doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.18.013

基于作物多光谱荧光特征的冠层叶绿素含量原位检测系统设计

晁金阳[1]　张鹏磊[2]　郝天波[1]　王宏硕[1]　孙　红[1]　塔　娜[3]　杨　玮[1]　张　漫[1]

(1. 中国农业大学智慧农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083;
3. 内蒙古农业大学能源与交通工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为了满足田间作物营养快速检测的需求,通过对叶部多光谱荧光特征筛选设计了冠层叶绿素含量原位检测系统。基于封闭试验采用 Relief、RFE 及逐步回归 3 种方法筛选出 UV690、B740、UV690/B740 核心变量,明确了叶部叶绿素荧光探测特征参数,为设备光学通道设计提供依据;优化封闭式探测为半开放式用于冠层原位测量,硬件包括 Raspberry Pi 4B 主控与双目宽动态摄像头模组,集成均匀激发光源同时开发双目协同采集软件。田间原位试验结果表明,UV520、UV690、B740、UV690/B740 为冠层尺度叶绿素探测的敏感性参数,其中 UV520 荧光可反映蓝绿荧光区对植物胁迫及环境差异的响应特征,与红光荧光参数形成互补,有助于提升冠层尺度叶绿素含量检测模型的稳定性与抗干扰能力。构建支持向量机(SVM)叶绿素含量回归模型,训练集 R_C^2 达 0.82,验证集 R_V^2 达 0.72,RMSE 为 2.86 mg/L,平均相对误差 MRE 为 8.8%。研究结果实现了从"叶片测量原型"到"冠层群体检测"应用,为小麦叶绿素含量的实时无损监测提供实用工具。

关键词: 叶绿素含量; 多光谱成像; 荧光参数; 特征变量筛选

中图分类号: S237　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)18-0144-08　　**OSID**:

Design of In-situ Canopy Chlorophyll Content Detection System Based on Crop Multispectral Fluorescence Characteristics

Chao Jinyang[1]　Zhang Penglei[2]　Hao Tianbo[1]　Wang Hongshuo[1]　Sun Hong[1]　Ta Na[3]　Yang Wei[1]　Zhang Man[1]

(1. *Key Laboratory of Smart Agriculture Systems*, *Ministry of Education*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
3. *College of Energy and Traffic Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010018, *China*)

Abstract: Aiming to meet the demand for rapid detection of crop nutrients in the field, systematic research was conducted on the screening of leaf multispectral fluorescence characteristics and the development of an in-situ canopy chlorophyll detection system. Firstly, based on controlled experiments, three methods, including Relief, recursive feature elimination (RFE) and stepwise regression were adopted to screen out core variables such as UV690, B740 and UV690/B740. The characteristic parameters for leaf chlorophyll fluorescence detection were clarified, which provided a basis for the optical channel design of the device. Secondly, the closed detection mode was optimized to a semi-open mode for in-situ canopy measurement. The hardware system was composed of a Raspberry Pi 4B main controller and a binocular wide dynamic camera module, with an integrated uniform excitation light source and independently developed binocular cooperative acquisition software. Field experiments demonstrated that UV520, UV690, B740, and UV690/B740 were sensitive fluorescence parameters for chlorophyll detection at the canopy scale. Among them, the UV520 fluorescence reflected the response characteristics of blue-green fluorescence to plant stress and environmental variations, which complemented red fluorescence parameters and improved the robustness of canopy chlorophyll detection models. A support

收稿日期: 2026-03-24　修回日期: 2026-04-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1701001)和内蒙古中央引导地方科技发展资金项目(2024ZY0145)

作者简介: 晁金阳(2001—),男,硕士生,主要从事农业信息化技术研究,E-mail: S20233081819@cau.edu.cn

通信作者: 孙红(1980—),女,教授,博士生导师,主要从事农业信息化技术研究,E-mail: sunhong@cau.edu.cn

vector machine (SVM) regression model for chlorophyll content was constructed. The model achieved a coefficient of determination (R^2) of 0.82 for the calibration set and 0.72 for the validation set, with RMSEC and RMSEV values of 3.42 mg/L and 2.86 mg/L, respectively, and a mean relative error (MRE) of 8.8%. This research realized the application transformation from the "leaf measurement prototype" to "canopy population detection", providing a practical tool for real-time and non-destructive monitoring of wheat chlorophyll content.

Key words: chlorophyll content; multispectral imaging; fluorescence parameters; feature variable selection

0　引言

叶绿素含量是表征小麦光合能力、生长态势及营养状况的核心参数,其精准快速测定对田间管理与产量调控具有重要指导意义[1-2]。传统叶绿素含量依赖破坏性采样和化学法测定,操作繁琐、耗时费力,难以满足现代农业对实时监测的需求[3-4]。光谱法是一种非破坏性分析技术,为作物田间原位检测提供了路径[5-6]。

依据植物光吸收与利用的途径,作物光谱分析主要分为反射光谱与荧光光谱 2 大类[7]。其中,反射光谱通过叶部或冠层反射率间接反映叶绿素的光吸收差异,而荧光光谱源于作物自身生理代谢过程色素体的受激而发现象,与植物生理特性密切相关,为叶绿素含量解析提供了基础[8]。研究证实叶绿素是植物荧光的主要来源,且不同波段受激而发的荧光强度对叶绿素浓度变化的响应存在差异:当叶绿素含量低时,荧光强度随浓度升高显著增强;当叶绿素含量高时,叶绿素对自身荧光的再吸收效应会削弱 690 nm 荧光强度,而对 740 nm 远红光波段影响较弱,因此 690 nm 与 740 nm 荧光强度比值通常作为表征叶绿素含量动态变化的指标[9]。

