

基于无人机遥感的春玉米产量预测研究

马世骄^{1,2}, 房城泰³, 赵经华^{1,2*}, 刘锋^{1,2}, 杨庭瑞¹, 袁如芯¹

(1.新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2.新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052; 3.兵团水土保持与水利发展中心, 乌鲁木齐 830002)

摘要:【目的】适应现代农业发展作物产量快速预测的需求。【方法】以春玉米为研究对象, 设置50% ET_c (W1)、75% ET_c (W2)、100% ET_c (W3)、125% ET_c (W4)、150% ET_c (W5) 5个水分梯度处理试验, 基于无人机多光谱影像进行植被指数的构建, 并利用皮尔逊相关系数法筛选模型输入变量。采用偏最小二乘法(Partial least squares, PLS)、随机森林回归(Random forest regression, RF)和粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)优化随机森林模型, 分别对拔节期、抽雄期和灌浆期春玉米进行基于单一植被指数和多植被指数组合的产量估测, 结合模型精度评价指标, 最终确定研究区春玉米产量分布图。【结果】以多植被指数组合为输入变量的模型精度总体高于以单一植被指数为输入变量的模型精度, 且PSO-RF模型在抽雄期的拟合效果最好。基于单一植被指数NDVI的PSO-RF模型验证集的 R^2 为0.685, RMSE为1792.71 kg/hm², RPD为1.764。基于多植被组合的PSO-RF模型验证集的 R^2 为0.806, RMSE为1485.88 kg/hm², RPD为2.032。研究区W3处理春玉米产量最高, 平均产量为19845.25 kg/hm², W1产量处理最低, 平均产量为12054.52 kg/hm²。【结论】综上所述, 多光谱无人机能够准确预测作物产量, 可为实现精准农业提供技术支持。

关键词: 无人机; 春玉米; 产量; 植被指数; 抽雄期; 随机森林回归

中图分类号: S127

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2024218

马世骄, 房城泰, 赵经华, 等. 基于无人机遥感的春玉米产量预测研究[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(1): 43-49, 65.

MA Shijiao, FANG Chengtai, ZHAO Jinghua, et al. Predicting spring maize yield using UAV remote sensing[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(1): 43-49, 65.

0 引言

【研究意义】玉米是主要粮食作物之一, 在全球粮食安全中发挥着重要作用。因此, 及时准确地预测玉米产量, 有利于田间的宏观调控和微观管理, 从而保证粮食供应的稳定性。

传统产量获取主要通过人工破坏采样法获取, 不仅费时、费力, 还易形成较大的误差, 难以实现产量的准确估测^[1]。【研究进展】近年来, 卫星遥感技术因其覆盖面积广、时空连续性强和成本效益低等优势被认为是大尺度农田产量预测的新途径。陈鹏飞等^[2]以卫星时序归一化植被指数为数据源, 提取了冬小麦生长期内的植被动态信息, 并建立了产量估测模型。李卫国等^[3]基于CBERS卫星遥感数据, 并结合地面作物生理特征, 成功实现江苏地区冬小麦产量的精准

预测。罗维等^[4]基于多源卫星遥感数据, 使用ECA-BiseNetV2模型实现了对广西中南部地区甘蔗的识别和产量预测。然而, 卫星遥感技术仍受到云层遮挡、影像分辨率低和卫星访问时间等限制, 在农田作物产量预测方面仍面临挑战^[5]。与卫星遥感相比, 低空无人机成像技术具有影像空间分辨率高、灵活性强、成本效益低等优势, 可实时获取农情生长信息, 已逐步成为现代农业领域预测的主要手段。杨楠等^[6]以无人机拍摄田间影像为数据源, 分别利用随机森林回归、偏最小二乘法、BP神经网络、支持向量机模型对小麦不同生育时期建立产量预测模型, 结果表明, 随机森林回归模型预测效果较优。程千等^[7]根据无人机多光谱影像, 利用光谱指数并结合随机森林回归、支持向量机和偏最小二乘法模型建立冬小麦产量预测模型, 结果表明, 随机森林回归预测效果优于支持向量机和偏最小二乘法模型。鲁向晖等^[8]以矮林芳樟叶片精油产量为研究对象, 并结合无人机光谱影像的单一光谱数据构建矮林芳樟叶片精油产量预测模型, 并指出随机森林回归模型预测精度最高。Mwinuka等^[9]利用归一化植被指数(NDVI)和土壤调节指数(OSAVI)预测茄子在营养阶段的产量。Saravia等^[10]基于多光谱影像利用植被指数对4种豆类在13个物候发育时

收稿日期: 2024-05-29 修回日期: 2024-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52169013); 新疆维吾尔自治区“十四五”重大专项(2020A01003-4); 自治区研究生科研创新项目(XJ2024G126)

作者简介: 马世骄(1998—), 男, 内蒙古赤峰人。硕士研究生, 主要从事节水灌溉技术研究。E-mail: 2625267575@qq.com

通信作者: 赵经华(1979—), 男, 新疆奇台人。教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉技术研究。E-mail: 105512275@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

期的产量进行预测,结果表明,以植被指数为模型输入变量能更好地预测所有豆类品种在物候阶段的产量。Lipovac 等^[11]基于不同灌溉处理结合无人机影像并利用植被指数实现了对田间豆类的产量预测。

