

基于无人机高光谱影像玉米叶绿素含量估算

常潇月,常庆瑞,王晓凡,储 栋,郭润修

(西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:以无人机为平台搭载高光谱相机获得玉米农田高光谱影像,从中提取光谱特征参数,构建玉米叶片叶绿素含量估算模型,并制作玉米叶片叶绿素含量分布图。结果表明,以红边面积(SDr)、红边一阶微分最大值(Dr)、差值植被指数(DVI)为自变量构建的回归模型建模精度较高,以此反演玉米叶片 SPAD 值分布图并对填图结果进行精度检验,得出 SPAD- Dr 模型填图预测效果最佳($R^2=0.89$, $RMSE=1.28$, $RE=2.31$),可以作为玉米叶片叶绿素含量无人机高光谱影像遥感反演估算的基本模型。

关键词:无人机;高光谱影像;玉米;叶绿素含量;估算模型

中图分类号:S127;S513;TP79 **文献标志码:**A

Estimation of maize leaf chlorophyll contents based on UAV hyperspectral drone image

CHANG Xiao-yue, CHANG Qing-rui, WANG Xiao-fan, CHU Dong, GUO Run-xiu

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: UAV remote sensing system can quickly acquire high-resolution remote sensing images on farmland scale, which is significant for crop growth monitoring and agricultural production management. In this research, the hyperspectral images of maize field were acquired with a UHD185 camera mounted on a drone. The spectral parameters were extracted from the hyperspectral images to construct models for estimating chlorophyll content in maize leaves. Chlorophyll distribution maps of maize leaf were inversely estimated using these models. The results showed that the simple regression model separately built with red edge area (SDr), maximum first derivative values within red edge (Dr), or difference vegetation index (DVI) had higher modeling accuracy. These inversion models were used to make SPAD value distribution map of maize leaves, then, they were validated against observed results for the accuracy of the map, it was found that SPAD- Dr model was the best one in estimating the chlorophyll of maize leaves ($R^2=0.89$, $RMSE=1.28$, and $RE=2.31$). Therefore, this new method is feasible to be used for estimating the chlorophyll content of maize leaves.

Keywords: UAV; hyperspectral image; maize; chlorophyll; estimate model

我国是世界第二大玉米生产国,种植范围广,产量高。同时,我国也是玉米的最大消费国,消费量的 90%靠国内生产^[1]。叶绿素是绿色植物重要的光合色素,其含量影响光合作用效率,能间接反映植被长势。因此,利用遥感手段反演玉米叶绿素含量,可以快速获取农田信息,帮助指导玉米田间管理,提高玉米品质与产量,对我国玉米生产具有重要意义。

高光谱数据光谱分辨率高,能捕捉到由于植物生化组分(各种色素、氮、木质素、纤维素、水分)变化,而导致的植被反射波谱曲线特征吸收峰、反射谷的细微位置和深度差异,能更加精确地反演植被生化参数^[2]。自 20 世纪 80 年代以来,成像光谱技术取得重大突破,其凭借光谱分辨率高、图谱合一的独特优势,实现了在生态、农业、环境等领域的成功应用^[3-11]。但是地面成像光谱仪工作范围小、视

收稿日期:2018-01-18

修回日期:2018-04-08

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)(2013AA102401-2)

作者简介:常潇月(1996-),女,山东莱阳人,本科生,研究方向为遥感应用。E-mail:changxiaoyue1996@126.com

通信作者:常庆瑞(1959-),男,陕西子州人,博士生导师,主要从事土地资源与空间信息技术研究。E-mail:changqr@nwsuaf.edu.cn

野窄,工作量大;卫星搭载的高光谱成像仪常因天气和时间无法获得感兴趣区域的遥感影像^[12],且其较低的空间分辨率不适合地块尺度的信息获取。近年来,无人机遥感技术以其数据的时空分辨率高、测量机动灵活、观测范围大等优势,在农田生态环境信息监测与获取中开始应用。

本文以陕西关中地区夏玉米为研究对象,使用无人机搭载高光谱成像光谱仪,获得夏玉米灌浆期高光谱影像,利用地面同步获得的玉米叶片 SPAD 值数据,构建夏玉米叶片 SPAD 值遥感估算模型,以期对夏玉米农田信息快速获取提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 田间试验

试验地设置在陕西省咸阳市乾县梁山乡齐南村(E108°7'6", N34°38'33"),该地位于关中平原中段、渭北高原南缘,温带大陆性季风气候,年平均气温 13.1℃,年平均降水量 573~592 mm,农业种植一般一年一熟。田间试验玉米品种为陕单 8806,划分为 46 个小区和一个大区,小区面积 63 m²(7 m×9 m),大区面积 280 m²(20 m×14 m)。小区试验分别设置 6 个不同梯度的施氮、施磷、施钾处理和 5 个不同梯度的灌溉处理,每个处理设置一个重复。氮肥、磷肥、钾肥均作为底肥一次施入,不再追加;大田按照当地玉米常规种植模式种植。田间试验小区和大区的管理方式与当地农民的生产管理方式相同。

