doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.12.020

基于无人机遥感的冬小麦灌浆期关键酶活性定量反演

史喜飞[1]　杨兆临[2]　杜蒙蒙[2]　吉恒善[1]　马　超[1]　李春霞[1]
(1.河南科技大学农学院,洛阳 471023;2.河南科技大学农业装备工程学院,洛阳 471003)

摘要:小麦灌浆期旗叶酶活性是影响籽粒产量和品质形成的关键因素。为提高冬小麦关键酶活性定量反演精度与效率,2023—2024 年在河南省洛阳市汝阳县河南科技大学试验农场进行了冬小麦水肥梯度试验,供试品种为新麦 26,设置 11 个水氮处理,利用无人机搭载 RGB 相机在冬小麦灌浆期获取遥感数据,提取可见光波段归一化绿红差异指数(NGRDI)、比值植被指数(RVI)、植被覆盖度(FVC)3 个指标,与同期实验室测定的旗叶硝酸还原酶(NR)活性、1,5-二磷酸核酮糖(RUBP)羧化酶活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性分别建立多元逐步回归模型,结果表明:该方法在预测 NR 活性、POD 活性和 RUBP 羧化酶活性有较高精度,决定系数(R^2)分别为 0.909、0.770 和 0.683,均方根误差(RMSE)分别为 3.457 μg/(g·h)、1.581 U/g 和 0.225 μmol/(g·min),平均绝对误差(MAE)分别为 1.903 μg/(g·h)、1.235 U/g 和 0.757 μmol/(g·min)。研究结果表明无人机遥感在冬小麦酶活性反演中具有一定潜力,可为冬小麦酶活性反演提供参考依据。

关键词:冬小麦;酶活性反演;支持向量机;逐步回归模型
中图分类号:S127　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)12-0213-09　　**OSID**:

Quantitative Inversion of Key Enzyme Activities at Grain Filling Stage of Winter Wheat Based on UAV Remote Sensing

SHI Xifei[1]　YANG Zhaolin[2]　DU Mengmeng[2]　JI Hengshan[1]　MA Chao[1]　LI Chunxia[1]
(1. *College of Agriculture*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang* 471023, *China*
2. *College of Agricultural Equipment Engineering*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang* 471003, *China*)

Abstract: The enzyme activity of flag leaves at the grain filling stage of wheat was a key factor affecting the formation of grain yield and quality. In order to improve the accuracy and efficiency of quantitative inversion of key enzyme activities in winter wheat, a water and fertilizer gradient test of winter wheat was carried out in Henan University of Science and Technology Farm in Ruyang County, Luoyang City, Henan Province from 2023 to 2024, and the test variety was Xinmai 26, and 11 water and nitrogen treatments were set. The remote sensing data were obtained by UAV with RGB camera at the filling stage of winter wheat, the normalized green-red difference index (NGRDI), ratio vegetation index (RVI) and fractional vegetation coverage (FVC) in the visible band were extracted, and the activities of flag leaf nitrate reductase (NR), ribulose 1,5-bisphosphate (RUBP) carboxylase, superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) were measured by the laboratory during the same period. Catalase (CAT) activity was used to establish a multivariate stepwise regression model. The results showed that the method had high accuracy in predicting NR activity, POD activity and RUBP carboxylase activity, with determination coefficient (R^2) of 0.909, 0.770 and 0.683, root mean square error (RMSE) of 3.457 μg/(g·h), 1.581 U/g and 0.225 μmol/(g·min), and mean absolute error (MAE) of 1.903 μg/(g·h), 1.235 U/g and 0.757 μmol/(g·min), respectively. The results showed that UAV remote sensing had certain potential in the inversion of enzyme activity in winter wheat, and the research results can provide a reference for the inversion of enzyme activity in winter wheat.

Key words: winter wheat; enzyme activity inversion; support vector machine (SVM); stepwise regression model

收稿日期:2025-03-25　修回日期:2025-05-20
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2300802)
作者简介:史喜飞(1998—),女,硕士生,主要从事小麦智慧栽培与生理研究,E-mail:shixifei666@163.com
通信作者:李春霞(1969—),女,教授,主要从事作物高产高效栽培研究,E-mail:lichx@haust.edu.cn

0 引言

小麦是重要的粮食作物[1],其贸易量占全球粮食作物贸易总量的 20%。干旱是制约全球农业生产的主要问题[2-3],近 40 年来,我国由于干旱缺水造成的粮食减产已达近 1×10^8 t。灌浆期是小麦籽粒生长发育最快的时期。研究表明,灌浆期高温、干旱导致小麦籽粒千粒质量降低[4],严重影响小麦产量和品质,因此,在旱作区如何减少干旱对小麦生长发育的影响,提高小麦产量和品质一直是研究热点。氮是小麦生长发育过程必需的营养元素,是叶绿体和蛋白质的关键组成成分。小麦生长过程所需的氮素主要来源于氮肥[5],氮肥施用量、施用时间和施用方式是小麦增产提质的关键因素,合理的水氮运筹对提高小麦产量和品质具有重要意义[6]。

在小麦灌浆期,随着生育进程推进,叶片开始逐渐衰老,此时干旱、缺氮胁迫将造成细胞中活性氧含量增加,引起过氧化反应,细胞膜受到损坏,加速叶片衰老[7]。植物体内多余的活性氧(ROS)通过酶促和非酶促 2 种保护系统清除[8],在超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等抗氧化酶共同作用下,可以有效清除植物体内有害的活性氧自由基,降低膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)含量[9-10],从而提高植物对抗逆境的能力,缓解逆境对植物造成的损害。叶片中硝酸还原酶(NR)在氮代谢过程起着关键作用[11],适宜的 NR 活性有助于延缓叶片衰老[12],延长光合产物积累时间,增加粒质量,与小麦籽粒中蛋白含量及产量等呈正相关[13-14]。1,5-二磷酸核酮糖(RUBP)羧化酶活性直接决定了光合作用,进而影响小麦生长速度、生物量积累以及最终产量[15]。因此,及时获取小麦的 NR 活性、RUBP 羧化酶活性、SOD 活性、POD 活性和 CAT 活性等生理指标,对小麦增产提质十分重要。目前,获取上述生理指标多采用地面采样结合实验室分析方式,效率较低、时效性差,难以满足大面积、实时监测需求。