【切入点】尽管基于无人机平台预测作物产量方面研究较多,但在建立产量反演空间分布时,多数研究是以单一植被指数或多种植被指数估算作物产量,而将二者用于不同生育时期同一预测模型的研究尚不完善。

【拟解决的关键问题】为此,以春玉米为研究对象,利用无人机多光谱影像构建光谱指数,并采用皮尔逊系数法和方差膨胀因子筛选模型变量,使用偏最小二乘法、随机森林回归、粒子群算法优化随机森林回归建立春玉米不同生育时期产量的预测模型,探讨传统模型与机器学习模型的优劣,以期为更加精确、快速地获取春玉米产量预测提供理论参考。

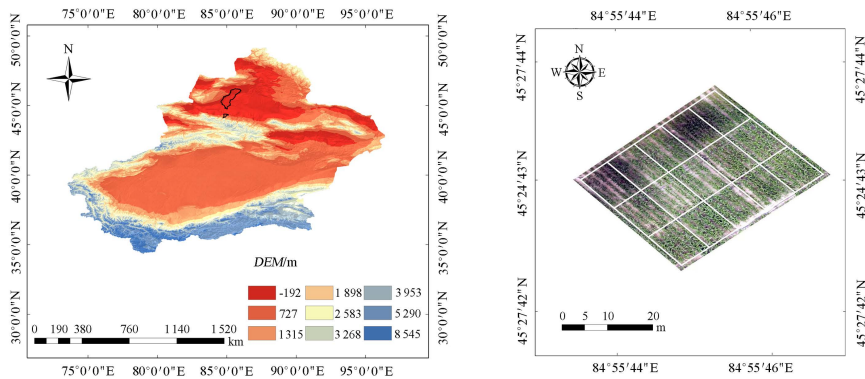


图 1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of study area

1.2 试验设计

于2023年4—9月在绿城农业公司进行玉米大田试验,试验供试玉米品种为新农008,种子埋深为7 cm,采用40 cm+70 cm+40 cm的宽窄行种植模式,株距为20 cm。地下滴灌带间距为110 cm,滴头间距为30 cm,毛管埋深为35 cm。滴头流量为2.8 L/h。小区面积为6 m×8 m,灌水周期为7 d。全生育期内施入尿素500 kg/hm²、磷酸一铵200 kg/hm²、硫酸钾130 kg/hm²,

1 材料与方

1.1 试验区概况

试验区位于克拉玛依市农业综合开发区东20 km处,地处东经84°49'26"—85°21'39",北纬45°21'33"—45°40'17",海拔275 m。农业综合开发区西北抵准噶尔盆地西部,南依天山北麓,东临古尔班通古特沙漠,区域地形自西南向东北倾斜,平均坡降为0.36%,属于典型的大陆性干旱荒漠气候,年平均气温为8.3℃,1月平均气温为-19.7℃,7月平均气温为24.9℃,极端最高气温为42.9℃,极端最低气温为-39℃,年降水量为108.9 mm,平均蒸发量为2 849.8 mm,年日照时间为2 711 h,占可照时间的61%。研究区示意见图1。

不施用基肥,肥料随地下滴灌灌水施入,N、P、K肥料均为纯量,拔节期30%、抽雄期30%、灌浆期40%分别随灌水施入。选取灌水量作为试验因素,设置50% ET_c (W1)、75% ET_c (W2)、100% ET_c (W3)、125% ET_c (W4)、150% ET_c (W5)共计5个处理,每个处理3个重复,共15个小区。玉米全生育期共灌水10次。试验小区种植模式见图2。

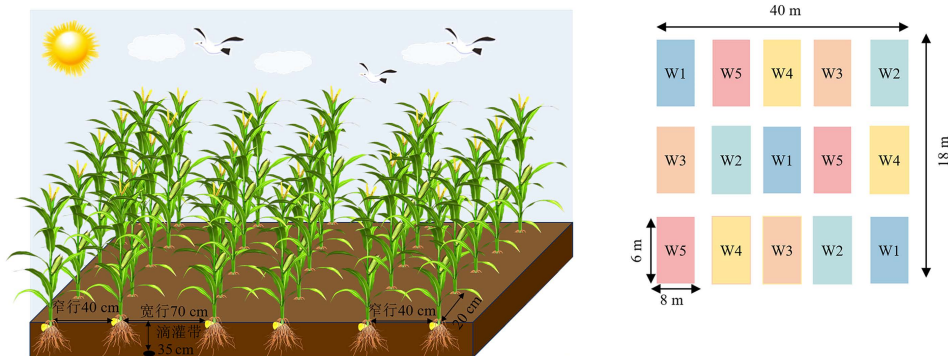


图 2 小区试验布置

Fig.2 Plot test layout

1.3 无人机多光谱遥感影像的获取与数据处理

多光谱遥感数据获取采用大疆精灵 4 多光谱版,

可采集高精度多光谱数据,配备NDVI分析功能,具

有一体式多光谱成像系统，集成 1 个可见光相机及 5 个多光谱相机。5 个 208 万像素单波段传感器：红光波段（波长 650 nm，波宽 16 nm），蓝光波段（波长 450 nm，波宽 116 nm），绿光波段（波长 560 nm，波宽 16 nm），红边波段（波长 730 nm，波宽 16 nm），近红外光波段（波长 840 nm，波宽 26 nm）。起飞时间选择 12:00—13:00，设定飞行高度为 30 m，航向重叠度为 75%、旁向重叠度为 75%。选择在无风的天气飞行，在起飞前，对 AERO 北京 AeroAstro 智能科技有限公司经销的 Diffuse Reflectance Standard

