

李瑞鑫, 张宝林, 潘丽杰, 等. 不同无人机飞行高度下玉米叶片叶绿素相对含量的无人机遥感反演及其指示叶位的识别[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(7): 1234-1244.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.07.010

# 不同无人机飞行高度下玉米叶片叶绿素相对含量的无人机遥感反演及其指示叶位的识别

李瑞鑫<sup>1</sup>, 张宝林<sup>1,2,3</sup>, 潘丽杰<sup>1</sup>, 牛潘婷<sup>1</sup>, 斯琴高娃<sup>1</sup>, 何美玲<sup>1</sup>

(1. 内蒙古师范大学化学与环境科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 内蒙古自治区环境化学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3. 内蒙古节水农业工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:** 玉米叶片叶绿素含量的空间异质性对其监测精度有影响。本研究旨在基于无人机遥感技术探究玉米叶片叶绿素相对含量 (SPAD 值) 与植被指数间的关系, 从而明确指示叶位、无人机的最佳飞行高度。采用随机森林法构建基于植被指数的叶绿素相对含量遥感估算模型, 并进行模型的评价。结果表明, 玉米灌浆期叶片的叶绿素相对含量高于乳熟期叶片的叶绿素相对含量, 植株中部叶片的叶绿素相对含量高于上部、下部叶片的叶绿素相对含量。在玉米灌浆期与乳熟期, 玉米叶片 SPAD 值的指示叶位为第 5 叶, 当无人机飞行高度为 20 m 时, 模型的精度最高 [决定系数 ( $R^2$ ) = 0.94]。研究结果可为提高叶绿素相对含量遥感监测的精度提供技术支撑, 并为农作物的田间智能化管理提供理论依据。

**关键词:** 玉米; 叶绿素; 无人机; 遥感; 指示叶位; 智能

**中图分类号:** X87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)07-1234-11

## Unmanned aerial vehicle remote sensing inversion of relative chlorophyll content of maize leaves and identification of their indicator leaf at different flight altitudes

LI Ruixin<sup>1</sup>, ZHANG Baolin<sup>1,2,3</sup>, PAN Lijie<sup>1</sup>, NIU Panting<sup>1</sup>, Siqingaowa<sup>1</sup>, HE Meiling<sup>1</sup>

(1. College of Chemistry and Environmental Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010020, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Environmental Chemistry, Hohhot 010020, China; 3. Inner Mongolia Water-saving Agriculture Engineering Research Center, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** The detection accuracy of chlorophyll content in maize leaves is affected by spatial heterogeneity. The purpose of this study was to investigate the relationship between relative chlorophyll content (SPAD value) and vegetation indices of maize leaves based on unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing technology, so as to clarify the indicator leaf and the best UAV flying altitude. The remote sensing estimation model of relative chlorophyll content based on vegetation indices was constructed by random forest method, and the model was evaluated. The results showed that relative chlorophyll

content in maize leaves at grain filling stage was higher than that at milking stage, and relative chlorophyll content of middle leaves was higher than that of upper and lower leaves. During the grain filling stage and milking stage, the SPAD value of maize leaves was indicated by the fifth leaf, and the best precision for the regression model ( $R^2$  = 0.94) was obtained when the flying altitude of UAV was

收稿日期: 2024-03-22

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目 (2022LHMS03009); 内蒙古自治区科技重大专项 (2021ZD0003-1); 内蒙古师范大学基本科研业务费专项 (2022JBTD009)

作者简介: 李瑞鑫 (1998-), 男, 内蒙古巴彦淖尔人, 硕士研究生, 研究方向为环境遥感。 (E-mail) 1443637569@qq.com

通讯作者: 张宝林, (E-mail) zhangbl@imnu.edu.cn

20 m. The results can provide technical support for improving the accuracy of remote sensing monitoring of relative chlorophyll content, and provide theoretical basis for crop smart management in the fields.

**Key words:** maize; chlorophyll; unmanned aerial vehicle; remote sensing; indicator leaf; intelligence

玉米是中国第一大粮食作物,玉米生产对国民经济和社会发展具有重要意义。叶绿素含量是反映农作物光合效率、氮素胁迫、水分供给和发育状况的指标<sup>[1]</sup>。叶绿素含量对农作物产量有重要影响,是玉米冠层重要的生理生化参数。玉米叶绿素含量的分布表现出垂直异质性<sup>[2-3]</sup>,不同生育时期、不同叶位叶片的叶绿素含量均不同,从而给准确监测玉米冠层的叶绿素含量带来了挑战。

“分层切片”是进行传统叶绿素含量监测的主要手段,主要借助化学方法<sup>[4]</sup>、叶绿素计<sup>[5]</sup>、地物光谱仪<sup>[6]</sup>和荧光技术<sup>[7]</sup>等对叶片叶绿素含量进行监测,研究过程费时费力,难以大面积推广应用。定量遥感技术的出现,极大地推动了叶片、冠层生化参数(如叶绿素含量等)的反演<sup>[2]</sup>。研究发现,使用SPAD叶绿素仪获取叶片的SPAD值,可代替传统方法用于测定叶片叶绿素相对含量。叶片的SPAD值越高,表明植物的生长活力越强,长势越好<sup>[8]</sup>。然而,目前叶绿素仪仅适用于叶片的单点测量,为了实现植物冠层或大面积叶片叶绿素相对含量的监测,可根据植物的叶绿素相对含量、水分含量、干物质含量等形成的特有光谱特征构建植被指数,对植被状况进行评估<sup>[9]</sup>,以反映植被特征信息。通过建立植被指数与叶绿素相对含量之间关系的统计模型,可以估算叶片的叶绿素相对含量<sup>[10]</sup>。目前,人们广泛使用的植被指数有50余种<sup>[11]</sup>,已成为遥感反演植被叶绿素相对含量、覆盖度、叶面积指数、生物量、净初级生产力和光合有效辐射吸收等生物物理与生物化学参数的重要技术指标。

近年来,由于无人机遥感(UAV)具有机动灵活、便捷性强、数据采集成本低、影像分辨率高、对天气变化不敏感等优点<sup>[12]</sup>,使其在农业等众多领域呈现出较好的应用前景。在基于无人机遥感技术构建玉米叶绿素相对含量反演模型的过程中,已有的研究大多基于冠层、叶片的分层观测数据,没有细化到具体叶位,可能会造成信息丢失<sup>[13]</sup>。同时,由于玉米株型高大,叶绿素相对含量的垂直变化规律主要表现在生育中后期,而目前的研究主要集中于生育前期<sup>[3]</sup>,因此基于无人机遥感的