无人机遥感技术被广泛应用于小麦等作物关键农学参数估算,为实现农业精细化管理提供技术支持。植被覆盖度(Fractional vegetation coverage, FVC)和植被指数(Vegetation index, VI)是衡量作物冠层的重要指标[16],植株体内酶活性与作物长势密切相关,作物长势越好,作物冠层越大。因此,可以利用 FVC 和 VI 对酶活性进行定量反演。BOSHKOVSKI 等[17]基于高光谱反射数据,利用主成分回归、偏最小二乘回归和线性判别方法,研究了干旱条件下受盐胁迫的橄榄树抗氧化酶与高光谱反射数据的相关性,结果表明,CAT 活性与光谱的可见光部分相关性最高,SOD 活性在 1 190 ~ 1 850 nm 范围内相关性较高。IRSA 等[18]通过高光谱成像方法,研究了低温和干旱胁迫对植物单一及联合响应,结果表明,偏最小二乘回归(PLSR)模型对酶活性预测精度在 90% 以上。BUNACIU 等[19]通过傅里叶变换红外光谱法,研究了草药抗氧化能力,结果表明,傅里叶变换红外光谱能快速测定抗氧化酶活性,且模型相关系数达到 0.97。此外,遥感特征和作物生长参数间存在复杂关系,机器学习法能从复杂的光谱数据中提取到有用信息,实现目标检测、分类和反演等任务[20]。

因此,本研究利用无人机获取冬小麦灌浆期遥感图像,建立不同 VI 与冬小麦旗叶 NR、RUBP、SOD、POD 和 CAT 活性等多个生理指标间回归模型,进而定量反演各生理指标活性,为冬小麦精准水肥管理和高产优质栽培提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与试验设计

研究区位于河南省洛阳市汝阳县(34°13′N, 112°53′E,图 1)河南科技大学试验农场,属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 14℃ 左右,土壤类型为褐土,土壤有机质含量 25.2 g/kg、全氮含量 1.33 g/kg、有效磷含量 10.11 mg/kg、有效钾含量 259.6 mg/kg。

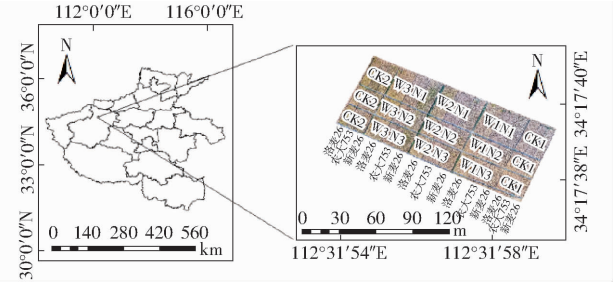


图 1 试验麦田地块

Fig. 1 Plots of experimental wheat field

试验田共种植冬小麦品种 3 个,分别为新麦 26、农大 753 和洛麦 26。本试验以新麦 26 为供试材料,于 2023 年 10 月 20 日播种,2024 年 6 月 6 日收获。试验采用水氮一体化技术,大区设置,每个大区分为 3 个重复,测定冬小麦灌浆期旗叶碳氮代谢酶活性,研究不同水氮处理对冬小麦产量和品质的影响。试验地所用肥总量为尿素(含 N 46%)330 kg/hm^2、二铵(含 P 64%)330 kg/hm^{2}和硫酸钾(含 K 52%)240 kg/hm^2。

灌溉措施为滴灌,在小麦拔节期、孕穗期进行,每次灌溉量分别控制为 0、100、200、300、600 m^3/hm^2,分别

以 CK1、W1、W2、W3 和 CK2 表示。

氮肥施用设置 3 个水平，分别为：底肥 50% + 拔节 25% + 孕穗 25%；底肥 50% + 拔节 15% + 孕穗 35%；底肥 50% + 拔节 35% + 孕穗 15%，分别以 N1、N2 和 N3 表示。底肥在整地前撒施，追肥按照计划量随滴灌进行。其中，CK1、CK2 氮肥 100% 作为底肥施用。

1.2　无人机遥感试验

2024 年 5 月 17 日冬小麦灌浆期，使用大疆无人机获取遥感图像，如图 1 所示。无人机飞行高度为离地面 80 m，以获取空间分辨率约为 2 cm 的航空图像。麦田遥感试验设备见表 1。

表 1　麦田遥感试验设备

Tab. 1　Remote sensing test equipment for wheat fields

设备	参数	数值/形式
无人机	外形尺寸/(mm × mm × mm)	245 × 289 × 56
	净质量/g	249
	飞行高度/m	80
	地面采样距离/cm	2
成像传感器	视角/(°)	83
	传感器类型	CMOS
	有效像素/(像素 × 像素)	2 250 × 4 000
	等效焦距/mm	24
	曝光时间/s	1/1 000
	ISO 灵敏度	100

1.3　测定项目与方法

1.3.1　植被指数选取

植被指数(VI)是一种利用遥感数据反映植被生长状况的指标，监测植被覆盖度、生物量、叶绿素含量、水分含量等参数，从而评估植被健康程度和生产力。VI 通过对遥感影像不同波段反射率进行组合和计算得到。在农业上利用 VI 可帮助管理者及时监测作物生长、估算产量、预警病虫害和规划农业资源等，从而提升农业生产效率和可持续性。选取 2 个相关的 VI，即归一化绿红差异指数(Normalized green-red difference index，NGRDI)与比值植被指数(Ratio vegetation index，RVI)，计算式为

$$NGRDI = \frac{R_{green} - R_{red}}{R_{green} + R_{red}} \tag{1}$$

$$RVI = \frac{R_{green}}{R_{red}} \tag{2}$$

式中　R_{green}——绿色波段反射率

R_{red}——红色波段反射率

1.3.2　植被覆盖度提取

植被覆盖度(FVC)指植被在地面上垂直投影面积占总面积比值，反映小麦群体长势的重要指标。无人机遥感是高效获取农田 FVC 的主要技术手段之一，具体可分为植被指数法与像素统计法。传统基于植被指数估算 FVC 方法，易于实现，适用于大范围估算，但精度受 VI 种类和所选阈值影响较大。近年来，图像分割技术被广泛引入到农业定量遥感研究中[21]，有效提高了 FVC 反演精度与效率。因此，本研究基于机器学习算法实现无人机遥感图像分割，统计感兴趣区域(Region of interest，RoI)内被划分为植被特征的像素个数，计算其占区域像素总数比例，采用像素统计法计算试验田 FVC，计算式为