1.2 数据获取与处理

1.2.1 无人机高光谱影像获取 使用零度智控 E-EPIC 八旋翼无人机搭载 Cubert UHD185 firefly 高光谱相机,获得玉米灌浆期(2016 年 8 月 11 日)高光谱影像。玉米灌浆期覆盖度大,冠层光谱影像受土壤背景影响较小,且玉米成熟籽粒干物质的 85%~90%是绿叶在这个阶段合成的^[1]。因此对玉米灌浆期叶片叶绿素含量监测,可以指导合理施肥,防止叶片早衰,提高玉米产量;对玉米产量预测也有重要意义。UHD185 是一款摄影型光谱成像仪,可在 0.1 ms 内获得 450~950 nm 波长范围内,采样间隔为 4 nm 的 125 个波段的高光谱影像。无人机飞行试验选在晴朗无风的正午开展。

无人机飞行参数和相机参数的选择主要考虑到以下三个方面的因素:(1)地面分辨率。地面分辨

率 = $\frac{2 \times \tan\left(\frac{\text{视场角 } FOV}{2}\right) \times \text{航高 } H}{1000}$, 其中 1000 是

指 UHD185 相机空间分辨率为 1000 像元×1000 像元。航高越高、相机视场角越大,地面分辨率越低。(2)误差控制。当相机视场角较大时,影像边缘部分变形较大。(3)影像处理工作量。低航高、小视场角,虽然可以提高影像地面分辨率,但是会导致影像数量大幅增加,影像处理工作量增加。本研究在玉米植株尺度展开研究,需要较高的地面分辨率,但要控制影像形变误差和影响处理工作量。因此,本研究设置无人机飞行高度 100 m,航速 6 m·s⁻¹,飞行过程中保持 80%航向重叠,60%旁向重叠。UHD185 相机设置镜头焦距 23 mm,视场角 15°,镜头垂直向下,地面分辨率约为 2.6 cm。在无人机起飞之前,对 UHD185 高光谱相机进行暗电流校正,并使用参考板进行辐射定标,在飞行拍摄时直接获得地表反射率数据。

1.2.2 玉米叶片 SPAD 值测量 为同步、快速、无损获得玉米叶片叶绿素含量,使用 SPAD-502 型手持叶绿素仪,测得叶片 SPAD 值。SPAD-502 型手持叶绿素仪是根据叶绿素吸收红光,但在近红外波段几乎没有吸收的特点设计而成,该仪器发射一定强度的红光(峰值波长 650 nm)和近红外光(峰值波长 940 nm)照射叶片,并将透射过叶片的光信号转换为电信号,经放大器放大后再由 A/D 转换器转换为数字信号,微处理器利用这些数字信号计算叶绿素的相对含量,即为 SPAD 值。艾天成^[13]等测定了玉米、水稻、棉花等多种农作物叶片叶绿素含量和 SPAD 值,确定了二者的最佳相关函数,表明可以使用 SPAD 值表示叶片叶绿素含量。本研究在每个小区和大田各选取 2 个样点,共 84 个样点,同步测得玉米叶片 SPAD 值。每个样点的玉米选择 3 片叶子测量,每片叶子不同部位测 10 个 SPAD 值,取平均值作为该片叶子的 SPAD 值,将 3 片叶子的 SPAD 平均值作为该样点的 SPAD 值,并记录样点位置。

1.2.3 高光谱影像处理 UHD185 相机一次拍摄可获得一张全色灰度图像和一组高光谱影像,全色图像空间分辨率 1000 像元×1000 像元,高光谱影像空间分辨率 50 像元×50 像元。使用系统软件,将高光谱影像重采样为 1000 像元×1000 像元,并将灰度图像和重采样后的高光谱影像存储到一个 TIFF 图像中。在 AgisoftPhotoscan 软件中,导入研究区的全部 TIFF 图像,以全色图像为模板进行拼接,得到完整的研究区高光谱影像。最后,在 ENVI 中,根据 SPAD 样点的位置,建立训练区,以训练区内光谱反射曲线的平均值作为该样点的光谱反射曲线。

1.2.4 反演模型构建与检验 通常使用高光谱分

分辨率遥感数据估计植被农学参数主要有两类方法：一是通过多元回归方法建立光谱数据或由此衍生的植被指数与农学参数之间的关系^[14-16]；二是通过植被的红边参数描述植被的物候变化及其农学参数^[17-20]。本研究选用的高光谱特征参数包括基于光谱位置的变量、基于光谱面积的变量以及植被指数,具体定义见表 1。将实验获得的 84 组数据随机分为 6 组,其中 4 组作为建模集,1 组作为验证集