前期研究已明确小麦叶部的蓝绿荧光峰值分别位于 450 nm 和 530 nm,同时特异性荧光峰值位于 690 nm 和 735 nm 波段;此外,红边及近红外相关波段的反射光谱对叶绿素含量反演具有优势[10]。基于荧光参数建模的结果表明,单一波段荧光参数因难以匹配叶绿素荧光的非线性特性,建模精度普遍偏低;而基于多波段数据的机器学习模型展现出更优性能,如 Li 等[11]将荧光参数与机器学习结合实现冬小麦氮含量快速预测,Chen 等[12]利用荧光图像特征结合支持向量机、极端梯度增强等算法实现黄瓜病害分类准确率超 85%。上述研究均证实了多荧光数据融合模型在作物生理参数反演中有效性。

尽管在前期理论研究指导下已经开发了相关的应用系统,然而,田间原位测量仍存在显著局限。法国公司的 Dualex 检测器,通过近红外光检测叶绿素,但因点检测的特点,导致难以通量反映叶片或冠层空间的精细化分布[13];捷克 PSI 公司的荧光成像系统,通过生成二维荧光分布图提升了检测尺度和范围,却因价格高昂、体积庞大且需长时间暗适应,限制了田间原位应用的效率[14]。此外,国内相关研究也在设备小型化方面取得了一定进展,仍难以满足冠层群体信息采集的需要[15]。从应用需求来看,农业生产亟需突破现有技术瓶颈,获取更灵敏、全面的冠层荧光信息,因此设计冠层叶绿素含量原位检测系统,是解决田间作物荧光特性规模化解析难题的关键。

聚焦小麦冠层荧光信息的快速采集需求,本研究以突破大田场景下小麦冠层叶绿素含量快速无损检测难题为核心目标,立足叶片荧光检测机理,研发适用于大田作物冠层的多光谱荧光原位检测新装置。融合多波段荧光特征与机器学习算法构建叶绿素含量预测模型,以白粉病胁迫下小麦为研究对象,系统验证装置的检测精度与田间适用性,深入探索在小麦冠层营养诊断中应用潜力,以期解决田间作物荧光特性规模化解析难题,为田间小麦生长状况实时监测提供技术支撑。

1　叶部多光谱荧光特征筛选

为确保冠层多光谱荧光检测装置在光学通道设计上具有明确的荧光依据,基于叶部多光谱荧光数据,对不同波段的荧光特征进行敏感性评估。通过对叶部尺度识别确定最具判别力的关键荧光变量,减少硬件开发的盲目性和波段冗余。

1.1　叶部多光谱荧光数据集

为对叶绿素荧光特征变量进行筛选,于 2024 年 4—6 月在河南省中国农业科学院植物保护研究所新乡试验基地(35°08′N,113°46′E)开展数据采集试验。设置 108 个标准化试验小区,其中 72 个接种白粉病病原小区(覆盖不同病害等级),36 个未接种的小区。为防止病原体在小区间扩散,在接种和未接种之间设置宽度 0.8 m 油菜缓冲区[16]。

叶部多光谱荧光数据采用本实验室自主研发的多光谱荧光成像检测系统采集[17]。能够同时记录

叶部在多个关键波段的荧光发射强度，包括：UV440、UV520、UV690、UV740、B690、B740、R690、R740，其中 UV、B、R 分别表示紫外光、蓝光、红光，440、520、690、740 分别表示对应的荧光波长，单位 nm；叶绿素含量采用 Dualex 多功能叶部分析仪进行非破坏性测定。共采集 240 片小麦叶片，覆盖白粉病 0、1、3、5、7、9 共 6 个病害梯度，每个梯度 40 片。每片叶片分别在前、中、后 3 段进行多点测量，取平均值作为最终叶绿素含量。为保证荧光与叶绿素数据的时序一致性，2 项测量时间间隔控制在 5 min 以内，获得可用于建立叶绿素含量与多波段荧光响应关系的数据集。

1.2 叶部多光谱荧光数据分析

1.2.1 叶部数据集划分

采用 KS 算法对数据集进行划分，结果如表 1 所示，包含所有白粉病等级的数据。训练集包含 180 个样品，叶绿素含量为 9.47 ~ 44.56 mg/L，平均值为 28.14 mg/L。验证集为 60 个样品，叶绿素含量为 21.10 ~ 39.96 mg/L，平均值为 30.47 mg/L。训练集叶绿素含量范围包含了验证集所有的叶绿素含量，有利于建立有效的预测模型[18]。

表 1 数据集划分结果

Tab. 1 Dataset segmentation results

数据集	样本数	叶绿素含量/(mg·L^{-1})			
		最大值	最小值	平均值	标准差
总数	240	44.56	9.47	28.72	4.42
训练集	180	44.56	9.47	28.14	7.53
验证集	60	39.96	21.10	30.47	6.07