Calibration Target Package (V2) 灰板（反射率分别为 0.5、0.95、0.05）进行拍摄，用于之后影像的校正。

采用 Pix 4D mapper 对无人机影像进行拼接，并利用灰板进行辐射校正，拼接完成后，使用指数计算器生成蓝光 (Blue)、绿光 (Green)、近红外光 (NIR)、红光 (Red)、红边 (Reg) 5 个波段影像，采用 ArcGIS10.7 提取 5 个波段影像的植被指数。将地面实测产量数据与植被指数作相关分析，筛选模型关键变量，从而构建春玉米产量预测模型。具体流程见图 3。

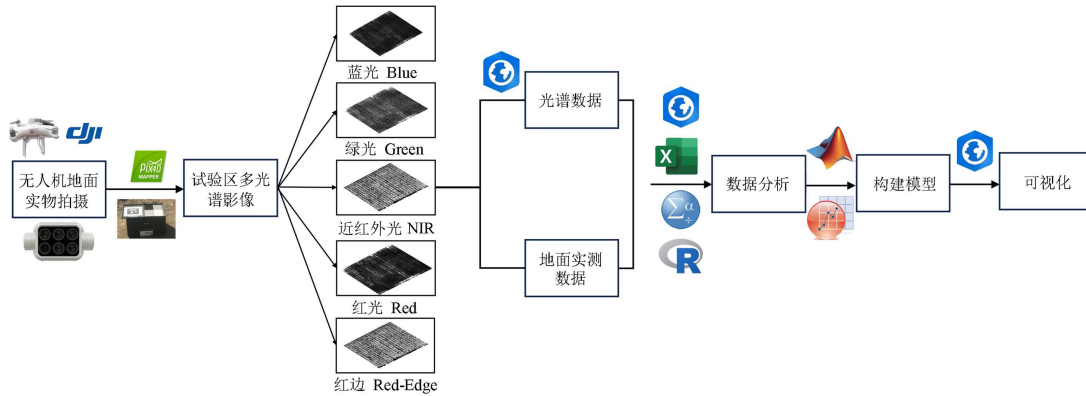


图 3 数据处理流程

Fig.3 Data processing flow

1.4 植被指数选取

基于前人^[12]研究植被指数与地面实测长势参数的响应程度，选取有明确实际物理意义 8 种植被指数构建春玉米综合长势反演模型。计算式见表 1。

表 1 植被指数

Tab.1 vegetation index

植被指数	计算式	文献
土壤调节指数 <i>OSAVI</i>	$OSAVI=1.16(R_{NIR}-R)/(R_{NIR}+R+0.16)$	[13]
红边叶绿素指数 <i>CIRE</i>	$CIRE=R_{NIR}/R_{Re}-1$	[14]
归一化植被指数 <i>NDVI</i>	$NDVI=(R_{NIR}-R)/(R_{NIR}+R)$	[15]
绿色归一化植被指数 <i>GNDVI</i>	$GNDVI=(R_{NIR}-R_G)/(R_{NIR}+R_G)$	[16]
比值植被指数 <i>RVI</i>	$RVI=R_{NIR}/R$	[17]
叶面叶绿素指数 <i>LCI</i>	$LCI=(R_{NIR}-R_{Re})/(R_{NIR}+R)$	[18]
归一化红边植被指数 <i>NDRE</i>	$NDRE=(R_{NIR}-R_{Re})/(R_{NIR}+R_{Re})$	[19]
作物氮反射指数 <i>NRI</i>	$NRI=(R_G-R)/(R_G+R)$	[20]

注 R 、 R_G 、 R_{Re} 、 R_{NIR} 分别为红光波段、绿光波段、红边波段、近红外光波段的反射率。

1.5 产量数据获取

无人机多光谱影像拍摄当天，同时进行地面春玉米产量采集。春玉米成熟期，取每个小区单位面积内 1 m^2 长势均一的植株，取其全部果实烘干至恒质量并进行测量。测定完毕后，对各小区的全部果实进行脱粒，混合均匀后，计算小区籽粒产量，根据小区面积折算单位面积产量。

1.6 反演模型的构建

1.6.1 偏最小二乘法

偏最小二乘法 (Partial least squares, PLS) 是一种多元回归分析方法，常用于处理自变量之间的多重

共线性问题。PLS 通过构建综合变量 (即为潜在变量)，减少自变量和因变量之间的相关性，从而提高模型的模拟精度^[21]。

1.6.2 随机森林回归

随机森林回归 (Random forest regression, RF) 是一种机器学习方法，通过构建多棵决策树来预测连续变量，并将每棵决策树的结果进行平均，以降低过拟合风险，从而提高模型预测的准确性^[22]。经过试验反复验证和误差分析，选用 $n_{tree}=500$ 、 $m_{try}=5$ 构建模型。

