

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.09.004

徐鑫, 郝瑶, 唐恬, 等. 基于无人机多光谱的荞麦产量估测研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(9): 36-45.

基于无人机多光谱的荞麦产量估测研究

徐鑫, 郝瑶, 唐恬, 方小梅, 易泽林

西南大学 农学与生物科技学院, 重庆 400715

摘要: 荞麦是一种重要的药食兼用作物, 传统的产量估测方法往往耗时长且效率较低. 无人机多光谱技术可以快速获取植被信息, 提高产量估测的效率. 以无人机搭载高光谱仪作为遥感技术平台, 利用 4 个荞麦品种 3 个不同生育时期的多光谱图像, 建立了估算荞麦产量的监测模型. 结果表明: 不同发育苗期作物指数和作物实测产量的相关性均较高, 苗期的 NDI 以及 VARI 与甜荞 2 号实测产量的相关性最高. 综合考虑, 选择苗期建模, 甜荞选择作物指数 VARI, 建立的监测模型($y=1.2694x+0.351$, $R^2=0.675$)最佳; 苦荞选择作物指数 GNDVI, 建立的监测模型($y=6.5459x-1.604$, $R^2=0.567$)最佳. 该模型可为荞麦产量遥感监测提供技术支持.

关键词: 无人机; 多光谱; 作物指数; 荞麦产量模型

中图分类号: S517; S127

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2023)09-0036-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Buckwheat Yield Estimation Based on UAV Multi-Spectral Spectrum

XU Xin, HAO Yao, TANG Tian, FANG Xiaomei, YI Zelin

College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Buckwheat is an important crop used in both medicine and food. Traditional production estimation methods are often time-consuming and inefficient. UAV multi-spectral technology can obtain vegetation information quickly and improve the efficiency of yield estimation. In this study, the monitoring model of buckwheat yield estimation was established by using the multi-spectral images of 4 buckwheat varieties at 3 different growth stages using the high spectral spectrometer mounted on UAV as the remote sensing technology platform. The results showed that the correlation analysis between crop index and measured crop yield at different seedling stages was good. The correlation between NDI and VARI at seedling stage with measured crop yield of Tartary buckwheat 2 was the highest. The best monitoring model ($y=1.2694x+0.351$, $R^2=0.675$) was established by selecting crop index VARI at seedling stage. The mo-

收稿日期: 2023-05-31

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(CSTB2022NSCQ-MSX1034); 西南大学教育教学改革研究项目(2022JY096).

作者简介: 徐鑫, 实验师, 主要从事智慧农业研究.

通信作者: 易泽林, 教授, 硕士研究生导师.

monitoring model of Tartary buckwheat index GNDVI ($y = 6.5459x - 1.604$, $R^2 = 0.567$) was the best. This model can provide technical support for monitoring buckwheat yield by remote sensing.

Key words: unmanned aerial vehicle; multi-spectral; crop index; buckwheat yield model

荞麦是蓼科荞麦属的一年生草本植物, 也称净肠草、乌麦、三角麦等, 具有生育期短、耐贫瘠、适应性强等特点。我国是荞麦发源地, 种植历史悠久。荞麦兼具食用和药用价值, 被誉为“21 世纪人类的健康食品”, 能够起到降低血压、血糖和血脂的作用, 具有优秀的营养保健价值和食疗功效, 也是国际粮农组织公认的杰出食药兼用粮食种类之一。

精准农业的发展依赖于详细可靠的农田状况信息, 如作物长势状况、营养状况、杂草分布、病虫害分布等。然而, 传统的田间作物信息获取方法存在耗时耗力、破坏性强、时效性差等缺点, 严重阻碍了大规模作物生长的实时监测。而随着低空高通量表型平台的出现, 这一过程得到了改进^[1-5]。无人机遥感技术是现代比较新型的技术手段之一, 即可以通过无人机设备, 直接遥控无人机的行驶, 同时通过 CPS, GIS 等信息技术手段, 对特定地方实施扫描, 以便于获取相关数据。