1.2.2 叶部多光谱荧光特征筛选

为优化叶部多光谱荧光特征变量并减少冗余，对 8 个荧光参数及基于其定义的 28 个荧光比值参数进行筛选，分别采用递归特征消除(RFE)、Relief 算法与逐步回归法 3 种策略进行特征优化。为保证特征筛选过程的稳定性与可重复性，对各算法参数进行了统一设置。Relief 算法中邻域样本数 k 设置为 10，通过比较相邻样本间特征差异计算权重并筛选重要变量；递归特征消除(RFE)方法采用支持向量机(SVM)作为基学习器，并通过交叉验证方式逐步剔除贡献度较低的特征变量；逐步回归分析采用双向逐步回归策略，以显著性水平 $p < 0.05$ 作为变量进入模型的标准，以 $p > 0.10$ 作为变量剔除标准，从而获得最优特征变量组合。

特征变量筛选结果如表 2 所示[19]。UV 波段相关特征在 3 类策略中均实现全波段参与高占比，充分表明 UV 全波段的荧光信号及与其他波段的交互信息，反映作物生理特性的关键且不可或缺的特征集群；B740(740 nm 蓝光波段荧光值)是 3 种策略均选中的唯一特征，且以 B740 为基础的波段比值特征在 Relief 和 RFE 策略中完全共现；逐步回归策略包含 B740 与紫外波段的组合特征(UV520/B740)，表明荧光信号是支撑叶绿素含量估算、作物生理状态识别等目标任务的核心特征。

表 2 叶部特征变量筛选结果

Tab. 2 Results of leaf feature variable screening

筛选方法	筛选结果
Relief	UV520、B740、B740/R740、B740/R690、B690/R690、R690/R740、UV520/UV740、B690、UV520/UV690
RFE	UV520、B740、B740/R740、B740/R690、B690/R690、R740、R690/R740、UV520/UV740、B690、UV520/UV690
逐步回归	UV690、UV740、B740、UV440/UV740、UV440/R690、UV440/R740、UV520/B690、UV520/B740、UV520/R690、UV690/R690、UV690/R740、UV740/R690、B690/R740、R690/R740

1.2.3 叶部特征变量筛选后建模

为系统评估模型的诊断性能，采用支持向量机(Support vector machine, SVM)回归模型进行模型预测，使用均方根误差(RMSE)与决定系数(R^2)作为评价指标：其中 RMSE 用于量化模型预测结果与实际值的离散程度，R^2 用于表征模型的拟合优度，且 R_C^2、R_V^2分别对应训练集与验证集的拟合精度。荧光参数建模结果如表 3 所示[20]。

表 3 荧光参数建模结果

Tab. 3 Modeling results of fluorescence parameters

筛选方法	R_C^2	R_V^2	RMSE/(mg·L^{-1})
全变量	0.68	0.61	3.24
Relief	0.68	0.60	3.32
RFE	0.67	0.60	3.29
逐步回归	0.89	0.68	2.41

基于 3 种筛选方法的模型在叶绿素含量估算方面表现出良好的性能，其中，逐步回归模型最优，训练集 R_C^2 为 0.89，验证集 R_V^2 为 0.68，均方根误差(RMSE)为 2.41 mg/L。

由表 3 可知，筛选后的荧光参数与叶绿素含量显著相关，验证了叶绿素含量估算的可行性；特征筛选不仅增强了白粉病胁迫下模型的估算能力，凸显了减少参数冗余的优势，助力高效评估胁迫条件下的植物健康状态。

因此，基于叶部多光谱荧光数据筛选的结果，对实验室自主研发的多光谱荧光成像检测系统进行优化：保留紫外光与蓝光核心波段，搭载双目摄像头以提升采集效率，同时将原封闭式结构升级为半开放

式冠层荧光检测系统，实现更快速的数据采集。

2　冠层叶绿素含量原位检测系统设计

2.1　检测系统硬件

冠层多光谱荧光检测系统硬件主要包括微控制器单元（Microcontroller unit，MCU）、显示模块、电源模块、相机模块、激发光源模块和滤光模块，如图 1 所示。MCU 通过直流信号放大板控制激发光源的选择，并通过步进电机驱动的滤光模块选择实现荧光图像的采集。电源模块确保系统稳定运行，而显示模块则实现实时数据可视化[21]。

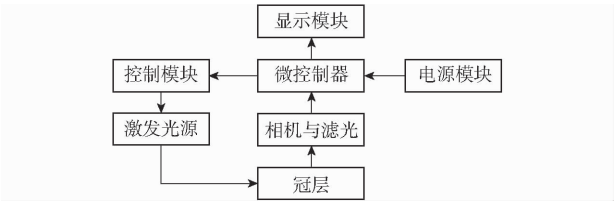

图 1　系统硬件组成

Fig. 1　System hardware composition

2.1.1　微控制器

选用 Raspberry Pi 4B 作为微控制器，具备 1.5 GHz 四核处理能力与 4 GB 内存，提供了包括 GPIO（可支持传感器供电与通信）、CSI（用于连接摄像头）及多个 USB 接口的丰富外设。能够高效完成数据接收、处理与 SD 卡存储等任务。

2.1.2　激发光源

激发光源模块采用紫外 LED 与蓝光 LED 组合激发，其中紫外激发波长为 355 ~ 385 nm，蓝光激发波长为 450 ~ 480 nm，可有效激发植物蓝绿荧光及红光荧光信号。

