

团 体 标 准

T/CAGDRS XX—2026

基于无人机多光谱遥感的马铃薯长势 监测技术规程

Technical code of practice for potato condition monitoring based
on UAV multispectral remote sensing

征求意见稿

2026-XX-XX 发布

2026-XX-XX 实施



中国农业绿色发展研究会 发布

目 次

前言.....II

1 范围.....1

2 规范性引用文件.....1

3 术语和定义.....1

4 缩略语.....2

5 作业基本要求.....2

6 监测流程.....3

7 数据获取与处理.....4

8 马铃薯长势监测模型构建.....6

9 马铃薯长势分级制图.....7

10 马铃薯长势监测报告编制.....8

附录 A（资料性） 变量计算公式附录.....9

参考文献.....11

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国农业科学院农业资源与农业区划研究所提出。

本文件由中国农业绿色发展研究会归口。

本文件起草单位：中国农业科学院农业资源与农业区划研究所、湖北大学、中国农业科学院蔬菜花卉研究所、内蒙古科学技术研究院、中国农业绿色发展研究会。

本文件主要起草人：钱建平、陈谦、于婧、李文杰、刘建刚、余强毅、杨雪峰、刘北桦、王瑞利、李会宾、欧阳凌欢、谢安坤、王聪、李思涵。

基于无人机多光谱遥感的马铃薯长势监测技术规程

1 范围

本文件规定了基于无人机多光谱遥感的马铃薯长势监测的作业基本要求、监测流程、数据获取与处理、长势监测模型构建、长势分级制图和监测报告编制等要求。
本文件适用于马铃薯大田垄作生产场景下利用无人机多光谱遥感技术开展马铃薯长势监测工作。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 18316 数字测绘成果质量检查与验收 质量评价体系
- GB/T 33862 全（半）自动凯氏定氮仪
- GB/T 39610 倾斜数字航空摄影技术规程 航摄设计
- GB/T 39612 低空数字航摄与数据处理规范
- GB/T 40034 叶面积指数遥感产品真实性检验
- GB/T 41282 植被覆盖度遥感产品真实性检验
- GB/T 45631 无人机遥感测绘飞行管理信息要求 飞行管理信息内容
- HB 8760 民用轻小型多旋翼无人机系统视觉惯性里程计通用要求
- NY/T 2419 植株全氮含量测定 自动定氮仪法
- NY/T 4151 农业遥感监测无人机影像预处理技术规范
- NY/T 4373 面向主粮作物农情遥感监测田间植株样品采集与测量
- QX/T 300 农业气象观测规范 马铃薯

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

马铃薯长势 potato growth conditions

马铃薯生长期间的植株生长发育状况及相关长势指标等信息。

注：长势指标包括出苗率、株高、冠层覆盖度、叶面积指数、SPAD 值、叶片氮含量、植株生物量和冠层衰老程度等。

[来源：NY/T 4373—2023，3.4]

3.2

轻小型多旋翼无人机 civil light and small multirotor unmanned aircraft

空机重量小于等于116 kg、起飞全重不大于150 kg、校正空速不超过100 km/h的多旋翼无人机。

[来源：HB 8760—2023，3.1]

3.3

多光谱影像 multispectral image

多光谱相机通过摄影或扫描的方式，在同一时间内获取相同目标若干谱段信息的数字图像。

[来源：NY/T 4151—2022，3.2]

3.4

植被覆盖度 fractional vegetation coverage

单位面积内植被冠层（包括叶、茎、枝）垂直投影面积所占的比例。

注：无量纲，取值范围 0~1。

[来源：GB/T 41282—2022，3.1]

3.5

植株高度 plant height

土壤表面到马铃薯主茎顶端的长度。

[来源：QX/T 300—2015，2.2]

3.6

叶面积指数 leaf area index

地面单位投影面积内叶片总面积的一半。

[来源：GB/T 40034—2021，3.1]

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

CGCS2000：2000国家大地坐标系（China Geodetic Coordinate System 2000）

GNSS：全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System）

LAI：叶面积指数(Leaf Area Index)

