doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.035

不同车速车载多光谱成像系统性能分析*

文　瑶　李民赞　赵　毅　张　猛　孙　红　宋媛媛
(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室,北京 100083)

摘要:为了探索大田冬小麦冠层叶片叶绿素指标的快速检测方法,基于车载式多光谱成像系统进行了大田冬小麦叶绿素含量指标的快速无损诊断研究,并分析了不同车速条件下车载式多光谱成像系统的工作性能。系统以福田欧豹 4040 型拖拉机为车载平台,搭载了 2-CCD 多光谱图像智能感知系统。田间试验分别设置了 4 种行进速度(分别为 S1(0.54 m/s)、S2(0.83 m/s)、S3(1.04 m/s)、S4(1.72 m/s)),采集了冬小麦冠层可见-近红外图像,同步获得了车载 GPS 轨迹坐标信息,并测量了样本叶绿素含量指标 SPAD 值。图像经滤波和冠层分割预处理后,提取了 R、G、B、NIR 4 个波段平均灰度,并计算了 RVI、NDVI 等 4 种常见植被指数、H 分量的灰度平均值和覆盖度 C,共 10 个图像检测参数。分析了各图像检测参数与叶绿素含量指标 SPAD 值之间的相关关系,结果表明,S1、S2 和 S3 速度下,各图像检测参数与 SPAD 值相关性高于 S4 速度。同时,S1、S2、S3 速度下,NDVI、NDGI、RVI 与 SPAD 值的相关系数绝对值均达到 0.50 以上。分别建立了 S1 ~ S3 不同车速下叶绿素含量指标诊断 MLR 模型,模型精度满足作物生长空间分布图制图的要求。为了进一步提高车载式大田作物生长参数移动诊断效率,将不同车速下的数据合并,选取 NDVI、NDGI、RVI 参数建立叶绿素指标 MLR 模型,结果表明模型具有通用性。该研究可为车载式大田作物生长快速诊断提供支持。

关键词:冬小麦　叶绿素指标　植被指数　车载式　图像处理　多光谱成像
中图分类号:O657.3;S126　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2015)S0-0215-07

Performance Analysis of Vehicle-mounted Multi-spectral Imaging System at Different Vehicle Speeds

Wen Yao　Li Minzan　Zhao Yi　Zhang Meng　Sun Hong　Song Yuanyuan
(*Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research*, *Ministry of Education*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to rapidly detect the chlorophyll content of winter wheat canopy leaves in the field, a vehicle-mounted multi-spectral imaging system with 2-CCD camera was developed, and the working performance of the system was analyzed at different vehicle speeds. The FOTON－4040 tractor was used as the vehicle platform equipped multi-spectral image intelligent sensing system. Four speeds were set up in field experiments, which were S1 (0.54 m/s), S2 (0.83 m/s), S3 (1.04 m/s) and S4 (1.72 m/s). Visible and near infrared canopy images of winter wheat were collected. Meanwhile, the GPS position information was obtained and the SPAD values which indicated the chlorophyll content of winter wheat leaves were measured. Multi-spectral images were processed by adaptive smoothing filtering and canopy segmentation. There were 10 parameters in the image detection. The average gray values of four bands (R, G, B and NIR) were extracted, and four vegetation indices (NDVI, NDGI, RVI and DVI), mean value of H in HSI model and canopy cover degree C were calculated. The correlation between each

收稿日期:2015－10－28　修回日期:2015－11－18
*国家自然科学基金资助项目(31271619、31501219)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015XD004)和北京市科技计划资助项目(D151100004215002)
作者简介:文瑶,硕士生,主要从事农业信息获取技术研究,E-mail:wy_marta@126.com
通讯作者:孙红,副教授,主要从事农业信息获取技术研究,E-mail:sunhong@cau.edu.cn

parameter of the image and the SPAD value of the chlorophyll index was analyzed. The results showed that the correlations between the parameters of each image and the chlorophyll index at speed of S1, S2 and S3 were higher than that at speed of S4. The correlation coefficients between NDVI, RVI, NDGI and the SPAD value reached over 0.50 at speed of S1, S2 and S3. MLR models for the diagnosis of the chlorophyll content were established at different speeds of S1, S2 and S3, respectively. The model precision met the requirements of crop growing space distribution map. In order to further improve the diagnostic efficiency of the crops growth parameters in the field, the MLR model of the chlorophyll content in winter wheat leaves was built by NDVI, NDGI and RVI. The results showed that the model was universal. The research can provide support for the rapid diagnosis of field crop growth.