为克服作物冠层荧光信号因叶绿素分布不均及传统 LED 照明不均匀导致的测量误差，采用 TracePro 仿真软件对多种 LED 排布方案进行光学模拟[22-23]。通过优化圆形阵列在固定距离下照度分布，一种圆形阵列在均匀性与照明范围上表现最佳。最终设计一种 3 层排布的激发光源模块，额定电压 12 V、功率 24 W，PCB 板尺寸为 60 mm × 120 mm × 2 mm，可提供均匀的圆形照明区域，有助于提升图像采集质量。

2.1.3　相机与滤光

相机采用 1080P 双目宽动态摄像头模组作为核心采集单元，由 RGB 相机与近红外相机组成，分辨率为 1 920 像素 × 1 080 像素，最高采集帧率为 30 f/s。RGB 相机镜头内置中心波长分别为 440、520、690 nm窄带滤光通道，带宽约为 20 nm；近红外相机内置滤光片，中心波长为 740 nm，带宽 20 nm，用于采集远红光荧光信号。

2.1.4　其他模块

系统还包括电源模块与显示模块。其中，3 400 mA·h 的18650 型锂电池，12 V/2 A 输出可为激发光源供电；同时，通过 DC - DC 稳压模块将电压降至 5 V/2 A，为树莓派提供稳定电源，支持系统持续工作超过 8 h；显示模块选用 7 寸树莓派触摸屏，分辨率为 1 024 像素 × 600 像素，刷新频率为 60 Hz，支持触摸操作，提供人机交互支持。

2.1.5　冠层检测系统集成

利用 Solidworks 软件设计便携式检测装置，对作物冠层叶绿素含量实时监测[24]，如图 2 所示，体积为 23 cm × 10 cm × 5 cm。

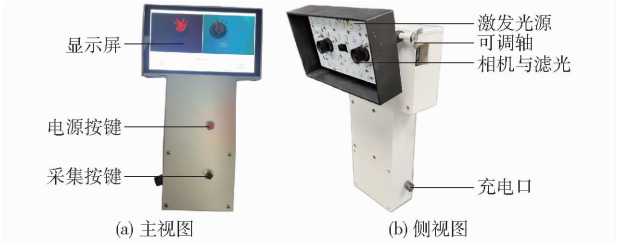

图 2　硬件整体实物图

Fig. 2　Physical diagrams of overall hardware

2.2　检测系统采集软件设计

作物冠层荧光采集采用双目协同技术，将单次采集时间缩短至 4 s，集成相机控制、光源切换、双目同步拍摄、图像存储及自动采集等功能，为便于现场操作，采集界面如图 3 所示。系统采集软件流程图见图 4。



图 3　系统荧光图像采集界面

Fig. 3　System fluorescence image acquisition interface

3　激发光源性能测试

3.1　测试方法

3.1.1　光源均匀性

为评估光源的照明均匀性，依次采用 3 种激发光，距离冠层高度 5 ~ 25 cm（每次升高 5 cm），分别拍摄 40% 反射率的漫反射标准板图像。每个高度位置重复采集 3 次图像取平均值。对获取的图像进行像素灰度转换，计算灰度变异系数用于评估光源

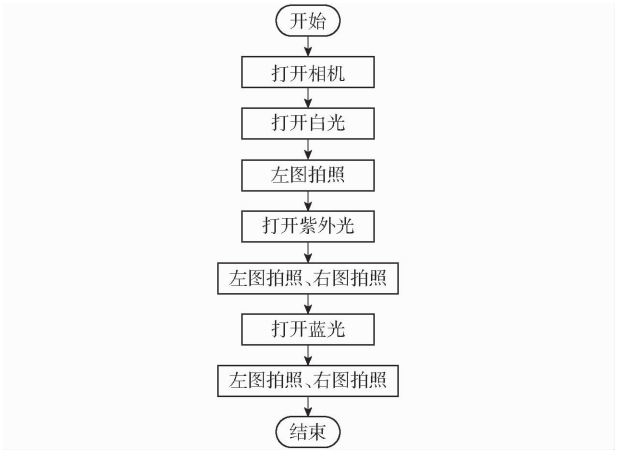

图 4 系统采集软件流程图

Fig. 4 System acquisition software flowchart

的均匀性。变异系数越大,表示灰度值离散程度越高,光源的均匀性及稳定性越差。变异系数C_V计算式为

$$C_V = \frac{\sigma}{\mu} \tag{1}$$

式中 σ——光强标准差,灰度

μ——光强平均值,灰度

3.1.2 光源稳定性

由于田间试验周期较长且采集的图像数据量较大,使用西玛仪器生产的 AR813A 型照度计(测量范围为 1 ~ 100 000 lx,分辨率为 1 lx,测量误差小于 5%。)记录了每种光在 40 min 内的光强度变化。测量间隔为 2 min,从而每种光获取 20 组数据的完整数据集。试验中,光源与照度计之间距离固定为 15 cm,所有测量均在中国农业大学信息与电气工程学院实验室内进行。为排除环境光对光源数据的潜在干扰,试验全程在黑暗条件下完成。