在农业领域中, 无人机遥感技术应用广泛。王乃斌等^[6]在研究中提出用绿度指数、绿度变化率等指标, 在分析冬小麦水、肥、气、热等条件的基础上, 构建了大尺度小麦遥感产量估测模型。吉书琴等^[7]采用 NOAA 卫星遥感影像数据, 挑选水稻最适估产生长期, 利用植被指数构建了水稻产量估测模型, 估产精度较好。张玉萍等^[8]利用遥感卫星获取了单品种小麦和多品种小麦不同施氮量后的冠层光谱数据, 并利用植被指数、一阶微分参数和小麦产量建立了遥感估产模型。结果表明, 单品种小麦和多品种小麦估产模型的预测精度较高, 可用于估产试验。申洋洋等^[9]通过采集冬小麦关键生育期 5 种多光谱数据, 计算 72 种植被指数, 并基于偏最小二乘法、随机森林法构建了不同的估产模型。经误差评价, 基于随机森林法建立的小麦抽穗期估产模型效果最佳。对估产精度的分析表明, 无人机多光谱获得的植被指数有助于提高小麦估产效果。韩文霆等^[10]选取 6 种植被指数分别与夏玉米 4 个单一生育期、多生育期建模, 并结合实际产量筛选建立了基于绿色归一化差异植被指数 (Green Normalized Difference Vegetation Index, GNDVI) 的最优估产模型。结果显示, 多生育期的多光谱估产优于单一生育期, 优化后的估产模型可快速评估作物长势和产量。王恺宁等^[11]利用卫星遥感数据, 计算出 4 种植被指数, 并建立了线性和非线性回归模型, 用于预测小麦的产量。其中, 非线性回归模型的准确性更高, 非线性支持向量机 (SVM) 模型的准确性更高, 达到了 $R^2 = 0.79$ 的水平。Tao 等^[12]采集冬小麦拔节期、挑旗期、开花期等 3 个时期的无人机高光谱影像, 用 3 种方法回归建模后发现偏最小二乘法建立的回归模型估产最准确 ($R^2 = 0.77$)。Han 等^[13]结合无人机影像和多元线性回归、支持向量机、人工神经网络和随机森林等 4 种机器学习算法来估测玉米生物量, 发现随机森林算法模型具有较高的精度和较低的误差 ($R^2 = 0.94$, $RMSE = 0.50$)。

综上所述, 我们能够发现学界对于将无人机运用于农业中的技术已经逐步走向成熟, 估产方法及模型的建立也更加多元化。传统的荞麦产量估测方法往往耗时长且成本较高, 而利用无人机多光谱技术, 可以快速获取植被信息, 并提高产量估测的效率, 从而更好地预测产量, 降低经营成本和劳动力消耗。同时由于目前荞麦多生长在山地, 人工测产具有一定的难度, 本研究基于无人机多光谱来建立荞麦的估产模型, 以期对荞麦及无人机估产等行业提供借鉴经验与启示。

1 试验材料与方法

1.1 田间试验设计

试验于 2020—2022 年在西南大学合川农场试验基地进行, 试验地属亚热带季风气候, 海拔 204 m。试验地土壤为砂壤土, 其中 pH 值为 6.53, 有机质质量分数为 6.77 g/kg, 碱解氮质量分数为 58.3 mg/kg, 速效磷质量分数为 50.61 mg/kg, 速效钾质量分数为 162.37 mg/kg。该区域地形平坦, 上空区域宽阔, 无高大树木遮挡, 十分适合用无人机对荞麦进行遥感监控。同时, 该地光热条件良好, 土壤质地优秀, 肥力充足, 荞麦生长

态势良好.

供试苦荞品种为 zim00312(生育期 90~100 d, K1)、西荞 6 号(生育期 110~120 d, K2); 甜荞品种为乌克兰大粒荞(生育期 60~70 d, T1)、西荞 2 号(生育期 80~90 d, T2), 由重庆荞麦产业体系提供, 西荞 6 号和西荞 2 号为重庆市审定品种, zim00312 由中国农业科学院作物科学研究所提供, 乌克兰大粒荞为国外引进品种. 种子均为上一季收获的新种子, 发芽率 80% 以上, 播种前人工挑选种子, 除去泥土等杂质和杂种子. 供试肥料为复合肥(嘉施利化肥有限公司, N-P₂O₅-K₂O: 15-15-15, 总养分 ≥45%)、纳米有机肥(成都正光纳米有机肥, 氮磷钾总养分含量 ≥5%, 有机质 ≥45%), 经过测定, 纳米有机肥中的 N, P, K 含量分别为 2.94%, 0.98%, 1.34%.

本试验采用裂区试验设计, 主区是甜荞 2 个品种和苦荞 2 个品种, 一共 4 个品种, 裂区是 6 个肥料处理与对照. 小区面积为 6.68 m²(长 4 m, 宽 1.67 m), 3 次重复, 人工条播, 基本苗 90 万株/hm², 每个小区出苗 600 株, 行距 33 cm, 种植 6 行, 每行 100 株苗, 区组间隔 50 cm. 播种前将 2 种肥料作为基肥一次性施入, 并按常规管理. 期间进行 3 次重复试验. 试验田中的荞麦同时进行肥效试验, 共 6 种处理, 因此每个品种有 6×3=18 个小区, 4 个品种共 72 个小区.

1.2 数据获取方法

1.2.1 图像获取设备

采集图像所用的设备是相机分辨率为 1 240 万像素的大疆精灵 Phantom 4 无人机, 分别在荞麦的苗期、花期、成熟期进行飞行作业, 垂直采集荞麦试验田的冠层图像(图 1), 持续飞行时间约 20 min.