1.6.3 粒子群算法优化随机森林回归

粒子群算法 (Particle swarm optimization, PSO) 是一种基于群体智能的优化算法，通过不断地调整粒子位置来寻找最优解^[23]。在 PSO-RF 中，粒子群优化算法用于优化随机森林回归模型的参数，以提高模型的预测精度。

1.7 模型精度评价指标

为验证模型精度，采用决定系数 (Coefficient of determination, R^2)、均方根误差 (Root mean square error, *RMSE*)、相对分析误差 (Relative analysis error, *RPD*) 作为模型评价指标。其中， R^2 越大，*RMSE* 越小，代表模型精度越高。根据 *RPD* 将模型预测定为 3 个等级。当 $RPD < 1.4$ 时，表示不能对样本进行预测；当 $1.4 \leq RPD < 2$ 时，表示预测效果一般，只能对样本

进行简单的估算；当 $RPD \geq 2$ 时，表示可以对样本进行有效预测^[24]。

2 结果与分析

2.1 春玉米产量的差异性分析

图 4 为春玉米产量分布情况。由图 4 可知，产量数据的上极值、上四分位数、中位数、下四分位数和下极值分别为 22 277.53、18 651.72、16 899.45、14 570.28、10 051.82 kg/hm²，整体呈正态分布，波动程度较小。

2.2 春玉米产量与植被指数的相关分析

春玉米产量与不同生育时期植被指数的相关性如图 5 所示。由图 5 可知，拔节期、抽雄期、灌浆期 *NDVI*、*CIRE*、*GNDVI*、*LCI*、*NDRE*、*OSAVI*、*RVI* 均与产量正相关。其中拔节期和抽雄期，由近红外光、红光波段构建 *NDVI* 与产量的相关性最高，相关系数分别为 0.72、0.74。其余植被指数与产量的相关系数

介于 0.48~0.67。灌浆期，由近红外光、绿波段构建的 *GNDVI* 与产量显著相关，相关系数为 0.67。综上所述，除 *NRI* 以外，其余 7 个植被指数与产量均在 $P < 0.01$ 水平显著相关，为植被指数预测春玉米产量提供可行性。

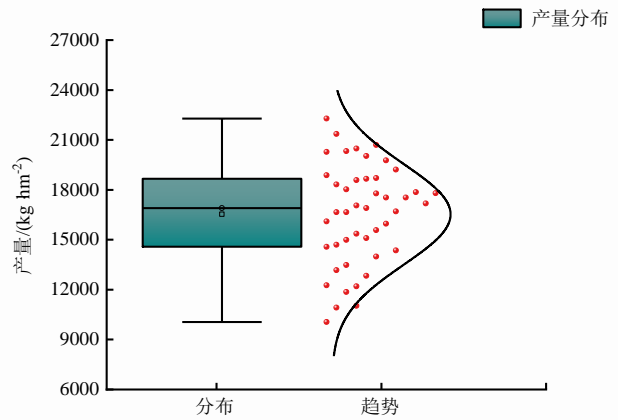


图 4 春玉米产量分布

Fig.4 Distribution of spring corn yield

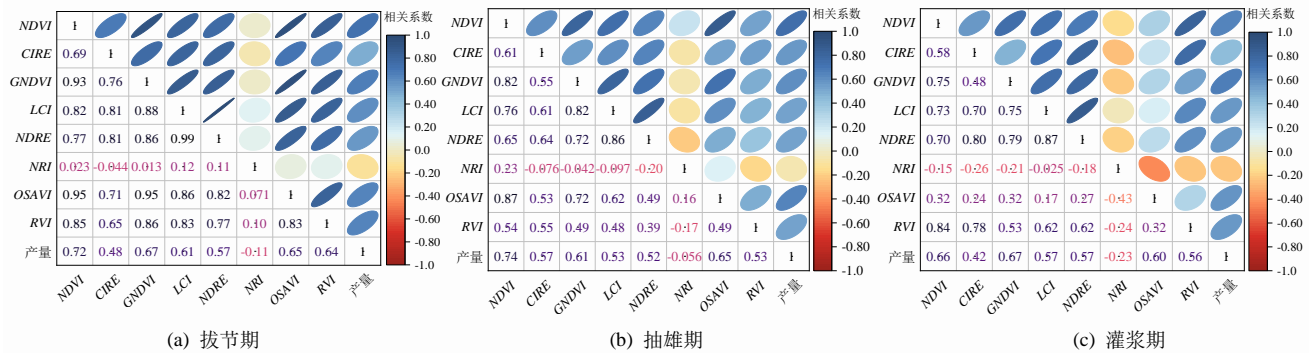


图 5 产量与植被指数的相关性

Fig.5 Correlation between yield data and vegetation index

2.3 不同生育时期的植被指数估算春玉米产量

在构建不同生育时期单一植被指数预测春玉米产量时，拔节期、抽雄期、灌浆期的模型输入变量依次为 *NDVI*、*NDVI*、*GNDVI*。不同估产模型单一植被指数输入变量的建模结果见表 2。