$$FVC = \frac{N_v}{N_v + N_b} \tag{3}$$

式中　N_v——RoI 范围内被划分为植被的像素数量

N_b——RoI 范围内被划分为背景的像素数量

采用支持向量机(Support vector machine，SVM)对遥感图像进行二值分类，并使用 50 像素 × 50 像素邻域窗口处理分类结果，将遥感图像进行 1 m × 1 m 网格化处理，统计各网格内植被像素数量，最终获取各网格的 FVC。SVM 是一种常用监督分类机器学习算法，核心思想是通过寻找一个最佳的超平面将不同类别样本分开，从而实现分类，广泛应用于模式识别、文本分类和图像识别等任务，在处理高维数据和非线性关系方面具有优势[22]。在 ENVI 5.6 中构建感兴趣区域 RoI，选取植被和背景 RoI 各 100 个，其中 80 个作为训练集，20 个作为验证集，如图 2 所示。

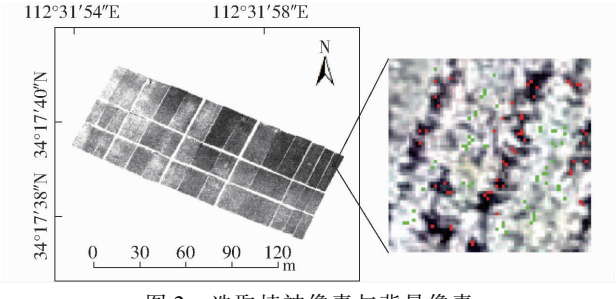


图 2　选取植被像素与背景像素

Fig. 2　Selection of vegetation pixel and background pixel

1.3.3　酶活性测定

于花后 25 d 每个处理随机取正常生长、有代表性、无病虫害的冬小麦旗叶 9 片，3 次重复，放入冰盒迅速带入室内，在液氮中速冻 30 min 后置于 −80℃冰箱保存备用。用氮蓝四唑(NBT)光化还原法测定 SOD 活性(U/g)，用愈创木酚实验法测定 POD 活性(U/g)，用紫外吸收法测定 CAT 活性(U/g)，用离体法测定 NR 活性(μg/(g·h))，用分光光度法测定 RUBP 羧化酶活性(μmol/(g·min))。

1.4　模型构建与验证

选取“一米双行”的冬小麦茎蘖数，统计冬小麦

茎蘖数地面真值,并建立冬小麦茎蘖数地面真值与 FVC 间回归模型。

采用多元逐步回归(Multiple stepwise regression)建模方法,基于 NGRDI、RVI 和 FVC,定量反演冬小麦关键酶活性。共获取 11 组数据,随机抽取 9 组数据作为数据集,2 组数据作为验证集。在建模过程,首先建立包含所有自变量的全模型,随后通过迭代过程逐步剔除不显著变量:每次删除 1 个对模型拟合度影响最小的自变量,并重新拟合模型及检验剩余变量的显著性。该过程持续进行,直至删除任一自变量都会显著降低模型拟合优度,从而获得最优模型。

选用决定系数(R^2)、均方根误差(Root mean square error,RMSE)和平均绝对误差(Mean absolute error,MAE)作为回归模型评价指标。

2 结果与分析

2.1 不同水肥处理对酶活性的影响

2.1.1 不同水肥处理对 SOD 活性的影响

由图 3(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同)可知,在不同灌水梯度下,SOD 活性均值 W3 处理最高,W2 处理最低;在不同施氮配比下,W1 处理 SOD 活性由大到小依次为 N1、N2、N3,W2 和 W3 处理 SOD 活性由大到小依次为 N3、N2、N1;在所有处理中,W3N3 处理 SOD 活性最高,W2N1 处理活性最低,两者差异显著,且 W2N1 处理较 W3N3 处理降低 22.66%,较 CK1、CK2 处理分别降低 13.87%、10.27%,W3N3 处理较 CK1、CK2 处理分别增加 11.37%、16.02%。其余处理间差异不显著。

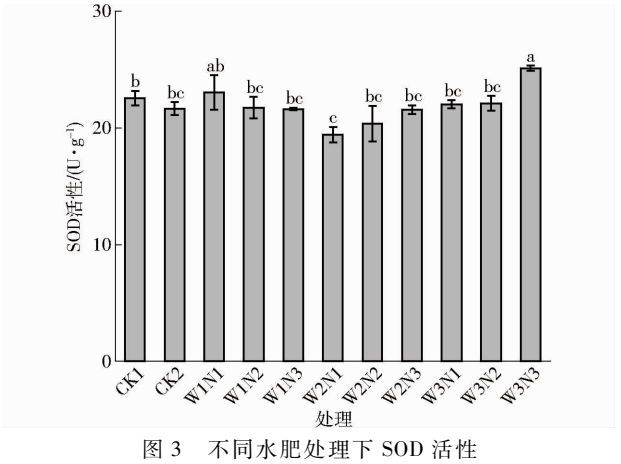


图 3 不同水肥处理下 SOD 活性

Fig. 3 SOD activity under different water and fertilizer treatments

2.1.2 不同水肥处理对 POD 活性的影响

由图 4 可知,在不同灌水梯度下,CK2 处理 POD 活性最高,W3 处理 POD 活性均值最低;在不同施氮配比下,W1 处理 POD 活性由大到小依次为 N3、N2、N1,W2 处理 POD 活性由大到小依次为 N3、N1、N2,W3 处理 POD 活性由大到小依次为 N1、N3、N2;在所有处理中,W2N3 处理活性最高,W3N2 处理活性最低,W3N2 处理较 W2N3 处理降低 50.00%,较 CK1 处理降低 40.00%,较 CK2 处理降低 46.83%,W2N3 处理较 CK1、CK2 处理分别增加 20.00%、6.33%。