Key words: Winter wheat Chlorophyll index Vegetation index Vehicle-mounted Image processing Multi-spectral imaging

引言

植物叶绿素含量能够很好地反映作物生长状况[1],在拔节期进行叶绿素含量诊断可以指导田间追肥,对提高小麦品质和产量具有明显的调节作用。通常,田间叶绿素含量诊断通过破坏性采样进行化学分析测定,无法保证测试时效,因此迫切需要开展田间叶绿素含量的快速无损诊断研究[2-5]。

现代光谱成像技术作为一种快速、无损的技术手段已被广泛应用于作物营养监测领域[6-9]。基于温室种植条件,Hinzman 等[10]研究了冠层光谱对小麦氮素营养变化的响应特性,表明了利用冠层光谱诊断小麦氮素状况的可行性。Borhan 等[11]设计了由彩色图像和 550、710、810 nm 波段图像组成的多光谱图像系统,用于分析和预测温室环境下马铃薯叶片和硝酸盐含量,相关系数达到 0.9 以上。刘飞等[12]基于黄瓜叶片的多光谱图像提取归一化植被指数(NDVI)、绿色归一化植被指数(GNDVI)和比值植被指数(RVI)3 种参数,采用最小二乘-支持向量机(LS-SVM)建立了叶片含氮量和叶面积指数检测模型。丁永军等[13]基于温室番茄叶片的多光谱图像,建立了用于诊断叶绿素含量指标(SPAD 值)和全氮含量的预测模型。

针对大田作物,王海华等[14]使用 Tetracam 公司的 ADC 多光谱相机,在田间定点拍摄玉米冠层多光谱图像,提取了图像的近红外(NIR)和绿色(G)通道参数,构建了 NIR/G 比值特征参数,建立了叶绿素含量指标诊断模型。张浩等[15]采集绿、红和近红外 3 个波段图像检测水稻叶片叶绿素含量,结果显示水稻叶片叶绿素 a、叶绿素 b 分别与 G、NIR 通道图像灰度呈极显著线性相关。

上述研究中,通过手持设备,定点采集静态光谱图像,干扰较小、图像质量较高,所建立模型精度也较高。然而,针对大面积的种植作物,手持式采集方式费时费力,效率不高,无法大面积推广。因此,通过农用车辆搭载多光谱图像采集系统,在车辆行进中进行冠层图像移动式采集,将更有效地解放劳动力、节约时间开销,实现快速无损诊断。

中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室已经开发了一套车载式作物冠层多光谱图像采集系统[16-17],搭载在农用测量车上移动拍摄作物冠层多光谱图像,用于快速分析作物叶绿素含量指标。本文以拔节期大田冬小麦为对象,分析该系统在不同车辆行进速度下所拍摄的图像,选取适于拔节期冬小麦冠层叶绿素含量指标检测的特征图像参数,建立叶绿素含量指标移动式诊断模型,为田间精细化管理决策提供支持。

1 材料与方法

1.1 车载式作物冠层多光谱图像采集系统

冬小麦冠层多光谱图像由实验室开发的 2-CCD 多光谱图像采集系统获取,其结构示意图如图 1 所示。系统包括 2-CCD 多光谱图像感知器和采集控制器。其中多光谱图像采集器可以同步获取可见光(Blue(B),Green(G),Red(R),400 ~ 700 nm)和近红外(Near-infrared: NIR,760 ~ 1 000 nm)图像信号,经 GigE Vision2.0 接口分别输出。采集控制器以 AFL-08AH 型工业平板数据终端作为核心,通过双千兆网口与多光谱图像感知器连接,实时传输两路多光谱图像信号,每幅图像大小为 1 024 像素 ×

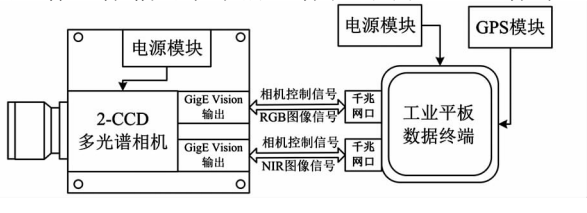


图 1 2-CCD 多光谱图像采集系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of 2-CCD multi-spectral image acquisition system

768 像素，TIF 格式。多光谱图像采集控制系统软件可进行图像拍摄参数设置、采集模式选择、动态触发、图像存储和分析。同时，平板数据终端外部扩展 ND－100s GPS 接收机用于实时获取图像拍摄位置信号。多光谱图像感知器和采集控制器均采用轻量便携的动力锂电池进行供电。

研究选用福田欧豹 4040 型拖拉机作为农机车载平台，设计安装了由减震措施和位置可调相机支架组成的农机拖载平台，用于搭载多光谱图像采集器和工业平板数据终端。车载平台采集数据前，需先对相机曝光时间、图像拍摄频率、增益以及白平衡等参数进行设置，然后再实现移动式拍摄。