I,1 组作为验证集 II。对 SPAD 值与选取的特征参数进行相关分析,选择极显著相关且相关系数大于 0.5 的参数建模。模型均为单因素线性、非线性回归模型。综合比较训练集模型的决定系数(R^2)、均方根误差($RMSE$)以及验证集 I 估测值与实测值线性回归方程的决定系数(R^2)、均方根误差($RMSE$)、相对误差(RE),确定最优估算模型。最后,在 ENVI+IDL 中,使用最优模型对研究区高光谱

表 1 高光谱特征参数及计算公式
Table 1 Spectral parameters and formulas

光谱参数 Spectral parameter	计算公式 Formula	参考文献 Reference
基于光谱位置参数 The parameters based on spectral location		
蓝边内最大一阶微分值 D_b Maximum first derivative values within blue edge	波长 490~530 nm 内一阶微分最大值 The maximum of first derivative values within 490~530 nm	[21]
蓝边位置 λ_b Blue edge location	D_b 对应的波长位置 The wavelength location of the D_b	[21]
黄边内最小一阶微分值 D_y Minimum first derivative values within yellow edge	波长 550~582 nm 内一阶微分最小值 The minimum first derivative values within 550~582 nm	[21]
黄边位置 λ_y Yellow edge location	D_y 对应的波长位置 The wavelength location of the D_y	[21]
红边内最大一阶微分值 D_r Maximum first derivative values within red edge	波长 680~760 nm 内一阶微分最大值 The maximum first derivative values within 680~760 nm	[22]
红边位置 λ_r Red edge location	D_r 对应的波长位置 The wavelength location of the D_r	[23]
绿峰反射率最大值 R_g Maximum reflectance within green peak	波长 510~560 nm 内光谱反射率最大值 The maximum of the reflectance within 490~530 nm	[24]
红谷反射率最小值 R_r Minimum reflectance within red valley	波长 640~680 nm 内光谱反射率最小值 The minimum of the reflectance within 550~582 nm	[24]
基于光谱面积变量 The parameters based on spectral area		
蓝边面积 SD_b Blue edge area	波长 490~530 nm 内一阶微分值的总和 The sum of the first derivative values within 490~530 nm	[21]
黄边面积 SD_y Yellow edge area	波长 550~582 nm 内一阶微分值的总和 The sum of the first derivative values within 550~582 nm	[21]
红边面积 SD_r Red edge area	波长 680~760 nm 内一阶微分值的总和 The sum of the first derivative values within 680~760 nm	[25]
基于高光谱植被指数变量 The parameters based on hyperspectral vegetation indexes		
差值植被指数 DVI Difference vegetation index	$R_{810}-R_{680}$	[26]
归一化植被指数 $NDVI$ Normalized difference vegetation index	$(R_{810}-R_{680})/(R_{810}+R_{680})$	[27]
修正叶绿素吸收反射率指数 $MCARI$ Modified chlorophyll absorption reflectivity index	$[(R_{700}-R_{670})-0.2(R_{700}-R_{550})](R_{700}/R_{670})$	[28]
再归一化植被指数 $RDVI$ Renormalized difference vegetation index	$(DVI \times NDVI)^{1/2}$	[29]
最优土壤调节植被指数 $OSAVI$ Optimal soil-adjusted vegetation index	$(1+0.16)(R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670}+0.16)$	[30]
综合型光谱指数 $MCARI/OSAVI$ The ratio of $MCARI$ to $OSAVI$	$MCARI/OSAVI$	[28]

影像进行填图,得到研究区 SPAD 值分布图,并使用验证集 II,对填图精度进行验证。 $RMSE$ 和 RE 计算公式分别如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}}{n} \times 100\% \quad (2)$$

本研究采用的技术路线如图 1。

2 结果与分析

2.1 不同 SPAD 值玉米冠层反射光谱曲线

图 2 为拼接后研究区影像,从中提取 SPAD 值测量样点的冠层反射光谱曲线。图 3 是部分不同 SPAD 值对应的玉米冠层光谱反射曲线,以及裸地的光谱反射曲线。从图中可以看出,玉米冠层反射曲线在 550 nm 附近有绿光反射峰,670 nm 附近有红光反射谷,750 nm 附近开始出现近红外高反射肩。且在 450~680 nm 的可见光波段内,玉米叶片 SPAD 值越高,光谱反射率越低;在 750~850 nm 的

近红外波段内 SPAD 值越高,反射率越高且差异较大,与金震宇等^[31]研究结果一致。裸地的光谱反射率随着波长增加而增加。玉米冠层和裸地的反射光谱曲线均呈现出该类地物的典型特征,表明 UHD185 相机获得的高光谱影像是可靠的。