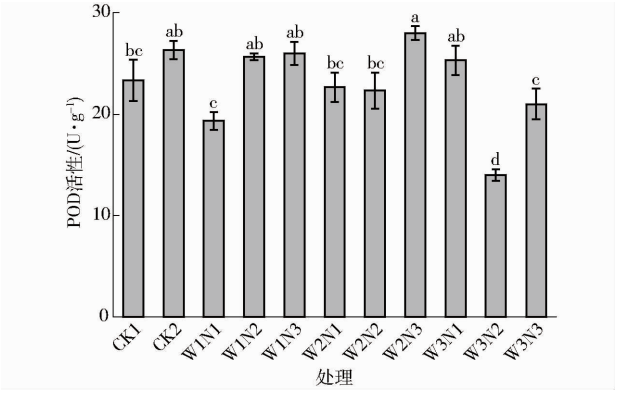


图 4 不同水肥处理下 POD 活性

Fig. 4 POD activity under different water and fertilizer treatments

2.1.3 不同水肥处理对 CAT 活性的影响

由图 5 可知,在不同灌水梯度,CAT 活性均值随着灌水量增加呈先降低后升高趋势,由大到小依次为 CK1、W1、CK2、W2、W3;在不同施氮配比下,W1 和 W3 处理 CAT 活性由大到小依次为 N1、N3、N2,W2 处理由大到小依次为 N3、N1、N2;在所有处理中,W1N1 处理 CAT 活性最高,W3N2 处理 CAT 活性最低,W3N2 处理较 W1N1 处理 CAT 活性降低 49.58%,较 CK1、CK2 处理分别降低 41.39%、37.94%,W1N1 处理较 CK1、CK2 处理增加 16.24%、23.10%。

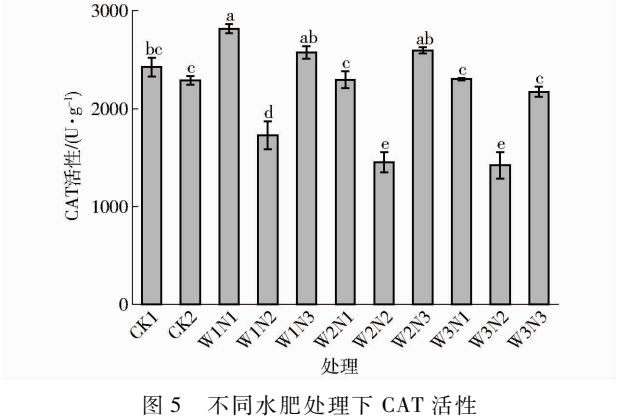


图 5 不同水肥处理下 CAT 活性

Fig. 5 CAT activity under different water and fertilizer treatments

2.1.4 不同水肥处理对 NR 活性的影响

由图 6 可知,在不同灌水梯度下,CK2 处理 NR

活性最高，其次为 W2 处理，两者差异不显著，CK1 处理活性最低；在不同施氮配比下，W1、W2 和 W3 处理 NR 活性由大到小均依次为 N2、N1、N3；在所有处理中，W2N2 处理 NR 活性最高，CK1 处理 NR 活性最低，W2N2 处理较 CK1 活性增加 986.19%，较 CK2 处理增加 18.20%。

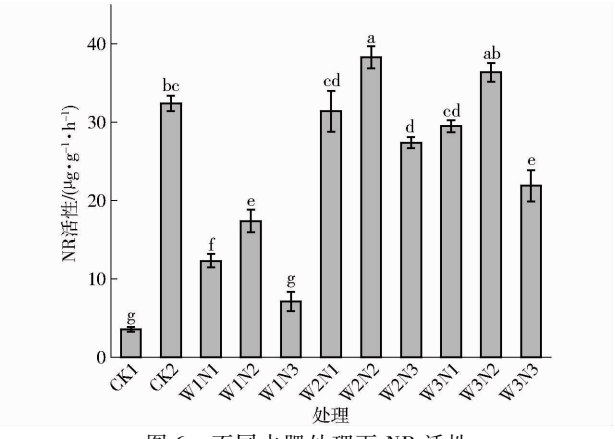


图 6　不同水肥处理下 NR 活性

Fig. 6　NR activity under different water and fertilizer treatments

2.1.5　不同水肥处理对 RUBP 羧化酶活性的影响

由图 7 可知，在不同灌水梯度下，RUBP 羧化酶活性均值随着灌水量增加呈先增加后降低趋势，由大到小依次为 W3、W2、CK2、W1、CK1；在不同施氮配比下，W1、W2 和 W3 处理 RUBP 羧化酶活性由大到小均依次为 N2、N1、N3；在所有处理中，W3N2 处理活性最高，CK1 处理活性最低，W3N2 处理比 CK1 处理活性增加 73.02%，比 CK2 处理增加 18.10%。

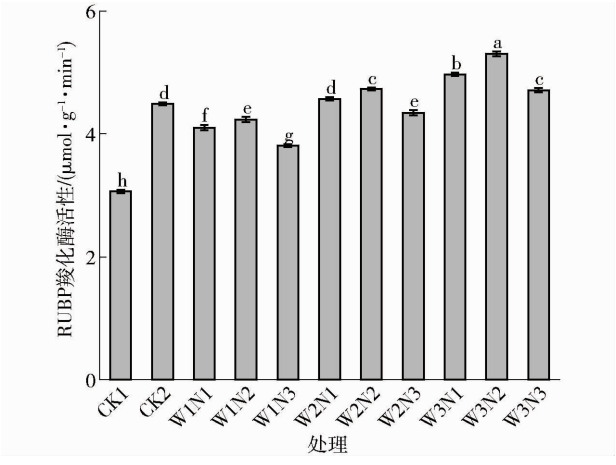


图 7　不同水肥处理下 RUBP 羧化酶活性

Fig. 7　RUBP carboxylase activity under different water and fertilizer treatments

2.2　植被指数和植被覆盖度获取

利用无人机遥感图像蓝、绿、红 3 波段图像分量，在 ENVI 遥感图像处理软件环境下，基于“波段运算”根据式(1)、(2)获取相应的 NGRDI、RVI 专题图。利用支持向量机法对无人机遥感图像进行监督分类，使用 50 像素 × 50 像素邻域窗口处理分类结果，获取 1 m × 1 m 网格化 FVC 专题图，如图 8 所示。