1.2　田间试验

试验于 2014 年 4 月 27 日 10:00—14:00 在陕西省杨凌区揉谷镇粮食基地进行，土壤类型以娄土与黄绵土为主，小麦种植品种为小偃 22 号，物候期为拔节后期。试验在 110 m×10 m 的冬小麦种植区域中进行。试验时，相机垂直安装在可调节支架上，距地面高度为 160 cm，镜头焦距为 12 mm，视场角约为 26.2°，设置相机定时采集时间间隔为 1 s。

农用车辆分别设置 4 种速度在田间匀速行进，分别为 S1(0.54 m/s)、S2(0.83 m/s)、S3(1.04 m/s)和 S4(1.72 m/s)。其中，S1、S2 和 S3 速度各拍摄获得冬小麦多光谱图像 100 组，S4 速度下获得多光谱图像 45 组。拖拉机匀速行进过程中 GPS 模块实时地记录了图像采集位置和拖拉机运动轨迹，可以用于精确匹配各项测量结果以及后续的数据分析处理。

叶绿素含量测定方面，为避免破坏性采样后再测量造成的成分变化和测量误差，使用 SPAD－502Plus 型便携式叶绿素仪测定。首先，将采集样区划分为 9 个小样区，每个样区采集 6 个点，每个采样点测量 3 次取平均值作为冬小麦冠层叶绿素含量指标 SPAD 值，共计 54 个数据。然后，依据采集获取的图像数进行定位匹配，对无法完全对应的点，采用插值法计算该位置 SPAD 值。

1.3　图像处理方法

开发的冬小麦冠层多光谱图像和数据处理总体软件流程图如图 2 所示，主要包括 2-CCD 多光谱图像滤波预处理、冬小麦冠层图像分割、图像参数提取与分析等功能，该软件基于 Matlab GUI 平台(Matlab 2009a)编程实现。

天气情况、拍摄环境等因素均会造成不同程度的图像噪声，为减小图像噪声，消除其中的随机性和局部性噪声点，首先利用[3,3]窗口对图像进行了滤波平滑处理。然后，为了实现冬小麦冠层叶片与土壤背景的分割，利用小麦冠层叶片与土壤背景颜色不同的特点，基于 HSI 彩色空间模型的 H 分量进行冠层叶片分割。

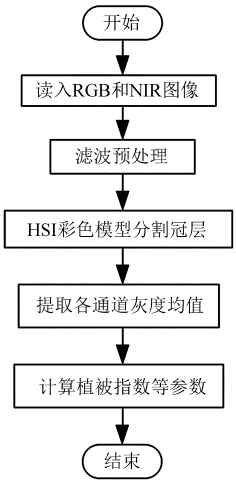


图 2　多光谱图像和数据处理过程

Fig. 2　Multi-spectral image and data processing

针对分割后的多光谱图像，可提取小麦冠层图像中 R、G、B、NIR 4 个通道的平均灰度，并计算比值植被指数(Ratio vegetation index，RVI)、归一化植被指数(Normalized difference vegetation index，NDVI)、差值植被指数(Difference vegetation index，DVI)、归一化差异绿度指数(Normalized difference green index，NDGI)4 种常见光谱植被指数和 HSI 模型下 H 分量的平均灰度 A_H 以及植被覆盖度 C。这 10 个参数将作为冬小麦冠层多光谱图像特征参数[18]。各参数计算公式如表 1 所示，其中，各波段平均灰度的计算仅以红光为例。

表 1　基于光谱图像的特征检测参数计算

Tab. 1　Parameter calculation based on spectral image

参数	定义
红光波段平均灰度 A_{red}	$\sum R$ 波段灰度与像素点总数比值
比值植被指数	A_{nir}/A_{red}
差值植被指数	$A_{nir}-A_{red}$
归一化植被指数	$(A_{nir}-A_{red})/(A_{nir}+A_{red})$
归一化差异绿度指数	$(A_{green}-A_{red})/(A_{green}+A_{red})$
H 分量的平均灰度 A_H	$\sum H$ 分量灰度与像素点总数比值
覆盖度 C	$\sum$ 叶片像素点数与像素点总数比值

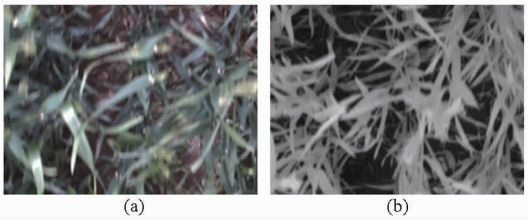
注：A_{green} 和 A_{nir} 分别为绿光和近红外波段平均灰度。

2　结果与讨论

2.1　不同车速下原始图像质量对比

基于车载搭载的多光谱成像系统在 S1、S2、S3、S4 4 种速度下移动获取的小麦冠层原始多光谱图像分别如图 3～6 所示。

观察比较不同速度下拍摄的原始图像可知，在试验中，相机采集设置均保持一致，但图像质量(图像亮度和清晰度)却随速度的提升而降低。本试验



(a) (b)