MAE：平均绝对误差（Mean Absolute Error）

R²：决定系数（Coefficient of Determination）

RMSE：均方根误差（Root Mean Square Error）

SPAD：叶绿素相对含量(Soil and Plant Analyzer Development)

5 作业基本要求

5.1 航拍监测环境

5.1.1 无人机航拍作业应符合国家和地方有关民用航空、空域管理及无人驾驶航空器飞行管理的规定，宜在非禁飞区内选择平坦开阔、具有代表性的监测区域，并避开高大树木、电线杆、积水、裸地、杂草、地膜反光、机械作业及人员遮挡等干扰因素。

5.1.2 影像采集宜在晴朗或少云、光照稳定、风速不大于 5 m/s 的条件下进行，航摄期间不应出现云层明显遮挡、光照剧烈变化、降水、雾霾或扬沙等影响影像质量的天气现象；马铃薯冠层、叶片及土壤表面不应有明显雨水、露水或灌溉水。

5.1.3 无法避开的干扰区域应记录其位置和范围，并在影像处理时进行掩膜或剔除。

5.1.4 航拍监测环境及安全作业应符合 GB/T 39610 和 GB/T 39612 的规定。

5.2 监测时期与航拍时刻

5.2.1 航拍监测时期应根据马铃薯品种、生育进程、种植制度和监测目的确定，宜选择冠层长势差异

较明显的关键生育期开展监测。

5.2.2 影像采集宜在当地太阳正午前后 2 小时内进行，同一监测区域开展多期航拍时，各期影像的采集时刻宜保持一致。

5.3 空间坐标基准

5.3.1 无人机及机载传感器原始定位数据可采用 WGS84 坐标系统，经纬度和高度信息应随影像同步记录，其中高度采用星基大地高。

5.3.2 数据处理时，应将原始定位数据的平面坐标转换至 CGCS2000 坐标系，最终正射影像、监测结果图及其他空间数据成果统一采用 CGCS2000 坐标系。

