

中国农业绿色发展研究会团体标准  
编制说明

《基于无人机多光谱遥感的马铃薯长势  
监测技术规程》

（征求意见稿）

《基于无人机多光谱遥感的马铃薯长势  
监测技术规程》编制组

二〇二六年九月

## 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 一、团体标准制修订背景、目的和意义 .....         | 1  |
| 二、工作简况 .....                    | 3  |
| 三、标准编制原则和依据 .....               | 5  |
| 四、标准主要条文或技术内容及其确定依据 .....       | 5  |
| 五、主要试验、验证及试行结果 .....            | 7  |
| 六、采用国际标准的程度及水平说明 .....          | 18 |
| 七、与现行法律法规、强制性标准和其他有关标准的关系 ..... | 19 |
| 八、重大分歧或重难点的处理经过和依据 .....        | 21 |
| 九、贯彻该标准的要求、措施建议及预期效果 .....      | 21 |
| 十、其他应说明的事项 .....                | 23 |

# 《基于无人机多光谱遥感的马铃薯长势监测技术规程》

## 一、团体标准制修订背景、目的和意义

### 1. 马铃薯产业是保障国家粮食安全的核心支柱产业

马铃薯是全球仅次于水稻、小麦、玉米的第四大粮食作物，凭借高产稳产、抗旱耐瘠、环境适应性强的生物学特性，被国家明确确立为保障粮食安全的“第二主粮”，是我国粮食供给体系中抗风险能力最强的“压舱石”作物之一。

当前我国马铃薯种植面积稳定在 7000 万-7500 万亩，年产量突破 9500 万吨，占全球总产量近三分之一，稳居全球首位；全产业链产值超 1200 亿元，已形成集种薯繁育、规模种植、精深加工、品牌流通于一体的千亿级产业集群。经过多年产业布局，我国已构建起北方一作区（内蒙古、河北坝上）、中原二作区、西南混作区、南方冬作区四大优势产区，实现了马铃薯全年错峰生产与持续供应。其中，内蒙古乌兰察布、甘肃定西等核心产区种植规模超千万亩，500 亩以上规模化连片基地占比已达 42%，“乌兰察布马铃薯”、“定西马铃薯”等区域公用品牌年产值均突破百亿元，直接带动全国超 300 万农户增收，是北方旱作区、西部欠发达地区衔接粮食安全与乡村振兴的核心支柱产业。

与此同时，马铃薯产业也进入了量质并重的转型深水区：传统依靠扩大种植面积的增产模式已触及耕地资源红线，当前我国马铃薯平均单产常年徘徊在 1.2 吨/亩，远低于欧美主产国 2 吨/亩的平均水平，迫切需要通过精准化生产管理突破产业发展瓶颈。

### 2. 马铃薯规模种植长势监测正呈现精准化、智能化趋势

当前马铃薯大田生产的核心矛盾，集中体现为作物生育过程的高环境敏感性与传统粗放管理模式的严重错配。马铃薯全生育周期对水、热、养分胁迫的响应阈值较窄，块茎形成期遭遇持续 35℃ 以上高温会导致块茎停止膨大，花期连续 72 小时积水会引发晚疫病大流行。近年，北方一作区极端高温、春旱、局地暴雨等灾害发生频率较 10 年前提升 63%，传统人工巡查模式下，灾害预警滞后 3-5 天的地块平均减产损失可达 20%-30%。

依靠农技人员田间抽样、农户经验判断的监测方式，1000 亩连片田块完成全覆盖长势排查至少需要 9 人·天，监测成本超过 15 元/亩，且抽样点代表性不足，难以捕捉地块内部 10 米级的长势空间异质性，易引发水肥过量施用、追肥时机滞后等问题。据内蒙古农牧厅 2025 年调研数据，当地规模化马铃薯基地氮肥平均过量施用 27%，水肥资源浪费直接推高种植成本 8% 以上，还导致土壤板结、农残超标等次生生态问题。

跨区域产业协同长期缺乏统一的长势数据基准：当前不同基地、不同服务商输出的马铃薯长势等级评价口径脱节，乌兰察布与定西两大产区的长势监测数据无法打通，区域公用品牌溯源、产业宏观产能预估缺乏统一的数据标尺，严重制约了马铃薯全国性产业调度的精准性。