玉米生育中后期叶绿素相对含量的垂直变化规律有待进一步研究。此外,无人机的飞行高度会影响叶绿素相对含量的估算结果<sup>[14]</sup>。但是,无人机的飞行参数设定大多依赖于经验,在保证飞行安全、无障碍物、图像清晰、无人机风场不产生扰动的前提下设定飞行高度,往往无法使传感设备的利用效率实现最大化,从而使试验成本增加,耗费人力物力。在对田间作物表型进行监测的过程中,随着无人机飞行高度的增加,影像空间分辨率下降,获取的信息细节减少,使得光谱信息发生明显变化,可能出现混合像元<sup>[15]</sup>。但是,当飞行时间大幅缩短时,影像数量减少,后期影像处理耗时缩短,从而提高了工作效率<sup>[14]</sup>。在对全试验区域进行拍摄时,无人机影像可能会受到飞行姿态、镜头畸变的影响,需要通过预处理获得正射校正影像<sup>[16]</sup>。在多旋翼无人机的续航时间内,当飞行高度从90 m降低到30 m时,相同面积的影像数量增加了200张,从而降低了采样效率,增加了拼接时间<sup>[15]</sup>。因此,研究无人机飞行高度对获取作物信息准确性的影响,对于优化飞行策略、提高无人机飞行效率、降低作业成本具有重要意义<sup>[14]</sup>。研究发现,通过设置不同无人机飞行高度或图像重采样法<sup>[14]</sup>可以模拟无人机飞行高度对影像分辨率的影响。图像重采样法可最大限度地防止外界环境变化对图像质量造成的干扰,但易受到原始数据的质量、降采样高斯权重随机参数等的影响<sup>[16]</sup>。对不同农作物的研究发现,拍摄高度对表型参数的估算精度存在一定影响。在对玉米叶绿素相对含量的预测研究中,大多采用单一飞行高度<sup>[17]</sup>,一般为40~75 m。

为了探索在不同飞行高度下获取的无人机影像对作物表型反演的影响,提高无人机的采样效率,有效利用续航时间,本研究拟在玉米的灌浆期、乳熟期基于无人机可见光遥感技术研究无人机的不同飞行高度下玉米不同生育时期、不同叶位叶片的SPAD值与可见光植被指数间的关系及无人机遥感的敏感叶位,探究无人机遥感对玉米叶片叶绿素相对含量的反演能力,以期对叶片叶绿素相对含量的精准监

测和田间作物管理提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域位于内蒙古呼和浩特市,平均海拔为 1 000 m。该地区属于温带大陆性气候,年均降水量为 320 mm,空气干燥,年平均日照时数约为 3 000 h。

### 1.2 叶绿素相对含量的测定

试验地点位于 111°38'52"E, 40°41'25"N, 总面积约为 1.2 hm<sup>2</sup>, 根据试验要求, 将试验区划分为 10 个小区(图 1)。玉米品种为瑞普 686, 播种时间为 5 月上旬, 收获时间为 9 月下旬, 行距为 0.45 m, 株距为 0.30 m。地面数据的采集与无人机遥感同步, 使手持全球定位系统(GPS)与航点飞行配合, 用 SPAD-502plus 手持叶绿素仪测定玉米叶片的 SPAD 值。每个小区选取 3 株玉米, 自上而下测定全部叶片的 SPAD 值。测量时避开叶脉, 分别在叶基、叶中、叶尖测定 2 次 SPAD 值, 取其平均值作为该叶片的 SPAD 值<sup>[18]</sup>。每个小区选用 3 株玉米相同叶位叶片的平均 SPAD 值表征该叶位叶片叶绿素相对含量。由于下部叶片衰老、干枯、不完整等, 全株玉米有 13~14 张叶片时即可测定叶绿素相对含量。



图 1 研究区域的地理位置

Fig.1 Geographic location of the study area

### 1.3 无人机影像的获取与预处理

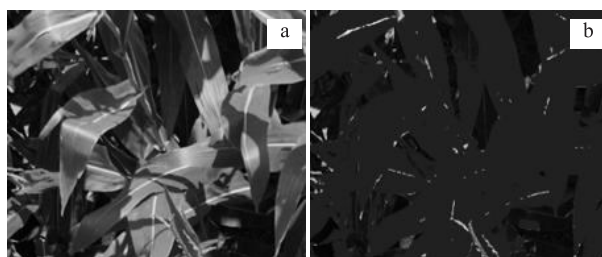
用大疆无人机 Mavic3M 搭载可见光相机进行图像采集, 无人机飞行高度设为 10 m、15 m、20 m、25 m、50 m 和 75 m, 相机设置定时拍摄, 数据储存格式为 jpg。在玉米灌浆期(2023 年 8 月 12 日)和乳

熟期(2023 年 8 月 28 日), 选取太阳辐射强度稳定、天气晴朗的时刻(10:00–14:00)进行数据采集<sup>[19]</sup>。采集的无人机影像用大疆智图软件进行拼接和预处理。

由于玉米试验田的无人机影像由土壤、植被像元组成, 为了减少背景的影响, 本研究用 ExG<sup>[20]</sup> 植被指数进行阈值分割, 去除边界、土壤背景等的影响后, 能够准确获取玉米的覆盖度(图 2)。相关计算公式如下:

$$ExG = 2G - R - B$$

式中,  $R$ 、 $G$ 、 $B$  分别为红波段、绿波段、蓝波段的像素值(DN)。



a: 原始图像; b: ExG 植被图像。

图 2 玉米影像的 ExG 阈值分割结果

Fig.2 Image segmentation by excess green index

### 1.4 植被指数的选取

参考叶绿素相对含量与植被指数之间关系的研究方法, 本研究选用 13 种常用的可见光植被指数(表 1), 建立植被指数与叶绿素相对含量间关系的统计模型, 用于估算玉米叶片的叶绿素相对含量。

### 1.5 数据分析

随机森林法(RF)是一种基于集成学习和随机空间的机器学习算法, 可有效处理多变量问题, 不易过拟合, 对异常值、缺失值和干扰值有较高的容忍度, 具有良好的鲁棒性。本研究使用随机森林回归算法, 将 80% 的样本数据用于模型训练, 20% 的样本数据用于模型验证。在构建不同飞行高度下无人机遥感的玉米指示叶位叶绿素相对含量的预测模型时, 输入变量为植被指数, 输出变量为叶片叶绿素相对含量(SPAD 值), 采用决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)、均方误差(MSE)和平均绝对误差(MAE)对模型进行评价。相关计算公式如下:

表 1 与叶绿素相对含量相关的可见光植被指数

Table 1 Visible light vegetation indices related to relative chlorophyll content

名称	公式	文献
差值植被指数(DVI)	$DVI=R-B$	[21]
绿红比值指数(GRRI)	$GRRI=G/R$	[22]
蓝红比值指数(BRRI)	$BRRI=B/R$	[23]
蓝绿比值指数(BGRI)	$BGRI=B/G$	[24]
红绿比值指数(RGRI)	$RGRI=R/G$	[25]
红光标准化值(NRI)	$NRI=R/(R+G+B)$	[26]
绿光标准化值(NGI)	$NGI=G/(R+G+B)$	[26]
蓝光标准化值(NBI)	$NBI=B/(R+G+B)$	[26]
可见光波段差异植被指数(VDVI)	$VDVI=(2G-R-B)/(2G+R+B)$	[27]
归一化叶绿素比值植被指数(NPCI)	$NPCI=(R-B)/(R+B)$	[28]
归一化蓝绿差异植被指数(NGBDI)	$NGBDI=(G-B)/(G+B)$	[29]
归一化绿红差异指数(NGRDI)	$NGRDI=(G-R)/(G+R)$	[30]
植被颜色指数(CIVE)	$CIVE=0.44R-0.88G+0.39B+18.79$	[31]

R、G、B 分别为红波段、绿波段、蓝波段的像素值。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (M_i - \bar{M})(E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (E_i - \bar{E})^2}}$$
$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (M_i - E_i)^2$$
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (M_i - E_i)^2}$$
$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |(M_i - E_i)|$$

式中, $M_i$ 为实测的叶片 SPAD 值, $\bar{M}$ 为实测的叶片平均 SPAD 值, $E_i$ 为预测的叶片 SPAD 值, $\bar{E}$ 为预测的叶片平均 SPAD 值, $m$ 为样本数。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米不同叶位叶片叶绿素相对含量的变化

由图 3 可以看出,在玉米的灌浆期和乳熟期,叶片的 SPAD 值表现为中部叶位高、上部叶位和下部叶位低,呈单峰曲线变化。在1~4 叶位,玉米叶片的 SPAD 值呈现增加的趋势;在5~10 叶位,玉米叶片的 SPAD 值较高;当叶位>10 后,玉米叶片的 SPAD 值呈现下降的趋势。最高 SPAD 值一般出现在第 7~8 叶位(穗位叶)。此外,玉米中部叶位、上部叶位叶片的 SPAD 值分布相对集中,差异相对较小;下部叶位的叶片由于衰老、干旱等原因,叶片 SPAD 值的变化较大;与乳熟期相比,玉米灌浆期叶片的 SPAD 值相对较高。

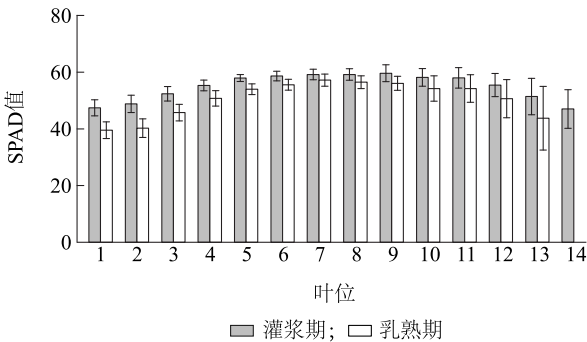


图 3 玉米不同叶位叶片 SPAD 值的变化

Fig.3 Changes of SPAD values of maize leaves at different leaf positions

### 2.2 无人机遥感测定玉米叶片叶绿素相对含量的指示叶位

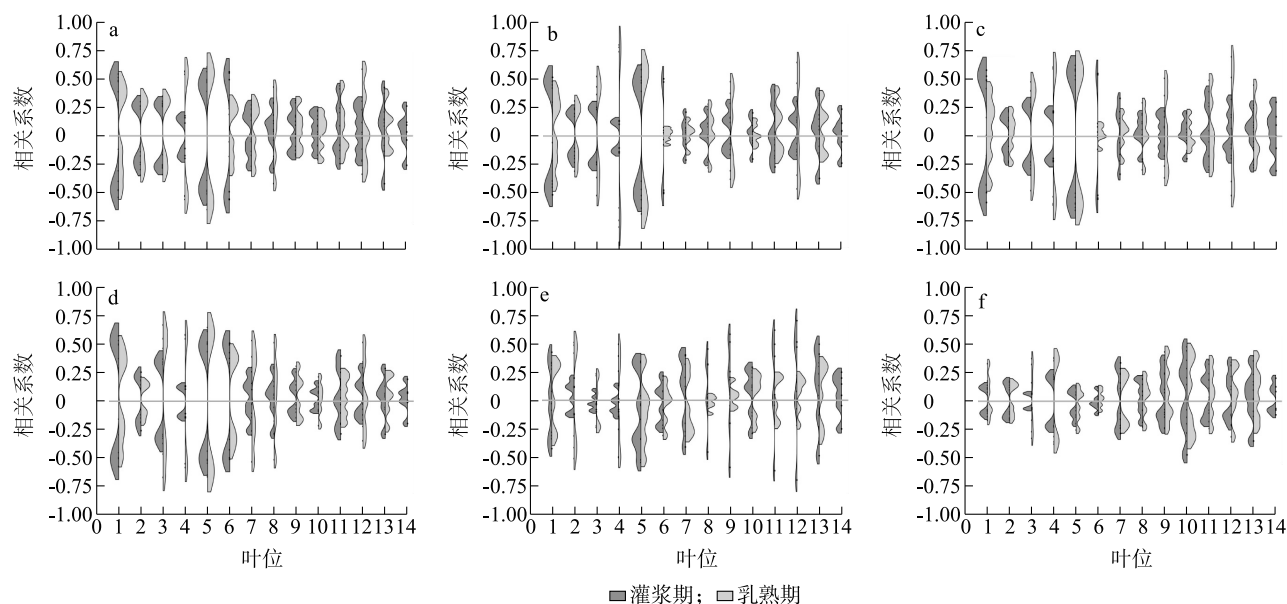
对在不同无人机飞行高度下提取的植被指数(表 1)与各叶位叶片的 SPAD 值进行相关性分析,分析相关系数的大小及其变异情况,根据相关系数绝对值的大小及其分布情况,确定无人机遥感测定玉米叶片叶绿素相对含量的指示叶位。

由图 4 可以看出,当无人机飞行高度为 10 m 时,NGBDI、NDVI、BGRI、NBI、BRRI、NPCI 6 种植被指数与玉米第 5 叶位叶片 SPAD 值间的相关系数的绝对值最大,相关系数的绝对值在乳熟期、灌浆期均集中于 0.50~0.75,6 种植被指数[蓝红比值指数(BRRI)、蓝绿比值指数(BGRI)、蓝光标准化值(NBI)、可见光波段差异植被指数(VDVI)、归



