

# 基于无人机多光谱遥感数据的植被指数玉米估产模型研究

王宗辉, 裴宝红\*

(甘肃林业职业技术学院, 甘肃 天水 741020)

**摘 要:** 玉米作为主要的粮食作物, 其产量估产意义较为重大。传统的产量估算方法均以数据抽样调查为主, 产量估算精度较低。随着新技术新方法的不断涌现, 该文以无人机结合多光谱遥感技术, 通过采集玉米的拔节期、吐丝期、乳熟期、蜡熟期 4 个关键生育期植被指数的变化, 通过产量构建分析模型, 并验证筛选合理的模型用于产量估算。经验证, 在乳熟期, 依据 RVI、DVI、SAVI 构建的产量模型精度较高。在蜡熟期, 依据 NDVI、RVI、DVI、SAVI 构建的产量模型较高。通过以上研究, 对于在玉米生长过程中, 能够积极结合数据变化, 便于高效开展农作物种植, 估测作物产量具有重要的指导意义。

**关键词:** 玉米; 多光谱; 估产模型; 植被指数; 无人机

**中图分类号:** S38

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-9902(2024)04-0001-05

**Abstract:** Corn, as the main grain crop, has significant significance in estimating its yield. The traditional yield estimation methods are mainly based on data sampling survey, and the accuracy of yield estimation is low. With the continuous emergence of new technologies and new methods, this paper uses UAV based on multi-spectral remote sensing technology to collect the changes of vegetation index in four key growth stages of corn, such as jointing stage, silking stage, milking stage and doughing stage, and construct an analysis model through yield, and verify and screen a reasonable model for yield estimation. It is proved that in the milk stage, the yield model based on RVI, DVI and SAVI has higher accuracy. In the wax ripening stage, the yield model based on NDVI, RVI, DVI and SAVI was higher. Through the above research, it has important guiding significance to actively combine the changes of data in the process of corn growth, facilitate efficient crop planting and estimate crop yield.

**Keywords:** corn; multispectral; yield estimation model; vegetation index; UAV

玉米作为我国第一大粮食作物, 在甘肃省内种植面积广泛, 主要分布在甘肃省张掖、庆阳、临夏等地, 其中张掖市 2020 年玉米种植面积为 1.81 万  $\text{hm}^2$ , 占总播种面积的 25.45%, 年产量 616.83 万  $\text{t}^{[1]}$ 。传统的产量估算方法主要以地面数据抽样调查为主, 该方法费时、费力、具有破坏性, 难以扩展到大尺度及时、准确预测玉米产量<sup>[2]</sup>。

随着遥感技术的兴起和精准农业的发展, 遥感技术积极应用于玉米生长过程中的监测及产量的估计, 卫星遥感可进行大面积的作物生长监测得到大规模的应用<sup>[3]</sup>, 但是卫星遥感数据获取的局限性, 遥感数据受天气的影响明显, 图像的分辨率低, 无法精确获取农作物产量估算的精确数据, 对农作物产量的估计无法满足精准农业的需要。近年来无人机在各个行业的大规模应用, 其挂载多种类的传感器为无人机遥感技术的应用提供了可能。国内学者利用遥感技术对多种农作物产量估测开展

了研究, 王恺宁等<sup>[4]</sup>选取灌浆期的卫星遥感数据计算 4 种植被指数, 并建立植被指数与小麦产量的线性及非线性回归模型。王尔美等<sup>[5]</sup>基于 Landsat-TM 与 MODIS 卫星遥感影像, 利用 NDVI 光谱植被指数构建 TM-MODIS 多元线性回归玉米单产估测模型。陶惠林等<sup>[6]</sup>采集冬小麦拔节期、挑旗期、开花期无人机高光谱影像, 用 3 种方法回归建模估测冬小麦生物量。无人机遥感技术借鉴卫星遥感的估产方法, 由于无人机机动性较强、获取数据便捷、数据精度高等特点, 能够更为精确地获取到高分辨率影像, 极大地规避了卫星遥感的弊端, 也为农作物的生长监测和产量估计提供了新的应用思路, 为精准农业的发展提供了数据支持。

## 1 研究区概况

研究区位甘肃省张掖市甘州区沙井镇东五村 ( $100^{\circ}15'E \sim 39^{\circ}09'N$ ), 距离甘州区 27 km。区域属大陆性气候。年平均日照时 2 932~3 085 h, 交通方便, 土地肥沃,