### 3. 无人机多光谱遥感是适配马铃薯规模化种植的高效监测路径

无人机多光谱遥感作为近空地协同精准农业的核心技术路径，凭借机动灵活、1-5 米级高时空分辨率、可实现单日千亩级无损监测的优势，可以适配马铃薯连片规模种植场景。通过采集作物冠层可见光-近红外特征光谱，可同步反演叶面积指数、叶片氮含量、冠层覆盖度等 10 余项关键长势参数。相比卫星遥感重访周期长、易受云雨遮挡的短板，无人机多光谱监测更适配北方一作区马铃薯生育期短、监测窗口期紧凑的生产需求，近年已在乌兰察布、齐齐哈尔等核心产区开展了大量示范应用。

但技术规模化推广的过程中，无标可依的问题直接形成产业壁垒。当前，无人机多光谱数据采集规范不统一，飞行高度差可达 50 米以上，光谱反射率校准方法各异，同类长势参数反演模型的精度差异最大超过 25%；不同主体输出的长势等级、胁迫等级结果互不可比，生产主体拿到多源监测数据无法形成统一的管理决策，大量采购的遥感设备陷入“看图片用数据”的低效状态，技术落地效率被严重稀释。据中国农业遥感协会 2026 年上半年调研，国内马铃薯主产区已配备无人机遥感设备的规模化基地中，真正实现常态化业务化运行的占比不足 28%，核心瓶颈就是缺乏统一可执行的技术标准作为支撑。

#### 4.标准制订目的

制订《基于无人机多光谱遥感的马铃薯长势监测技术规程》，旨在构建一套科学、高效且标准化的马铃薯长势监测技术体系。其核心目标是通过规范无人机多光谱影像全流程采集质控流程，结合作物生长机理中的核心参数，构建精准可复现的长势监测模型，并形成统一规范的分级制图成果。这一规程将充分释放无人机多光谱遥感技术和机器学习模型的技术优势，大幅减少对传统人工实地采样的依赖，从而实现快速、大范围的长势监测，显著提高监测效率和精度。

在实际应用中，本标准的制订与实施将有效统一不同主体在马铃薯长势无人机多光谱遥感监测时的技术路径、数据要求和成果表达方式。通过标准化的流程和规范化的操作，能够确保监测结果的准确性和跨场景一致性，从而显著提升大范围农田作物长势监测的精度、效率和成果的可比性。这不仅为农业生产管理提供了科学依据，帮助农民和农业企业优化种植策略、提高生产效益，还为政府政策制定者提供了精准的数据支持，使其能够更好地制定农业补贴、粮食储备等政策，全方位保障国家粮食安全。

此外，通过这一标准的实施，可以推动农业无人机遥感技术的广泛应用，促进农业现代化进程，提升我国在全球农业领域的竞争力和影响力。

#### 5.标准制订意义

建立健全《基于无人机多光谱遥感的马铃薯长势监测技术规程》具有极为重要的现实意义：

##### （1）补齐技术落地短板，提升监测业务化能力

通过规范化的技术流程和科学统一的模型构建方法，解决当前不同厂商设备、不同服务商监测结果稳定性差、精度参差不齐的痛点，确保无人机遥感监测技术在实际应用中的可靠性，为全国马铃薯主产区提供一套可直接落地的标准化操作指南，同步推动农业遥感相关技术的迭代创新与规范应用。

## **(2) 统一数据基准，打通产业数据协同链路**

确保不同区域、不同时期、不同机构所得到的马铃薯长势遥感监测数据具有一致性和可比性，彻底解决跨产区数据口径不统一的历史问题，为马铃薯生长动态汇总分析、供需平衡预测、种植结构调整以及精准农业实践等提供坚实的基础数据支撑。一致、可靠的全域数据能够帮助农业从业者和决策者更准确地把握农业生产态势，从而制定出更具针对性和科学性的产业调控措施。

## **(3) 引领行业规范建设，支撑农业高质量发展**

该标准的制定与推广将引领行业应用与标准建设，推动无人机多光谱影像数据在马铃薯产业核心业务中的深度应用与价值挖掘。通过完善农情遥感监测标准体系，能够提升整个行业的标准化与规范化水平，促进农业遥感技术在全国范围内的广泛应用和协同发展。这不仅有助于提高农业生产的精细化管理水平，还能为农业现代化和乡村振兴战略的实施提供有力的技术支撑，推动我国农业向高质量、可持续方向发展。