2.2 玉米 SPAD 值估算模型构建

根据表 1 公式,计算建模集样点的高光谱特征参数并与 SPAD 值进行相关分析,结果如表 2。样本容量为 56 时,相关系数达 0.259 即为显著相关。相关分析结果表明,SPAD 值与红边面积(SDr)、绿峰反射率最大值(R_g)、差值植被指数(DVI)、红边一阶微分最大值(Dr)、红谷反射率最小值(R_r)、蓝边一阶微分最大值(Db)相关性大于 0.6,达 0.05 显著水平,其中, SDr 与 SPAD 值相关系数高达 0.853。选取以上 6 个特征参数构建玉米叶片叶绿素含量估算模型。SPAD 值与光谱特征参数的回归模型如表 3。对比 6 个模型的决定系数(R^2)、均方根误差,SPAD- SDr 模型拟合效果最好($R^2 = 0.74$, $RMSE = 1.54$),SPAD- R_g 模型、SPAD- DVI 模型、SPAD- Dr 模型拟合效果较好。

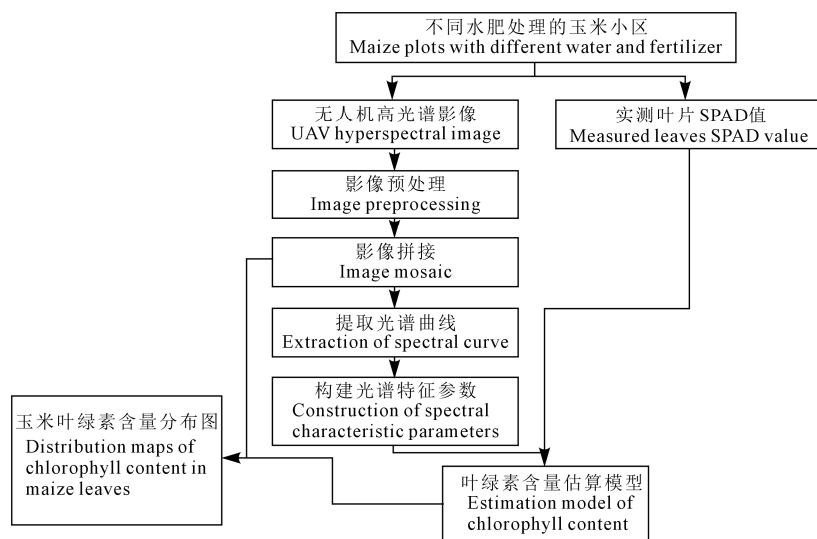


图 1 数据处理流程

Fig.1 Data processing flow

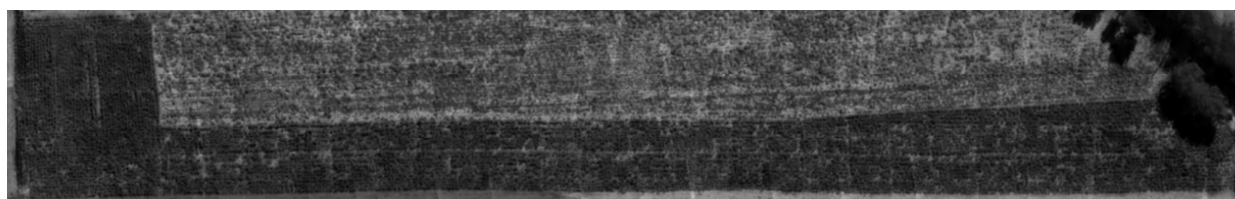


图 2 研究区拼接影像

Fig.2 Mosaic image of study area

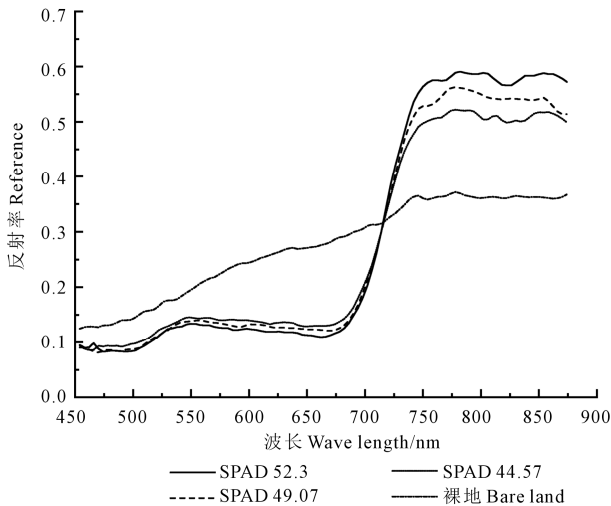


图3 不同 SPAD 值对应的玉米冠层反射率
光谱与裸地反射率光谱

Fig.3 Maize canopy reflectance spectrum of corresponding
SPAD values and reflectance spectrum of bare land

表 2 玉米叶片 SPAD 值与光谱参数相关性

Table 2 Correlation coefficients between spectral
parameters and maize leaf SPAD values