**基金项目:** 2023 年甘肃省教育厅高校教师创新基金项目 (2023B-320)

**第一作者简介:** 王宗辉 (1981-), 男, 硕士, 副教授。研究方向为测绘技术、园林类专业人才培养。

**\* 通信作者:** 裴宝红 (1974-), 女, 副教授。研究方向为园林及园艺技术。

年平均气温 6~8℃,4~10 月日均温差在 13.4℃~18.2℃ 之间。优质的气候和土地资源适宜玉米的生长,本次实验采用人工点播方式,品种选用 4 月初播种,10 月收获。病虫害防治统一采用无人机统一防治管理。

## 2 数据采集及处理

本试验选用大疆经纬 M300RTK 作为无人飞行平台,无人机空中飞行时间 55 min,具备智能定位跟踪功能,打点定位功能可实现更高效的监测任务。通过 DJI X-Port 与经纬 M300 系列飞行平台无缝兼容,为本次项目提供数据支持。MS600 Pro 支持 400~900 nm 6 种选配波长任意 17 种波长任选 6 种组合使用,本次选用蓝(450 nm)、绿(555 nm)、红(620 nm)、红边 1(720 nm)、红边 2(750 nm)和近红外(840 nm)组合,在数据采集前对灰板拍照以开展辐射校正,同时选择对应数据采集时间为 11:00—12:00 点进行数据采集。为了更好地提升数据有效性,利用大疆 DJI GS PRO 软件完成航线规划,航向重叠度及旁向重叠率为 80%,飞行高度为 110 m,地面分辨率为 0.16 m 开展数据采集工作。

结合玉米的生长周期,根据研究计划,于 5 月 17 日—9 月 28 日开展共计 15 次数数据采集,期间覆盖玉米的拔节期、吐丝期、乳熟期、蜡熟期 4 个生育期。数据采集以大面积采集为主,采样样方选用面积为 4 m<sup>2</sup> (2 m×2 m),地面采样点对应 GNSS 定位,用根据数据点位裁剪对应的样方,提取其植被指数。

## 3 研究方法

### 3.1 技术路线

研究方法如图 1 所示,首先对导出的原始数据通过影像拼接、波段合成、影像配准等操作输出多光谱影像,通过辐射校正、大气校正、几何校正确保数据的准确性和一致性。利用适合的波段组合计算植被指数,并输出植被指数影像,完成植被指数的提取,结合实际产量构建回归模型,通过精度评定最终形成该区域玉米产量的最优模型。

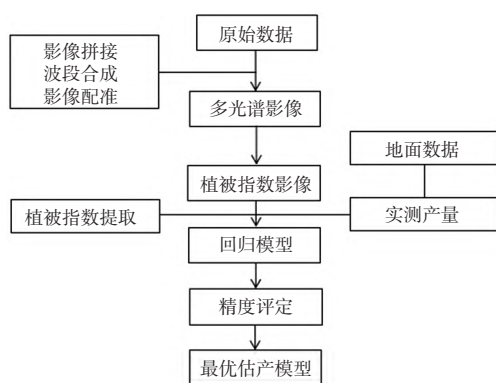


图 1 数据处理流程

### 3.2 植被指数的选择

1)NDVI:Normalized Difference Vegetation Index, NDVI 是一种广泛使用的植被指数,能够反映植被覆盖度和光合作用强度。在玉米估产模型中,NDVI 是一个常用的指标,能够提供关于玉米生长状况的信息。

2)NDBI:Normalized Difference Build-up Index, NDBI 是一种专门用于估算森林地上生物量的植被指数,其对裸露的地表不敏感。在玉米估产模型中,NDBI 可以提供关于玉米植株内部结构的信息,有助于估产。

3)REPI:Red-Edge Position Index,REPI 是一种测量红边缘位置的植被指数,能够反映植被的生长阶段和健康状况。在玉米估产模型中,REPI 可以帮助判断玉米的生长阶段和成熟度。

4)GNDVI:Green NDVI,GNDVI 是一种基于绿光波段的植被指数,能够区分出绿色植被和非绿色植被。在玉米估产模型中,GNDVI 可以帮助区分玉米和其他非植被覆盖区域。

5)OSAVI:Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index,OSAVI 是一种考虑土壤影响的植被指数,能够减小土壤背景的影响,更准确地反映植被的状况。在玉米估产模型中,OSAVI 可以提高模型的准确性。