# **二、工作简况**

## **1. 任务来源**

根据中国农业绿色发展研究会下发的《关于 2026 年第一批 17 项团体标准立项的公告》（农绿（培）（2024）5 号）文件，《基于无人机多光谱遥感的马铃薯长势监测技术规程》团体标准获立项制定，起草单位为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。

## **2. 主要工作过程**

本标准编制全程严格遵循规范流程，紧密贴合马铃薯主产区产业实际与无人机遥感技术落地需求，分四个阶段有序推进：

### **(1) 前期准备与产业调研阶段（2026 年 5 月—7 月）**

正式组建由农业遥感科研团队、马铃薯产业技术体系专家、主产区规模化种植主体、无人机测绘技术服务商共同组成的标准编制工作组，明确各成员单位任务分工与时间节点。系统梳理国内外农情遥感现行标准、无人机多光谱监测相关技术规范，全面汇总马铃薯长势反演、胁迫识别领域的最新研究成果，锚定产业端“无标可依、数据不互通、结果不可比”的核心痛点。先后赴内蒙古乌兰察布、甘肃定西、河北坝上等北方一作区核心产区开展实地走访调研，覆盖连片千亩级马铃薯种植基地，完成基层农技推广机构、产业服务商的需求摸排，最终形成标准草案初稿，明确了数据采集、校准、反演、分级全流程的基本框架。

### **(2) 试点验证与技术参数优化阶段（2026 年 8 月—10 月）**

选取跨生态类型的典型马铃薯主产区作为试点验证基地，覆盖不同海拔、不同种植模式、不同土壤类型的代表性地块，在马铃薯块茎形成期、块茎膨大期两个关键生育期开展全流程无人机多光谱监测试点。对不同飞行高度、不同光照条件、不同校准方式下的影像质量稳定性、长势参数反演精度进行实地比对校验，结合地面同步实测样本数据，对作业流程、影像获取质控要求、田间采样规范、

长势指标计算方法等关键条款进行迭代验证，剔除了脱离生产实际的技术门槛，最终完成标准草案第一轮修订，所有核心技术参数均经过田间实测验证，可直接落地应用。

**(3) 公开征求意见与专家论证阶段（2026 年 11 月—2027 年 1 月）**

面向全国农业农村主管部门、高等院校、科研院所、遥感技术企业、马铃薯种植龙头企业单位定向发函征求意见，同步组织召开行业专家专项论证会，邀请农业遥感、马铃薯栽培、标准研究领域的资深专家对标准内容进行逐条质询把关。工作组对收集到的反馈意见进行分类梳理、逐条研判吸纳，修改完善条款，有效提升标准的科学性、普适性与产业适配性，最终形成标准送审稿及配套编制说明。

**(4) 送审报批与宣贯筹备阶段（2027 年 2 月—4 月）**

严格按照标准制修订管理程序提交完整送审材料，全程配合标准化行政主管部门完成技术审查，根据审查意见完成最终修改，形成标准正式报批稿。同步启动标准落地配套准备工作，组织编制标准图文解读手册、田间操作培训短视频、典型场景应用案例集等宣贯材料，面向主产区基层农技人员、种植主体提前开展标准应用预培训，为后续标准正式发布后的全域推广落地夯实基础