图 3 速度 S1 下小麦冠层原始图像

Fig. 3 Wheat canopy images at speed of S1

(a) 可见光图像 (b) 近红外图像

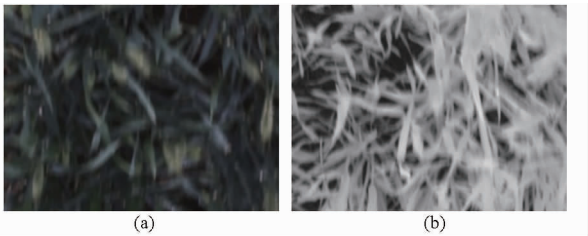


(a) (b)

图 4 速度 S2 下小麦冠层原始图像

Fig. 4 Wheat canopy images at speed of S2

(a) 可见光图像 (b) 近红外图像

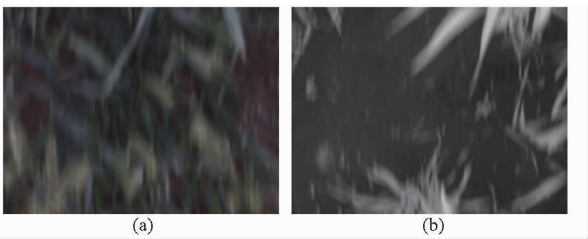


(a) (b)

图 5 速度 S3 下小麦冠层原始图像

Fig. 5 Wheat canopy images at speed of S3

(a) 可见光图像 (b) 近红外图像



(a) (b)

图 6 速度 S4 下小麦冠层原始图像

Fig. 6 Wheat canopy images at speed of S4

(a) 可见光图像 (b) 近红外图像

中车载速度在 S1 ~ S3(0.54 ~ 1.04 m/s)范围内,获得的图像较为清晰,而当速度提高至 S4(1.72 m/s)时图像严重模糊。

在对图像质量进行评价时,平均梯度反映图像对微小细节反差表达的能力,值越大表明图像越清晰。信息熵反映图像信息丰富程度,在图像能量一定的情况下,图像熵越大则图像越清晰。边缘强度反映目标与背景的边缘,边缘锐利,图像较清晰,如果边缘过渡平缓,图像则较模糊。所以本研究中随机选择了 S1 ~ S4 速度下 20 幅小麦冠层 RGB 原始图像,选择信息熵、平均梯度和边缘强度进行综合评价[19-20]。观察得到的图像质量参数如表 2 所示。

表 2 4 种车载速度下图像质量参数

Tab. 2 Image quality parameters at four vehicle speeds

质量参数	S1	S2	S3	S4
平均梯度	2.608 6	1.279 4	1.113 9	0.801 0
信息熵	16.446 9	14.372 3	13.502 7	13.010 6
边缘强度	28.459 6	13.949 3	11.997 0	8.460 9

观察表 2 可知,随着速度 S1 ~ S4 的增加平均梯度、信息熵和边缘强度逐渐减小,反映出图像的微小细节反差表达能力降低,图像信息量减小以及小麦冠层与土壤的边缘锐利程度减小。分析可知,图像质量除了与相机本身设置参数有关外,还与试验过程中车辆行进速度密切相关。一方面,曝光时间、图像增益以及白平衡参数等是在车辆开始时或低速状态下进行的设置,对高度动态适应性不高;另一方面,车载平台行进时田垄间地面高低不平,颠簸导致拖拉机难以保持理想均匀前进,垂直方向和水平方向均存在相对运动,速度越快,惯性影响越显著。因此,车辆在田间保持低速状态行驶,可以获取清晰度较高、图像信息较丰富的图像。

2.2 多光谱图像处理

对拍摄图像的进一步处理还包括图像滤波和作物冠层分割,用于减少图像中存在的随机噪声和土壤背景对后续分析的影响。多光谱图像滤波预处理时,首先分别对 R、G、B 和 NIR 通道灰度图像分别进行自适应平滑滤波,只在噪声局部区域进行平滑,而对无噪声局部区域不进行平滑,以消除图像中的随机性和局部性噪声点。然后,再合成滤波后的 RGB 和 NIR 图像。以 S2 速度下拍摄的图 4 为例,自适应平滑滤波后的 RGB 和 NIR 图像分别如图 7a 和图 7b。