6)PVI:Progressive Vegetation Index,PVI 是一种基于多光谱数据的植被指数,能够反映植被的垂直分布和结构。在玉米估产模型中,PVI 可以帮助描述玉米植株的高度和密度,有助于提高估产精度。

7)EVI:Enhanced Vegetation Index,EVI 是一种增强型植被指数,能够更好地反映植被覆盖度和光合作用强度。在玉米估产模型中,EVI 可以提高模型的灵敏度和准确性。

8)SAVI:Soil-Adjusted Vegetation Index,SAVI 是一种考虑土壤影响的植被指数,能够减小土壤背景的影响,更准确地反映植被的状况。在玉米估产模型中,SAVI 可以提高模型的准确性。

数据分析过程中采用 EXECL 软件对数据统计分析并制作图表。对所有数据随机选择 80%数据构建监测及产量模型,其他数据进行检核。

在基于植被指数建立的监测模型中,我们可以通过计算  $R^2$ 、 $RMSE$  2 个指标综合评价模型的性能。模型的决定系数  $R^2$ ,其值越接近 1,模型具有较高的拟合度,可以较好地反映样本数据的特性。 $RMSE$  和  $MRE$  2 个指标越小,模型预测的准确度越高,模型的可信度也就越高。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i + \bar{y}_i)^2}, \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - y_i)^2}{n}}, \quad (2)$$

式中:  $X_i$  为预测值;  $Y_i$  为实测值;  $\bar{y}_i$  为实测值的平均值;  $i$  为样本数,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ;  $n$  为样本数。

### 3.3 模型评价指标

在基于无人机多光谱遥感数据的植被指数玉米估产模型研究中,常用的模型评价指标包括以下几个方面。

1) 预测精度: 预测精度是评估模型性能最常用的指标之一。其可以通过比较模型预测的产量和实际产量来计算。预测精度可以用平均绝对误差(MAE)、均方误差(MSE)等指标来衡量。

2) 灵敏度: 灵敏度是指模型对于不同条件或因素的响应程度。在玉米估产模型中,灵敏度可以用来评估模型对于不同生长阶段、气候条件和土壤类型等因素的响应程度。

3) 稳定性: 稳定性是指模型在不同情境下的预测

结果的一致性。在玉米估产模型中,稳定性可以用来评估模型在不同年份、不同地块和不同种植品种等情况下的预测结果的稳定性。

4) 可解释性: 可解释性是指模型对于其预测结果的解释能力。在玉米估产模型中,可解释性可以用来评估模型是否能够提供清晰、易于理解的结果解释,帮助人们更好地理解玉米生长和产量形成的机制。

## 4 模型验证

### 4.1 产量数据分析

根据研究过程,选定 NDVI、RVI、SAVI、OSAVI、EVI 和 GNDVI 等植被指数作为作物产量的分析指数。利用 EXECL 软件,分析玉米拔节期、吐丝期、乳熟期、蜡熟期 4 个生育期的产量进行数据分析,对关联性较高的指数与产量进行多元线性回归分析,构建产量预测模型。

经过统计,区域玉米产量统计表如图 2 所示,根据调查,产量频次最多为 23 500~24 000 kg 之间,每公顷面积玉米最高产量 25 125 kg,最低 21 011 kg,整体数据呈现正态分布,样本数据合理,满足分析要求。