**3. 主要起草人及其分工**

| 姓名   | 性别 | 职务/职称 | 工作单位                | 主要工作         |
|------|----|-------|---------------------|--------------|
| 钱建平  | 男  | 研究员   | 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 | 组织、协调，确定标准框架 |
| 陈谦   | 男  | 助理研究员 | 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 | 标准文本、编制说明等起草 |
| 于婧   | 女  | 教授    | 湖北大学                | 技术内容和指标确定    |
| 李文杰  | 男  | 博士研究生 | 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 | 文献收集与整理、意见征求 |
| 刘建刚  | 男  | 副研究员  | 中国农业科学院蔬菜花卉研究所      | 技术内容和指标确定    |
| 余强毅  | 男  | 研究员   | 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 | 技术内容和指标确定    |
| 杨雪峰  | 女  | 研究员   | 内蒙古科学技术研究院          | 试验验证         |
| 刘北桦  | 女  | 研究员   | 中国农业绿色发展研究会         | 技术内容和指标确定    |
| 王瑞利  | 男  | 研究员   | 内蒙古科学技术研究院          | 试验验证         |
| 李会宾  | 男  | 助理研究员 | 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 | 技术内容和指标确定    |
| 欧阳凌欢 | 女  | 硕士研究生 | 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 | 文献收集与整理、意见征求 |
| 谢安坤  | 女  | 助理研究员 | 中国农业绿色发展研究会         | 技术内容和指标确定    |
| 王聪   | 男  | 研究员   | 中国农业科学院农业资源         | 技术内容和指       |

| 姓名  | 性别 | 职务/职称 | 工作单位        | 主要工作      |
|-----|----|-------|-------------|-----------|
|     |    |       | 与农业区划研究所    | 标确定       |
| 李思涵 | 女  | 助理研究员 | 中国农业绿色发展研究会 | 技术内容和指标确定 |

### 三、标准编制原则和依据

#### 1. 编制原则

本标准的编制遵循《中华人民共和国标准化法》《团体标准管理规定》等有关法律法规和标准化管理要求，并按照有关国家标准、行业标准的规定，以科学性、先进性、适用性、协调性和规范性为原则，以马铃薯大田生产条件下无人机多光谱遥感长势监测的实际需求为切入点，充分考虑不同生产区域、马铃薯生育时期及无人机遥感作业条件，合理确定标准的技术流程和内容要求。

标准编制过程中，围绕无人机多光谱数据获取与处理、地面长势调查、遥感变量提取与筛选、长势指标反演模型构建与精度评价、长势分级制图及监测报告编制等关键环节，对已有成熟技术优先引用相关国家标准、行业标准和气象行业标准，并结合马铃薯长势监测实际进行必要的细化和衔接。同时，参考国内外相关研究成果和同类标准，使技术内容具有较好的科学性、可操作性、可重复性和成果可比性，为马铃薯无人机多光谱遥感长势监测提供统一的技术依据。

#### 2. 编制依据

2.1 本标准依据 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》的要求和规定起草制定。

2.2 本标准以中央引导地方科技发展专项（项目编号：2024ZY0155）的相关研究工作和编制组在农业遥感、无人机多光谱监测及马铃薯生长监测方面的研究积累为主要技术基础，结合项目实施过程中开展的相关试验研究和技术应用，以及标准编制过程中对国内外相关标准、科研文献和技术资料的收集整理，在充分考虑马铃薯主产区生产实际和无人机长势监测应用需求的基础上制定。标准中涉及无人机航空摄影、影像预处理、地面样方调查、马铃薯生育时期与长势指标测定、遥感变量筛选、模型构建与精度评价及专题制图等技术内容，充分参考现行国家标准、行业标准和气象行业标准，并结合无人机多光谱遥感开展马铃薯地块尺度长势监测的实际需求，对相关技术环节进行衔接和细化，以保证标准内容的科学性、准确性、适用性和可操作性。

### 四、标准主要条文或技术内容及其确定依据

#### 1. 范围

根据 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》的有关规定，结合本标准的技术内容 and 应用对象，规定本标准主要包括基于无人机多光谱遥感的马铃薯长势监测作业基本要求、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内容。结合无人机多光谱遥感空间分辨率高、作业灵活和适用于地块尺度精细监测的特点，本标准

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长势监测工作。

## 2. 规范性引用文件

根据本标准技术流程和内容要求,对已有国家标准、行业标准和气象行业标准中能够直接采用的成熟技术进行规范性引用,主要涉及无人机航空摄影与数据质量控制、农业遥感影像预处理、专题制图、农作物物候期与地面样方调查、田间植株样品采集与测量、马铃薯农业气象观测以及叶面积指数、植被覆盖度和植株全氮含量测定等内容。通过与现有相关标准衔接,避免对已有成熟技术重复规定,并保证本标准相关技术要求与现行农业遥感和无人机应用标准体系相协调。

