.6 不同氮素营养最佳数码照片像素尺寸的筛选 数码照片像素尺寸是指图像中储存的信息量, 也是影响冬油菜冠层数字图像获取的因素之一。表 4 结果表明, 除 N360 处理以  $2464 \times 1632$  分辨率稍大外, 其他处理均以  $3696 \times 2448$  较大。不同施氮处理在不同照片像素尺寸条件下拍摄的冠层 NRI 之间差异不显著, 照片像素尺寸对数码相机获取冬油菜数码冠层信息影响不大, 均能较好的表征冬油菜氮素营养指标。

2.2.7 不同氮素营养水平最优储存格式筛选 由不同相机储存格式下获取的冠层 NRI 与地上部生物量、叶片氮浓度和叶绿素浓度的相关分析可知 (表 5), 三种储存格式获取的冠层 NRI 与冬油菜氮素营养指标均达到极显著水平, 均可用来储存冬油菜冠层数字图像。NEF(RAW)格式为无损未压缩格式, 占用内存较大, 不利于大批量数码图像的储存, 而 JPEG 精细格式, 虽为有损的压缩格式, 但基本没有丢失图像信息且占用空间较小。考虑到数码照片的质量及存储的方便性, 因此选用 JPEG 精细格式作为最优的储存格式。

### 3 讨论

不同拍摄参数 (光照强度、拍摄时间、拍摄高度、拍摄角度、拍摄模式、相片像素尺寸和储存格式) 下利用数码相机获取的冬油菜冠层数字图像信息均可以反映冠层氮素营养信息。本试验条件下, 不同光照强度、拍摄角度、相片像素尺寸和储存格式下获取的冬油菜冠层数字图像信息之间没有显著差异, 与贾良良<sup>[12]</sup>和王秀峰<sup>[15]</sup>研究结果一致, 说明利用数字图像技术估测作物氮素营养具有相似的操作范围。与王娟等<sup>[16]</sup>研究结果有所不同, 本试验中三种不同拍摄高度获取的冬油菜冠层 NRI 差异不显著, 因为较高的拍摄高度获取的目标区域的冠层数字图像, 其真彩值与较低拍摄高度所获取的部分目标区域的冠层数字图像之间差异不显著。因此, 在实际的操作中, 可以选用较高的拍摄高度以扩大视场范围,

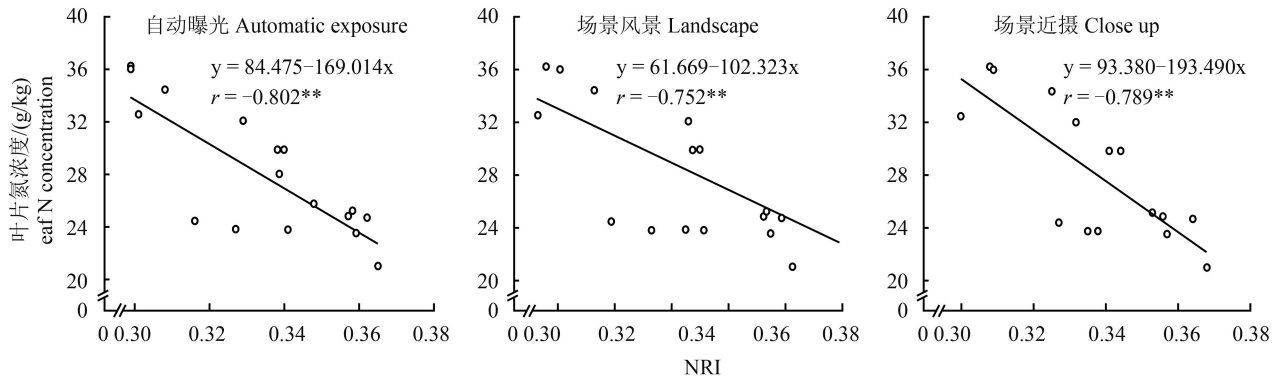
图 5 不同拍摄模式下冠层 NRI 与植株叶片氮浓度的关系( $n = 15$ )

Fig. 5 The relationship between canopy NRI and leaf N concentration at different shooting modes