每次飞行采取距离地面 30 m 的高度进行拍摄作业, 由于荞麦植株较细, 无人机起飞以及降落时, 机翼旋转产生的风流会导致荞麦植株倾斜, 故飞行高度不能过低, 而太高又会导致无法获得精确数据, 故设置飞行高度为 30 m, 尽量减小数据的误差.



图 1 无人机飞行区域

1.2.2 图像获取过程

无人机影像获取时期分别是荞麦的苗期、花期和成熟期, 且在晴朗少风天气的中、下午拍摄, 为确保飞机在飞行过程中的安全性及数据可用性, 飞机在安装后设定了航点、航线、飞行高度以及图像重复率等参数. 该试验采用 DJI GS Pro 实现了指定地区航线的自动生成、飞行、拍摄并完成有关数据的收发. 鉴于需要在短时间内得到所有需要的影像, 该无人机的飞行方式为“S”形航线. 在完成图像采集之后使用软件 Pix4DMapper 制作正射影像、DSM 以及三维点云等数据, 并对相邻图像进行特征匹配, 实现相邻图像之间的无缝拼接. 将配准后的影像进行切割, 切割出需要研究的区域^[14].

1.2.3 产量测定

待籽粒 70%~80% 成熟时对各小区进行单独收获并实测小区产量, 然后折合成每公顷产量(kg/hm²). 于收获前 3 天随机取 5 株长势一致且未倒伏的植株, 测定其单株粒数、单株粒质量和千粒质量. 每个小区 3

次重复, 取平均值.

1.3 数据分析

1.3.1 植被指数的选择

基于苗期、花期及成熟期的正射图像, 利用 ArcGIS 提取各小区冠层图像的 RGB 通道值. 查阅相关文献, 梳理前人在研究中选择的最优光谱指数, 本研究选用了 8 个颜色指数 (ExG, ExGR, ExR, GLI, MGRVI, RGBVI, NDI, VARI) 和 7 个植被指数 (DVI, EVI2, GNDVI, NDVI, OSAVI, RVI, SAVI) 用于图像数据分析, 具体图像光谱参数定义如表 1 所示.

表 1 本研究采用的颜色指数及作物指数

名称	符号	计算公式	参考文献
超绿植被指数	ExG	$2g - r - b$	WOEBBECKE D M, 1993 ^[15]
绿红差值指数	ExGR	$E_{\text{ExG}} - E'_{\text{ExR}}$	WOEBBECKE D M, 1993 ^[15]
超红植被指数	ExR	$1.4r - g$	MAO D L, 2003 ^[16]
绿叶植被指数	GLI	$(2g - b - r) / (2g + b + r)$	LOUHAICHI M, 2001 ^[17]
改良绿红植被指数	MGRVI	$(g^2 - r^2) / (g^2 + r^2)$	BENDIG J, 2015 ^[18]
红绿蓝植被指数	RGBVI	$(g - r) / (g + r)$	BENDIG J, 2015 ^[18]
归一化差分指数	NDI	$(g - r) / (g + r)$	TUCKER PW, 1979 ^[19]
可见光大气阻抗植被指数	VARI	$(g - r) / (g + r - b)$	GITELSON A A, 2002 ^[20]
差值植被指数	DVI	$\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Red}}$	RICHARDSON A J, 1992 ^[21]
两波段增强植被指数	EVI2	$2.5(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Red}}) / (\rho_{\text{NIR}} + 2.4\rho_{\text{Red}} + 1)$	JIANG Z Y, 2008 ^[22]
绿波段归一化植被指数	GNDVI	$(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Green}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Green}})$	GITELSON A A, 1996 ^[23]
归一化植被指数	NDVI	$(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Red}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}})$	ROUSE J W, 1974 ^[24]
优化的土壤调节植被指数	OSAVI	$(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Red}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}} + 0.16)$	RONDEAUX G, 1996 ^[25]
比值植被指数	RVI	$\rho_{\text{NIR}} / \rho_{\text{Red}}$	JORDAN C F, 1969 ^[26]
土壤调节植被指数	SAVI	$(1+L)(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Red}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}} + L)$ $L=0.5$	HUETE A R, 1988 ^[27]

注: r 为归一化红色指数; g 为归一化绿色指数; b 归一化蓝色指数; ρ 为光谱反射率.

1.3.2 相关系数的计算

相关系数是用来反映变量之间线性相关关系密切程度的统计指标. 在使用 ArcGIS 将各个作物指数计算后, 导出数据表, 在 Microsoft Excel 软件中使用 VLOOK UP 函数将统计好的产量数据与作物指数对应的数据相匹配, 然后再用 Correl 函数计算产量和各作物光谱指数的相关性系数.