## 3. 术语和定义及缩略语

根据马铃薯无人机多光谱遥感长势监测实际需要,对马铃薯长势、轻小型多旋翼无人机、多光谱影像、植被覆盖度、植株高度和叶面积指数等主要术语进行界定,并对 CGCS2000、GNSS、UTM、 $R^2$ 、MAE、RMSE、SPAD、LAI 和 FVC 等标准正文中使用频率较高的缩略语进行说明。相关术语和定义优先引用现行国家标准、行业标准和气象行业标准,并结合本标准应用场景进行规范,以保证不同使用主体对相关概念理解的一致性。

## 4. 作业基本要求

无人机多光谱遥感数据质量易受天气、光照、飞行时刻、传感器性能、空间定位及地面环境等因素影响。为提高不同监测任务之间数据的一致性和可比性,本标准从航拍监测环境、监测时期与航拍时刻、空间坐标基准、无人机多光谱影像和地面调查数据等方面提出基本要求。监测时期根据马铃薯品种、生育进程和监测目的确定,多期监测时尽量保持航拍时刻及作业条件一致;最终正射影像和监测成果采用统一空间坐标基准,以保证无人机影像、地面样点和监测成果之间能够准确匹配。

## 5. 监测流程

根据无人机遥感长势监测的数据获取、信息提取、模型构建和成果应用过程,本标准将马铃薯长势监测技术流程划分为数据获取与处理、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主要环节。通过明确各技术环节之间的数据衔接关系,形成从无人机和地面数据获取到长势监测成果输出的完整技术流程,提高监测工作的规范性和可重复性。

## 6. 数据获取与处理

数据获取与处理包括无人机多光谱数据和马铃薯地面样本数据两个方面。无人机数据获取重点规范航空摄影、影像预处理和成果质量控制,并通过辐射校正、几何校正、正射校正、影像拼接和裁剪等处理获得满足长势监测要求的多光谱正射影像。地面样点调查应与无人机影像采集同期开展,并通过合理布设样点、统一调查方法和准确记录空间位置,实现地面实测数据与无人机影像的空间对应。

根据马铃薯不同生育时期的生长发育特点,本标准选取株高、冠层覆盖度、

SPAD 值、叶片氮含量和叶面积指数等作为主要地面长势监测指标，并针对不同生育时期确定相应的监测内容。同时，对地面调查数据的完整性、一致性、异常值核查及质量控制提出要求，为后续长势指标反演模型构建提供可靠的地面样本数据。

## **7. 马铃薯长势监测模型构建**

马铃薯冠层光谱响应受到叶片色素含量、冠层结构、生育时期等多种因素共同影响，因此本标准综合选取光谱反射率、植被指数和纹理特征等作为候选遥感变量，并通过相关性分析、特征重要性评价和特征筛选等方法确定敏感变量。在样本划分过程中兼顾不同生育期和长势水平的代表性，将样本划分为训练样本和独立验证样本。

在模型构建方面，以筛选得到的敏感变量为输入，以地面实测马铃薯长势指标为输出，采用适宜的机器学习方法建立长势指标反演模型。不同长势指标分别进行模型构建，并采用决定系数 ( $R^2$ )、平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 等指标对模型精度进行评价，以综合反映模型拟合能力和预测误差，为模型选择及优化提供依据。

## **8. 马铃薯长势分级制图**

考虑不同马铃薯品种、生育时期和田间管理条件下长势指标水平存在差异，本标准规定长势等级应在相同或相近条件下进行比较。具有明确农艺诊断阈值或区域推荐指标时，优先依据相应阈值进行分级；缺少明确阈值时，可结合地面实测数据和长势指标预测值的分布特征进行相对分级，并将长势划分为偏弱、正常和偏旺三个等级。采用多个长势指标进行综合评价时，可在指标无量纲化基础上构建综合长势指数。

为直观反映马铃薯长势空间差异，本标准进一步规定长势分级专题图的基本组成、等级表示、空间信息和成果输出要求，使不同监测区域和不同监测时期的成果具有较好的规范性和可读性。

## **9. 马铃薯长势监测报告编制**

为规范马铃薯长势监测成果表达和应用，本标准规定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。报告内容主要包括监测区域概况、马铃薯品种与生育期、使用数据、技术流程、模型与精度评价、监测结果及结果分析，并附长势指标空间分布图和长势分级专题图等成果，从而保证监测过程和结果具有完整性、可追溯性和应用价值。