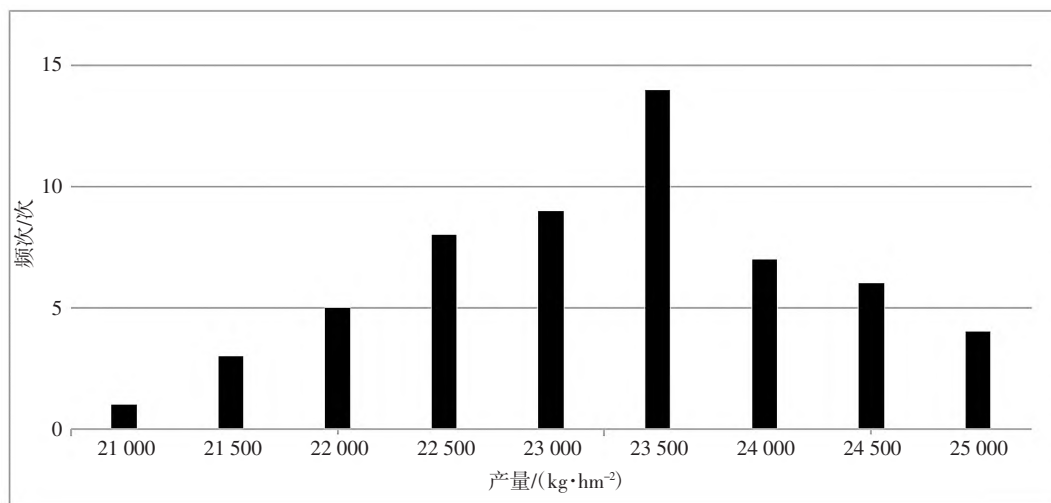


图 2 产量分布频数图

### 4.2 植被指数与产量的相关性分析

根据对应 NDVI 等参数对玉米生长关键期植被指数,结合产量开展关联分析,研究对应数据关系。根据表 1 显示,拔节期、抽穗期对应的相关系数均在 0.3 以下,

充分反应前 2 个生长期植被指数与产量关系不大。后期乳熟期和蜡熟期,对应的相关性较高,均在 0.3 以上,其中 NDVI、RVI、DVI、SAVI 相关性较高,蜡熟期更为明显,对产量分析具有决定性作用。详见表 1。

表 1 不同生育期植被指数与产量相关性分析

时期	NDVI	RVI	DVI	SAVI	GNDVI	EVI
拔节期	0.204	0.211	0.229	0.258	0.125	0.157
抽穗期	0.226	0.273	0.275	0.274	0.251	0.269
乳熟期	0.543	0.632	0.645	0.585	0.478	0.332
蜡熟期	0.799	0.789	0.741	0.820	0.573	0.425



5 玉米产量估测模型构建与验证

5.1 乳熟期玉米产量模型构建

在产量模型构建过程中，选用 NDVI、RVI、DVI、SAVI、GNDVI 和 EVI 等指数，对相关性较高的乳熟期和蜡熟期指数分别进行一元线性回归分析，根据一元线性回归结果进行多元线性回归分析，并计算其对应的决定系数  $R^2$  和  $RMSE$ ，具体模型见表 2，经过计算，其中单一参数中，DVI 对应的模型最佳，多元线

性回归计算过程中，由于一元线性回归中 GNDVI 模型精度较差，推荐选用较高的 DVI 等参数构建估测模型，建立的模型中选用 NDVI、RVI、DVI、SAVI 构建的模型  $Y=301.489A_1-289.043A_2-1\ 489.512A_3-461.056A_4+27\ 864.584$ ，对应的决定系数  $R^2=0.451$ ， $RMSE=623.821$ ；选用 RVI、DVI、SAVI 构建的模型  $Y=-281.387A_2-1\ 491.455A_3-217.546A_4+27\ 875.814$ ，对应的决定系数  $R^2=0.462$ ， $RMSE=617.901$ ，2 个模型比较接近。

表 2 乳熟期玉米产量与植被指数拟合模型

植被指数	拟合方程	决定系数 $R^2$	均方根误差 $RMSE$
$A_1$	$Y=-8\ 089.255A_1+27\ 612.332$	0.322	722.129
$A_2$	$Y=-534.447A_2+25\ 112.498$	0.292	681.215
$A_3$	$Y=-2\ 201.939A_3+28\ 012.006$	0.367	673.982
$A_4$	$Y=-5\ 780.012A_4+27\ 789.263$	0.271	693.627
$A_5$	$Y=6\ 101.746A_5+23\ 718.921$	0.196	738.122
$A_1、A_2、A_3、A_4$	$Y=301.489A_1-289.043A_2-1\ 489.512A_3-461.056A_4+27\ 864.584$	0.451	623.821
$A_2、A_3、A_4$	$Y=-281.387A_2-1\ 491.455A_3-217.546A_4+27\ 875.814$	0.462	617.901
$A_1、A_3、A_4$	$Y=527.485A_1-1\ 592.265A_3-3\ 624.385A_4+29\ 597.657$	0.411	633.423
$A_1、A_2、A_4$	$Y=3\ 695.695A_1-996.472A_2-2\ 597.769A_4+22\ 412.151$	0.367	649.821
$A_1、A_2、A_3$	$Y=115.731A_1-353.646A_2-1\ 538.313A_3+27\ 616.719$	0.422	642.211

备注： $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  和  $A_5$  分别表示 NDVI、RVI、DVI、SAVI 和 GNDVI，下同。