一化叶绿素比值植被指数(NPCI)和归一化蓝绿差异植被指数(NGBDI)]与玉米其他叶位叶片 SPAD 值间的相关系数分布得较为分散,或表现不一致,或相关系数较低;从玉米第 7 叶位叶片开始,6 种植被指数与玉米叶片 SPAD 值间相关系数的分布较为分散,大致集中在 $-0.25 \sim 0.25$ (图 4a)。由此可见,在灌浆期和乳熟期,当无人机的飞行高度为 10 m 时,玉米叶片 SPAD 值的指示叶位为第 5 叶。当无人机飞行高度为 15 m 时, NGBDI、NDVI、BGRI、NBI、BRRI、NPCI 6 种植被指数与玉米灌浆期第 1、第 5、第 6 叶位叶片 SPAD 值间的相关系数分布得较为集中,与乳熟期第 4、第 5 叶位 SPAD 值间的相关系数分布得较为集中(图 4b)。当无人机飞行高度为 20 m(图 4c)、25 m(图 4d)时,6 种植被指数与玉米叶片 SPAD 值间相关系数的分布与飞行高度为 15 m 时相比呈现出相似的规律,但相关系数的分布范围略有差异,在乳熟期,6 种植被指数与玉米第 5 叶位 SPAD 值间的相关系数

高于灌浆期。当无人机飞行高度为 50 m(图 4e)时,6 种植被指数与玉米第 5 叶位 SPAD 值间相关系数的分布较无人机飞行高度为 10~25 m 时分散。与无人机飞行高度为 10~50 m 相比,当无人机飞行高度为 75 m(图 4f)时,6 种植被指数与叶片 SPAD 值间的相关性变弱,相关系数绝对值集中于 $0 \sim 0.5$ 。分析不同生育时期、不同无人机飞行高度 6 种植被指数与玉米叶片 SPAD 值间的相关性可知,当无人机飞行高度为 10~25 m 时,6 种植被指数与玉米叶片 SPAD 值间的相关系数较为稳定;当无人机飞行高度为 50~75 m 时,植被指数与玉米叶片 SPAD 值间相关系数的波动较大。从整体来看,在玉米灌浆期、乳熟期,无人机遥感测定的叶绿素相对含量指示叶位为第 5 叶位。试验区的调查结果表明,当玉米穗位叶叶位为第 7~8 叶,无人机遥感观测叶绿素相对含量的深度在穗位叶以上。



a: 飞行高度 10 m; b: 飞行高度 15 m; c: 飞行高度 20 m; d: 飞行高度 25 m; e: 飞行高度 50 m; f: 飞行高度 75 m。

图 4 植被指数与玉米不同叶位叶片 SPAD 值间的相关性

Fig.4 Correlations between vegetation index and leaf SPAD at different leaf positions of maize

### 2.3 无人机遥感测定玉米叶片叶绿素相对含量的最佳飞行高度

由表 2 可以看出,在玉米灌浆期与乳熟期,不同飞行高度下由无人机遥感获得的 13 种植被指数与指示叶位叶片 SPAD 值间的相关系数存在差异。在

灌浆期,无人机飞行高度为 20 m 时,6 种植被指数[蓝红比值指数(BRRI)、蓝绿比值指数(BGRI)、蓝光标准化值(NBI)、可见光波段差异植被指数(VDVI)、归一化叶绿素比值植被指数(NPCI)和归一化蓝绿差异植被指数(NGBDI)]与叶片 SPAD 值呈显

著相关( $\alpha=0.05$ )。在乳熟期,当无人机飞行高度为15~20 m时,6种植被指数与叶片 SPAD 值呈显著( $\alpha=0.05$ )或极显著( $\alpha=0.01$ )相关。在2个生育时期,在20 m无人机飞行高度获得的植被指数

BRRI、BGRI、NBI、VDVI、NPCI 和 NGBDI 均与叶片 SPAD 值呈显著相关( $\alpha=0.05$ )。由此可见,在进行玉米叶片叶绿素相对含量的反演时,无人机的最佳飞行高度为20 m。

表2 不同无人机飞行高度下植被指数与玉米指示叶位叶片 SPAD 值间的相关性

Table 2 Correlations between vegetation index captured at different flight heights and SPAD value of indicator leaf

生育时期	植被指数	不同飞行高度植被指数与叶片 SPAD 值间的相关系数					
		10 m	15 m	20 m	25 m	50 m	75 m
灌浆期	DVI	-0.04	0.01	0.01	0.21	0.27	0.17
	GRRI	-0.58	-0.59	-0.60	-0.58	-0.41	-0.18
	BRRI	0.52	0.51	0.63 *	0.54	-0.22	-0.11
	BGRI	0.61	0.59	0.65 *	0.59	0.31	0.04
	RGRI	0.58	0.59	0.59	0.57	0.41	0.18
	NRI	0.28	0.41	0.26	0.37	0.36	0.31
	NGI	-0.62	-0.60	-0.64	-0.60	-0.43	-0.11
	NBI	0.59	0.57	0.65 *	0.58	0.04	0.00
	VDVI	-0.62	-0.60	-0.64 *	-0.60	-0.43	-0.11
	CIVE	0.53	0.51	0.37	0.48	0.35	0.05
	NPCI	-0.52	-0.51	-0.63 *	-0.55	0.22	0.12
	NGBDI	-0.62	-0.59	-0.65 *	-0.59	-0.31	-0.04
	NGRDI	-0.58	-0.59	-0.59	-0.58	-0.41	-0.18
乳熟期	DVI	-0.21	-0.13	0.42	0.35	0.24	-0.11
	GRRI	-0.54	-0.61	-0.50	-0.60	-0.46	-0.26
	BRRI	0.58	0.75 *	0.64 *	0.61	0.01	0.21
	BGRI	0.66 *	0.79 *	0.69 *	-0.69 *	0.35	0.31
	RGRI	0.53	0.60	0.56	0.60	0.45	0.25
	NRI	-0.03	0.09	0.13	0.26	0.25	0.05
	NGI	-0.66 *	-0.74 *	-0.66 *	0.68 *	-0.50	-0.33
	NBI	0.64 *	0.79 **	0.69 *	-0.68 *	0.18	0.29
	VDVI	-0.66 *	-0.74 *	-0.66 *	0.68 *	-0.58	-0.33
	CIVE	0.59	0.59	0.34	0.14	0.10	0.32
	NPCI	-0.58 *	-0.75 *	-0.64 *	-0.61	-0.01	-0.22
	NGBDI	-0.66 *	-0.79 **	-0.69 *	-0.69 *	-0.36	-0.32
	NGRDI	-0.53	-0.61	-0.56	-0.60	-0.45	-0.26