# **五、主要试验、验证及试行结果**

## **1. 在内蒙古武川、四子王旗马铃薯长势监测实验结果**

### **1.1 研究区概况与试验设计**

试验区位于内蒙古自治区乌兰察布四子王旗马铃薯试验基地 ( $41^{\circ} 21' 07''N$ ,  $111^{\circ} 41' 18''E$ , 海拔为 1665m)。该区域属温带大陆性季风气候，年平均气温约  $3.6^{\circ}C$ ，年平均降水量约 300mm，日照充足、昼夜温差大；土壤类型以栗钙土为主，土层较深且通透性良好，适宜马铃薯生长。结合当地实际生产情况，选取 AW、

麦肯 1 号和 V7 等 3 个马铃薯品种作为研究对象。其中，AW 和麦肯 1 号试验区各布设 72 个  $2\text{m} \times 2\text{m}$  采样区，V7 试验区布设 20 个同尺度采样区，如图 1 所示。相关数据于 2025 年 7 月 16 日、8 月 5 日和 9 月 5 日获取。

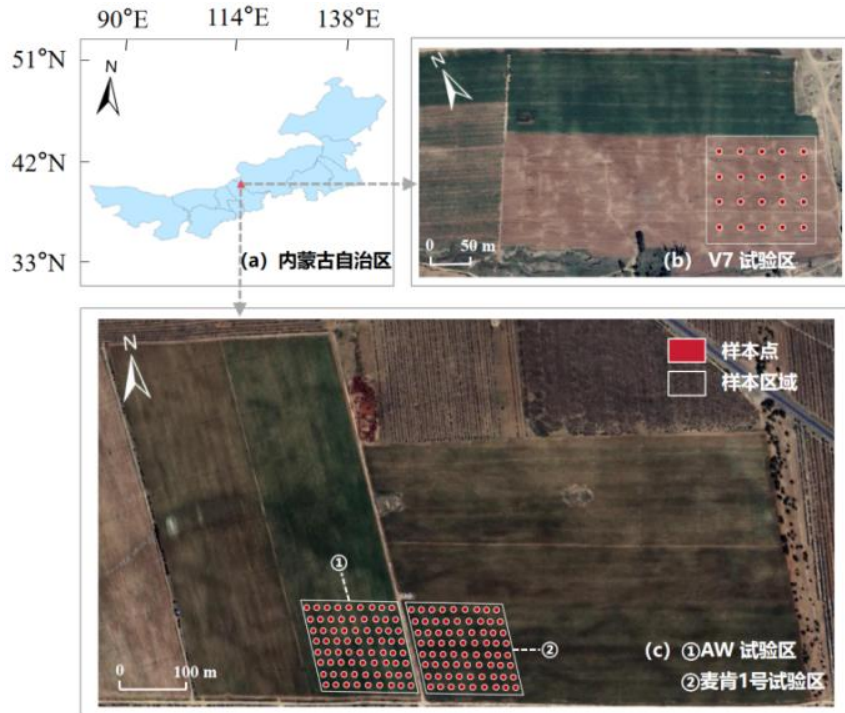


图 1 研究区及采样点分布

## 1.2 数据获取

### 1.2.1 UAV 多光谱影像获取

采用 DJI Mavic 3 Multispectral UAV 获取多光谱影像。该平台集成多光谱与可见光相机模块，可在单次飞行中同时获取 RGB 影像及红、绿、红边、近红外等 4 个关键光谱波段的高分辨率影像数据。为保证影像质量，作业选在天气晴朗、风速低于  $5\text{m/s}$  且太阳高度角较高的 11:00-13:00 时段进行，飞行高度、航向重叠度和旁向重叠度分别设置为 12m、65%和 75%。