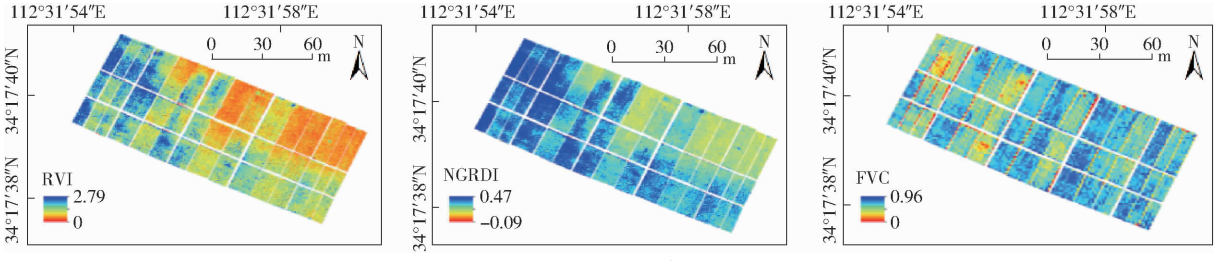


图 8　VI 和 FVC 专题图

Fig. 8　VI and FVC thematic maps

根据式(1)、(2)计算得出的冬小麦 VI 和根据 SVM 监督分类法得到的 FVC 如表 2 所示。由表 2 可知，不同水氮处理对应的 NGRDI 为 0.048 ~ 0.177，RVI 为 1.102 ~ 1.455，FVC 为 0.717 ~ 0.887。

2.3　冬小麦茎蘖数地面真值

冬小麦茎蘖数与 FVC 回归模型如图 9 所示，R^2 为 0.985，P 为 0.021，根据验证集数据计算 MAE 为 4.175。可知利用 FVC 反演表征冬小麦群体长势的茎蘖数回归模型具有较高精度，为基于 FVC 定量反演冬小麦酶活性提供理论依据。

2.4　冬小麦酶活性指标定量反演模型构建

利用不同水氮处理的冬小麦旗叶酶活性数据与 NGRDI、RVI、FVC，随机分配 9 组训练数据建立逐步回归模型，如表 3 所示，而其他 2 组作为验证集。由

表 2　新麦 26 各试验处理 VI、FVC 和茎蘖数

Tab. 2　VI, FVC and tillers in each treatment of Xinmai 26

处理	NGRDI	RVI	FVC	茎蘖数
CK1	0.048	1.102	0.797	437
CK2	0.136	1.320	0.730	393
W1N1	0.052	1.110	0.885	485
W1N2	0.077	1.167	0.836	462
W1N3	0.111	1.252	0.887	501
W2N1	0.055	1.117	0.768	416
W2N2	0.080	1.177	0.743	409
W2N3	0.133	1.313	0.785	432
W3N1	0.104	1.234	0.725	384
W3N2	0.112	1.257	0.717	367
W3N3	0.177	1.455	0.774	427

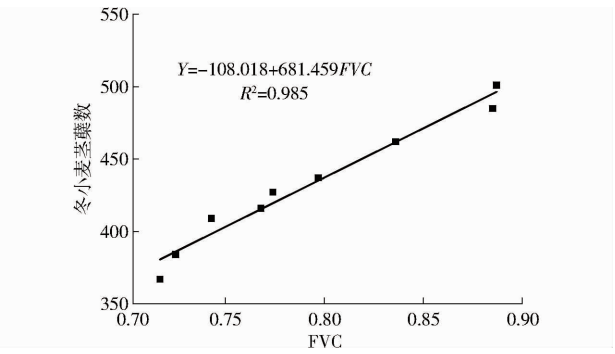


图 9 冬小麦茎蘖数与植被覆盖度线性回归模型

Fig. 9 Linear regression model of winter wheat stem tiller number and vegetation coverage

表 3 可知，NR、RUBP 羧化酶、SOD、POD 和 CAT 活性回归模型 R^2 分别为 0.909、0.683、0.572、0.770 和 0.475，P 分别为 0.001、0.006、0.203、0.012 和 0.040，RMSE 分别为 3.457 μg/(g·h)、0.225 μmol/(g·min)、1.241 U/g、1.581 U/g 和374.459 U/g，MAE 分别为 1.903 μg/(g·h)、0.757 μmol/(g·min)、0.728 U/g、1.235 U/g 和 278.230 U/g。其中，SOD 酶活性与 CAT 酶活性定量反演模型 R^2 为 0.572 与 0.475，相关性较低；且 SOD 定量反演模型 P 为 0.203，大于 0.05 显著性水平。由此可知，基于 NGRDI、RVI、FVC 定量反演 NR、RUBP 羧化酶与 POD 酶活性具有较高的预测精度。

表 3 基于 VI 和 FVC 建立的逐步回归模型

Tab. 3 Stepwise regression model based on VI and FVC

酶指标	酶指标活性预测模型	R^2	RMSE	MAE	P
NR	$Y=162.673-166.281FVC-65.111NGRDI$	0.909	3.457 μg/(g·h)	1.903 μg/(g·h)	0.001
RUBP 羧化酶	$Y=8.897-5.547FVC$	0.683	0.225 μmol/(g·min)	0.757 μmol/(g·min)	0.006
SOD	$Y=-62.385-198.018NGRDI+4.446FVC+81.825RVI$	0.572	1.241 U/g	0.728 U/g	0.203
POD	$Y=279.881+741.512NGRDI-268.086RVI$	0.770	1.581 U/g	1.235 U/g	0.012
CAT	$Y=-1\,799.33+5\,148.88FVC$	0.475	374.459 U/g	278.230 U/g	0.040

根据逐步回归模型计算冬小麦旗叶 NR、RUBP 羧化酶与 POD 酶活性预测值，计算 RMSE 与 MAE，结果如表 4 所示。NR、RUBP 羧化酶和 POD 活性测量值和预测值间差异较小，RMSE 分别为 16.596 μg/(g·h)、1.001 μmol/(g·min)和 8.660 U/g，MAE 分别为 11.810 μg/(g·h)、0.786 μmol/(g·min)和 7.454 U/g，说明利用可见光波段的遥感图像对 NR、RUBP 羧化酶和 POD 活性的定量反演精度较高。

表 4 不同模型下酶活性预测结果

Tab. 4 Prediction results of enzyme activity under different models

参数	NR 活性/($\mu g\cdot g^{-1}\cdot h^{-1}$)	RUBP 羧化酶活性/($\mu mol\cdot g^{-1}\cdot min^{-1}$)	POD 活性/($U\cdot g^{-1}$)
测量值 1	3.526	3.064	23.333
预测值 1	3.526	4.469	20.289
测量值 2	12.300	3.810	14.000
预测值 2	12.150	3.977	25.863
RMSE	16.596	1.001	8.660
MAE	11.810	0.786	7.454