5.3.3 坐标转换方法、转换参数及精度应予以记录，机载遥感数据时空信息的坐标系统、高程基准和姿态信息应符合 GB/T 45631 的要求。

5.4 无人机多光谱影像

5.4.1 无人机多光谱影像应至少具备绿波段、红波段、红边波段和近红外波段。

5.4.2 影像数据采集应符合 GB/T 39610 规定的飞行质量要求，数据成果质量应符合 GB/T 18316 规定的栅格数据质量要求。

5.4.3 数据处理前应检查影像的波段完整性、空间分辨率、清晰度、噪声、过曝或欠曝情况，以及不同波段间的配准精度。

5.5 地面调查数据

5.5.1 调查范围应与无人机影像中的对应样方保持一致，调查样点应具有代表性，避开非监测目标异常干扰区域。

5.5.2 调查数据应具有代表性、完整性和可追溯性，并能够与无人机影像准确进行空间匹配。

5.5.3 地面长势调查指标应根据马铃薯生育时期和监测目的确定，植株样品采集、资料记录和档案管理应符合 NY/T 4373 的规定。

6 监测流程

基于无人机多光谱遥感的马铃薯长势监测技术流程包括：数据获取与处理、变量提取与筛选、模型构建与评价、长势指标反演制图及成果编制等步骤，具体流程如图1所示。

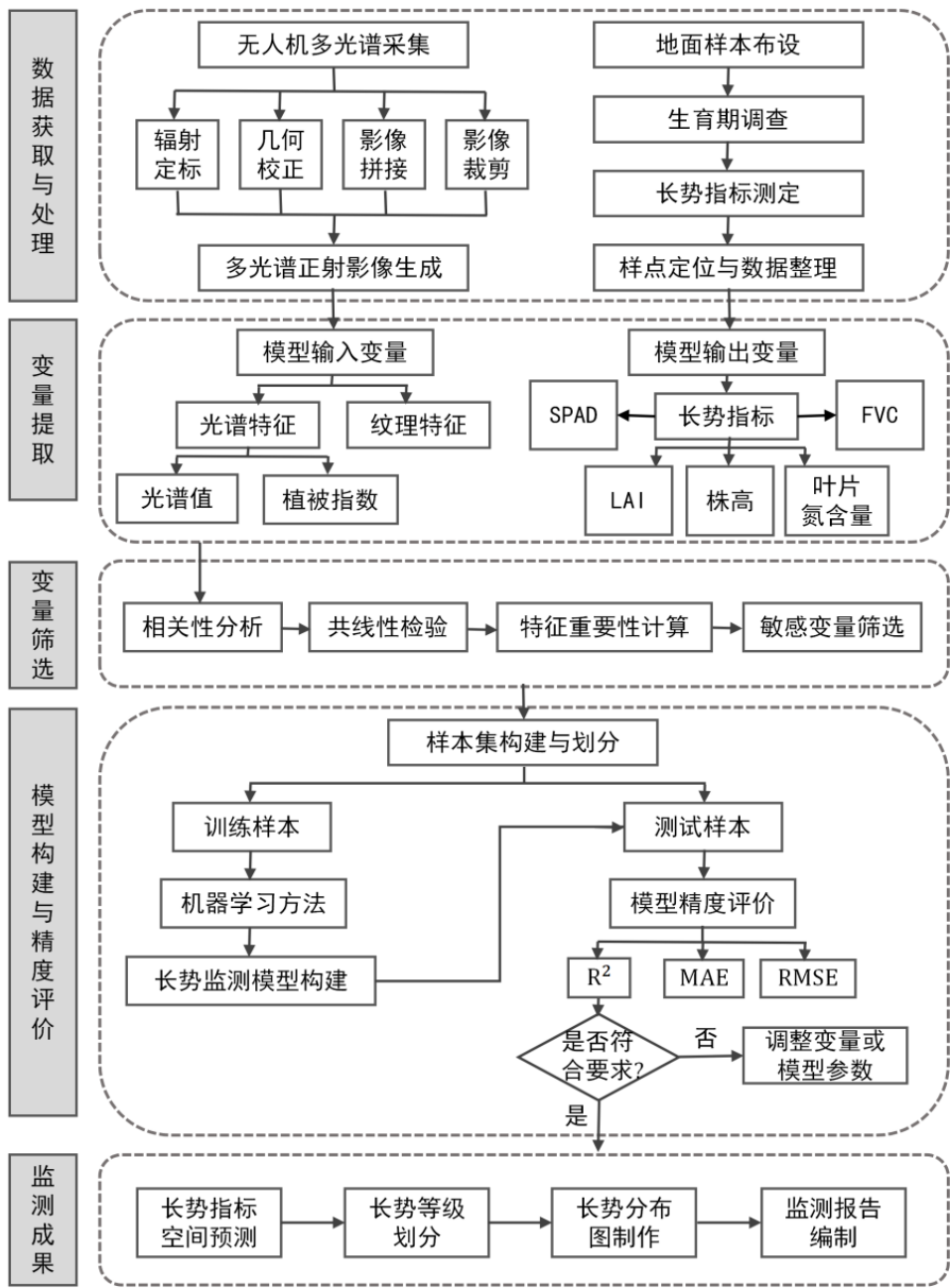


图 1 基于无人机多光谱遥感的马铃薯长势监测技术流程图

7 数据获取与处理

7.1 无人机多光谱数据获取与处理

- 7.1.1 无人机航空摄影应按照 GB/T 39610 的规定执行，并参考 GB/T 39612 的基本要求。
- 7.1.2 航摄计划与设计、航摄实施、成果质量检查等环节应符合相应标准的规定。
- 7.1.3 无人机影像数据的预处理（包括辐射定标、几何校正、正射校正、影像拼接与裁剪等）应按照 NY/T 4151 的规定执行。
- 7.1.4 无人机数据成果的质量检查应按照 GB/T 18316 的规定执行，满足无人机航空摄影成果质量检