观察滤波后图像可知,由于冬小麦叶细且为窄行密植作物,图像中土壤背景与冠层叶片边缘紧密相接。观察 RGB 和 NIR 图像各通道的灰度直方图发现,各图像中灰度分布连续,无明显双峰特征,无法直接进行二值化分割。由于小麦冠层呈绿色,土壤背景呈深棕色,故而可采用与人眼感受最为接近的 HSI 彩色模型中的 H 分量,基于颜色特征对图像进行分割。设定 H 分量中绿色的分布阈值为[π/4, 6π/5],将分割结果映射到 RGB 图像和 NIR 图像中,得到小麦冠层图像如图 7c 和图 7d 所示。

为了清晰观察分割结果,对分割后 NIR 灰度图像(图 7d)进行二值化,结果如图 7e 所示。图中冬小麦冠层叶片与背景土壤及部分干枯残留麦秆较好地分离开来,得到了完整的作物冠层。

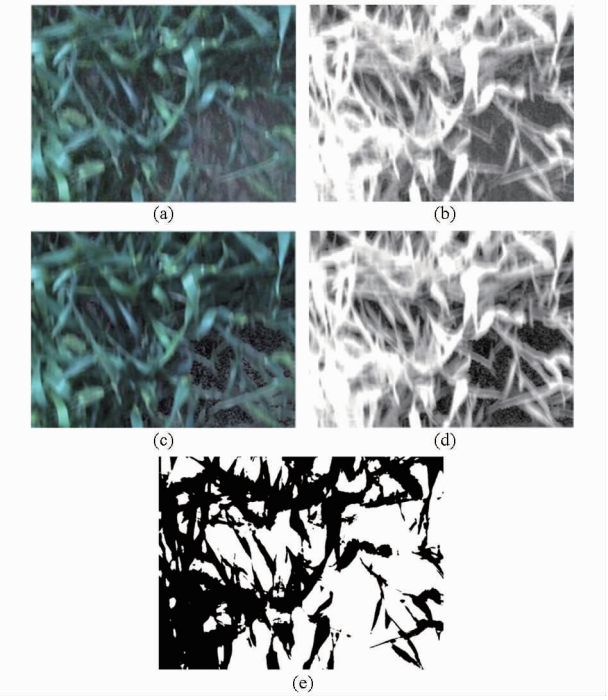


图 7　多光谱图像处理结果

Fig. 7　Processing results of multi-spectral images

(a) RGB 滤波后图像　(b) NIR 滤波后图像

(c) 分割后 RGB 图像　(d) 分割后 NIR 图像

(e) 冠层分割结果二值化图像

2.3　图像检测参数提取与分析

尽管图像分割处理完整地保留了小麦冠层叶片信息，但由于太阳光经冠层呈不规则漫反射，图像中叶片亮度和色彩分布不均匀，因此，首先提取出冠层在 R、G、B 和 NIR 波段的图像灰度均值，在一定程度上消减这种不均匀性的干扰，再根据表 1 所示公式分别计算 NDVI、RVI、A_H、C 等图像检测参数。

根据不同车载速度下提取的 10 个图像检测参数（A_{red}、A_{green}、A_{blue}、A_{nir}、NDVI、NDGI、RVI、DVI、A_H、C）分别与 SPAD 值进行相关性分析，得到的相关系数结果如表 3 所示。结果表明：

表 3　4 种车载速度下图像参数与 SPAD 值相关分析结果（R）

Tab. 3　Correlation analysis of image parameters and SPAD values at four vehicle speeds

图像参数	S1	S2	S3	S4
A_{red}	0.525 4	0.134 0	0.360 9	0.145 6
A_{green}	0.580 5	−0.048 1	0.444 6	0.176 4
A_{blue}	0.596 0	0.082 3	0.562 0	0.218 3
A_{nir}	−0.074 5	−0.670 7	−0.480 3	−0.221 5
NDVI	−0.514 2	−0.602 3	−0.572 7	−0.304 5
NDGI	0.533 9	−0.597 6	0.601 8	0.342 6
RVI	0.506 7	0.593 1	0.575 7	0.290 5
DVI	−0.333 7	−0.693 3	−0.529 1	−0.267 7
A_H	−0.089 4	0.551 2	0.261 8	0.125 8
C	0.144 6	−0.438 4	−0.172 6	−0.011 7

（1）总体而言，与 S1、S2、S3 速度相比，在 S4 速度下，所有图像检测参数与 SPAD 值之间的相关性均不高。由 2.1 节分析可知，这是由车载行进速度增加降低了图像质量所致，针对相对清晰的图像提出的图像处理算法对严重模糊图像的适用性不高，导致提取的图像检测参数不能很好地代表采样点叶绿素含量指标。建议车辆在田间以 1.04 m/s 以内的速度行驶，以保证图像处理算法能获取代表采样点叶绿素含量指标的图像检测参数。