模型建立完成后，依据未参与建模的数据进行模型数据验证，检验模型的可靠性。在乳熟期，NDVI、RVI、DVI、SAVI 和 RVI、DVI、SAVI 建立的模型对应的  $R^2$  为 0.451、0.462， $RMSE$  为 623.821、617.901，模型建

立较为理想。如图 3 和图 4 所示，经数据验证，基于 RVI、DVI、SAVI 建立的模型决定系数更高，模型确定为  $Y=-281.387A_2-1\ 491.455A_3-217.546A_4+27\ 875.814$ ，能够更好地满足产量预测。

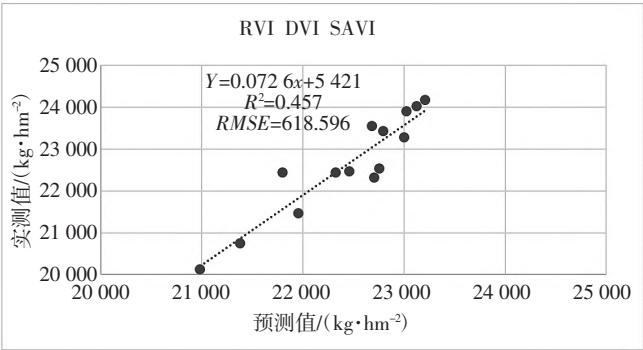


图 3 乳熟期产量估测模型验证(1)

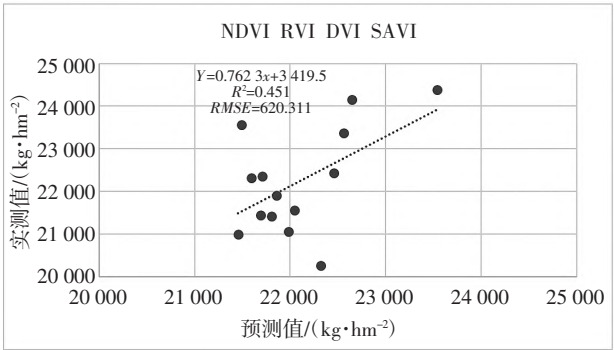


图 4 乳熟期产量估测模型验证(2)

5.2 蜡熟期玉米产量模型构建

在蜡熟期数据构建产量模型过程中，通过回归分析，建立模型见表 3。根据决定系数  $R^2$  和均方根误差  $RMSE$  判定，利用 NDVI、RVI、DVI、SAVI 建立的模型  $Y=-3\ 691.581A_1+655.192A_2-261.878A_3-5\ 618.910A_4+26\ 320.226$  和 NDVI、RVI、SAVI 建立的模型  $Y=-3\ 478.211A_1+651.376A_2-6\ 378.198A_4+259\ 879.209$  满足预测要求，更合理地反映了玉米产量模型。

依据未参与建模的数据进行模型数据验证，在模型数据核查中，一元线性模型模型对应的决定系数  $R^2$  和均方根误差  $RMSE$  精度较差，不考虑作为建模的依据；多元线性拟合效果精度更高，如图 5 和图 6 所示，基于 NDVI、RVI、DVI、SAVI 的多元线性拟合模型  $Y=-3\ 691.581A_1+655.192A_2-261.878A_3-5\ 618.910A_4+26\ 320.226$  拟合更好，可以对产量进行预测。

结合上述分析，在玉米生长的早期，各种植被指数

与产量的相关性较差,植被指数对产量的反映效果不好,难以利用此方法在生长早期进行产量估测。而在生

长中后期,利用植被指数构建回归模型,可以有效地估测夏玉米的产量。

表 3 蜡熟期玉米产量与植被指数拟合模型

植被指数	拟合方程	决定系数 $R^2$	均方根误差 $RMSE$
$A_1$	$Y = -8\,463.211A_1 + 25\,898.112$	0.617	515.827
$A_2$	$Y = -865.616A_2 + 24\,901.105$	0.623	531.218
$A_3$	$Y = -1\,979.255A_3 + 25\,601.152$	0.541	587.236
$A_4$	$Y = -4\,691.291A_4 + 25\,511.468$	0.587	562.120
$A_5$	$Y = 3\,889.215e + 22\,702.891$	0.387	633.568
$A_1、A_2、A_3、A_4$	$Y = -3\,691.581A_1 + 655.192A_2 - 261.878A_3 - 5\,618.910A_4 + 26\,320.226$	0.679	471.298
$A_2、A_3、A_4$	$Y = 425.109A_2 - 1\,689.165e - 6\,221.811A_4 + 24\,721.185$	0.681	478.872
$A_1、A_3、A_4$	$Y = -2\,981.310A_1 - 316.214A_3 - 2\,489.783A_4 + 25\,908.766$	0.601	492.276
$A_1、A_2、A_4$	$Y = -3\,478.211A_1 + 651.376A_2 - 6\,378.198A_4 + 259\,879.209$	0.589	488.265
$A_1、A_2、A_3$	$Y = -4\,421.661A_1 - 198.273A_2 - 709.234A_3 + 25\,811.219$	0.576	493.671