表 4 不同照片像素尺寸对冠层 NRI 的影响

Table 4 Effect of different photo pixel on canopy NRI

处理 Treatment	像素尺寸 Photo pixel	NRI	标准差 SD	CV%
N0	4928 × 3264	0.3635 aA	0.0045	1.23
	3696 × 2448	0.3695 aA	0.0006	0.15
	2464 × 1632	0.3643 aA	0.0056	1.54
N90	4928 × 3264	0.3540 aA	0.0115	3.25
	3696 × 2448	0.3541 aA	0.0120	3.39
	2464 × 1632	0.3539 aA	0.0095	2.68
N180	4928 × 3264	0.3313 aA	0.0132	3.99
	3696 × 2448	0.3314 aA	0.0137	4.13
	2464 × 1632	0.3311 aA	0.0123	3.72
N270	4928 × 3264	0.3216 aA	0.0118	3.68
	3696 × 2448	0.3262 aA	0.0101	3.10
	2464 × 1632	0.3257 aA	0.0100	3.06
N360	4928 × 3264	0.3032 aA	0.0053	1.76
	3696 × 2448	0.3045 aA	0.0018	0.58
	2464 × 1632	0.3084 aA	0.0006	0.18

注 (Note): 数值后不同的小、大写字母分别表示达到 5% 和 1% 差异显著水平 Values followed by different lowercase letters or capital letters within the same column indicate significant differences at the 5% and 1% probability, respectively.

表 5 不同储存格式下冠层 NRI 与测定指标的相关性( $r$ ,  $n = 15$ )

Table 5 Correlation between canopy NRI and tested index at different image formats

储存格式 Image formats	生物量 Biomass	氮浓度 N content	叶绿素浓度 Chl. content
JPEG 精细格式 JPEG fine format	-0.657**	-0.802**	-0.862**
JPEG 标准格式 JPEG standard format	-0.691**	-0.760**	-0.863**
NEF(RAW) 格式 NEF(RAW) format	-0.685**	-0.769**	-0.869**

注 (Note): \*\*— $P < 0.01$ .

提高效率。同时, 较高的拍摄高度也为作物较大面积的营养诊断提供理论依据<sup>[20-21]</sup>。

油菜作为双子叶植物, 叶片在苗期时相对较大。叶片完全展开时往往会形成类似“凸面镜”的凸

起,当太阳光以某一角度照射在叶片时,形成镜面反射;同时在利用数码相机以某一拍摄角度和位置获取数字图像时,反射光被相机捕捉,可能会呈现明亮的斑点即“亮斑”。数码相机获取“亮斑”,造成叶片“失绿”的假象,提取的数字图像 R、G、B 值发生变化,进而影响 NRI 估测的精度。因此,利用数字图像技术进行大面积作物长势监测和氮素诊断时,在实际操作允许的情况下,应对适宜的拍摄时间、拍摄角度和拍摄位置做适当的调整,应尽量减少“亮斑”的出现,降低 NRI 的变异性;或者利用类似消除土壤背景值的方法,如图像分割法<sup>[22]</sup>和剔除背景值法<sup>[23]</sup>等,消除“亮斑”对 NRI 预测冬油菜氮素营养造成的影响。

影响数码相机获取冬油菜冠层数字图像的因素有很多,本试验只对拍摄参数(光照强度、拍摄时间、拍摄高度、拍摄角度、拍摄模式、照片像素尺寸和储存格式)进行了研究,而对于其影响的机理及其他影响因素诸如相机类型、作物品种等,则需要进一步研究和探讨。

## 4 结论

数字图像技术(Nikon-D7000, 1620 万像素)估测冬油菜氮素营养指标最优可操作范围为拍摄时间为晴天太阳高度角相对较大的中午;拍摄高度为近地面均可;拍摄角度为易于操作的 30°~60°;相机拍摄模式为自动曝光模式;照片像素尺寸为图片相对较为清晰的高分辨率;存储格式为压缩格式且占用空间相对较小的 JPEG 精细格式。