表 2 单一植被指数建模结果

Tab.2 Modeling results of single vegetation index

生育时期	单一植被指数	反演模型	训练集		验证集		RPD
			R ²	RMSE/(kg hm ⁻²)	R ²	RMSE/(kg hm ⁻²)	
拔节期	<i>NDVI</i>	PLS	0.503	2 123.322	0.524	2 032.432	1.602
		RF	0.608	2 132.431	0.598	1 983.543	1.639
		PSO-RF	0.683	2 032.123	0.663	1 892.126	1.729
抽雄期	<i>NDVI</i>	PLS	0.569	1 930.324	0.576	1 872.861	1.643
		RF	0.623	1 867.971	0.603	1 832.432	1.684
		PSO-RF	0.712	1 734.525	0.685	1 792.712	1.764
灌浆期	<i>GNDVI</i>	PLS	0.504	2 289.508	0.513	2 143.561	1.579
		RF	0.574	2 034.532	0.617	1 993.643	1.688
		PSO-RF	0.664	1 876.437	0.684	1 744.552	1.734

由表 2 可知，抽穗期以单一植被指数 *NDVI* 为模型输入变量的模拟效果最优。对比不同模型的综合评价指标发现，不同生育时期基于单一植被指数的产量预测模型均以 PSO-RF 模型模拟精度最高。3 个生育时期 PSO-RF 模型验证集的 R^2 分别为 0.663、0.685、0.684， $RMSE$ 分别为 1 892.126、1 792.712、1 744.552 kg/hm²， RPD 分别为 1.729、1.764、1.734。

图 6 为拔节期 (JS)、抽雄期 (TS)、灌浆期 (FS) 多种植被指数与产量构建的预测模型验证结果。由图 6 可知，3 个生育时期中，基于 RF 模型构建春玉米产量预测模型的评价指标均优于 PLS 模型，其验证集的 R^2 分别为 0.621、0.719、0.641， $RMSE$ 分别为 1 866.81、1 728.32、1 755.11 kg/hm²。拔节期 2 种模型的 RPD 均小于 2，说明对样本预测效果一般。基于 PSO 算法优化能够显著提升 RF 模型精度。与 RF、PLS 模型相比，PSO-RF 模型在不同生育时期建模集和验证集的 R^2 均在 0.7 以上，且抽雄期 PSO-RF 模型的 $RPD > 2$ ，满足精准模型要求。