3.2 测试结果

3.2.1 光源均匀性

激发光源均匀性测试结果如图 5a 所示。由图 5a 可知,随着与待测物距离(距离冠层高度)的增大,变异系数呈升高趋势,这是由于距离增大后光源光强分布的一致性变差所致。当与待测物距离 15 cm 时,3 种光源变异系数分别为 0.08、0.16 和 0.19,整体仍处于较小范围,均匀性变化在可控区间内。结合试验数据采集需求与均匀性表现,选取 15 cm 作为光源高度具有合理性。

3.2.2 光源稳定性

激发光源稳定性测试结果如图 5b 所示。由图 5b 可计算变异系数,紫外光强度变异系数为 0.02,蓝光强度变异系数为 0.01,白光强度变异系数为 0.02。测试结果表明,3 种激发光源在长期运行中表现出出色的稳定性。

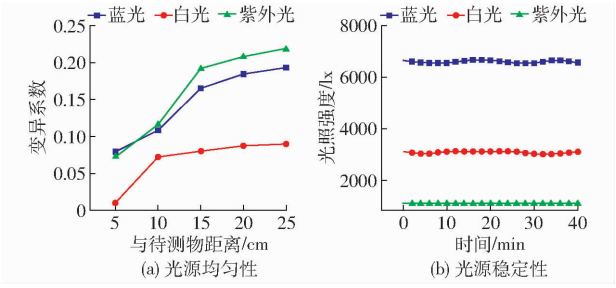

图 5 激发光源性能测试结果

Fig. 5 Excitation light source performance test results

4 田间冠层叶绿素含量检测

4.1 数据采集

为验证检测系统在大田中应用性能,于 2025 年 5—6 月在河南省中国农业科学院植物保护研究所新乡试验基地(与数据集采集场地一致)开展田间试验。考虑自然光对荧光信号的干扰,统一选择夜间进行试验,以确保荧光数据采集的稳定性与准确性。试验对象为自然发病小麦群体,共选取 130 组具有不同白粉病侵害程度的小麦冠层作为检测单元。采用冠层叶绿素含量检测系统同步采集 130 组小麦冠层多光谱荧光图像,结果见图 6。针对每组检测现场,选取冠层中部代表性叶片,使用 Dualex 型多功能叶片分析仪进行叶绿素含量测定。在叶片中段进行 3 次重复测量,取平均值作为该组冠层叶绿素含量基准值。为保障荧光图像与叶绿素含量的对应性,每组荧光采集与叶绿素测量时间间隔严格控制在 5 min 以内,最大限度降低时序差异带来的误差。

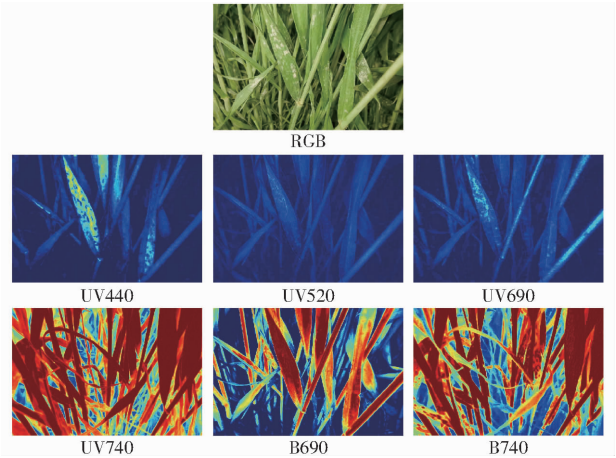

图 6 荧光图像采集结果

Fig. 6 Fluorescence image acquisition results

采用 KS 算法对数据集进行划分,结果如表 4 所示,其中训练集包含 100 个样品,叶绿素含量为 21.31 ~ 45.44 mg/L,平均值为 31.45 mg/L;验证集为 30 个样品,叶绿素含量为 21.49 ~ 45.38 mg/L,平均值为 33.29 mg/L。

表 4　田间数据集划分结果

Tab. 4　Dataset segmentation results

数据集	样本数	叶绿素含量/(mg·L^{-1})			
		最大值	最小值	平均值	标准差
总样本	130	45.44	21.31	31.45	6.12
训练集	100	45.44	21.31	30.88	5.68
验证集	30	45.38	21.49	33.29	7.04

4.2　数据处理

为从冠层多光谱荧光图像中精准提取反映小麦叶绿素含量的有效信息，需剔除背景干扰并标准化荧光参数，处理流程如图 7 所示。

4.2.1　OTSU 阈值分割

由于田间采集的荧光图像包含小麦冠层、土壤背景及少量杂草等干扰信息，采用 OTSU 自适应阈值分割算法对原始图像进行二值化处理。通过自动计算最优分割阈值，将图像划分为前景（小麦冠层区域）与背景（土壤、杂草等干扰区域），实现冠层区域的精准提取，参数计算排除非目标区域干扰[25]。