（2）在 S1、S2、S3 速度下，A_{red}、A_{green} 及 A_{blue} 与 SPAD 值相关系数绝对值从大到小依次为：S1、S3、S2；其他参数 A_{nir}、NDVI、NDGI、RVI、DVI、A_H、C 与 SPAD 值相关系数绝对值从大到小依次为：S2、S3、S1。

（3）分别分析 S1、S2、S3 速度下的植被指数与 SPAD 值相关性结果显示：S1 速度下，A_{red}、A_{green}、A_{blue}、NDVI、NDGI、RVI 与叶绿素指标之间相关系数绝对值达到 0.50 以上；S2 速度下，A_{nir}、NDVI、NDGI、RVI、DVI 以及 A_H 与 SPAD 值相关系数绝对值达 0.55 以上；S3 速度下，A_{blue}、NDVI、NDGI、RVI、DVI 与 SPAD 值相关系数绝对值达 0.50 以上。所有参数中，NDVI、NDGI、RVI 在 3 种速度下与 SPAD 值相关系数绝对值均高于 0.5。

2.4　不同车速下冬小麦叶绿素指标检测模型

基于上述相关性分析结果，一方面，针对 S4 速度的图像处理方法和叶绿素诊断参数还有待继续研究，本文中首先考虑针对 S1 ~ S3 速度进行叶绿素含量指标诊断；另一方面，S1、S2 和 S3 速度图像检测参数与叶绿素指标 SPAD 值之间相关性最高参数各不相同，因此研究拟先分别建立不同车速下的冬小麦叶绿素含量指标诊断模型。

建模结果如表 4 所示。模型 1 ~ 3 分别是在 S1 ~ S3速度下，利用 10 个冠层多光谱图像特征参数建立的冬小麦叶片 SPAD 值多元线性回归（MLR）模型。其中 y 为预测 SPAD 值，x_1 ~ x_9 分别表示 A_{red}、A_{green}、A_{blue}、A_{nir}、NDVI、NDGI、RVI、DVI、A_H。建模分析中，对有效采集的 100 组图像样本，随机选择 70 组建立叶绿素指标 SPAD 值检测多元线性回归模型，其余 30 组进行模型验证。

模型 1 ~ 3 建模结果如图 8 所示，3 种速度下，建模决定系数 R_C^2 均达到 0.53 以上，验证决定系数 R_V^2 为 0.46 以上，其中速度 S3 下模型 3 的建模和验证决定系数 R^2 分别为 0.73 和 0.63。尽管模型 1 ~ 3 分别对 S1 ~ S3 行进速度叶绿素含量指标的获取具有较好的结果，但是各个车速下模型选用参数不一，农用拖拉机在田间行进中实际上无法完全保证以期

表 4 4 种车载速度下图像参数与 SPAD 值建模结果

Tab. 4 Modeling results of image parameters and SPAD values at four vehicle speeds

模型序号	公式	建模决定系数 R_C^2	验证决定系数 R_V^2
1	$y=84.2071-1.1740x_1+0.9595x_2+0.1285x_3-37.0433x_5-153.4426x_6-25.5849x_7$	0.53	0.46
2	$y=183.9079-0.3348x_4-153.2439x_5-33.6516x_6-105.9010x_7+0.4144x_8-1.6936x_9$	0.55	0.53
3	$y=-519.3054+0.8970x_3+688.9453x_5-4.5891x_6+640.6716x_7-0.3200x_8$	0.73	0.63
4	$y=87.8307-46.4186x_5+3.7757x_6-34.0582x_7$	0.40	0.38