采用 50 像素×50 像素邻域窗口，将 NGRDI 和 RVI 专题图进行 1 m×1 m 网格化处理，计算各网格像素平均值，获取与网格化 FVC 专题图空间分辨率一致的植被指数专题图。基于 NGRDI、RVI 和 FVC 网格化专题图，调用冬小麦 RUBP 羧化酶、NR 和 POD 活性定量反演的逐步回归模型，在 ENVI 软件环境下生成田块尺度的冬小麦 RUBP 羧化酶、NR 和 POD 活性定量反演专题图，如图 10 所示。

3 讨论

3.1 不同水氮条件对酶活性的影响

小麦叶片是小麦进行光合作用的器官[23]，易受环境条件变化的影响，作物体内的生理生化特性是环境适应的体现。研究表明水和肥亏缺或过量对作物生长发育不利[24]，本试验研究发现冬小麦叶片 SOD 活性在大多数水氮处理中差异不显著，可能是由于灌浆后期 SOD 处于非主导地位。POD 和 CAT 活性均表现为在 W3 与 N2 处理下处于较低水平，说

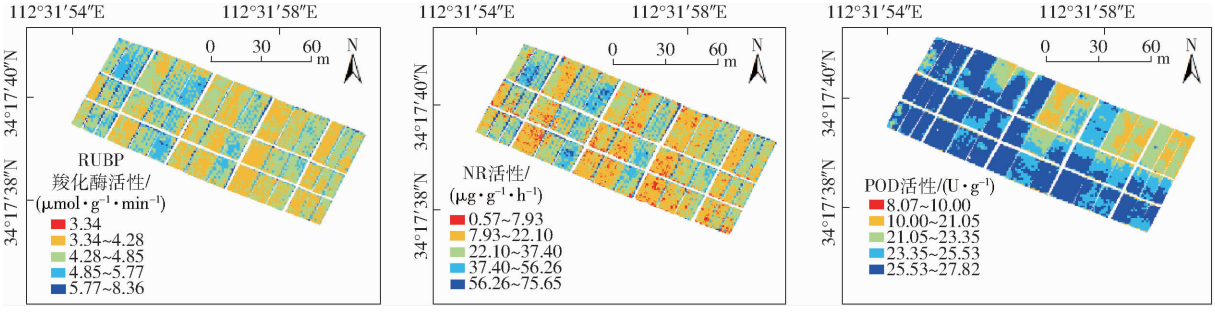


图 10 田块尺度冬小麦关键酶活性定量反演专题图

Fig. 10 Thematic map of quantitative inversion of key enzyme activities in winter wheat at field scale

明在此时冬小麦没有遭受严重的逆境胁迫，而在其他施氮配比或灌水量下冬小麦遭受到了伤害，为缓解这种胁迫，增加 POD、CAT 活性去清除体内的各种电子供体和过氧化氢等[25]。本研究发现在相同灌水条件下 N2 处理 NR 活性较高，在相同施肥条件下，W2 处理 NR 活性较高。有研究表明，过高的水分或缺水都会降低 NR 活性[26]，不施氮或者过量施氮也会使 NR 活性降低[27]，这与本研究结果一致。在适宜水氮条件下，植物的光合作用效率提高，CO_2 供应增加，这有助于 RUBP 羧化酶的羧化反应。CO_2 浓度增加可以减少 RUBP 羧化酶的加氧反应，从而提高光合作用的整体效率[28]。氮是蛋白质合成的重要元素[29]，充足的氮供应可以促进 RUBP 羧化酶合成。在适宜氮供应条件下，植物叶片中的总氮含量增加，RUBP 羧化酶含量也随之增加[30]。本研究表明，W3、N2 处理时 RUBP 羧化酶活性较高，进一步验证了以上观点。其中，CK2 供氮量虽少于 N1、N2、N3，可能是由于灌水量较多，水氮互作效应对 RUBP 羧化酶活性影响较大，导致 RUBP 羧化酶活性较高。

3.2　冬小麦关键酶活性反演

本研究涉及冬小麦的 11 种水氮处理组合，不同处理酶活性存在差异，酶活性与 VI 间存在复杂关系。基于可见光 VI 和 FVC 构建 5 个模型，结果表明与 NR 活性构建的模型最佳（R^2 = 0.909，RMSE 为 3.457 μg/(g·h)，P = 0.001，MAE 为 1.903 μg/(g·h)），实现了对冬小麦 NR 活性的精确反演，对于 RUBP 羧化酶活性和 POD 活性的反演效果也较好，可能是由于 NR 参与氮代谢[31]，其活性与植被覆盖度关系密切，预测精度较高，POD 参与抗氧化反应，其活性与作物胁迫状态相关，可能通过植被覆盖度变化间接反映，因此预测精度较高。RUBP 羧化酶作为光合作用关键酶，其活性与 VI 高度相关，光谱特征对其变化较为敏感，因此预测精度较高。SOD 和 CAT2 种酶也参与抗氧化反应[32]，但其活性变化较为复杂，受环境胁迫的影响较大，光谱特征对其变化的响应较弱，导致预测精度较低。因此，利用可见光波段的遥感图像可以实现 RUBP 羧化酶活性、NR 活性和 POD 活性的定量反演，但不能实现 SOD 活性和 CAT 活性的反演。实现 SOD 活性和 CAT 活性的反演可能需要近红外波段的多光谱或者高光谱设备进行试验。

4　结束语

对冬小麦灌浆期不同酶活性进行了测定，利用无人机搭载 RGB 相机，基于 2 种植被指数和植被覆盖度反演酶活性。试验结果表明，利用无人机遥感图像对各个酶活性的定量反演精度由大到小依次为 NR、POD、RUBP 羧化酶、SOD 、CAT。研究发现 NR 活性、POD 活性和 RUBP 羧化酶活性反演精度较高，R^2 分别为 0.909、0.770 和 0.683，RMSE 分别为 3.457 μg/(g·h)、1.581 U/g 和 0.225 μmol/(g·min)，MAE 分别为 1.903 μg/(g·h)、1.235 U/g 和 0.757 μmol/(g·min)。因此在实践中，可以利用机器学习算法进行图像分割，基于图像分割结果建立预测模型，以实现精确、快速获取 NR 活性、POD 活性、RUBP 羧化酶活性数据的目的。