2 结果与分析

本研究在 4 个荞麦品种的 3 个不同生育时期, 选取了 15 个光谱指数, 与实测产量进行相关性分析, 以确定估算生物量的最优作物指数. 不同作物指数和生育期与不同品种产量的相关系数 R 如表 2~表 8 所示, 其中 R 绝对值只要大于 0.75 就可以认为 2 个变量的线性相关关系有统计学意义, 且 R 值越接近 1, 意味着作物指数与产量的相关性越高.

2.1 相同时期各品种产量与作物指数的相关性

2.1.1 苗期作物指数与各品种产量的相关性

荞麦在苗期基于无人机图像的各作物指数与产量的相关系数 R 值经计算后如表 2 所示. 分析表 2 可知, 荞麦 T2 品种的产量和绝大多数作物指数的相关关系均有统计学意义, 除 GNDVI 外的相关系数为 0.19, 其余的绝对值都在 0.75 左右, 其中 NDI 和 VARI 的相关性最高, 均达到了 0.82. GNDVI 和 K1 品种产量的相关性有统计学意义, 而其他 3 个品种的产量与这 15 个作物指数的相关性则较低, 且没有任何一个单一的作物指数与 4 个品种的产量显著相关.

表 2 荞麦苗期作物指数与产量的相关系数 R

作物指数	K1	K2	T1	T2
ExG	-0.36	0.36	0.32	0.79**
ExGR	-0.30	0.37	0.29	0.80**
ExR	0.11	-0.36	-0.21	-0.79**
GLI	-0.37	0.34	0.33	0.79**
MGRVI	-0.35	0.41	0.27	0.82**
NDI	-0.35	0.41	0.27	0.82**
RGBVI	-0.37	0.33	0.33	0.79**
VARI	-0.35	0.41	0.28	0.82**
DVI	0.07	0.53	0.33	0.80**
EVI2	0.07	0.53	0.33	0.80**
GNDVI	0.75**	-0.31	0.08	0.19
NDVI	-0.22	0.20	0.33	0.72
OSAVI	0.06	0.53	0.33	0.80**
RVI	-0.21	0.16	0.32	0.71
SAVI	0.07	0.53	0.33	0.80**

注：* * 表示相关性极有统计学意义，下同。

2.1.2 花期作物指数与各品种产量的相关性

荞麦在花期基于无人机图像的各作物指数与产量的相关系数 R 值经计算后如表 3 所示。分析表 3 可知，荞麦花期的作物指数与 4 个品种荞麦产量的相关关系均无统计学意义，荞麦 T2 品种的产量与作物指数的相关性和其他 3 个品种比起来相对高一点，而 K1 品种在花期与大多数作物指数的相关系数都为负值。

表 3 荞麦花期作物指数与产量的相关系数 R

作物指数	K1	K2	T1	T2
ExG	0.01	0.44	0.02	0.48
ExGR	-0.15	0.39	0.24	0.49
ExR	0.30	-0.27	-0.36	-0.43
GLI	-0.27	0.27	0.36	0.48
MGRVI	-0.30	0.26	0.35	0.46
NDI	-0.30	0.26	0.35	0.46
RGBVI	-0.25	0.28	0.34	0.49
VARI	-0.30	0.26	0.34	0.44
DVI	-0.35	0.10	0.20	0.63
EVI2	-0.35	0.10	0.20	0.63
GNDVI	-0.43	-0.15	0.09	0.46
NDVI	-0.37	0.04	0.17	0.52
OSAVI	-0.35	0.10	0.20	0.63
RVI	-0.42	-0.02	0.17	0.50
SAVI	-0.35	0.10	0.20	0.63

2.1.3 成熟期作物指数与各品种产量的相关性

荞麦成熟期基于无人机图像的各作物指数与产量的相关系数 R 值经计算后如表 4 所示。从表 4 可以看出，荞麦成熟期的作物指数与 K1 品种产量的相关性相对较高，均在 0.70 左右，而此时 T2 品种则与之前时期的结果相反，与各作物指数的相关性均较低。总体来看，在成熟期时各个作物指数和苦荞品种(K1 和 K2)产量的相关性较高，而和甜荞品种(T1 和 T2)产量的相关性较低。

表 4 荞麦成熟期作物指数与产量的相关系数 R

作物指数	K1	K2	T1	T2
ExG	0.66	0.41	-0.11	0.11
ExGR	0.73	0.47	0.05	0.02
ExR	-0.70	-0.34	-0.26	0.10
GLI	0.66	0.55	0.07	0.12
MGRVI	0.74	0.42	0.06	-0.08
NDI	0.74	0.42	0.06	-0.08
RGBVI	0.60	0.57	0.08	0.19
VARI	0.74	0.39	0.06	-0.08
DVI	0.73	0.40	0.16	0.02
EVI2	0.73	0.40	0.16	0.02
GNDVI	0.73	0.32	0.28	0.20
NDVI	0.69	0.36	0.19	0.14
OSAVI	0.73	0.40	0.16	0.02
RVI	0.76 * *	0.37	0.15	0.07
SAVI	0.73	0.40	0.16	0.02

2.2 不同时期相同品种产量与作物指数的相关性

2.2.1 不同时期甜荞 1 号(T1)产量与作物指数的相关性

从表 5 中可以看出 3 个生育时期的 15 个作物指数与甜荞 1 号的产量相关性都不高, 其中成熟期的相关性普遍较低. 但从总体上来看, ExR 与该品种产量的相关性较好, 均为负相关.