### 参考文献:

- [1] 王汉中. 我国油菜产业发展的历史回顾与展望[J]. 中国油料作物报, 2010, 32(2): 300-302.  
Wang H Z. Review and future development of rapeseed industry in China [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2010, 32(2): 300-302.
- [2] 李慧, 马常宝, 鲁剑巍, 等. 中国不同区域油菜氮磷钾肥的增产效果[J]. 中国农业科学, 2013, 46(9): 1837-1847.  
Li H, Ma C B, Lu J W, *et al.* Increasing effect of N, P and K fertilizer on rapeseed in different regions of china [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(9): 1837-1847.
- [3] 邹娟, 鲁剑巍, 刘锐林, 等. 4个双低甘蓝型油菜品种干物质积累及养分吸收动态研究[J]. 华中农业大学学报, 2008, 27(2): 229-234.  
Zou J, Lu J W, Liu R L, *et al.* Dynamics of dry vass accumulation and nutrients uptake in 4 louble-low rapeseed (*Brassica napus*L.) varoetoes [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2008, 27(2): 229-234.
- [4] 刘后利. 实用油菜栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987. 243-244.
- [5] Liu H L. Applied cultivation of rapeseed [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1987. 243-244.
- [5] 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  
Jia L L, Fan M S, Zhang F S, *et al.* Nitrogen status diagnosis of rice by using a digital camera [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(8): 2176-2179.
- [6] 李岚涛, 张萌, 任涛, 等. 应用数字图像技术进行水稻氮素营养诊断[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 259-268.  
Li L T, Zhang M, Ren T, *et al.* Diagnosis of N nutrition of rice using digital image processing technique [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 259-268.
- [7] Su C H, Fu C C, Chang Y C, *et al.* Simultaneous estimation of chlorophyll a and lipid contents in microalgae by three-color analysis [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2008, 99: 1034-1039.
- [8] Sstya P Y, Ibaraki Y. Estimation of the chlorophyll content of micropropagated potato plants using RGB based image analysis [J]. Plant Cell Tissue Organ Culture, 2010, 100: 183-188.
- [9] Lee K J, Lee B W. Estimation of rice growth and nitrogen nutrition status using color digital camera image analysis [J]. European Journal of Agronomy, 2013, 6: 57-65.
- [10] Graeff S, Claupein W. Quantifying nitrogen status of corn (*Zea mays* L.) in the field by reflectance measurements [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 19(4): 611-618.
- [11] Pagola M, Ortiz 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.
- [12] 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: 中国农业大学博士学位论文, 2003.  
Jia L L. To detect nitrogen status of winter wheat by using color digital camera [D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2003.
- [13] 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.
- [14] Huang W J, Wang Z J, Huang L S, *et al.* Estimation of vertical distribution of chlorophyll concentration by bi-directional canopy reflectance spectra in winter wheat [J]. Precision Agriculture, 2011, 12: 165-178.
- [15] 王秀峰. 应用数字图像技术进行黄瓜和番茄氮素营养诊断的研究[D]. 吉林: 吉林农业大学硕士学位论文, 2005.  
Wang X F. Study on diagnosis of N status of cucumber and tomato using digital image processing [D]. Jilin: MS Thesis of Jilin Agricultural University, 2005.
- [16] 王娟, 张永帅, 郭金强, 等. 不同成像方式对棉花冠层特征光谱参数的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2006, 24(4): 397-400.  
Wang J, Zhang Y S, Guo J Q, *et al.* Effect of different imaging mode on canopy feature spectral parameter [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2006, 24(4): 397-400.
- [17] 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



- 断研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(19): 3877-3886.
- Wei Q Q, Li L T, Ren T, *et al.* Study on diagnosing nitrogen nutrition status of winter rapeseed via digital image processing technique [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(19): 3877-3886.
- [18] 刘绚霞, 董振生, 刘创社, 等. 油菜叶绿素提取方法的研究[J]. 中国农学通报, 2004, 20(4): 62-63.
- Liu X X, Dong Z S, Liu C S, *et al.* Study on extracting methods of chlorophyll in rape [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(4): 62-63.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. *Soil and agro-chemistry analysis (3rd Edition)* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [20] 祝锦霞, 陈祝炉, 石媛媛, 等. 基于无人机和地面数字影像的水稻氮素营养诊断研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2010, 36(1): 78-83.
- Zhu J X, Chen Z L, Shi Y Y, *et al.* Diagnoses of rice nitrogen status based on spectral characteristics of leaf and canopy [J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2010, 36(1): 78-83.
- [21] Swain K C, Thomson S J, Jayasuriya H P W. Adoption of an unmanned helicopter for low-altitude remote sensing to estimate yield and total biomass of a rice crop [J]. *Transactions of the ASABE*, 2010, 53(1): 21-27.
- [22] 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.
- Wang Y, Wang D J, Zhang G, *et al.* Digital camera-based image segmentation of rice canopy and diagnosis of nitrogen nutrition [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(17): 131-136.
- [23] 蔡洪昌, 崔海信, 宋卫堂, 等. 黄瓜初花期叶片光合色素含量与颜色特征的初步研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 34-38.
- Cai H C, Cui H X, Song W T, *et al.* Preliminary study on photosynthetic pigment content and color feature of cucumber initial bloom stage [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(9): 34-38.