\*\* 表示在 0.01 水平显著相关, \* 表示在 0.05 水平显著相关。DVI、GRRI、BRRI、BGRI、RGRI、NRI、NGI、NBI、NDVI、CIVE、NPCI、NGBDI、NGRDI 见表1。

## 2.4 基于随机森林回归的玉米叶片叶绿素相对含量的反演

当无人机飞行高度为10 m、15 m、20 m、25 m、50 m、75 m时,基于13种植被指数(筛选前),采用

随机森林法分别建立玉米叶片 SPAD 值的回归预测模型,表3显示,基于与玉米叶片 SPAD 值间相关性较高的6种植被指数建立的预测模型的表现整体上优于基于全部植被指数建立的预测模型的表现。

表 3 随机森林回归模型性能评估结果

Table 3 Performance evaluation results of random forest regression models

模型	无人机飞行高度 (m)	$R^2$	MAE	MSE	RMSE
筛选后(基于 6 种植被指数)	10	0.92	0.67	0.90	0.95
	15	0.90	0.84	1.09	1.04
	20	0.94	0.69	0.64	0.80
	25	0.87	0.88	1.41	1.19
	50	0.73	1.07	2.98	1.73
	75	0.66	1.13	3.78	1.95
筛选前(基于 13 种植被指数)	10	0.62	2.11	5.23	2.29
	15	0.66	1.42	3.41	1.85
	20	0.84	0.53	0.38	0.62
	25	0.43	2.29	6.56	2.56
	50	0.68	1.25	1.74	1.32
	75	0.69	2.00	4.37	2.09

$R^2$ : 决定系数; MAE: 平均绝对误差; MSE: 均方误差; RMSE: 均方根误差。13 种植被指数见表 1; 6 种植被指数为蓝红比值指数(BRRI)、蓝绿比值指数(BGRI)、蓝光标准化值(NBI)、可见光波段差异植被指数(VDVI)、归一化叶绿素比值植被指数(NPCI)和归一化蓝绿差异植被指数(NGBDI)。

当无人机的飞行高度为 10~20 m 时, 基于与 SPAD 值间相关性较高的 6 种植被指数(筛选后的 BRRI、BGRI、NBI、VDVI、NPCI 和 NGBDI), RF 预测模型的决定系数( $R^2$ )均不低于 0.90, 模型的表现较好; 当无人机的飞行高度达到 25 m 之后, 随飞行高度的增加, 模型的预测误差增大, 模型性能下降; 当无人机的飞行高度为 75 m 时, 预测玉米叶片 SPAD 值的效果最差。当无人机飞行高度为 20 m 时, 用无人机获取的植被指数进行玉米叶片叶绿素相对含量的预测, 模型的 RMSE = 0.80, MSE = 0.64, MAE = 0.69, 拟合效果( $R^2 = 0.94$ )优于无人机其他飞行高度(表 3)。基于 RF 回归模型的玉米叶片 SPAD 值的预测结果主要集中于 50~70(图 5), 与穗位叶及其上下叶位的叶绿素相对含量相近(图 3)。在空间上, 种植区中心地带的玉米叶片叶绿素相对含量相对较高, 叶片 SPAD 值 < 40 的区域主要分布于道路附近、地块分界线等处(图 5)。

## 2.5 玉米叶片叶绿素相对含量反演模型的可解释性分析

在玉米叶绿素相对含量的 RF 预测模型中, 植被指数的重要性存在差异。当无人机飞行高度为 10 m、20 m、25 m、50 m 时, BRRI、NBI 和 NPCI 为玉米叶片 SPAD 值预测模型的主要贡献因子。当无人机飞行高度为 50 m 时, BRRI 的贡献率最高。NBI

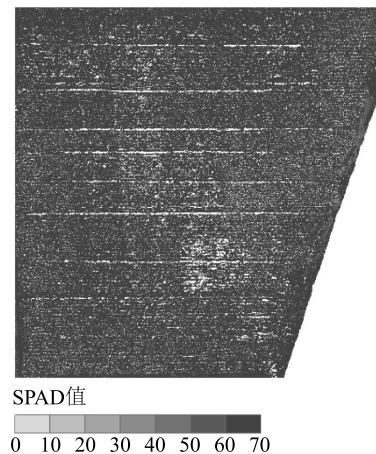
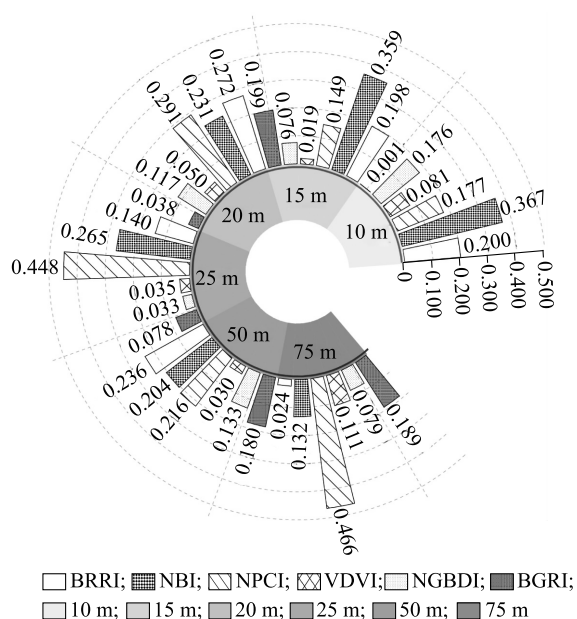


图 5 基于随机森林(RF)法回归模型的玉米叶片 SPAD 值的预测结果

Fig.5 Prediction of SPAD values of maize leaves based on random forest regression model

的贡献率在无人机飞行高度为 10 m、15 m 时较高, NPCI 的贡献率在无人机飞行高度为 20 m、25 m、75 m 时较高(图 6)。

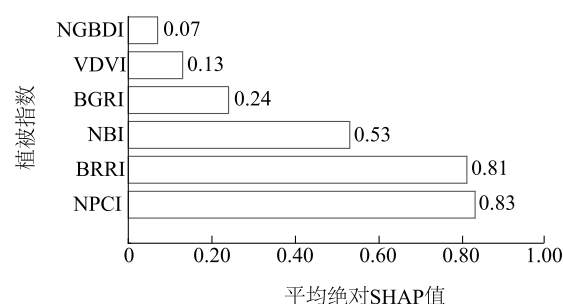
利用 SHAP 模型对 RF 预测模型进行可解释性分析, 通过全局特征重要性对无人机飞行高度为 20 m 时的全部样本的预测结果进行解释。在宏观层面, 根据 SHAP 模型中各特征的贡献率, NPCI、BRRI 和 NBI 对模型预测的贡献较大(图 7), 与基于 RF 回归的模型特征重要性分析结果相似。