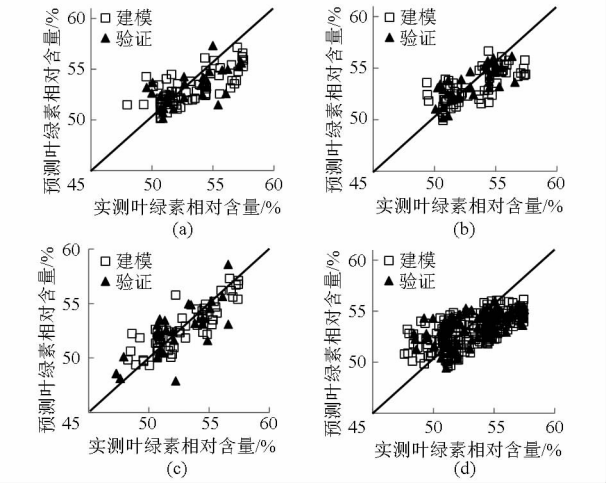


图 8 叶绿素含量指标诊断结果

Fig. 8 Diagnosis results of chlorophyll content index

(a) S1 车速诊断结果 (b) S2 车速诊断结果

(c) S3 车速诊断结果 (d) 通用诊断结果

望的某一速度行驶;另外,在系统作业时也希望车辆行进尽可能地快,而检测参数尽可能地少,这样可以保证田间作业效率和简化模型复杂度。

因而,再次利用在 3 种速度下与 SPAD 值相关系数绝对值均高于 0.5 的 3 个植被指数 NDVI、NDGI、RVI 来建立冬小麦叶片叶绿素含量指标(SPAD 值)诊断模型 4。建模分析中,对 3 种速度下的 300 组图像样本,随机选择 210 组建立叶绿素指标 SPAD 值的检测多元线性回归模型,其余 90 组进行模型验证。模型 4 的建模结果如图 8d 所示。建模和验证决定系数 R^2 分别为 0.40 和 0.38。

综上,尽管模型 4 建模和验证的决定系数相比于模型 1 ~ 3 有所降低,但是该模型可以直接应用于 S1 ~ S3 3 种行进速度,通用性更好,利于田间应用,建议在车载移动测量中使用。

3 结论

基于车载式平台在 4 种速度下采集了大田冬小麦拔节期冠层多光谱图像,通过图像滤波预处理和冠层叶片分割处理,提取出 R、G、B、NIR 4 个波段平均灰度,并计算了 RVI、NDVI 等 4 种常见植被指数、H 分量的灰度平均值和覆盖度 C,针对这 10 个图像检测参数与叶绿素含量指标 SPAD 值进行相关性分析,选择不同的图像检测参数组合,建立了叶绿素含量指标的多元线性回归(MLR)模型。研究结果表明:

(1)在车载平台行进过程中,随着车速的提高,图像质量指标信息熵、平均梯度和边缘强度逐渐减小,说明图像清晰度降低。

(2)分析不同车载速度下提取的 10 个图像检测参数(A_{red}、A_{green}、A_{blue}、A_{nir}、NDVI、NDGI、RVI、DVI、A_H、C)分别与 SPAD 值的相关性,结果显示 S1、S2 和 S3 速度下,各图像检测参数与 SPAD 值的相关性高于 S4 速度,NDVI、NDGI、RVI 与 SPAD 值的相关系数绝对值均达到 0.50 以上。

(3)分别建立了 S1 ~ S3 不同车速下的叶绿素含量指标诊断 MLR 模型,模型精度满足作物生长空间分布图制图的要求。为了进一步提高车载式大田作物生长参数移动诊断效率,将不同车速下的数据合并,选取 NDVI、NDGI、RVI 参数建立叶绿素指标 MLR 模型,结果表明模型具有通用性。

参 考 文 献

1 郭建华,赵春江,王秀, 等. 作物氮素营养诊断方法的研究现状及进展[J]. 中国土壤与肥料, 2008, 26(4):10 - 14.
Guo Jianhua, Zhao Chunjiang, Wang Xiu, et al. Research advancement and status on crop nitrogen nutrition diagnosis[J]. Soil & Fertilizer Sciences in China, 2008, 26(4):10 - 14. (in Chinese)

2 赵德群,李文钊,戚从清, 等. 拔节期不同追氮量对强筋小麦皖麦 38 部分品质性状的影响[J]. 安徽农业科学,2007, 35(16):4781 - 4782.
Zhao Dequn, Li Wenzhao, Qi Congqing, et al. Effect of different dosage of nitrogen application on part quality properties of strong gluten wheat Wanmai 38 in jointing stage[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(16):4781 - 4782. (in Chinese)

3 梁红霞, 马友华, 黄文江, 等. 基于遥感数据的冬小麦长势监测和变量施肥研究进展[J]. 麦类作物学报, 2005,25(3): 119 - 124.