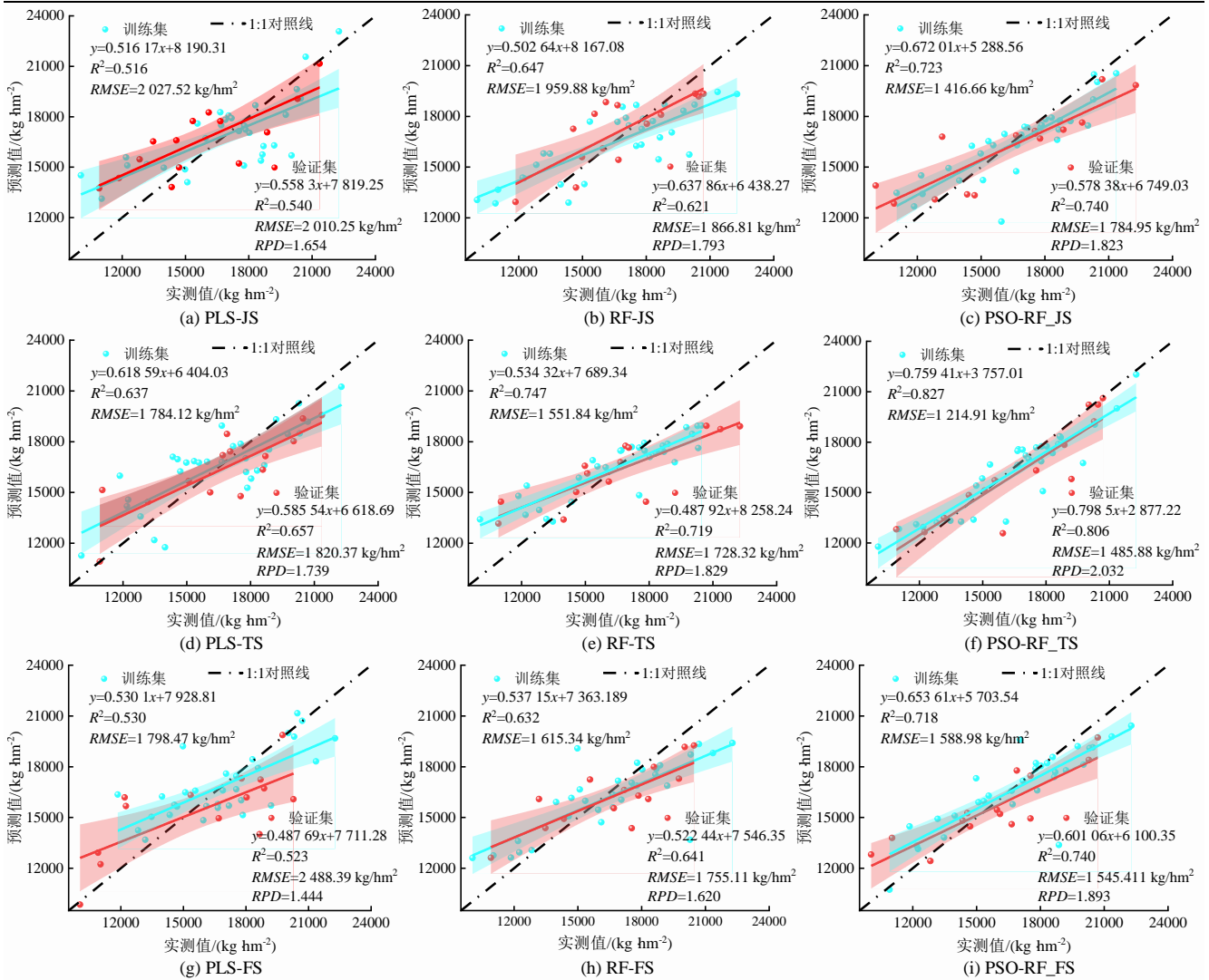


图 6 基于多种植指数构建春玉米产量预测模型

Fig.6 Building a spring corn yield prediction model based on multi planting index

2.4 基于最佳产量模型的空间反演

将基于抽雄期多种植被指数组合的 PSO-RF 模型 45 组预测数据按 15 个小区进行划分, 并取每个小区的均值制作春玉米产量分布图(图 7)。由图 7 可知, 不同灌水处理春玉米产量差异明显。其中 W3 处理产量最大, 平均产量为 19 945.25 kg/hm², W1 处理产量最小, 平均产量为 12 054.52 kg/hm², W4、W5 处理产量差异不明显。由表 3 可知, 基于 PSO-RF 模型的预测结果与田间实测数据分布规律相符, 说明基于无人机多光谱影像建立产量预测模型可行, 可为农业精细化管理提供技术指导。

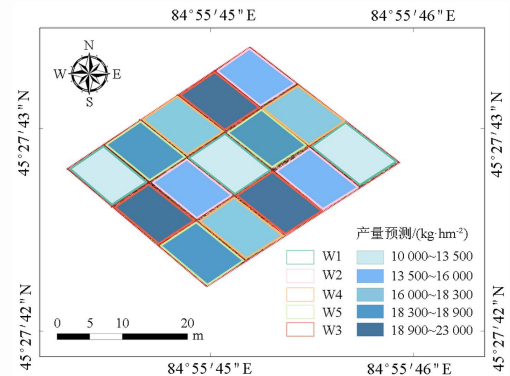


图 7 春玉米产量分布

Fig.7 Yield distribution of spring maize

表 3 基于 PSO-RF 模型反演春玉米产量统计

Tab.3 Spring maize yield statistics based on PSO-RF model

处理	实测结果				预测结果			
	最小值/(kg hm ²)	最大值(kg hm ²)	平均值/(kg hm ²)	变异系数	最小值/(kg hm ²)	最大值(kg hm ²)	平均值/(kg hm ²)	变异系数
W1	10 051.82	13 475.33	11 975.87	0.089	10 254.65	13 656.54	12 054.52	0.102
W2	13 979.99	15 961.58	14 953.27	0.039	13 856.64	16 024.31	15 065.45	0.042
W4	16 954.72	18 239.57	17 753.43	0.029	17 054.58	18 197.46	17 665.47	0.026
W5	18 380.56	18 875.83	18 423.35	0.027	18 265.42	18 756.34	18 392.57	0.024
W3	19 206.41	21 277.53	19 726.62	0.042	19 345.57	21 457.12	19 845.25	0.045

3 讨论

本研究表明,春玉米产量与植被指数相关性呈先增大后减小的趋势,且不同生长发育阶段均有与产量相关性较高的植被指数,说明提取的植被指数能够反映不同灌水条件下春玉米产量,这与严海军等^[25]和向友珍等^[26]反演作物产量研究结果类似。3个生育时期中,由近红外光、红光波段构建 *NDVI* 指数和由近红外光、绿光波段构建 *GNDVI* 指数与产量的相关性最高。说明 *NDVI* 与 *GNDVI* 包含更多的地物生长信息,能够表征春玉米产量特征。这与 Shammi 等^[27]研究结果一致。刘照等^[28]研究发现,发现采用抽雄期和乳熟期的植被指数预测玉米产量效果较优。胡田田等^[29]基于无人机多光谱影像估算不同生育时期冬小麦产量,研究显示,从抽穗—灌浆期冬小麦植被指数与产量相关性逐渐增大并在开花期达到峰值之后又随之减小。本研究中,抽雄期产量与植被指数的响应程度最高,这与前人^[28-29]研究结果相近。这是因为玉米拔节期主要处于营养生长期,无法全面表征生长末期器官的生长状况,因此植被指数与产量的相关性一般较低。抽雄期是玉米生长发育的关键期,养分需求量大,干物质积累快,此时植被指数与产量的相关性最高。灌浆期养分向籽粒转移,叶绿素下降,导致该时期植被指数与产量的相关性减弱^[30]。