光谱参数 Spectral parameters	相关系数 Correlation coefficient
<i>Db</i>	0.670 * *
λb	-0.062
<i>Dy</i>	-0.181
λy	0.145
<i>Dr</i>	0.772 * *
λr	-0.139
<i>Rg</i>	0.804 * *
<i>Rr</i>	0.680 * *
<i>SDb</i>	0.531 * *
<i>SDy</i>	0.16
<i>SDr</i>	0.853 * *
<i>DVI</i>	0.790 * *
<i>NDVI</i>	-0.215
<i>MCARI</i>	0.462 * *
<i>RDVI</i>	0.549 * *
<i>OSAVI</i>	0.163
<i>MCARI/OSAVI</i>	0.452 *

注: * * 在 0.01 水平上显著相关, * 在 0.05 水平上显著相关。

Note: * * indicates correlation is significant at $P = 0.01$ level,

* indicates correlation is significant at $P = 0.05$ level.

表 3 玉米叶片 SPAD 值估算模型

Table 3 Inversion models for estimating maize leaf SPAD values

模型 Model	公式 Formula	R^2	RMSE
SPAD-Db	$y = 0.6 \times 10^{-5}x^2 + 26859x + 17.223$	0.49	2.27
SPAD-Dr	$y = 860.34x^{0.6115}$	0.61	1.87
SPAD-SDr	$y = 107.08x^{0.8708}$	0.74	1.54
SPAD-Rg	$y = 195.35x + 18.481$	0.65	1.76
SPAD-Rr	$y = 156.85x + 26.924$	0.46	2.16
SPAD-DVI	$y = 101.84x^{0.8125}$	0.64	1.81

注: y 为 SPAD 预测值, x 为光谱参数。

Note: y is the predicted value of SPAD value, x is spectral parameters.

2.3 玉米 SPAD 值估算模型精度检验

使用 SPAD 值估算模型, 计算得到验证集 I 的 SPAD 估测值, 与 SPAD 实测值进行 $y = kx$ 线性拟合, 检验模型的估测精度。回归方程斜率和 R^2 越接近 1, $RMSE$ 和 RE 越小, 模型估测精度越高。检验结果如图 4、表 4 所示, 可以看出: (1) SPAD-Dr 模型回归方程斜率为 0.9816, $R^2 = 0.8099$, $RMSE$ (1.60) 和 RE (2.98) 最小, 预测精度最高; (2) SPAD-SDr 模型、SPAD-DVI 模型预测效果也较好; (3) SPAD-Db 模型、SPAD-Rg 模型、SPAD-Rr 模型对玉米 SPAD 值的预测结果偏差较大, 无法用于玉米叶片 SPAD 值预测。但是, 预测效果较好的 3 个模型仍需进一步检验其高光谱影像反演精度。

2.4 玉米叶片 SPAD 值高光谱影像反演及精度检验

在 ENVI+IDL 环境下, 使用 SPAD-Dr 模型、SPAD-SDr 模型和 SPAD-DVI 模型分别对高光谱影像进行反演填图, 获得研究区玉米叶片 SPAD 值分布图(图 5), 并对 SPAD 值进行统计(表 5)。然后, 利用验证集 II 数据, 对反演精度进行检验。验证集 SPAD 数据实测值和反演填图估测值拟合结果如图 6 所示, 精度检验结果如表 6 所示。观察研究区高光谱影像发现, 影像上有明显的暗色斑块, 且反演填图结果(图 5)中 SPAD 值呈现聚集状态, 聚集中心 SPAD 值高, 向外逐渐减少。这是由于玉米植株较高、叶片数目多且面积大, 植株之间相互遮蔽, 产生阴影, 导致冠层中心顶部反射率较高、SPAD 值较大, 四周反射率较低, SPAD 值较小。因此玉米叶片 SPAD 值填图统计结果(表 5)中最小值和均值与 SPAD 实测结果相差较大。综合分析不同模型反演得到的玉米叶片 SPAD 值分布图(图 5)及其统计结果(表 5), 发现 SPAD-SDr 模型和 SPAD-DVI 模型对玉米叶片 SPAD 高值估测偏高(两模型对 SPAD 值的最大估测值分别为 62.70 和 62.53, 而实测值最大值仅为 54.70), 且同一小区内估测值较为离散(两

表 4 玉米叶片 SPAD 值估测模型精度检验

Table 4 Validation of inversion models for estimating
maize leaf SPAD values

模型 Model	回归方程 斜率 Regression equation slope	决定系数 R^2 Coefficient of determination	REMS	RE/%
SPAD-Db	0.973	0.48	2.56	4.33
SPAD-Dr	0.982	0.81	1.60	2.98
SPAD-SDr	0.969	0.76	2.15	4.13
SPAD-Rg	1.000	0.45	2.24	3.68
SPAD-Rr	1.009	0.35	2.46	4.54
SPAD-DVI	0.964	0.69	2.46	4.71