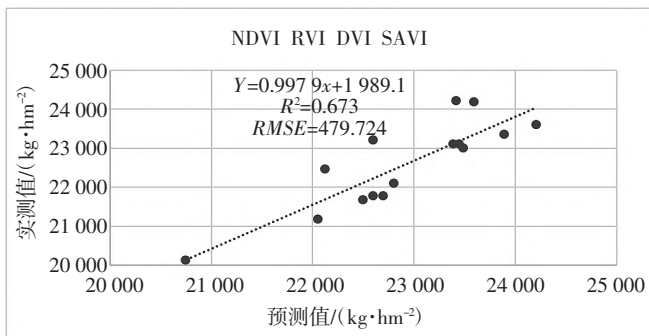


图 5 蜡熟期产量估测模型验证(1)

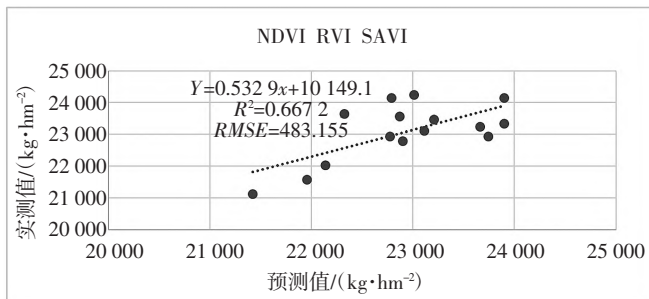


图 6 蜡熟期产量估测模型验证(2)

## 6 结论

玉米作为世界第三大粮食作物,其产量估算具有重要的意义。本文通过多光谱遥感技术采集玉米拔节期、吐丝期、乳熟期、蜡熟期 4 个关键阶段遥感数据,通过分析,选取 NDVI、RVI、SAVI、OSAVI、EVI 和 GNDVI 6 个植被参数建立模型,同时依据决定系数  $R^2$ 、均方根误差  $RMSE$  对模型进行评价。模型建立过程中,依据产

量和植被指数关联关系进行分析,由于拔节期和抽穗期植被与产量关联性均在 0.2~0.3 之间,不能作为产量估算的依据。在乳熟期,依据 RVI、DVI、SAVI 3 个指数建立的模型精度高, $Y = -281.387A_2 - 1\,491.455A_3 - 217.546A_4 + 27\,875.814$ , $R^2=0.462$ , $RMSE=617.901$ 。在蜡熟期,依据 NDVI、RVI、DVI、SAVI 4 种植被指数模型 $Y = -3\,691.581A_1 + 655.192A_2 - 261.878A_3 - 5\,618.910A_4 + 26\,320.226$ , $R^2=0.679$ , $RMSE=471.298$ 。通过研究构建的模型能够精确反映玉米的产量,有效指导玉米生长过程中精细化管理。

## 参考文献:

- [1] 甘肃省统计局. 甘肃省统计年鉴 2021[EB/OL].[http://tjj.gansu.gov.cn/tjj/c117468/info\\_disp.shtml](http://tjj.gansu.gov.cn/tjj/c117468/info_disp.shtml).
- [2] 韦海斌. 玉米产量测定方法的应用探讨[J]. 现代农业, 2013(9): 43.
- [3] 王来刚, 郑国清, 郭燕, 等. 融合多源时空数据的冬小麦产量预测模型研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 198-204, 458.
- [4] 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.
- [5] 王尔美, 李卫国, 顾晓鹤, 等. 基于光谱特征分异的玉米种植面积提取[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(4): 822-827.
- [6] 陶惠林, 冯海宽, 徐良骥, 等. 基于无人机高光谱遥感数据的冬小麦生物量估算[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(5): 1154-1162.