查的要求。

7.2 马铃薯地面样本数据获取与处理

7.2.1 地面样点布设与调查

地面样点调查应与无人机影像采集同期开展，调查时间间隔原则上不宜超过2小时。结合无人机多光谱遥感长势监测需求，样点布设与调查应符合以下规定：

- a) 样点宜采用网格法、分层随机法或典型样点法布设。样点应覆盖不同马铃薯品种、田间处理和长势水平，保证样点空间分布具有代表性；
- b) 样点数量应根据监测区域面积、马铃薯长势空间差异和模型构建要求合理确定，确保样本量满足训练集与验证集划分、模型精度评价及模型稳定性分析的要求；
- c) 样点宜设置在马铃薯种植区域内部，避开地块边缘、道路、沟渠、大面积缺苗区、积水区、严重病虫害区以及其他不具有代表性的区域；
- d) 每个样点应设置固定面积的调查样方。样方大小应根据马铃薯种植行距、株距、影像空间分辨率和地面调查指标确定，并保证样方范围能够在无人机正射影像中准确识别；
- e) 应使用 GNSS 或 RTK 设备记录样点中心坐标，并记录样点编号、调查日期、马铃薯品种、播种日期、生育期、种植密度及田间管理情况。样点定位精度应满足地面调查数据与无人机影像空间匹配的要求。

7.2.2 长势指标测定

7.2.2.1 SPAD 值测定

马铃薯叶片SPAD值采用便携式叶绿素仪测定，具体要求如下：

- a) 每个样点宜随机选择不少于 5 株具有代表性的马铃薯植株；
- b) 宜选取植株顶部完全展开、无病斑、无虫害和无机械损伤的功能叶进行测量；
- c) 测量位置应避开叶片主脉和叶缘，每个叶片宜测量不少于 3 次；
- d) 以样点内全部有效测量结果的平均值作为该样点的 SPAD 值；
- e) 不同样点和不同生育期的测量仪器、测量叶位、测量株数和重复次数应保持一致。

7.2.2.2 叶片氮含量测定

马铃薯叶片全氮含量测定宜按NY/T 2419的规定执行。采用全（半）自动凯氏定氮仪时，仪器性能应符合GB/T 33862的规定。采用其他测定方法时，应进行方法验证，并保证同一监测任务中样品采集、前处理、测定方法和结果表达方式一致。

7.2.2.3 叶面积指数测定

按GB/T 40034的规定执行。

7.2.2.4 冠层覆盖度测定

按GB/T 41282的规定执行。

7.2.2.5 株高测定

按QX/T 300的规定执行。

7.2.3 不同生育时期监测指标

马铃薯不同生育时期应采集与其生长发育特征相适应的长势调查数据。各生育时期的判定标准和监测指标见表1。

表 1 马铃薯不同生育期判定标准与监测指标

生育时期	判定标准	宜监测指标
出苗期	幼苗露出土壤表面约1.0厘米	出苗率
分枝期	基部叶腋间生出侧芽，长约1.0厘米	株高、冠层覆盖度、SPAD值、叶片氮含量、叶面积指数
花序形成期	在基部叶腋间开始出现第一轮花序，花蕾长约2.0毫米	株高、冠层覆盖度、SPAD值、叶片氮含量、叶面积指数
开花期	主茎顶部的花开放	株高、冠层覆盖度、SPAD值、叶片氮含量、叶面积指数
可收期	茎叶开始凋萎，植株基部叶子干枯，变为褐色	株高、冠层覆盖度、SPAD值、叶片氮含量、叶面积指数、冠层衰老程度

7.2.4 地面调查数据质量控制

马铃薯地面调查数据的质量控制应符合以下规定：

- a) 地面调查数据应按照统一格式整理，确保样点编号、地理坐标、生育期、调查日期及各项长势指标记录完整性；
- b) 应核查同一指标在不同样点和不同监测时期测定条件的一致性，测定条件发生变化时，应记录变更内容，并评估其对数据一致性和可比性的影响；
- c) 对于缺失值、重复值和异常值，应结合原始调查记录、样点位置及田间实际情况进行核查；
- d) 经核查属于仪器故障、记录错误、定位错误或样点受到异常干扰的数据，可予以修正或删除，并记录相应的处理依据及方法。