Liang Hongxia, Ma Youhua, Huang Wenjiang, et al. Advance in growth monitoring and variable nitrogen fertilization in winter wheat based on remote sensed data[J]. Acta Tritical Crops, 2005, 25(3):119 – 124. (in Chinese)

4 梁亮, 杨敏华, 张连蓬,等. 基于 SVR 算法的小麦冠层叶绿素含量高光谱反演[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 162 – 171.
Liang Liang, Yang Minhua, Zhang Lianpeng, et al. Chlorophyll content inversion with hyperspectral technology for wheat canopy based on support vector regression algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 162 – 171. (in Chinese)

5 孙红, 李民赞, 赵勇, 等. 冬小麦生长期光谱变化特征与叶绿素含量监测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(1): 192 – 196.
Sun Hong, Li Minzan, Zhao Yong, et al. The spectral characteristics and chlorophyll content at winter wheat growth stages[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(1):192 – 196. (in Chinese)

6 李庆波,黄彦文,张广军, 等.基于可见-近红外光谱的植物叶绿素含量无损检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,2009, 29(12):3275 – 3278.
Li Qingbo, Huang Yanwen, Zhang Guangjun, et al. Chlorophyll content nondestructive measurement method based on vis/NIR spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(12):3275 – 3278. (in Chinese)

7 杨玮, 李民赞. 基于多光谱图像分析的温室黄瓜叶片营养元素检测与诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(1): 210 – 213.
Yang Wei, Li Minzan. Nitrogen content testing and diagnosing of cucumber leaves based on multispectral imagines[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(1): 210 – 213. (in Chinese)

8 李树强,李民赞,孙红, 等.一种玉米苗期冠层叶片营养诊断动态光谱指数[J].光谱学与光谱分析,2014, 34(6):1605 – 1609.
Li Shuqiang, Li Minzan, Sun Hong, et al. A novel vegetation index (MPRI) of corn canopy by vehicle-borne dynamic prediction [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(6):1605 – 1609. (in Chinese)

9 赵杰文, 王开亮, 欧阳琴, 等. 高光谱技术分析茶树叶片中叶绿素含量及分布[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(2): 512 – 515.
Zhao Jiewen, Wang Kailiang, Ouyang Qin, et al. Measurement of chlorophyll content and distribution in tea plant's leaf using hyperspectral imaging technique[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(2):512 – 515. (in Chinese)

10 Hinzman L D, Bauer M E, Daughtry C S T. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat[J]. Remote Sensing of Environment, 1986, 19(1):47 – 61.

11 Borhan M S, Panigrahi S, Lorenzen J H, et al. Multispectral and color imaging techniques for nitrate and chlorophyll determination of potato leaves in a controlled environment[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(2): 599 – 608.

12 刘飞, 王莉, 何勇. 应用多光谱图像技术获取黄瓜叶片含氮量及叶面积指数[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1616 – 1620.
Liu Fei, Wang Li, He Yong. Application of multi-spectral imaging technique for acquisition of cucumber growing information[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6): 1616 – 1620. (in Chinese)

13 丁永军, 李民赞, 孙红, 等. 基于多光谱图像技术的番茄营养素诊断模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 175 – 180.
Ding Yongjun, Li Minzan, Sun Hong, et al. Diagnosis model of tomato nutrient content based on multispectral images[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8):175 – 180. (in Chinese)

14 王海华,张彦娥,郭威. 基于多光谱图像的玉米营养监测技术研究[J]. 农机化研究,2012(11):178 – 181.
Wang Haihua, Zhang Yan'e, Guo Wei. Corn growth monitoring technology research based on multi-spectral images[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012(11):178 – 181. (in Chinese)

15 张浩, 姚旭国, 张小斌, 等. 基于多光谱图像的水稻叶片叶绿素和籽粒氮素含量检测研究[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(5): 555 – 558.
Zhang Hao, Yao Xuguo, Zhang Xiaobin, et al. Measurement of rice leaf chlorophyll and seed nitrogen contents by using multi-spectral imagine[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2008, 22(5):555 – 558. (in Chinese)

16 Wu Qian, Sun Hong, Li Minzan, et al. Development of 2-charge-coupled device multi-spectral imagery system for winter wheat chlorophyll content monitoring[J]. Sensor Letters, 2014, 12(3 – 5): 818 – 823.

17 Wu Qian, Sun Hong, Li Minzan, et al. Development and application of crop monitoring system for detecting chlorophyll content of tomato seedlings[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2014, 7(2): 138 – 145.

18 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13(4):327 – 333.
Tian Qingjiu, Min Xiangjun. Advances in study on vegetation indices[J]. Advances in Earth Science, 1998, 13(4):327 – 333. (in Chinese)

19 李祚林, 李晓辉, 马灵玲,等. 面向无参考图像的清晰度评价方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2):239 – 246.
Li Zuolin, Li Xiaohui, Ma Linglin, et al. Research of definition assessment based on no-reference digital image quality[J]. Remote Sensing Technology & Application, 2011, 26(2):239 – 246. (in Chinese)

20 王鸿南, 钟文, 汪静,等. 图像清晰度评价方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(7):828 – 831.
Wang Hongnan, Zhong Wen, Wang Jing, et al. Research of measurement for digital image definition[J]. Journal of Image & Graphics, 2004, 9(7):828 – 831. (in Chinese)