### 1.2.2 地面 SPAD 值数据获取

地面对应 SPAD 值测定与 UAV 多光谱数据采集同步进行。马铃薯冠层 SPAD 值利用叶绿素测定仪（金科利达，TYS-4N，中国， $0.0 \sim 99.9$ ， $\pm 0.3$ ），并采用五点法进行均值测定，如图 2 所示。具体布点方式为，将单个采样区均匀划分为  $5 \times 5$  个小区，并在其四角及中心小区位置分别选取 1 株具有长势代表性的植株进行 SPAD 值测量，如图 2 中红色标记处。为提高所采集 SPAD 值数据对冠层整体生育状况表征的代表性，选取植株倒三叶、倒四叶进行测量，3 次重复并取平均值作为单株马铃薯的 SPAD 值测定值。

同时，为刻画不同生育期马铃薯冠层结构的变化特征，同步获取采样区株高和冠层覆盖度。其中，株高采用与 SPAD 值测定一致的五点法同步测量；冠层覆盖度基于采样区 UAV 影像分割结果计算植被像元占比获得。

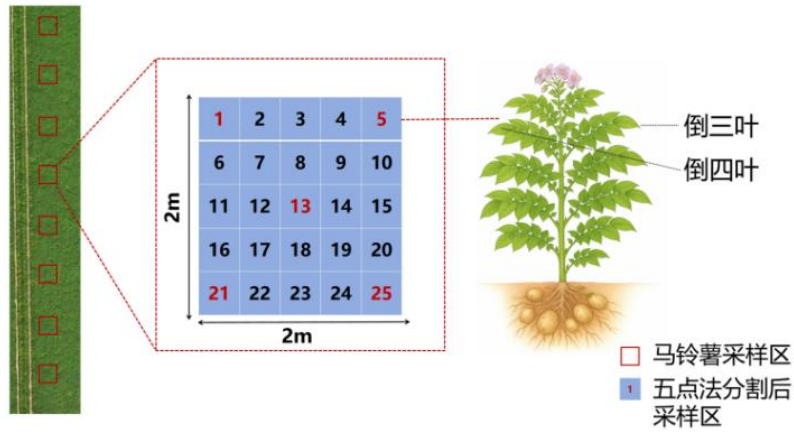


图 2 五点法采样示意图

### 1.2.3 马铃薯生育期信息获取

为明确不同样本所处生育阶段，并为后续生育期约束建模和生育期识别提供标签基础，本研究同步记录各采样区马铃薯生育期信息。本研究结合 BBCH (Biologische bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry) 尺度、马铃薯物候发育特征、试验区播种时间及植株形态观测结果，将 2025 年 7 月 16 日、8 月 5 日和 9 月 5 日获取的数据分别划分为盛花期、块茎膨大期和成熟期，其中 8 月 5 日采集的数据主要对应块茎膨大中期，上述 3 个时期覆盖马铃薯冠层由旺盛生长、块茎快速膨大到后期衰退的典型过程。其中，成熟期虽较少作为传统 SPAD 值反演的时期，但该阶段光谱响应受叶片衰老、冠层稀疏和土壤背景影响更明显，能够更好地检验多生育期统一估测模型的跨期稳定性。

本研究共布设 164 个采样区，并在 3 个生育期分别获取地面实测数据和 UAV 多光谱数据，最终形成 492 组样本数据。将数据随机分为两组，其中 80% 作为训练集，其余 20% 作为测试集。

## 1.3 多光谱影像数据处理

### 1.3.1 多光谱影像预处理

为消除采集过程中光照变化及传感器响应差异造成的辐射偏差，提高不同影像间数据的一致性，采用 DJI Terra 软件对原始多光谱影像进行拼接、大气校正和辐射校正，最终获得研究区多光谱正射影像图。辐射校正公式如下

$$\frac{D_{NS}}{R_S} = \frac{D_N}{R} \quad (1)$$

其中， $D_{NS}$  为辐射标定原始量化值， $R_S$  为标定反射率， $D_N$  为试验区马铃薯冠层原始量化值， $R$  为马铃薯冠层反射率。为减少定位偏差对冠层光谱提取结果的影响，本研究将 RTK 测定的样本区坐标导入 QGIS 软件，对试验区影像进行裁剪，获取对应采样区域；并为剔除土壤、阴影等信息干扰，采用基于归一化植被指数的自适应阈值分割方法提取马铃薯冠层区域。

### 1.3.2 光谱特征提取

为表征马铃薯冠层在不同生育期下的光谱响应、叶绿素变化及空间结构差异，基于多光谱影像构建由原始波段反射率 (Original band reflectances, OBRs)、植被