模型对 SPAD 值估测值的标准差分别为 7.16 和 6.98),SPAD-Dr 模型则能较好估测 SPAD 高值且估测结果具有较小的标准差。使用验证集 II 数据对填图精度检验结果如图 6、表 6 所示,三个模型计算得到的 SPAD 估测值与实测值的回归方程斜率均接近 1,但是 SPAD-Dr 模型的回归方程决定系数最大 ($R^2=0.89$),均方根误差和相对误差最小 ($RMSE=1.28, RE=2.31$)。综上所述,SPAD-Dr 模型能较为准确地反映研究区玉米叶片 SPAD 值,反演填图精度最高。

本研究表明,SPAD-Dr 经验回归模型能较好地估算该研究区玉米灌浆期叶片 SPAD 值,理论上该模型对于关中地区玉米灌浆期 SPAD 值反演具有较高的适用性,但仍需获得该地区同一时期的玉米农田影像及田间实测叶绿素含量对模型的适用性进行评价。但是由于天气等不可抗原因未能获得该研究区同一时期的玉米农田无人机影像数据,无法对该模型的反演适用性作进一步评价,未来还需更加长期、系统地研究,验证并改进该模型的反演精度并验证其适用性。

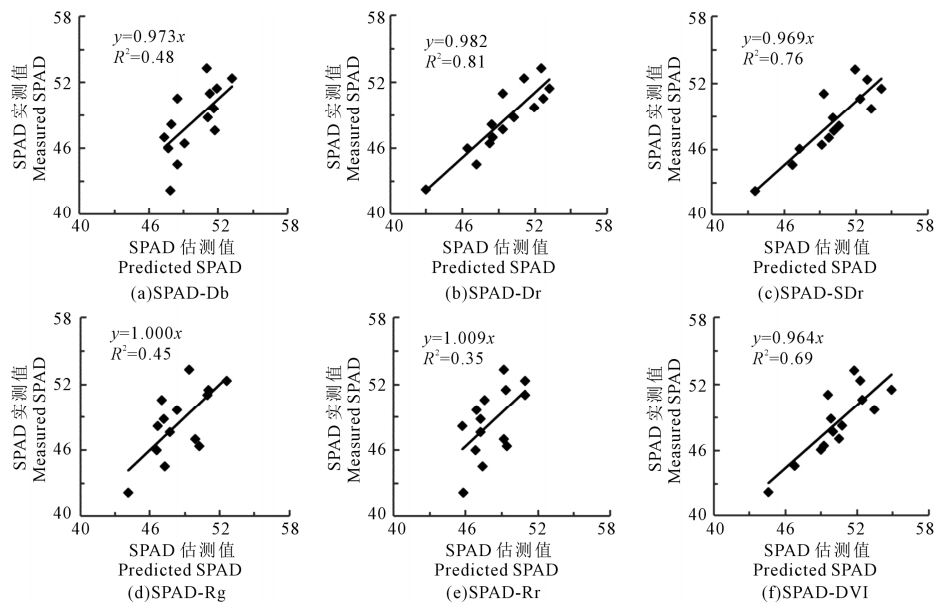


图 4 玉米叶片 SPAD 实测值与估测值拟合

Fig.4 Regression results of estimated and measured maize leaf SPAD values

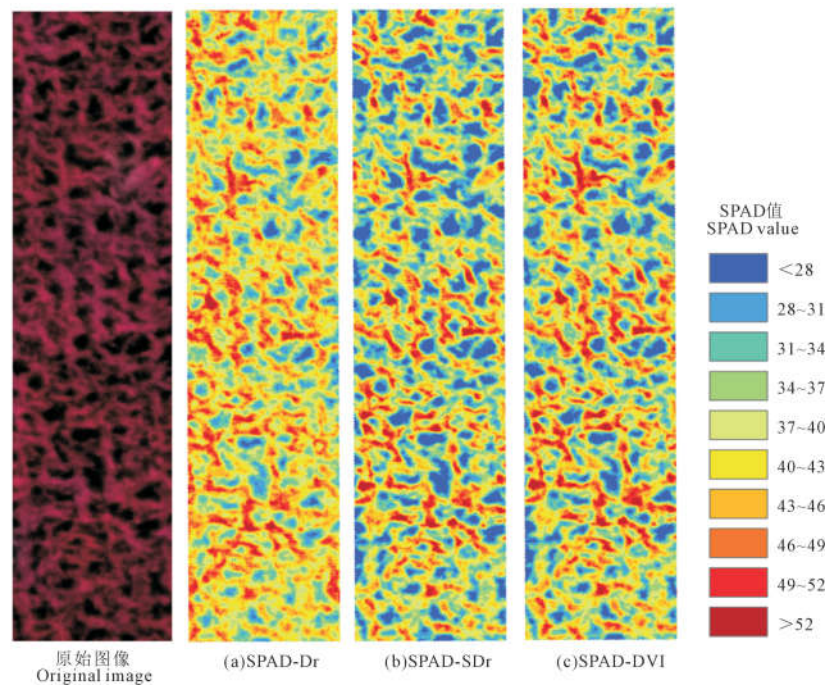


图 5 不同模型玉米叶片 SPAD 值反演估测

Fig.5 Distribution maps of maize leaf SPAD values estimated using different models