8 马铃薯长势监测模型构建

8.1 变量选取

- 8.1.1 马铃薯不同生育期的冠层结构、叶片色素含量及光谱响应特征存在差异。
- 8.1.2 根据马铃薯长势指标对无人机多光谱信息的响应特征，宜选取光谱反射率、植被指数和纹理特征作为长势监测变量；开展多生育期联合监测时，宜增加生育期信息，以表征不同生育期马铃薯冠层光谱特征与长势指标之间的差异。变量计算公式见附录 A。

8.2 变量筛选

- 8.2.1 用特征重要性方法进行变量筛选。
- 8.2.2 特征重要性用于定量表征各变量对马铃薯长势指标反演的贡献程度，从而识别敏感变量。变量数量可依据特征递归消除确定，在模型精度最优时确定变量集。
- 8.2.3 特征重要性计算方法推荐采用随机森林、极端梯度提升等模型。
- 8.2.4 变量筛选过程中，应对变量之间的相关性和多重共线性进行检验，避免选取信息高度重复的变量。
- 8.2.5 开展多生育期联合监测时，应分析各变量在不同生育期的稳定性，优先选取对马铃薯长势变化响应敏感且跨生育期稳定性较高的变量。

8.3 样本划分

根据马铃薯长势指标空间预测及建模需求，训练样本与验证样本的划分应符合以下要求：

- 应采用分层随机抽样方法，以马铃薯生育期、长势水平或田间处理为分层依据，在各层内随机划分样本，保证不同生育期和不同长势水平样本分布的代表性；
- 样本宜按照 8：2 或 7：3 的比例划分为训练样本和验证样本，以兼顾模型训练与精度评价需求；
- 训练样本用于模型训练与参数优化，验证样本作为独立数据集，用于模型预测精度与泛化能力验证；
- 同一地面样点或同一调查单元产生的重复观测数据宜划分至同一数据集，避免空间位置相近或重复观测样本同时进入训练样本和验证样本。

8.4 模型构建

8.4.1 以筛选得到的敏感变量为输入变量，以实测马铃薯长势指标为输出变量，构建马铃薯长势指标反演样本集。基于训练样本，采用机器学习方法建立敏感变量与马铃薯长势指标之间的映射关系，构建马铃薯长势指标反演模型。

8.4.2 机器学习方法推荐采用偏最小二乘回归、支持向量回归、极端梯度提升、随机森林等模型。

8.4.3 不同长势指标应分别构建反演模型。

8.4.4 开展多生育期联合监测时，可将生育期信息作为输入变量参与模型构建，或构建生育期与光谱、植被指数及纹理特征的交互变量，以提高模型在不同生育期的适用性和稳定性。

8.5 精度评价

8.5.1 利用独立验证样本对马铃薯长势指标估测模型进行精度评价，选择 R^2 、MAE、RMSE 作为精度评价指标。其中， R^2 用于表征模型拟合优度，其值越接近 1 表明模型拟合效果越好；MAE 和 RMSE 用于表征预测值与实测值之间的误差，数值越小表明模型预测精度越高。

8.5.2 按照公式（1）～（3）分别计算 R^2 、MAE 和 RMSE。模型精度不满足应用要求时，应重新筛选变量，优化和调整模型参数，更换或重新训练反演模型，直至满足精度要求。