不同模型输入变量对模型预测精度的效果各有异同。基于单一植被指数构建春玉米预测模型时,以 *NDVI*、*GNDVI* 的反演效果较优。但植被指数在春玉米生长阶段呈多样性,而单一植被指数只能代表部分波段的光谱特征,不能完全包括春玉米产量的地物信息。因此,应选择多种植被指数捕捉春玉米产量信息更为有效。本研究中,基于多种植被指数为输入变量的模型精度总体优于基于单一植被指数为输入变量的模型精度。向友珍等^[26]通过 RF 模型实现对大豆产量的精准预测,主要是因为 RF 模型本身具有较高的鲁棒性和较强的灵活性,对数据的极端忍耐性较强。然而,RF 模型存在陷入局部最优解的缺点,导致模型高度复杂,容易出现过拟合的问题。本研究表明,以 PSO-RF 模型预测春玉米不同生育时期的产量效果较优,说明 PSO-RF 模型可作为首选方法预测春玉米产量。在建立春玉米空间反演分布影像时发现,过量灌水以及水分亏缺均会影响春玉米产量。作物产量形成有关于一系列生理生化指标的反演过程,后期将从不同地域、多种尺度构建作物产量预测模型。除此之外,本研究还需尝试应用无人机采集更多的光谱指数,以避免光谱损失影响产量模型的预测精度。

4 结论

1) 3个生育时期中,除 *NRI* 外,其余植被指数均与春玉米产量极显著相关。其中,拔节期和抽雄期,*NDVI* 与产量相关性最高,相关系数分别为 0.72、0.74。灌浆期,*GNDVI* 与产量的相关性最高,相关系数为 0.67。

2) 基于单一植被指数和基于多植被指数组合作为模型输入变量,机器学习模型的精度均优于传统线性回归模型。

3) 以多植被指数组合为输入变量的 PSO-RF 模型在反演拔节期、抽雄期、灌浆期春玉米产量效果较优,其验证集 R^2 为 0.523、0.641、0.740,RPD 为 1.444、1.620、1.893。

4) 基于春玉米产量空间反演分布影像可知,W3 处理产量最高,W1 处理产量最低。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 孟沌超,赵静,兰玉彬,等.基于无人机可见光影像的玉米冠层 *SPAD* 反演模型研究[J].农业机械学报,2020,51(S2):366-374.
MENG Dunchao, ZHAO Jing, LAN Yubin, et al. *SPAD* inversion model of corn canopy based on UAV visible light image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 366-374.
- [2] 陈鹏飞,杨飞,杜佳.基于环境减灾卫星时序归一化植被指数的冬小麦产量估测[J].农业工程学报,2013,29(11):124-131.
CHEN Pengfei, YANG Fei, DU Jia. Yield forecasting for winter wheat using time series *NDVI* from HJ satellite[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(11): 124-131.
- [3] 李卫国,李正金.基于 CBERS 卫星遥感的冬小麦产量估测研究[J].麦类作物学报,2010,30(5):915-919.
LI Weiguo, LI Zhengjin. Study on estimating winter wheat yield by CBERS satellite images[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(5): 915-919.
- [4] 罗维,李修华,覃火娟,等.基于多源卫星遥感影像的广西中南部地区甘蔗识别及产量预测[J].自然资源遥感,2024,36(3):248-258.
LUO Wei, LI Xiuhua, QIN Huojuan, et al. Identification and yield prediction of sugarcane in the south-central part of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China based on multi-source satellite-based remote sensing images[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(3): 248-258.
- [5] BARZIN R, PATHAK R, LOTFI H, et al. Use of UAS multispectral imagery at different physiological stages for yield prediction and input resource optimization in corn[J]. Remote Sensing, 2020, 12(15): 2392.
- [6] 杨楠,周萌,陈欢,等.基于无人机 RGB 影像的小麦叶面积指数与产量估算研究[J].麦类作物学报,2023,43(7):920-932.
YANG Nan, ZHOU Meng, CHEN Huan, et al. Estimation of wheat leaf area index and yield based on UAV RGB images[J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(7): 920-932.
- [7] 程千,徐洪刚,曹引波,等.基于无人机多时相植被指数的冬小麦产量估测[J].农业机械学报,2021,52(3):160-167.
CHENG Qian, XU Honggang, CAO Yinbo, et al. Grain yield prediction of winter wheat using multi-temporal UAV based on multispectral vegetation index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 160-167.
- [8] 鲁向晖,杨宝城,张海娜,等.基于无人机多光谱遥感的矮林芳樟叶