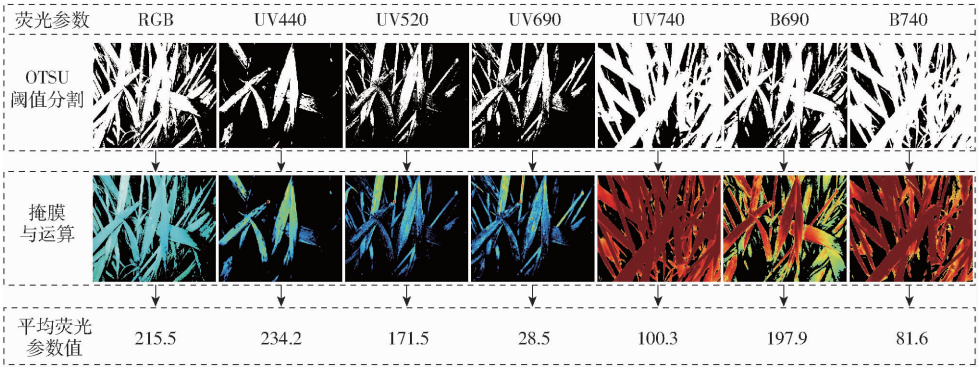

图 7　数据处理流程

Fig. 7　Flowchart of data processing

4.2.2　单通道提取

研发的冠层荧光检测系统可同步采集多波段荧光图像，对筛选的敏感波段及设备光学通道配置，从原始多光谱图像提取 R、G、B 单通道，生成 RGB、UV440、UV520、UV690、UV740、B690、B740 共 7 类通道图像，见表 5。

表 5　荧光光谱图像单通道提取

Tab. 5　Fluorescence spectrum image single-channel extraction

荧光光谱波段/nm	通道
440	B
520	G
690	R
740	R

4.2.3　荧光参数计算

针对分割后的冠层区域及提取的各单通道图像，采用平均灰度法计算每个波段的荧光参数，即统计单通道图像中冠层区域所有像素点灰度平均值，作为该波段对应的小麦冠层平均荧光强度。平均荧光参数计算式为

$$F_n = \frac{\sum V_{gray}}{N} \tag{2}$$

式中　F_n——荧光参数值

V_{gray}——叶片荧光图像在该像素点灰度

N——小麦叶片像素总个数

4.3　冠层多光谱荧光特征筛选

荧光参数与叶绿素含量相关性计算结果如图 8 所示。多数荧光参数与叶绿素含量关联程度较弱，但 UV440、UV520、UV690 及以其为基础的参数比值（UV520/B690、UV520/B740、UV690/B690、UV690/B740）与叶绿素含量表现出较高的相关性（大于 0.4），表明此类荧光参数对叶绿素含量变化具有更强的响应性。

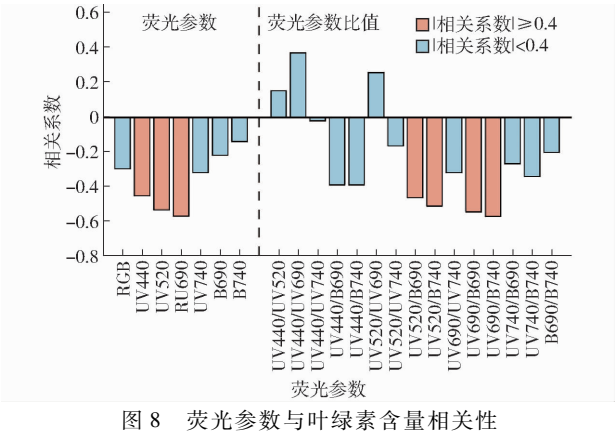

图 8　荧光参数与叶绿素含量相关性

Fig. 8　Correlation between fluorescence parameters and chlorophyll content

为明确冠层尺度下表征小麦叶绿素含量的关键荧光参数，采用 3 种变量筛选方法，对 7 个原始荧光参数及荧光参数比值进行筛选，3 种方法筛选结果如表 6 所示。最终确定 UV520、UV690、B740、UV690/B740 为冠层尺度叶绿素敏感核心变量，其

中 UV690、B740、UV690/B740 为必选变量，UV520 可补充胁迫样本检测精度；且冠层筛选与表 2 筛选结果高度一致，验证了核心变量的跨尺度可行性。

表 6 冠层特征变量筛选结果

Tab. 6 Results of canopy feature variable screening

筛选方法	筛选结果
Relief	UV690、UV690/B740、UV520、UV520/B740、B740、UV690/B690、UV440/B740、B690/B740
RFE	UV690、B740、UV690/B740、UV520、B690、UV520/B740、UV440
逐步回归	UV520、UV690、B740、UV690/B740

在核心波段上，UV690 与 B740 在叶片尺度与冠层尺度上均被筛选方法共同识别为关键变量；UV520 在叶片尺度 Relief 与 RFE 筛选中均表现为重要特征，并在冠层尺度中再次被识别为敏感参数，表明在不同尺度下均具有较好的叶绿素响应能力。证实“UV + 蓝光”波段激发的荧光信号对叶绿素含量变化的表征能力不受“叶片单点”与“冠层群体”的测量尺度差异影响；UV690/B740 比值在两尺度均为最优特征，进一步印证“敏感波段 + 基准波段(B740)”的组合可放大叶绿素含量差异信号、削弱环境干扰，符合叶绿素荧光响应机理；冗余波段上，UV440、B690 等波段在两尺度均被剔除，表明其信息可被核心变量替代。

4.4 冠层叶绿素含量检测模型

基于特征变量筛选前后的 2 组数据，分别构建叶绿素含量的支持向量机回归模型。为系统评估模型诊断性能，采用均方根误差(RMSE)、平均相对误差(MRE)与决定系数(R^2)作为核心评价指标。