表 5 甜荞 1 号(T1)不同时期产量与作物指数的相关系数 R

作物指数	苗期	花期	成熟期
ExG	0.32	0.02	-0.11
ExGR	0.29	0.24	0.05
ExR	-0.21	-0.36	-0.26
GLI	0.33	0.36	0.07
MGRVI	0.27	0.35	0.06
NDI	0.27	0.35	0.06
RGBVI	0.33	0.34	0.08
VARI	0.28	0.34	0.06
DVI	0.33	0.20	0.16
EVI2	0.33	0.20	0.16
GNDVI	0.08	0.09	0.28
NDVI	0.33	0.17	0.19
OSAVI	0.33	0.20	0.16
RVI	0.32	0.17	0.15
SAVI	0.33	0.20	0.16

2.2.2 不同时期甜荞 2 号(T2)产量与作物指数的相关性

从表 6 中可以看出, 各作物指数与甜荞 2 号的产量相关性主要差异在于生长时期, 其中苗期相关性最高, 花期次之, 成熟期最低. 而相同时期各个指数之间的差异并不大, 且和甜荞 1 号一样, 各个时期的相关系数中成熟期的数值普遍较低, 这种情况的出现可能与品种有一定的关系.

表 6 甜荞 2 号(T2)不同时期产量与作物指数的相关系数 R

作物指数	苗期	花期	成熟期
ExG	0.79**	0.48	0.11
ExGR	0.80**	0.49	0.02
ExR	-0.79**	-0.43	0.10
GLI	0.79**	0.48	0.12
MGRVI	0.82**	0.46	-0.08
NDI	0.82**	0.46	-0.08
RGBVI	0.79**	0.49	0.19
VARI	0.82**	0.44	-0.08
DVI	0.80**	0.63	0.02
EVI2	0.80**	0.63	0.02
GNDVI	0.19	0.46	0.20
NDVI	0.72	0.52	0.14
OSAVI	0.80**	0.63	0.02
RVI	0.71	0.50	0.07
SAVI	0.80**	0.63	0.02

2.2.3 不同时期苦荞 1 号(K1)产量与作物指数的相关性

分析表 7 可知,苦荞 1 号在成熟期与各作物指数的相关性都比较高,而花期较特殊,在花期该品种的产量与绝大多数作物指数呈负相关.而 GNDVI 在所有作物指数中与 K1 品种产量的相关性较高.

表 7 苦荞 1 号(K1)不同时期产量与作物指数的相关系数 R

作物指数	苗期	花期	成熟期
ExG	-0.36	0.01	0.66
ExGR	-0.30	-0.15	0.73
ExR	0.11	0.30	-0.70
GLI	-0.37	-0.27	0.66
MGRVI	-0.35	-0.30	0.74
NDI	-0.35	-0.30	0.74
RGBVI	-0.37	-0.25	0.60
VARI	-0.35	-0.30	0.74
DVI	0.07	-0.35	0.73
EVI2	0.07	-0.35	0.73
GNDVI	0.75**	-0.43	0.73
NDVI	-0.22	-0.37	0.69
OSAVI	0.06	-0.35	0.73
RVI	-0.21	-0.42	0.76**
SAVI	0.07	-0.35	0.73

2.2.4 不同时期苦荞 2 号(K2)产量与作物指数的相关性

从表 8 中可以看出苦荞 2 号在成熟期和苗期与各作物指数的相关性稍微高于花期,而作物指数 ExG 和 ExGR 在 3 个时期与该品种的相关性均比较高,因此相对于其他指数,这 2 个指数可以更好地估测该品种的产量.