表 5 玉米叶片 SPAD 实测值与填图估测值统计特征

Table 5 Statistical characteristics of observed and estimated maize leaf SPAD values on different distribution maps

项目 Item	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation
SPAD 实测值 Measured SPAD value	39.57	54.70	48.66	3.59
SPAD-Dr	22.19	58.07	40.3	5.58
SPAD-SDr	16.29	62.70	37.29	7.16
SPAD-DVI	16.74	62.53	38.37	6.98

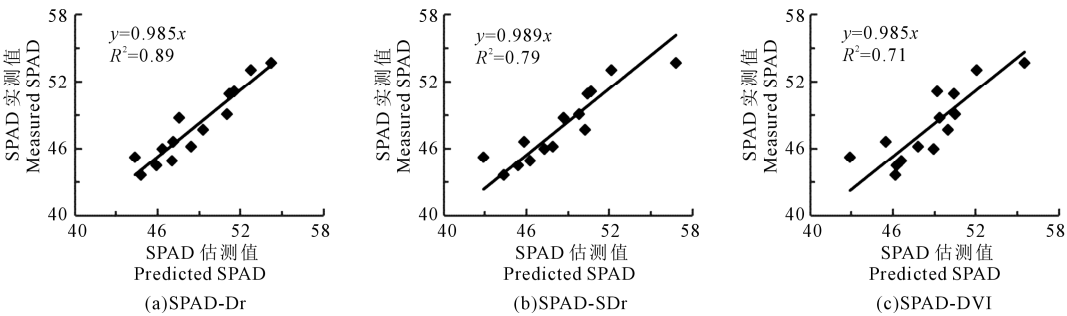


图 6 玉米叶片 SPAD 实测值与填图估测值拟合

Fig.6 Regression results of predicted and measured maize leaf SPAD values on different distribution maps

表 6 玉米叶片 SPAD 值填图结果精度检验

Table 6 Accuracy test of maize leaf SPAD values

distribution maps				
模型 Model	回归方 程斜率 Regression equation slope	R^2	REMS	RE/%
SPAD-Dr	0.985	0.89	1.28	2.31
SPAD-SDr	0.989	0.79	1.51	2.59
SPAD-DVI	0.985	0.71	1.81	3.55

3 讨论与结论

3.1 讨论

采用无人机低空遥感平台获得农田地块尺度的高光谱遥感图像,构建基于红边一阶微分最大值(Dr)的玉米叶绿素含量估算模型(SPAD-Dr模型),可以帮助快速获取玉米农田信息,指导农业生产。但是玉米叶片叶绿素含量会随着玉米品种、生育期、生长环境等因素的变化而改变,本研究数据源自于关中地区玉米灌浆期,因此获得叶绿素估算模型受限于实验条件和环境差异,在其它不同环境地区和生育期应用误差会较大,需要更加深入长期地系统研究,建立更普适的玉米叶片叶绿素含量估算模型。

目前,低空无人机成像光谱技术在农业领域的应用还处于探索阶段。低空无人机获得的遥感图像具有较高的空间分辨率,能捕获农作物不同部位细小的辐射差异,导致影像反演结果中同一株玉米

冠层中心的叶片叶绿素含量和四周相互遮蔽的叶片叶绿素含量差异明显,与实际情况有一定差异,需要进一步探索合适的无人机飞行高度,获得合适玉米植株尺度的影像。此外,小型无人机飞行不稳定,获得的影像易发生几何变形,且受到无人机载荷限制难以实现高精度地理位置的获取与记录,几何校正困难,需进一步研发无人机遥感影像几何校正系统。

3.2 结论

本文以无人机为平台,获得农田地块尺度高光谱影像,构建玉米叶片叶绿素含量估算模型,得到以下结论:

(1)以无人机为遥感平台获得的玉米高光谱影像具有典型的植被波谱特征,且在450~680 nm的可见光波段反射率与玉米叶片SPAD值呈负相关,在750~850 nm的近红外波段反射率与SPAD值呈正相关。

(2)光谱特征参数中,SDr、Rg、DVI、Dr、Rr、Db等6个参数与玉米叶片SPAD值相关性大于0.6且达显著水平。基于以上6个特征参数分别构建玉米叶片SPAD值估算模型,其中,SPAD-SDr模型具有最高的建模精度($R^2 = 0.74$),SPAD-Dr模型($R^2 = 0.61$)和SPAD-DVI模型($R^2 = 0.64$)建模精度也较高。

(3)分别应用SPAD-SDr模型、SPAD-Dr模型、SPAD-DVI模型对研究区高光谱影像进行反演填图,SPAD-Dr模型填图精度最高($R^2 = 0.89$, RMSE =