模型预测结果如图 9 所示。由图 9a 可知，变量筛选前 SVM 模型训练集和验证集 R^2 分别为 0.72 和 0.66，处于中等水平，且均方根误差 RMSE 为 3.42 mg/L 相对较高，散点分布偏离拟合线的幅度较大，反映全波段数据因信息冗余导致模型拟合精度与预测稳定性均存在局限。

经特征变量筛选后 SVM 模型(图 9b)呈现更优的拟合表现，训练集和验证集 R^2 分别提升至 0.82 和 0.72，同时均方根误差降至 2.86 mg/L，平均相对误差 MRE 由 11.5% 降低至 8.8%，散点与拟合线的贴合程度显著提高。印证了特征变量筛选的有效性，通过剔除冗余波段、聚焦核心荧光特征，模型的拟合精度与泛化能力得到了协同增强，更适用于叶绿素含量的定量反演分析。

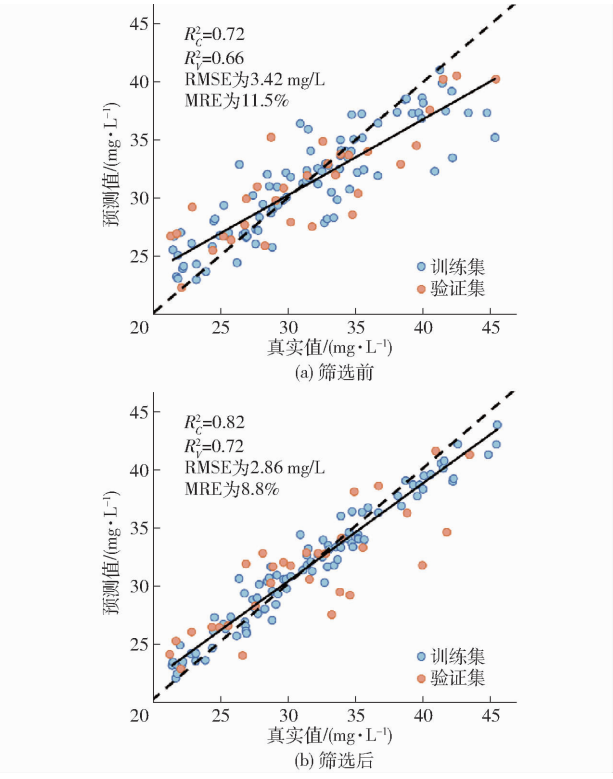

图 9 叶绿素含量模型预测结果

Fig. 9 Prediction results of chlorophyll content model

5 结论

(1)基于叶绿素荧光特性，分析筛选出 UV520、UV690 及 UV520/B740、UV690/B690、UV690/B740 与叶绿素含量高相关的荧光参数，明确了此类参数对叶绿素含量变化的强响应特性，为叶绿素含量的精准反演提供了核心特征依据。

(2)根据筛选的高敏感荧光参数，进行了冠层多光谱荧光成像设备的开发与性能优化。通过测试光源最佳采集距离提升了荧光数据采集精度，且设备光源稳定性验证结果表明，所设计的系统可满足大田环境下长时间连续检测的应用需求。

(3)以筛选后的 4 个荧光参数构建了叶绿素含量 SVM 检测模型，训练集 R^2 达 0.82，验证集 R^2 为 0.72，平均相对误差 MRE 降低至 8.8%。研究结果表明荧光参数可有效应用于叶绿素含量的无损检测，为植物营养状况与健康水平的快速评估提供了可行技术方案。

参 考 文 献

[1] 秘翌彤，张晓影，王宽豪，等. 基于遥感技术的作物生产研究进展[J]. 中国农学通报，2025，41(27)：149－156.
Mi Yitong, Zhang Xiaoying, Wang Kuanhao, et al. Research progress of crop production based on remote sensing technology [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2025, 41(27): 149－156. (in Chinese)
[2] 贺佳，郝瑞，任淑芳. 小麦主要病害遥感监测研究进展[J]. 中国植保导刊，2024，44(2)：18－23.