表 8 苦荞 2 号(K2)不同时期产量与作物指数的相关系数 R

作物指数	苗期	花期	成熟期
ExG	0.36	0.44	0.41
ExGR	0.37	0.39	0.47
ExR	-0.36	-0.27	-0.34
GLI	0.34	0.27	0.55
MGRVI	0.41	0.26	0.42
NDI	0.41	0.26	0.42
RGBVI	0.33	0.28	0.57
VARI	0.41	0.26	0.39
DVI	0.53	0.10	0.40
EVI2	0.53	0.10	0.40
GNDVI	-0.31	-0.15	0.32
NDVI	0.20	0.04	0.36
OSAVI	0.53	0.10	0.40
RVI	0.16	-0.02	0.37
SAVI	0.53	0.10	0.40

2.3 产量估算模型验证

甜荞不同生育时期的产量与作物指数进行分析后选取最优作物指数构建线性拟合函数(图 2a), 甜荞在苗期、花期以及成熟期被选择用来建立模型的作物指数分别为 VARI, DVI 和 GNDVI, 其中苗期 VARI 与产量的相关系数较大, 接近 0.7, 虽然均方根误差比花期 DVI 的大, 但总体看来在苗期用 VARI 对该品种建立的估产模型拟合程度更高。

苦荞不同生育时期的产量与作物指数进行分析后选取最优作物指数构建线性拟合函数(图 2b)。苦荞在苗期、花期被选择用来建立模型的作物指数均为 GNDVI, 成熟期选择的则是 RVI。其中, 苗期和成熟期与产量的相关系数均较大, 同时均方根误差也比较大, 建立的估产模型拟合程度较高。

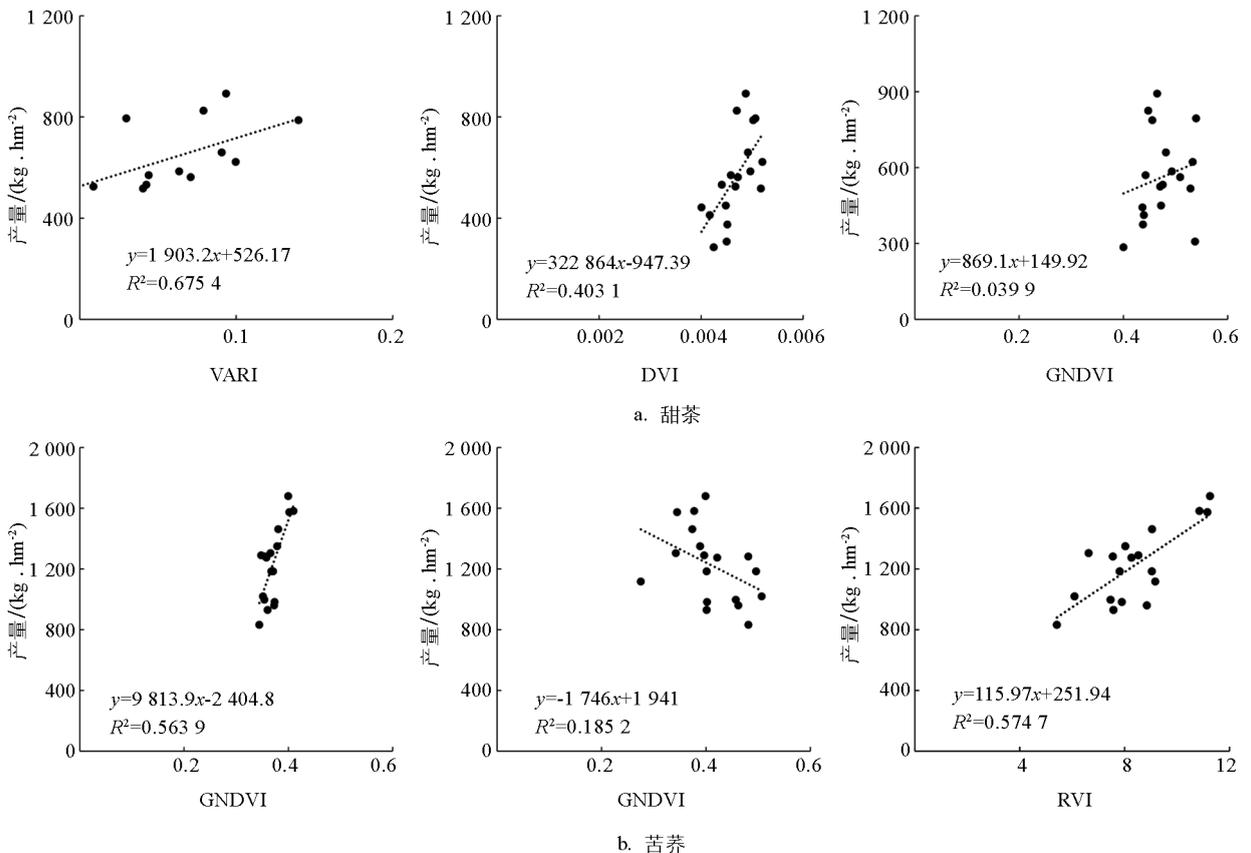


图 2 荞麦不同生育时期产量估算模型

综上所述,无论甜荞还是苦荞,苗期进行无人机多光谱产量估测效果较佳,甜荞选择作物指数 VARI,建立的监测模型($y=1.2694x+0.351$, $R^2=0.675$)最佳;苦荞选择作物指数 GNDVI,建立的监测模型($y=6.5459x-1.604$, $R^2=0.567$)最佳。