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

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (3)$$

式中：

n ——采样点数量；

$\hat{y}_i$ ——第 i 个验证样本长势指标的模型估测值；

y_i ——第 i 个验证样本长势指标的地面实测值；

$\bar{y}$ ——全部验证样本长势指标地面实测值的算术平均值。

9 马铃薯长势分级制图

9.1 长势指标反演

9.1.1 利用筛选得到的敏感变量及训练好的马铃薯长势指标反演模型，对监测区域马铃薯长势指标进行空间预测，生成长势指标空间预测结果。

9.1.2 不同长势指标应分别进行空间预测，并保证预测结果的坐标系统、空间分辨率和空间范围一致。开展多生育期监测时，应分别生成各生育期的长势指标空间预测结果。

9.2 长势分级

马铃薯长势等级应根据监测目的、马铃薯品种、生育期、田间实测数据及长势指标预测结果综合确定。马铃薯长势分级应符合以下要求：

- a) 应在相同品种、相同生育期及相近田间管理条件下进行长势比较，不宜直接采用同一阈值对不同品种或不同生育期的马铃薯进行分级；
- b) 具有明确农艺诊断阈值或区域推荐指标时，应依据相应阈值进行长势等级划分；
- c) 缺少明确分级阈值时，可根据监测区域地面实测数据和长势指标预测值的分布特征，采用自然断点法、分位数法或标准差法，将马铃薯长势划分为偏弱、正常和偏旺 3 个等级；
- d) 采用多个长势指标综合评价时，应对各指标进行无量纲化处理，根据指标重要性或实际监测目的确定权重，计算马铃薯综合长势指数，并依据综合长势指数划分长势等级；
- e) 长势等级划分结果应结合地面调查数据进行验证，重点核查长势偏弱、长势偏旺及空间突变区域。

9.3 长势分级专题图生成

马铃薯长势分级专题图应包括图名、图例、指北针、比例尺、坐标系统、监测区域边界和长势等级等要素。基本地图要素的表示应按照 GB/T 20257.1 的规定执行。专题图制作应符合以下要求：

- a) 专题图应以无人机正射影像或监测区域基础地理数据为底图，准确表示马铃薯种植区域和地块边界；
- b) 不同长势等级应采用具有明显差异且易于识别的颜色表示，宜采用红色表示长势偏弱、黄色表示长势正常、绿色表示长势偏旺；
- c) 专题图中应注明监测区域、监测日期、马铃薯品种、生育期、监测指标、空间分辨率；
- d) 同一监测任务专题图应采用一致的图式、用色、比例尺和等级表达方式；
- e) 专题图输出前应检查地块边界、空间位置、长势等级、图例颜色及文字标注的一致性和完整性；
- f) 专题图宜采用通用栅格或矢量数据格式保存，并根据实际应用需求输出图片或地图文档。

10 马铃薯长势监测报告编制

基于无人机多光谱遥感的马铃薯长势监测结果应结合地面调查情况，经技术人员审核或专家会商后形成监测报告。报告应包括下列内容：

- a) 报告题目：××年××县（市、区、省、区域）马铃薯长势监测报告；
- b) 报告正文：包括监测区域概况、马铃薯品种与生育期、使用数据、技术流程、具体步骤、模型与精度评价、监测结果和结果分析；
- c) 马铃薯长势指标空间分布图和长势分级专题图；
- d) 报告编写人和编写时间；
- e) 报告编写单位及报送单位。

附 录 A
(资料性)
变量计算公式附录

表A.1 规定了变量计算公式。

表A.1 变量计算公式

类型	名称	计算公式	变量说明	参考文献
光谱值	B、R、G、NIR、REG	/	B—蓝波段反射率、G—绿波段反射率、R—红波段反射率、REG—红边波段反射率、NIR—近红外波段反射率	[1]
植被指数	比值植被指数 (Ratio Vegetation Index, RVI)	$RVI = \frac{NIR}{R}$	NIR—近红外波段反射率、R—红波段反射率	[1]
	比值植被红边指数 (Ratio Vegetation Red-Edge Index, RVIREG)	$RVIREG = \frac{NIR}{REG}$	NIR—近红外波段反射率、REG—红边波段反射率	[2]
	归一化差值植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$	NIR—近红外波段反射率、R—红波段反射率	[2]
	归一化差值植被红边指数 (Normalized Difference Vegetation Red-Edge Index, NDVIREG)	$NDVIREG = \frac{NIR - REG}{NIR + REG}$	NIR—近红外波段反射率、REG—红边波段反射率	[2]
	优化土壤调节植被指数 (Optimized Soil Adjusted Vegetation Index, OSAVI)	$\frac{1.16(NIR - R)}{NIR + R + 0.16}$	NIR—近红外波段反射率、R—红波段反射率	[1]
	红边叶绿素指数 (Red-Edge Chlorophyll Index, RECI)	$\frac{NIR}{REG} - 1$	NIR—近红外波段反射率、REG—红边波段反射率	[7]