He Jia, Hao Rui, Ren Shufang. Research progress on remote sensing monitoring of major wheat diseases[J]. China Plant Protection, 2024, 44(2): 18 – 23. (in Chinese)
[3] Zhao R, Tang W, An L, et al. Solar-induced chlorophyll fluorescence extraction based on heterogeneous light distribution for improving in-situ chlorophyll content estimation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108405.
[4] Song D, Qiao L, Gao D, et al. Development of crop chlorophyll detector based on a type of interference filter optical sensor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106260.
[5] 燕辉. 基于叶绿素荧光分析的油菜响应低温胁迫机制研究[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(1): 58 – 64.
Yan Hui. Response mechanism of rape to low temperature stress based on chlorophyll fluorescence analysis[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(1): 58 – 64. (in Chinese)
[6] 杨妮,邓树林,樊艳红,等. 叶绿素荧光遥感反演及其农业监测应用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(14): 1 – 13.
Yang Ni, Deng Shulin, Fan Yanhong, et al. Research progress of chlorophyll fluorescence remote sensing inversion and its application in agricultural monitoring[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(14): 1 – 13. (in Chinese)
[7] 谢带琴,林羡,余元善,等. 柑橘属水果加工制品中挥发性风味物质的无损检测技术研究进展[J]. 农产品加工, 2025(5): 99 – 108.
Xie Daiqin, Lin Xian, Yu Yuanshan, et al. Research progress on nondestructive detection technology of volatile flavor compounds in processed citrus fruit products[J]. Farm Products Processing, 2025(5): 99 – 108. (in Chinese)
[8] 郭丽,范俊楠,张钰,等. 高效液相色谱–原子荧光光谱联用测定土壤中 Sb(Ⅲ)和 Sb(Ⅴ)[J]. 分析科学学报, 2026, 42(1): 69 – 74.
Guo Li, Fan Junnan, Zhang Yu, et al. Determination of antimony trivalent and antimony pentavalent in soil by high performance liquid chromatography – atomic fluorescence spectrometry[J]. Journal of Analytical Science, 2026,42(1): 69 – 74. (in Chinese)
[9] 张荣旭. 植物叶片光合功能色素荧光特征提取及便携式净光合速率检测仪器开发[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2023.
Zhang Rongxu. Extraction of fluorescence characteristics of photosynthetic functional pigments in plant leaves and development of portable net photosynthetic rate detection instrument[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2023. (in Chinese)
[10] 费耀莹,王迪,唐伟杰,等. 基于无人机多源影像融合的水稻籽粒蛋白质含量估测[J]. 中国农业科学, 2026, 59(1): 41 – 56.
Fei Yaoying, Wang Di, Tang Weijie, et al. Estimation of rice grain protein content based on UAV multi-source image fusion [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2026, 59(1): 41 – 56. (in Chinese)
[11] Li Z, Cheng Q, Chen L, et al. Enhancing winter wheat plant nitrogen content prediction across different regions: integration of UAV spectral data and transfer learning strategies[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 234: 110322.
[12] Chen X, Shi D, Zhang H, et al. Early diagnosis of greenhouse cucumber downy mildew in seedling stage using chlorophyll fluorescence imaging technology[J]. Biosystems Engineering, 2024, 242: 107 – 122.
[13] 高瞻. 不同施肥处理对不同基因型大豆养分利用的影响[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2025.
Gao Zhan. Effects of different fertilization treatments on nutrient utilization of different soybean genotypes[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2025. (in Chinese)
[14] Yan K, Fang X, Yang W, et al. Multiple light sources excited fluorescence image-based non-destructive method for citrus Huanglongbing disease detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237: 110549.
[15] Chen F, Wu B, Li Y, et al. Fusion of fluorescence and visible imaging for unsupervised detection of potato defects[J]. Food Control, 2026, 184: 111973.
[16] Liu Y, Liu G, Sun H, et al. Exploring multi-features in UAV based optical and thermal infrared images to estimate disease severity of wheat powdery mildew[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 225: 109285.
[17] Liu G H, Liu M J, Chao J Y, ea al. Diagnosis of leaf chlorophyll content based on close-range multispectral fluorescence image correction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 231: 110040.
[18] 唐伟杰,王楠,刘国辉,等. 基于光环境校正的便携作物叶绿素检测仪设计[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 1): 249 – 256.
Tang Weijie, Wang Nan, Liu Guohui, et al. Design of portable crop chlorophyll detector based on light environment correction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 249 – 256. (in Chinese)
[19] 赵文举,杨发奇,马宏,等. 基于无人机影像和宽度学习的小麦分蘖期土壤盐分反演[J]. 农业工程学报, 2025, 41(15): 66 – 75.
Zhao Wenju, Yang Faqi, Ma Hong, et al. Soil salinity inversion at wheat tillering stage based on UAV images and broad learning system[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(15): 66 – 75. (in Chinese)
[20] Qiao L, Tang W, Gao D, et al. UAV-based chlorophyll content estimation by evaluating vegetation index responses under different crop coverages[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 196: 106775.
[21] 李佳盟,王楠,李震,等. 基于特征波长优化的便携式作物叶绿素检测仪研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 270 – 277.
Li Jiameng, Wang Nan, Li Zhen, et al. Development of handheld chlorophyll detector based on characteristic wavelengths optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S2): 270 – 277. (in Chinese)
[22] 花传祥,乔敏,李非,等. 基于 TracePro 的秋刀鱼 LED 集鱼灯水下照度研究[J]. 南方水产科学, 2025, 21(5): 166 – 173.
Hua Chuanxiang, Qiao Min, Li Fei, et al. Research on underwater illumination of LED fishing lamps for Pacific saury (*Cololabis saira*) based on TracePro[J]. South China Fisheries Science, 2025, 21(5): 166 – 173. (in Chinese)
[23] 潘国柱,吴克跃,周军. TracePro 在 LED 照明设计中的应用研究[J]. 池州学院学报, 2023, 37(6): 16 – 18.
Pan Guozhu, Wu Keyue, Zhou Jun. Application of TracePro in LED lighting design[J]. Journal of Chizhou University, 2023, 37(6): 16 – 18. (in Chinese)
[24] 张春琪,刘梦姝,晁金阳,等. 基于特征波长的接触式作物叶绿素检测系统[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 2): 255 – 262.
Zhang Chunqi, Liu Mengshu, Chao Jinyang, et al. Contact-based crop chlorophyll detection system based on feature wavelengths[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S2): 255 – 262. (in Chinese)
[25] An L, Liu Y, Wang N, et al. Classification of wheat powdery mildew based on hyperspectral: from leaves to canopy[J]. Crop Protection, 2024, 177: 106559.