BRRI、NBI、NPCI、NDVI、NGBDI、BGRI 见表 1。

图 6 随机森林模型特征的重要性

Fig.6 The importance of features in random forest models



NGBDI、NDVI、BGRI、NBI、BRRI、NPCI 见表 1。

图 7 SHAP 模型特征的重要性

Fig.7 The importance of features in SHAP model

在微观层面,SHAP 模型可以对单个样本的预测结果进行可解释性分析,使其更直观地呈现植被指数对叶片 SPAD 值预测的影响。随机抽取 2 个样本,当 SPAD 值的预测结果为 52.14 时,基准值为 55.04,最大的影响源自 BRRI=0.588 5(图 8a)。当 SPAD 值的预测结果为 57.84 时,BRRI、NPCI、NBI 是起到增强作用的主要因素(图 8b)。

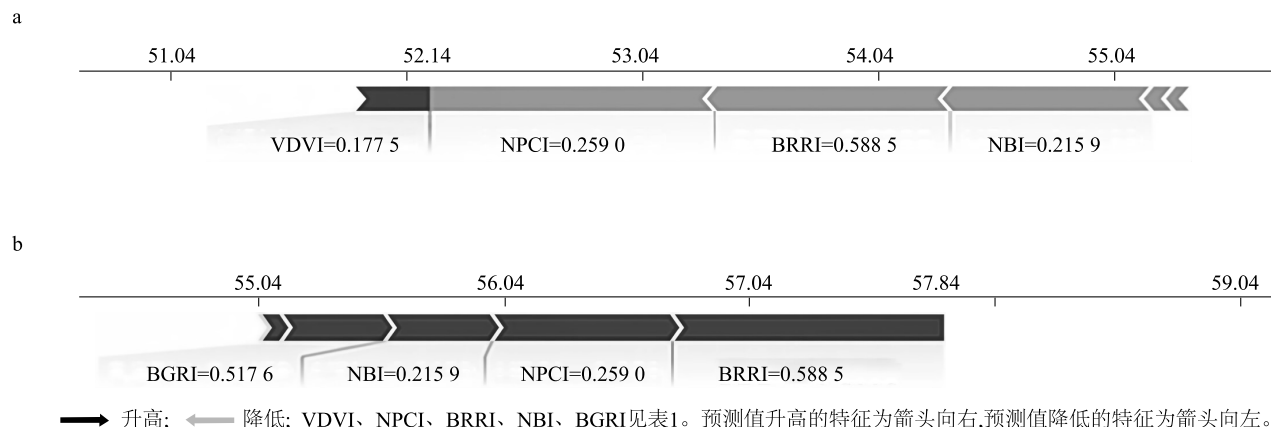


图 8 单一预测的可解释性

Fig.8 Interpretability of single prediction

由此可知,基于 RF 回归模型与 SHAP 模型,玉米叶绿素相对含量无人机反演的最适飞行高度为 20 m,贡献率较大的植被指数为 NPCI、BRRI 和 NBI。

### 3 讨论

#### 3.1 无人机遥感反演玉米叶片叶绿素相对含量的指示叶位

叶片中叶绿素相对含量的高低与植物的光合作用能力、生长发育和氮素营养状况有密切关

系<sup>[32-37]</sup>。目前,已有研究者利用无人机平台探究了植物冠层叶绿素相对含量及其与植被指数间的关系<sup>[14]</sup>,或者研究不同叶位的氮素营养状况。然而,基于玉米不同叶位叶绿素相对含量与植被指数的关系确定指示叶位,进而反演叶绿素相对含量的研究尚少见报道。玉米叶绿素相对含量的分布呈时空异质性,胡昌浩等<sup>[38]</sup>研究发现,玉米穗位叶的叶绿素含量高于其他叶位;随着叶片衰老,基部叶片的叶绿素含量下降,而中上部叶片的叶绿素含量增大,并且随着叶龄增加,叶片的叶绿素含量下降。这与本研



究中玉米不同叶位叶绿素相对含量的变化及含量最高叶位的研究结果一致,与生殖生长阶段穗位叶及其上下2~3张叶片对叶片合成有机物的作用最大有关<sup>[39]</sup>。本研究通过分析不同生育时期植被指数与玉米不同叶位叶片 SPAD 值间的相关性发现,在玉米灌浆期,叶片叶绿素相对含量无人机遥感的指示叶位为第5~6叶,乳熟期的指示叶位为第4~5叶,即用无人机进行叶绿素相对含量的遥感反演,主要反映了第4~6叶的叶绿素相对含量,由于植株顶端叶面积较小,中部叶面积较大,棒三叶面积最大<sup>[40]</sup>,因此单株第4~6叶为无人机视野内的主要监测目标。垂直观测光谱从冠层顶部可以检测到第6~8叶<sup>[41]</sup>,与本研究结论不完全相同,可能是由观测手段不同造成的。利用无人机监测指示叶位的叶绿素相对含量,可以提高玉米叶绿素相对含量监测的准确性,有助于及时掌握作物的生长状况,为作物田间管理提供理论依据。

### 3.2 植被指数与叶片叶绿素相对含量间的相关性分析

本研究结果表明,与指示叶位叶片 SPAD 值关系密切的植被指数有 BRRI、BGRI、NBI、VDVI、NPCI、NGBDI 等,在灌浆期(飞行高度为 20 m)和乳熟期(飞行高度为 15~25 m)的植被指数与叶片 SPAD 值间显著相关( $\alpha=0.05$ ),且在飞行高度为 20 m 时,2 个生育时期玉米的植被指数与叶片 SPAD 值间的相关性一致。有研究发现,在可见光波段范围,叶片光谱反射率在植物的整个生育期均表现为先上升后下降的趋势,与叶片叶绿素相对含量的变化趋势一致<sup>[42]</sup>。在可见光波段,叶绿素对绿光波段(550 nm)有较强的反射作用,而对红光波段(650~680 nm)、蓝光波段(450~500 nm)有明显的吸收作用<sup>[43]</sup>,红光波段、蓝光波段可以用于反演叶绿素相对含量<sup>[44]</sup>。红光波段的吸收现象是由叶绿素 a、叶绿素 b 引起的,蓝光波段的吸收现象是由叶绿素、类胡萝卜素引起的<sup>[45]</sup>。本研究结果表明,在玉米灌浆期,与叶绿素相对含量显著相关的植被指数多为蓝光波段敏感的植被指数,而在玉米乳熟期,蓝光波段敏感的植被指数减少,其原因是玉米绿色器官开始衰老,叶绿素的降解引起“叶绿素-蛋白质”复合体降解<sup>[46]</sup>,减少了对红光、蓝光的吸收。在飞行高度为 10 m 时,在乳熟期,叶绿素相对含量与 BRRI 间的相关性不显著,而与 BGRI、NBI、VDVI、NGBDI 间