1.28, $RE=2.31$), 可以为区域玉米叶片叶绿素含量无损快速测量提供技术支持。

参考文献:

- [1] 魏湜,曹广才,高洁,等.玉米生态基础[M].北京:中国农业出版社,2010:12-14,47.
- [2] 赵英时,陈冬梅,杨立明,等.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社,2013:81-86.
- [3] 童庆禧,张兵,张立福.中国高光谱遥感的前沿进展[J].遥感学报,2016,20(05):689-707.
- [4] 张兆明,何国金,江洪.基于 EO—1Hyperion 高光谱影像的福建森林叶面积指数反演[J].科学技术与工程,2013,13(31):9159-9162.
- [5] 王胜,潘洁,张衡,等.基于高光谱遥感影像的森林病虫害监测研究进展[J].林业资源管理,2014,(03):134-140.
- [6] 李军玲,郭其乐,任丽伟.基于近地高光谱和环境星高光谱数据的冬小麦越冬冻害遥感监测方法研究[J].自然灾害学报,2017,26(02):53-63.
- [7] 王冉,刘志刚,冯海宽,等.基于近地面高光谱影像的冬小麦日光诱导叶绿素荧光提取与分析[J].光谱学与光谱分析,2013,33(09):2451-2454.
- [8] 张东彦,刘镭源,宋晓宇,等.应用近地成像高光谱估算玉米叶绿素含量[J].光谱学与光谱分析,2011,31(03):771-775.
- [9] 乔振民,邢立新,李森森,等.Hyperion 数据玉米叶绿素含量制图[J].遥感技术与应用,2012,27(02):275-281.
- [10] 罗红霞,阚应波,王玲玲,等.基于高光谱遥感技术的农作物病虫害应用研究现状[J].广东农业科学,2012,39(18):76-80.
- [11] 徐伟凡,施勇,李云梅.基于环境一号卫星高光谱数据的太湖富营养化遥感评价模型[J].长江流域资源与环境,2014,8(08):1111-1118.
- [12] 李德仁,李明.无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J].武汉大学学报(信息科学版),2014,39(05):505-513.
- [13] 艾天成,李方敏,周治安,等.作物叶片叶绿素含量与 SPAD 值相关性研究[J].湖北农学院学报,2000,20(01):6-8.
- [14] 张金恒,王珂,王人潮.高光谱评价植被叶绿素含量的研究进展[J].上海交通大学学报(农业科学版),2003,21(01):74-80.
- [15] 杨峰,范亚民,李建龙,等.高光谱数据估测稻麦叶面积指数和叶绿素密度[J].农业工程学报,2010,26(02):237-243.
- [16] 孙雪梅,周启发,何秋霞.利用高光谱参数预测水稻叶片叶绿素和籽粒蛋白质含量[J].作物学报,2005,31(07):844-850.
- [17] 吴长山,项月琴,郑兰芬,等.利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究[J].遥感学报,2000,4(03):228-232.
- [18] 黄文江,王纪华,刘良云,等.冬小麦红边参数变化规律及其营养诊断[J].遥感技术与应用,2003,18(04):206-211.
- [19] 易秋香,黄敬峰,王秀珍,等.玉米叶绿素高光谱遥感估算模型研究[J].科技通报,2007,21(01):83-87+105.
- [20] 王强,易秋香,包安明,等.基于高光谱反射率的棉花冠层叶绿素密度估算[J].农业工程学报,2012,28(15):125-132.
- [21] 宫兆宁,赵雅莉,赵文吉,等.基于光谱指数的植物叶片叶绿素含量的估算模型[J].生态学报,2014,34(20):5736-5745.
- [22] Boochs F, Kupfer G, Dockter K, et al. Shape of the red edge as vitality indicator for plants[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(10): 1741-1753.
- [23] Horler D H, Dockray M, Barber J. The red edge of plant leaf reflectance[J]. International Journal of Remote Sensing, 1983, 4(2): 273-288.
- [24] 王秀珍,黄敬峰,李云梅,等.水稻生物化学参数与高光谱遥感特征参数的相关分析[J].农业工程学报,2003,19(02):144-148.
- [25] Filella I, Penuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(7): 1459-1470.
- [26] Jordan C F. Derivation of leaf - area index from quality of light on the forest floor[J]. Ecology, 1969, 50(4): 663-666.
- [27] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation [R]. NASA/GSFC:Final Report, 1974.
- [28] Daughtry C T, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(2): 229-239.
- [29] Roujean J L, Breon F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(3): 375-384.
- [30] Rondeaux, Steven, Baret. Optimization of soil ~ adjusted vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 1996,55(2):95-107.
- [31] 金震宇,田庆久,惠凤鸣,等.水稻叶绿素浓度与光谱反射率关系研究[J].遥感技术与应用,2003,18(03):134-137.