参　考　文　献

[1] 蔡文良，厉辉，付琳，等. 种植密度对晚播小麦籽粒产量和氮素积累的影响[J]. 山东农业科学，2025，57(3)：64－71.
CAI Wenliang，LI Hui，FU Lin，et al. Effects of planting density on seed yield and nitrogen accumulation of late-sown wheat [J]. Shandong Agricultural Science，2025，57(3)：64－71.(in Chinese)

[2] 郭萍，潘琦，岳琼，等. 基于 2 型模糊集的多目标农业-生态水土资源优化配置[J]. 农业机械学报，2022，53(12)：353－365.
GUO Ping，PAN Qi，YUE Qiong，et al. Optimal allocation of multi-objective agro-ecological soil and water resources based on type－2 fuzzy sets[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(12)：353－365.(in Chinese)

[3] 郭萍，赵敏，张妍，等. 基于水足迹的河套灌区多目标种植结构优化调整与评价[J]. 农业机械学报，2021，52(12)：346－357.
GUO Ping，ZHAO Min，ZHANG Yan，et al. Optimization and evaluation of multi-objective planting structure adjustment in Hetao Irrigation District based on water footprint[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(12)：346－357.(in Chinese)

[4] 崔国际，王传伟，贺威，等. 外源海藻糖对灌浆期高温胁迫下小麦灌浆特性和糖组分含量的影响[J]. 应用生态学报，2023，34(11)：3021－3029.
CUI Guoji，WANG Chuanwei，HE Wei，et al. Effect of exogenous trehalose on grain filling characteristics and sugar content of wheat under high temperature stress at grain filling stage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2023，34(11)：3021－3029.(in Chinese)

[5] SAVIN R，SADRAS V O，SLAFER G A. Benchmarking nitrogen utilisation efficiency in wheat for Mediterranean and non-Mediterranean European regions[J]. Field Crops Research，2019，241：107573.

[6] GUO Y, YIN W, HU F, et al. Reduced irrigation and nitrogen coupled with no-tillage and plastic mulching increase wheat yield in maize-wheat rotation in an arid region[J]. Field Crops Research, 2019, 243: 107615.

[7] 李乔,叶杨春,常旭虹,等.花后高温干旱逆境对冬小麦光合特性和产量的影响[J].作物学报, 2025, 51(4): 1077 - 1090.
LI Qiao, YE Yangchun, CHANG Xuhong, et al. Effects of high temperature and drought stress on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat after anthesis[J]. Acta Agronomica Sinica, 2025, 51(4): 1077 - 1090. (in Chinese)

[8] FAROOQ M, BRAMLEY H, PALTA J A, et al. Heat stress in wheat during reproductive and grain-filling phases[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2011, 30(6): 491 - 507.

[9] ALSCHER R G, ERTURK N, HEALTH L S. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants [J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(372): 1331 - 1341.

[10] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2010, 48(12): 909 - 930.

[11] 徐金崇,陈修斌,吕剑,等.水氮调控对寒旱区温室辣椒氮代谢酶活性及产量品质的影响[J].北方园艺, 2024(22): 31 - 37.
XU Jinchong, CHEN Xiubin, LÜ Jian, et al. Effects of water and nitrogen regulation on nitrogen metabolizing enzyme activities and yield quality of greenhouse chili peppers in cold and arid areas[J]. Northern Horticulture, 2024(22): 31 - 37. (in Chinese)

[12] 张凤云,贺军民.NR 和 NOS 在 CTK 延缓离体小麦叶片衰老中的作用[J].西北植物学报, 2009, 29(3): 506 - 511.
ZHANG Fengyun, HE Junmin. Effect of NR and NOS in CTK in delaying leaf senescence in isolated wheat[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(3): 506 - 511. (in Chinese)

[13] WAN C, GAO L, WANG J, et al. Effects of nitrogen fertilizer on protein synthesis, accumulation, and physicochemical properties in common buckwheat[J]. The Crop Journal, 2023, 11(3): 941 - 950.

[14] 齐学礼,马杰,赵明忠,等.低氮胁迫对不同氮效率小麦品种氮积累、代谢和产量、品质的影响[J].河南农业科学, 2024, 53(4): 30 - 36.
QI Xueli, MA Jie, ZHAO Mingzhong, et al. Effects of low nitrogen stress on nitrogen accumulation, metabolism, yield and quality of wheat varieties with different nitrogen efficiency[J]. Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(4): 30 - 36. (in Chinese)

[15] 王嘉男,李玲玲,谢军红,等.半干旱区保护性耕作对旱作春小麦光合特性和产量形成的影响[J].麦类作物学报, 2020, 40(12): 1493 - 1500.
WANG Jia'nan, LI Lingling, XIE Junhong, et al. Effects of conservation tillage on photosynthetic characteristics and yield formation of spring wheat in semi-arid region[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(12): 1493 - 1500. (in Chinese)

[16] 凌成星,刘华,纪平,等.基于无人机影像 VDVI 指数的植被覆盖度估算——以陕西神木防护林工程研究区为例[J].森林工程,2021,37(2):57 - 66.
LING Chengxing, LIU Hua, JI Ping, et al. Estimation of vegetation coverage based on VDVI index of UAV images: a case study of Shenmu shelterbelt engineering research area in Shaanxi Province[J]. Forest Engineering, 2021, 37(2): 57 - 66. (in Chinese)

[17] BOSHKOVSKI B, DOUPIS G, ZAPOLSKA A, et al. Hyperspectral imagery detects water deficit and salinity effects on photosynthesis and antioxidant enzyme activity of three greek olive varieties[J]. Sustainability, 2022, 14(3): 1432.

[18] IRSA E, WEI L, MUHAMMAD A, et al. Detection of combined frost and drought stress in wheat using hyperspectral and chlorophyll fluorescence imaging[J]. Environmental Technology & Innovation, 2023, 30: 103051.

[19] BUNACIU A A, ABOUL-ENEIN H Y, FLESCHIN S. FTIR spectrophotometric methods used for antioxidant activity assay in medicinal plants[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2012, 47(4): 245 - 255.

[20] WANG J P, WU X D, MA D J, et al. Remote sensing retrieval based on machine learning algorithm: uncertainty analysis [J]. Natl. Remote Sens. Bull, 2023, 27: 790 - 801.