的相关性显著。在对小麦进行叶绿素相对含量的预测中,随着无人机飞行高度的增加,由绿红比值植被指数的相关性较高变为红蓝比值植被指数的相关性较高<sup>[16]</sup>,与本研究结论相似,即在玉米乳熟期,叶片 SPAD 值与 15~20 m 高度的 BRRI、NPCI 显著相关,而到 25 m 后,其相关性减弱。由此可见,作物生育时期、无人机飞行高度和波段选择均会影响植被指数对叶片 SPAD 值的敏感性。

### 3.3 玉米叶片叶绿素相对含量的变化及预测

作物的叶绿素含量具有时空异质性<sup>[3]</sup>,不同生育期、不同叶位叶片的叶绿素含量不同。随着高度变化,叶片的叶绿素相对含量出现垂直分层的现象,最大值和最小值间的差值可达到最大值的 79.1%<sup>[2]</sup>。从拔节期到抽穗期、灌浆期,玉米叶绿素相对含量不断增加<sup>[47]</sup>;随着植物器官、组织的衰老,叶绿素发生分解,从灌浆期到蜡熟期,叶绿素相对含量下降<sup>[48]</sup>。

当无人机飞行高度为 20 m 时,采用随机森林法对植被指数和叶片 SPAD 值进行回归建模,模型具有最高精度( $R^2=0.94$ , RMSE=0.80, MSE=0.64, MAE=0.69),可用于玉米叶绿素相对含量的预测。通过 SHAP 模型进行可解释性分析,可以更好地量化模型中加入特征后的边际贡献<sup>[49]</sup>。有研究发现,影响预测精度最重要的植被指数为 NPCI、BRRI 和 NBI,均与蓝光波段有关,尤其是红光和蓝光组合的植被指数较重要,因此可以认为红光、蓝光波段是敏感波段。研究发现, NPCI、BRRI、DVI 与玉米叶片 SPAD 值间具有良好的相关性<sup>[50]</sup>,与本研究结论相近。

本研究发现,在进行玉米叶绿素相对含量反演时,无人机的最适高度为 20 m。但贺英等<sup>[50]</sup>估算玉米叶绿素相对含量,采用的无人机飞行高度为 40 m。还有研究者通过近邻插值算法模拟飞行高度,估算作物覆盖度、植被指数的最佳高度为 42 m<sup>[14]</sup>,与本研究结果不一致。分析无人机遥感的最适飞行高度研究结果不同的可能原因如下:1)研究不同作物、不同参数的最佳飞行高度不同;2)外界环境变化对获取的图像质量有影响;3)受到飞机姿态不稳定及相机镜头畸变<sup>[51]</sup>的影响;4)单点采样获得的无人机影像可能存在噪声等。因此,有必要进一步探究和验证无人机飞行高度对玉米叶片叶绿素相对含量反演精度的影响及其设置依据,更好地为无人机

遥感监测玉米叶片的叶绿素相对含量提供技术支撑。

## 4 结 论

玉米植株中部叶片的叶绿素相对含量高于上部叶片、下部叶片,灌浆期玉米叶片的叶绿素相对含量高于乳熟期。在灌浆期,对叶片叶绿素相对含量较为敏感的波段为蓝波段。无人机遥感测定叶绿素相对含量的最佳飞行高度为 20 m,无人机遥感测定玉米叶绿素相对含量的指示叶位为第 5 叶。RF 回归模型结果表明,当无人机飞行高度为 20 m 时,叶绿素反演模型的精度最高(RMSE=0.80, MSE=0.64, MAE=0.69),误差最小,拟合效果( $R^2=0.94$ )优于其他飞行高度,可解释性模型 SHAP 的分析结果表明,NPCI、BRR1 和 NBI 在模型中的贡献值较大。用单点拍摄法结合植被指数可以确定无人机遥感测定玉米叶绿素相对含量的指示叶位并预测叶绿素相对含量,研究结果可为玉米叶绿素实时监测提供技术支撑。但玉米的生育时期、无人机飞行高度和波段选择会影响植被指数对叶片 SPAD 值的敏感性,有必要进一步探讨选择新的植被指数,用于冠层和大面积叶绿素相对含量的无人机遥感。

### 参考文献:

- [1] 张国庆,黄楠,宋茜,等. 基于叶绿素含量的玉米长势遥感监测的研究[J]. 黑龙江科技信息,2013(19):6.
- [2] 谢东辉,朱启疆,王锦地,等. 基于真实三维结构的玉米冠层生化参数垂直分布的量化分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2007,43(3):337-342.
- [3] 潘丽杰,张宝林,李瑞鑫,等. 玉米不同叶位叶片叶绿素含量垂直分布研究进展[J]. 北方农业学报,2023,51(4):28-37.
- [4] 王群瑛,胡昌浩. 玉米不同叶位叶片叶绿体超微结构与光合性能的研究[J]. 植物学报,1988,30(2):146-150.
- [5] 童淑媛,宋凤斌,徐洪文. 玉米不同叶位叶片 SPAD 值的变化及其与生物量的相关性[J]. 核农学报,2008,22(6):869-874.
- [6] 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(2):165-178.
- [7] 朱延姝,郭丽丽,崔震海,等. 光强对玉米幼苗不同叶位叶片叶绿素荧光参数的影响[J]. 吉林农业科学,2013,38(4):1-4,14.
- [8] 王丹,赵朋,孙家波,等. 基于无人机多光谱的夏玉米叶绿素含量反演研究[J]. 山东农业科学,2021,53(6):121-126,132.
- [9] 郭妮. 植被指数及其研究进展[J]. 干旱气象,2003,21(4):71-75.
- [10] 徐晋,蒙继华. 农作物叶绿素含量遥感估算的研究进展与展望[J]. 遥感技术与应用,2016,31(1):74-85.
- [11] 敖登,杨佳慧,丁维婷,等. 54 种植被指数研究进展综述[J]. 安徽农业科学,2023,51(1):13-21,28.
- [12] 田婷,张青,张海东. 无人机遥感在作物监测中的应用研究进展[J]. 作物杂志,2020(5):1-8.
- [13] WU B, YE H C, HUANG W J, et al. Monitoring the vertical distribution of maize canopy chlorophyll content based on multi-angular spectral data[J]. Remote Sensing,2021,13(5):987.
- [14] 何勇,杜晓月,郑力源,等. 无人机飞行高度对植被覆盖度和植被指数估算结果的影响[J]. 农业工程学报,2022,38(24):63-72.
- [15] 井宇航,郭燕,张会芳,等. 无人机飞行高度对冬小麦植株氮积累量预测模型的影响[J]. 河南农业科学,2022,51(2):147-158.
- [16] 刘涛,张寰,王志业,等. 利用无人机多光谱估算小麦叶面积指数和叶绿素含量[J]. 农业工程学报,2021,37(19):65-72.
- [17] 郭松,常庆瑞,郑智康,等. 基于无人机高光谱影像的玉米叶绿素含量估测[J]. 江苏农业学报,2022,38(4):976-984.
- [18] 张银杰,王磊,白由路,等. 玉米不同层位叶片生理生化指标与 SPAD 值的关系[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(10):1805-1817.
- [19] 马明洋,许童羽,周云成,等. 东北粳稻叶绿素相对含量的无人机高清影像检测方法[J]. 沈阳农业大学学报,2017,48(6):757-762.
- [20] WOEBBECKE D M, MEYER G E, VON BARGEN K, et al. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions[J]. Transactions of the ASAE,1995,38(1):259-269.
- [21] 王方永,王克如,李少昆,等. 利用数码相机和成像光谱仪估测棉花叶片叶绿素和氮素含量[J]. 作物学报,2010,36(11):1981-1989.
- [22] PEÑUELAS J, GAMON J A, FREDEEN A L, et al. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves[J]. Remote Sensing of Environment, 1994,48(2):135-146.
- [23] 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.
- [24] SELLARO R, CREPY M, TRUPKIN S A, et al. Cryptochrome as a sensor of the blue/green ratio of natural radiation in *Arabidopsis* [J]. Plant Physiology,2010,154(1):401-409.
- [25] VERRELST J, SCHAEPMAN M E, KOETZ B, et al. Angular sensitivity analysis of vegetation indices derived from CHRIS/PROBA data[J]. Remote Sensing of Environment, 2008,112(5):2341-2353.
- [26] KAWASHIMA S, NAKATANI M. An algorithm for estimating chlorophyll content in leaves using a video camera[J]. Annals of