	修正土壤调节植被指数 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index, MSAVI)	$\frac{2NIR + 1 - \sqrt{(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - R)}}{2}$	NIR—近红外波段反射率、R—红波段反射率、	[2]
	归一化差异红边指数 (Normalized Difference Red-Edge Index, NDRE)	$\frac{NIR - REG}{NIR + REG}$	NIR—近红外波段反射率、REG—红边波段反射率	[2]
	非线性植被指数 (Nonlinear Vegetation Index, NLI)	$NLI = \frac{NIR^2 - R}{NIR^2 + R}$	NIR—近红外波段反射率、R—红波段反射率	[3]
	非线性植被红边指数 (Nonlinear Vegetation Red-Edge Index, NLIREG)	$NLIREG = \frac{NIR^2 - REG}{NIR^2 + REG}$	NIR—近红外波段反射率、REG—红边波段反射率	[3]
	土壤调整植被指数 (Soil-Adjusted Vegetation Index, SAVI)	$SAVI = \frac{(1 + L)(NIR - R)}{NIR + R + L}$	NIR—近红外波段反射率、R—红波段反射率、L—土壤调节系数 (土壤表面反射的调整因子, 通常取值为0.5)	[3]
	土壤调整植被红边指数 (Soil-Adjusted Vegetation Red-Edge Index, SAVIREG)	$SAVIREG = \frac{(1 + L)(NIR - R)}{NIR + REG + L}$	NIR—近红外波段反射率、REG—红边波段反射率、L—土壤调节系数 (土壤表面反射的调整因子, 通常取值为0.5)	[3]
纹理特征	灰度共生矩阵 (Gray-level co-occurrence matrix, GLCM)	平均值、方差、同质性、对比度、相异性、熵、二阶矩、相关性	RGB影像	[4]

参 考 文 献

- [1] 陈鹏, 冯海宽, 李长春, 等. 无人机影像光谱和纹理融合信息估算马铃薯叶片叶绿素含量[J]. 农业工程学报, 2019, 35 (11): 63-74. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.11.008.
- [2] YANG H B, HU Y H, ZHENG Z Z, et al. Estimation of potato chlorophyll content from UAV multispectral images with stacking ensemble algorithm [J]. Agronomy, 2022, 12 (10): 2318. DOI: 10.3390/agronomy12102318.
- [3] BIAN M B, CHEN Z C, FAN Y G, et al. Integrating spectral, textural, and morphological data for potato LAI estimation from UAV images [J]. Agronomy, 2023, 13 (12): 3070. DOI: 10.3390/agronomy13123070.
- [4] LIU Y, FENG H K, YUE J B, et al. Estimation of potato above-ground biomass based on unmanned aerial vehicle red-green-blue images with different texture features and crop height [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 938216. DOI: 10.3389/fpls.2022.938216.
- [5] FAN J J, LIU Y, FAN Y G, et al. Estimation of potato leaf area index based on spectral information and Haralick textures from UAV hyperspectral images [J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1492372. DOI: 10.3389/fpls.2024.1492372.
- [6] 陈垠凡, 郭发旭, 冯全. 基于机器学习和无人机高光谱遥感的马铃薯SPAD值估算[J]. 河南农业科学, 2024, 53 (8): 133-144. DOI: 10.15933/j.cnki.1004-3268.2024.08.015.
- [7] YEOM J, JUNG J, CHANG A, et al. Comparison of vegetation indices derived from UAV data for differentiation of tillage effects in agriculture[J]. Remote Sensing, 2019, 11(13): 1548. DOI: 10.3390/rs11131548.
-