[21] 杜蒙蒙,李民赞,姬江涛,等.基于无人机图像混合像元分解模型提高小麦基本苗数的反演精度[J].农业工程学报, 2022, 38(17):142 - 149.
DU Mengmeng, LI Minzan, JI Jiangtao, et al. Improving the accuracy of wheat basic seedling number inversion based on the mixed pixel decomposition model for remote sensing image of drone[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(17): 142 - 149. (in Chinese)

[22] 潘肖宇,李子明,吴文勇,等.基于 BA - SVM 的冬小麦旱情表型分析与诊断[J].农业工程学报, 2024, 40(10): 128 - 135.
PAN Xiaoyu, LI Ziming, WU Wenyong, et al. Phenotypic analysis and diagnosis of winter wheat drought based on BA - SVM [J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(10): 128 - 135. (in Chinese)

[23] 王君,黄杰,葛昌斌,等.氮素水平对冬小麦旗叶光合特性和子粒灌浆特性以及产量的影响[J].河北农业科学, 2024, 28(5): 48 - 56.
WANG Jun, HUANG Jie, GE Changbin, et al. Effects of nitrogen level on photosynthetic characteristics of flag leaf and grain filling characteristics and yield of winter wheat[J]. Hebei Agricultural Science, 2024, 28(5): 48 - 56. (in Chinese)

[24] 赫芳芳,杨龙龙,蒋桂英,等.水氮互作对春小麦干物质积累、转运与灌浆特性的影响[J].干旱地区农业研究, 2024,

42(6)：93－100,130.
HE Fangfang, YANG Longlong, JIANG Guiying, et al. Effects of water-nitrogen interactions on dry matter accumulation, translocation and irrigation characteristics of spring wheat[J]. Agricultural Research in Arid Regions, 2024, 42(6): 93－100,130. (in Chinese)

[25] 魏炜,赵欣平,吕辉,等.三种抗氧化酶在小麦抗干旱逆境中的作用初探[J].四川大学学报(自然科学版),2003,40(6)：1172－1175.
WEI Wei, ZHAO Xinping, LÜ Hui, et al. The study of the function of three antioxidant enzymes in wheat leaf under drought stress[J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition), 2003, 40(6): 1172－1175. (in Chinese)

[26] 姜丽娜,朱娅林,张雅雯,等.根箱种植下不同水肥管理模式对小麦生育后期根系氮代谢酶活性及产量的影响[J].西北植物学报, 2018, 38(12)：2267－2275.
JIANG Li'na, ZHU Yalin, ZHANG Yawen, et al. Effects of different water and fertilizer management modes on root nitrogen metabolism enzyme activity and yield in wheat late growth period under root box planting[J]. Northwest Chinese Journal of Botany, 2018, 38(12): 2267－2275. (in Chinese)

[27] EILRICH G L, HAGEMAN R H. Nitrate reductase activity and its relationship to accumulation of vegetative and grain nitrogen in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Crop Science, 1973, 13(1): 59－66.

[28] LAWLOR D W, KONTTURI M, YOUNG A T. Photosynthesis by flag leaves of wheat in relation to protein, ribulose bis phosphate carboxylase activity and nitrogen supply[J]. Journal of Experimental Botany, 1989, 40(1): 43－52.

[29] PEOPLES M B, BEILHARZ V C, WATERS S P, et al. Nitrogen redistribution during grain growth in wheat (*Triticum aestivum* L.) Ⅱ. Chloroplast senescence and the degradation of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase[J]. Planta, 1980, 149: 241－251.

[30] GAO J, WANG F, HU H, et al. Improved leaf nitrogen reutilisation and Rubisco activation under short-term nitrogen-deficient conditions promotes photosynthesis in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) at the seedling stage[J]. Functional Plant Biology, 2018, 45(8): 840－853.

[31] 董召娣,易媛,张明伟,等.春性和半冬性小麦花后旗叶和籽粒氮代谢关键酶活性的差异[J].麦类作物学报, 2015, 35(8)：1098－1106.
DONG Zhaodi, YI Yuan, ZHANG Mingwei, et al. Differences in key enzyme activities of nitrogen metabolism in flag leaves and grains between spring and semi-winter wheat after anthesis[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(8): 1098－1106. (in Chinese)

[32] 翁海勇,曾海燕,雷庆元,等.基于多叶位快速叶绿素荧光和 1D－DRDC－Net 的棉苗盐胁迫诊断方法[J].农业机械学报, 2025, 56(3)：476－484.
WENG Haiyong, ZENG Haiyan, LEI Qingyuan, et al. Cotton seedling salt stress diagnosis method based on multi-leaf rapid chlorophyll fluorescence and 1D－DRDC－Net[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machiner, 2025, 56(3):476－484. (in Chinese)

(上接第 184 页)

[19] 王长勤, 许林云, 周宏平, 等. 偏心式林果振动采收机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16)：10－16.
WANG Changqin, XU Linyun, ZHOU Hongping, et al. Development and experiment of eccentric-type vibratory harvester for forest-fruits[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 10－16. (in Chinese)

[20] MATHIEU R, DE E L, BRUNO M. A scaling law for the effects of architecture and allometry on tree vibration modes suggests a biological tuning to modal compartmentalization[J]. American Journal of Botany, 2008, 95(12): 1523－1537.

[21] 李艳聪, 宋欣, 杨磊. 苹果树枝力学特性试验研究[J]. 应用力学学报, 2016, 33(4)：720－725,745.
LI Yancong, SONG Xin, YANG Lei. Experimental study on mechanical properties of apple tree branch[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016, 33(4): 720－725,745. (in Chinese)

[22] LIU T, LUO G, EHSANI R, et al. Simulation study on the effects of tine-shaking frequency and penetrating depth on fruit detachment for citrus canopy-shaker harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 148: 54－62.

[23] 焦灏博, 罗炬明, 汤爱沸, 等. 基于 TRIZ 理论的半径可调式林果振动采收激振器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11)：231－239.
JIAO Haobo, LUO Juming, TANG Aifei, et al. Design and test of radius adjustable fruit vibration harvesting exciter based on TRIZ theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 231－239. (in Chinese)

[24] 散鋆龙, 杨会民, 王学农, 等. 振动收获过程中杏果实脱落的动态响应[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18)：68－75.
SAN Junlong, YANG Huimin, WANG Xuenong, et al. Dynamic response analysis of apricot fruit dropping during vibration harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 68－75. (in Chinese)

[25] HE L, LIU X, DU X, et al. In-situ identification of shaking frequency for adaptive vibratory fruit harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 170: 105245.