3 讨论

无人机遥感系统对于精准农业的发展有着重大的意义,因为它可以快速而准确地估算作物产量。由于高光谱传感器能够获得更多波段的光谱信息^[28],因此目前使用无人机高光谱遥感系统进行作物产量估测的研究比较多。多项研究表明,作物产量和图像颜色特征、纹理特征存在相关性并能够拟合模型进而估测产量,如龚红菊^[29]验证了基于纹理特征估算水稻产量的可行性,张静等^[30]结合棉花冠层图像的颜色指数特征和纹理特征对产量进行估算并得到较稳定的模型。本研究选择不同时期不同品种荞麦冠层图形的作物指数特征对荞麦产量进行估算并得到较稳定的模型,表明利用无人机多光谱技术对荞麦进行产量估测的方法具有较高的精度和可行性。

根据以往学者对无人机遥感系统的研究发现:光谱作物指数虽然能部分地反映作物产量情况,但是产量模型建立时最优作物指数的选取仍面临一些关键性问题。已经被定义的作物指数有 DVI, NDVI, SAVI 等 40 余种,但并不是每种作物指数都能准确反映某一品种作物的生长状况,在没有考虑作物指数和产量相关性的情况下,多个作物指数融合会使光谱信息趋于饱和,降低估测模型的准确性,如韩文霆等^[10]利用多旋翼无人机多光谱遥感平台,构建了基于多种植被指数和多种生育期对应的夏玉米实测产量的 6 种线性模型,可以快速预测产量。很多研究认为,NDVI 与产量相关,进行产量估测最普遍的方式是在 NDVI 与作物产量之间建立经验模型,该方法操作简单,便于推广^[31],在植被覆盖度较低时,NDVI 可以较为准确地估测作物长势和生物量,当覆盖度较高时,准确度会下降^[31-32],如冯美臣等^[33]利用冠层光谱数据提取植被指数 NDVI,结合作物产量数据,构建出用于产量估测的复合回归方程。本研究选用了 8 个颜色指数和 7 个植被指数用于图像数据分析,在不同生育期,选取相关系数最高的作物指数构建线性拟合函数,筛选出适合进行产量估算的时期,得出最终的产量估测模型,为荞麦产量遥感监测提供了技术支撑。

由于试验条件的限制以及气候等不可控因素,本研究存在以下几点不足之处:① 荞麦产量的数据获取存在人工采集和统计方面的误差,我们需要在数据处理步骤中,增加数据异常值与误差的识别处理过程,以提高数据准确性。② 受到条件限制,我们在本次研究中使用的作物指数不够全面,导致不同颜色指数和作物指数间相关性较强,不能够进行多元线性回归分析,从而影响了研究结果的深入程度。在未来的研究方案设计中,应该系统地选择全面的作物指数。③ 相关性计算时我们只考虑了单纯的线性回归方法,计算了相关系数 R 值,未能考虑到更多复杂模型的相关性计算方式,从而无法全面深入地分析数据相关性。在以后的研究中,应当研究更多算法。

4 结论

本研究探讨了荞麦 4 个品种 3 个不同生育时期的作物指数与产量的相关性,结果表明,苗期作物指数和甜荞 2 号产量的相关性大多数有或极有统计学意义,其中 NDI 以及 VARI 和甜荞 2 号产量的相关性最高。花期作物指数同样是和甜荞 2 号产量的相关性最好,但都不如苗期时的相关度高。成熟期作物指数和甜荞 2 号产量的相关系数大幅度下降,而与苦荞产量的相关系数有所上升。而在相同品种不同时期的作物指数与产量的相关性分析中,ExR 与甜荞 1 号产量的相关性较好,均为负相关;甜荞 2 号产量与各个时期作物指数的相关性随着时间而递减;苦荞 1 号在成熟期与各个作物指数的相关性都比较高,其中 GNDVI 在所有作物指数中与 K1 品种产量的相关性相对较高;对于苦荞 2 号来说,则是 ExG 和 ExGR 等 2 个作物指数在 3 个时期与其相关性均比较高。基于简单易操作的原则,构建了甜荞的估产模型($y=1.2694x+0.351$, $R^2=0.675$)和苦荞的估产模型($y=6.5459x-1.604$, $R^2=0.567$),为荞麦产量遥感监测提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 王继红,敬缠琴,王珍,等.小宗杂粮荞麦营养价值及栽培技术[J].农业科技与信息,2022(3):25-28.
- [2] 杨桂琴,杨瑞芹.荞麦的经济价值及其早作增产技术[J].农业科技通讯,2007(11):92.