- 片精油产量反演[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 191-197, 213.
- LU Xianghui, YANG Baocheng, ZHANG Haina, et al. Inversion of leaf essential oil yield of *Cinnamomum camphora* based on UAV multi-spectral remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 191-197, 213.
- [9] MWINUKA P R, MBILINYI B P, MBUNGU W B, et al. The feasibility of hand-held thermal and UAV-based multispectral imaging for canopy water status assessment and yield prediction of irrigated African eggplant (*Solanum aethopicum* L.)[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106-114.
- [10] SARAIVA D, VALQUI-VALQUI L, SALAZAR W, et al. Yield prediction of four bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars using vegetation indices based on multispectral images from UAV in an arid zone of Peru[J]. Drones, 2023, 7(5): 325.
- [11] LIPOVAC A, BEZDAN A, MORAVČEVIĆ D, et al. Correlation between ground measurements and UAV sensed vegetation indices for yield prediction of common bean grown under different irrigation treatments and sowing periods[J]. Water, 2022, 14(22): 3786.
- [12] 韩文霆, 汤建栋, 张立元, 等. 基于无人机遥感的玉米水分利用效率与生物量监测[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 129-141.
- HAN Wenting, TANG Jiandong, ZHANG Liyuan, et al. Maize water use efficiency and biomass estimation based on unmanned aerial vehicle remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 129-141.
- [13] 徐洪刚, 陈震, 程千, 等. 无人机多源光谱反演大田夏玉米叶面积指数[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(8): 42-49.
- XU Honggang, CHEN Zhen, CHENG Qian, et al. Leaf area index of summer maize estimated using UAV-based multispectral imageries[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(8): 42-49.
- [14] GITELSON A A, VIÑA A, ARKEBAUER T J, et al. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(5): 52.
- [15] 丁凡, 陈震, 李长春, 等. 不同施肥处理下无人机光谱感知冬小麦产量[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1): 24-30.
- DING Fan, CHEN Zhen, LI Changchun, et al. Using unmanned aerial vehicle to evaluate the effect of nitrogen fertilization on winter wheat yield[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 24-30.
- [16] 李宗鹏, 李连豪, 陈震, 等. 基于 Stacking 法的无人机光谱遥测冬小麦产量[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(8): 50-56.
- LI Zongpeng, LI Lianhao, CHEN Zhen, et al. Estimating winter wheat yield using UAV remote sensing imageries and stacking method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(8): 50-56.
- [17] 刘一博, 裴杰, 方华军, 等. 利用无人机影像反演水稻 SPAD 值的最优空间窗口确定[J]. 农业工程学报, 2023, 39(19): 165-174.
- LIU Yibo, PEI Jie, FANG Huajun, et al. Optimizing spatial window selection for rice SPAD value retrieval using multispectral UAV images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(19): 165-174.
- [18] 李阳, 苑严伟, 赵博, 等. 基于多时相多参数融合的麦玉米轮作小麦产量估算方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 186-196.
- LI Yang, YUAN Yanwei, ZHAO Bo, et al. Estimation of wheat yield in wheat-maize rotation based on multi-temporal and multi-parameter fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 186-196.
- [19] 朱文静, 冯展康, 戴世元, 等. 无人机多光谱影像的小麦倒伏信息多特征融合检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(1): 197-206.
- ZHU Wenjing, FENG Zhankang, DAI Shiyuan, et al. Multi-feature fusion detection of wheat lodging information based on UAV multispectral images[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(1): 197-206.
- [20] TUCKER C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127-150.
- [21] 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.
- FENG Hao, YANG Zhengting, CHEN Hao, et al. Estimation of summer maize SPAD based on UAV multispectral images[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 211-219.
- [22] 牛庆林, 冯海宽, 周新国, 等. 冬小麦 SPAD 值无人机可见光和多光谱植被指数结合估算[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 183-194.
- NIU Qinglin, FENG Haikuan, ZHOU Xinguo, et al. Combining UAV visible light and multispectral vegetation indices for estimating SPAD value of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 183-194.
- [23] 王晗, 向友珍, 李汪洋, 等. 基于无人机多光谱遥感的冬油菜地上部生物量估算[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 218-229.
- WANG Han, XIANG Youzhen, LI Wangyang, et al. Estimation of winter rapeseed above-ground biomass based on UAV multi-spectral remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 218-229.
- [24] JIN X L, YANG G J, XU X G, et al. Combined multi-temporal optical and radar parameters for estimating LAI and biomass in winter wheat using HJ and RADARSAR-2 data[J]. Remote Sensing, 2015, 7(10): 13251-13272.
- [25] 严海军, 卓越, 李茂娜, 等. 基于机器学习和无人机多光谱遥感的苜蓿产量预测[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 64-71.
- YAN Haijun, ZHUO Yue, LI Maona, et al. Alfalfa yield prediction using machine learning and UAV multispectral remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 64-71.
- [26] 向友珍, 安嘉琪, 赵笑, 等. 基于无人机多光谱遥感的大豆生长参数和产量估算[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 230-239.
- XIANG Youzhen, AN Jiaqi, ZHAO Xiao, et al. Soybean growth parameters and yield estimation based on UAV multispectral remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 230-239.
- [27] SHAMMI S A, HUANG Y B, FENG G, et al. Application of UAV multispectral imaging to monitor soybean growth with yield prediction through machine learning[J]. Agronomy, 2024, 14(4): 672.
- [28] 刘照, 李华朋, 陈慧, 等. 基于时序影像及不同模型的玉米早期估产研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(8): 2627-2637.
- LIU Zhao, LI Huapeng, CHEN Hui, et al. Maize yield forecasting and associated optimum lead time research based on temporal remote sensing data and different model[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(8): 2627-2637.
- [29] 胡田田, 赵璐, 崔晓路, 等. 无人机多光谱数据可靠性分析与冬小麦产量估算研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 217-225.
- HU Tiantian, ZHAO Lu, CUI Xiaolu, et al. Reliability analysis of UAV multispectral data and estimation of winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 217-225.
- [30] 贾增慧, 张继真, 郝航, 等. 基于无人机高光谱影像的田块尺度玉米估产与生育时期优选[J/OL]. 农业资源与环境学报, 1-14[2024-07-01]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0634>.
- JIA Zenghui, ZHANG Jizhen, HAO Hang, et al. Field-scale maize yield estimation and growth stages optimization based on UAV hyperspectral image[J/OL]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 1-14[2024-07-01]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0634>.