- Botany, 1998, 81(1): 49-54.
- [27] 汪小钦, 王苗苗, 王绍强, 等. 基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 152-157, 159, 158.
- [28] PEÑUELAS J, GAMON J A, FREDEEN A L, et al. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 48(2): 135-146.
- [29] HUNT E R, CAVIGELLI M, DAUGHTRY C S T, et al. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status[J]. Precision Agriculture, 2005, 6(4): 359-378.
- [30] SHIBAYAMA M, SAKAMOTO T, TAKADA E, et al. Estimating rice leaf greenness (SPAD) using fixed-point continuous observations of visible red and near infrared narrow-band digital images[J]. Plant Production Science, 2012, 15(4): 293-309.
- [31] 井然, 邓磊, 赵文吉, 等. 基于可见光植被指数的面向对象湿地水生植被提取方法[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1427-1436.
- [32] 马红雨, 李仙岳, 孙亚楠, 等. 基于无人机遥感的不同控释肥夏玉米 SPAD 差异性[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(12): 1261-1267.
- [33] 李靖言, 颜安, 宁松瑞, 等. 基于高光谱植被指数的春小麦 LAI 和 SPAD 值及产量反演模型研究[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(20): 201-210.
- [34] 李皓轩, 朱杰, 周勇, 等. 叶面肥与穗肥互作对稻虾共作水稻抽穗后光合特性、产量性状及稻米品质的影响[J]. 南方农业学报, 2023, 54(4): 1095-1105.
- [35] 吴秀宁, 张军, 王凤娟, 等. 肥密互作对旱地冬小麦商麦 1619 旗叶光合特性、干物质积累和产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 924-930.
- [36] 李雪梅, 黄禹翕, 蔡晓婧, 等. 外源氯化钙对铅胁迫下水稻幼苗生长、SPAD 值和荧光特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(14): 73-79.
- [37] 刘玲, 冯乃杰, 郑殿峰, 等. 不同微生物菌剂对水稻幼苗形态建成和生理特性的影响[J]. 南方农业学报, 2022, 53(1): 88-95.
- [38] 胡昌浩, 王群瑛. 玉米不同叶位叶片叶绿素含量与光合强度变化规律的研究[J]. 山东农业大学学报, 1989, 20(1): 43-47.
- [39] 陈岭, 孙耀邦, 崔绍平. 玉米穗部性状的基因效应分析[J]. 华北农学报, 1996, 11(2): 28-32.
- [40] 姜上川. 玉米单叶面积生长变化曲线研究[J]. 现代化农业, 2009(2): 12-15.
- [41] CIGANDA V S, GITELSON A A, SCHEPERS J. How deep does a remote sensor sense? Expression of chlorophyll content in a maize canopy[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 126: 240-247.
- [42] 刘燕婕, 李建设, 高艳明. 可见光波段不同氮处理生菜叶片光谱反射率与叶片全氮、叶绿素的相关性研究[J]. 北方园艺, 2015(22): 12-16.
- [43] LIVESLEY S J, MCPHERSON E G, CALFAPIETRA C. The urban forest and ecosystem services: impacts on urban water, heat, and pollution cycles at the tree, street, and city scale[J]. Journal of Environmental Quality, 2016, 45(1): 119-124.
- [44] ZHU W X, SUN Z G, YANG T, et al. Estimating leaf chlorophyll content of crops via optimal unmanned aerial vehicle hyperspectral data at multi-scales[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178: 105786.
- [45] 王方永. 基于近地可见光成像传感器的棉花生长信息监测研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2011.
- [46] LI F, MIAO Y X, HENNIG S D, et al. Evaluating hyperspectral vegetation indices for estimating nitrogen concentration of winter wheat at different growth stages[J]. Precision Agriculture, 2010, 11(4): 335-357.
- [47] 冯浩, 杨祯婷, 陈浩, 等. 基于无人机多光谱影像的夏玉米 SPAD 估算模型研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 211-219.
- [48] 袁媛, 瑚波, 武兴厚, 等. 基于植被指数的夏玉米不同生育期叶绿素含量遥感估算[J]. 中国农学通报, 2015, 31(15): 254-259.
- [49] LUNDBERG S M, LEE S I. A unified approach to interpreting model predictions[C]. Long Beach: NIPS, 2017.
- [50] 贺英, 邓磊, 毛智慧, 等. 基于数码相机的玉米冠层 SPAD 遥感估算[J]. 中国农业科学, 2018, 51(15): 66-77.
- [51] 刘启兴, 景海涛, 董国涛. 无人机高分辨率遥感影像分类方法研究[J]. 计算机与数字工程, 2019, 47(3): 638-642, 727.

(责任编辑: 徐 艳)