- [3] 呼瑞梅,王振国. 内蒙古通辽市荞麦发展现状、优势及应用前景 [J]. 杂粮作物, 2010, 30(2): 156-158.
- [4] PHILLIPS R L. Mobilizing Science to Break Yield Barriers [J]. *Crop Science*, 2010, 50: 99-108.
- [5] 丛充. 无人机遥感技术在工程测量中的应用 [J]. 世界有色金属, 2019(18): 252-254.
- [6] 王乃斌,周迎春,林耀明,等. 大面积小麦遥感估产模型的构建与调试方法的研究 [J]. 环境遥感, 1993(4): 250-259.
- [7] 吉书琴,陈鹏狮,张玉书. 水稻遥感估产的一种方法 [J]. 应用气象学报, 1997, 8(4): 509-512.
- [8] 张玉萍,马占鸿. 不同施氮量下小麦遥感估产模型构建 [J]. 江苏农业学报, 2015, 31(6): 1325-1329.
- [9] 申洋洋,陈志超,胡昊,等. 基于无人机多时相遥感影像的冬小麦产量估算 [J]. 麦类作物学报, 2021, 41(10): 1298-1306.
- [10] 韩文霆,彭星硕,张立元,等. 基于多时相无人机遥感植被指数的夏玉米产量估算 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 148-155.
- [11] 王恺宁,王修信. 多植被指数组合的冬小麦遥感估产方法研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(7): 44-49.
- [12] TAO H L, FENG H K, XU L J, et al. Estimation of the Yield and Plant Height of Winter Wheat Using UAV-Based Hyperspectral Images [J]. *Sensors*, 2020, 20(4): 1231.
- [13] HAN L, YANG G J, DAI H Y, et al. Modeling Maize Above-Ground Biomass Based on Machine Learning Approaches Using UAV Remote-Sensing Data [J]. *Plant Methods*, 2019, 15(1): 1-19.
- [14] 陈雯. 基于无人机图像的小麦出苗均匀度评价 [D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- [15] WOEBBECKE D M, MEYER G E, BARGEN K V, et al. Plant Species Identification, Size, and Enumeration Using Machine Vision Techniques on Near-Binary Images [J]. *Optics in Agriculture and Forestry*, 1993, 183: 208-219.
- [16] MAO D L, WU X B, DEPPONG C, et al. Negligible Role of Antibodies and C5 in Pregnancy Loss Associated Exclusively with C3-Dependent Mechanisms through Complement Alternative Pathway [J]. *Immunity*, 2003, 19(6): 813-822.
- [17] LOUHAICHI M, BORMAN M M, JOHNSON D E. Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat [J]. *Geocarto International*, 2001, 16(1): 65-70.
- [18] BENDIG J, YU K, AASEN H, et al. Combining UAV-Based Plant Height from Crop Surface Models, Visible, and near Infrared Vegetation Indices for Biomass Monitoring in Barley [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 39: 79-87.
- [19] TUCKER P W, HAZEN E E J R, COTTON F A. Staphylococcal Nuclease Reviewed: A Prototypic Study in Contemporary Enzymology [J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 1979, 23(2): 67-77.
- [20] GITELSON A A, STARK R, GRITS U, et al. Vegetation and Soil Lines in Visible Spectral Space: A Concept and Technique for Remote Estimation of Vegetation Fraction [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(13): 2537-2562.
- [21] RICHARDSON A J, EVERITT J H. Using Spectral Vegetation Indices to Estimate Rangeland Productivity [J]. *Geocarto International*, 1992, 7(1): 63-69.
- [22] JIANG Z Y, HUETE A R, DIDAN K, et al. Development of a Two-Band Enhanced Vegetation Index without a Blue Band [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(10): 3833-3845.
- [23] GITELSON A A, KAUFMAN Y J, MERZLYAK M N. Use of a Green Channel in Remote Sensing of Global Vegetation from EOS-MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 289-298.
- [24] ROUSE J W, HAAS R W, SCHELL J A, et al. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave Effect) of Natural Vegetation [J]. *NASA/GSFCT Type III Final Report*, 1974, 27: 0009608.
- [25] RONDEAUX G, STEVEN M, BARET F. Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2): 95-107.
- [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] HUETE A R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295-309.
- [28] 林家元,程亚男. 基于无人机遥感影像的裸岩识别及早期石漠化评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(12): 125-135.
- [29] 龚红菊. 基于分形理论及图像纹理分析的水稻产量预测方法研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [30] 张静,郭思梦,韩迎春,等. 基于无人机 RGB 图像的棉花产量估算 [J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(11): 112-120.
- [31] 刘雅婷,龚龔,段博,等. 多时相 NDVI 与丰度综合分析的油菜无人机遥感长势监测 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(2): 265-272.
- [32] 田婷,张青,张海东,等. 基于无人机遥感的水稻产量估测 [J]. 中国稻米, 2022, 28(1): 67-71, 77.
- [33] 冯美臣,杨武德. 不同株型品种冬小麦 NDVI 变化特征及产量分析 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 87-92.