指数 (Vegetation indices, VIs) 和纹理特征 (Textural features, TFs) 组成的特征体系, 并以采样区为基本单元依次完成特征提取。

首先, 在影像预处理后, 以采样区为基本单元提取绿光 (Green)、红光 (Red)、红边 (RedEdge)、近红外 (Nir) 等 4 个 OBRs。在此基础上, 结合马铃薯叶绿素吸收特性、高覆盖冠层下传统指数易饱和以及中后期土壤背景干扰增强等特点, 选取 6 种 VIs, 分别为归一化植被指数 (NDVI)、绿色归一化植被指数 (GNDVI)、红边归一化差值植被指数 (NDRE)、红边叶绿素指数 (RECI)、优化土壤调节植被指数 (OSAVI) 以及经叶绿素吸收比指数与优化土壤调节植被指数比值 (TCARI/OSAVI)。其中, NDVI 用于表征冠层整体生理状况, GNDVI、NDRE 和 RECI 用于增强模型对叶绿素变化的敏感性, OSAVI 和 TCARI/OSAVI 用于减弱土壤背景对早期和后期冠层反射的影响。6 种 VIs 的计算公式如表 1 所示。

为补充马铃薯冠层结构信息, 进一步提取 TFs 以反映不同时期马铃薯冠层叶层叠置和空间异质性变化。考虑到近红外波段对冠层结构及多次散射过程较为敏感, 本文基于近红外波段影像构建灰度共生矩阵 (Gray-level co-occurrence matrix, GLCM), 提取对比度 (Contrast, CON)、相异性 (Dissimilarity, DIS)、同质性 (Homogeneity, HOM) 等 3 类纹理特征。其中, CON 和 DIS 用于刻画叶片排列差异及局部结构粗糙度, HOM 用于表征冠层纹理的均匀程度。

表 1 本研究使用的植被指数计算公式

| 植被指数                   | 计算公式                                                                    |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 归一化植被指数<br>(NDVI)      | $\frac{R_{nir}-R_r}{R_{nir}+R_r}$                                       |
| 绿色归一化植被<br>指数 (GNDVI)  | $\frac{R_{nir}-R_g}{R_{nir}+R_g}$                                       |
| 优化土壤调节植<br>被指数 (OSAVI) | $\frac{1.16(R_{nir}-R_r)}{R_{nir}+R_r+0.16}$                            |
| 归一化差异红边<br>指数 (NDRE)   | $\frac{R_{nir}-R_{re}}{R_{nir}+R_{re}}$                                 |
| 复合指数<br>(TCARI/OSAVI)  | $\frac{3[(R_{re}-R_r)-0.2(R_{re}-R_g)\times\frac{R_{re}}{R_r}]}{OSAVI}$ |
| 红边叶绿素指数<br>(RECI)      | $\frac{R_{nir}}{R_{re}}-1$                                              |

注:  $R_r$ 、 $R_g$ 、 $R_{nir}$ 、 $R_{re}$  分别表示红波段、绿波段、近红外波段、红边波段反射率。

### 1.3.3 多源特征筛选

为减少特征冗余并筛选能够表征马铃薯不同生育期冠层生理状态和结构差异的关键变量, 本研究结合相关性分析和共线性检验进行特征筛选。

首先，为降低单一相关性分析方法带来的偏差，本研究采用皮尔逊相关系数（Pearson correlation coefficient, PCC）和斯皮尔曼等级相关系数（Spearman correlation coefficient, SCC）分析特征变量与 SPAD 值之间的相关关系，筛选相关性较弱的特征。其中，PCC 用于衡量变量之间的线性相关性；SCC 用于描述线性或非线性的单调相关关系，两者结合有助于提高相关性分析的稳健性。

在相关性筛选基础上，进一步采用方差膨胀因子（Variance inflation factor, VIF）检验特征间共线性，以剔除信息重复度较高的变量，降低相近光谱或纹理特征同时输入对模型稳定性的影响。

通过上述影像预处理、多特征提取与特征优选等数据处理流程，如图 3 所示，可有效实现多光谱影像向高质量特征变量转换，为后续多生育期 SPAD 值反演模型构建提供可靠数据支持。

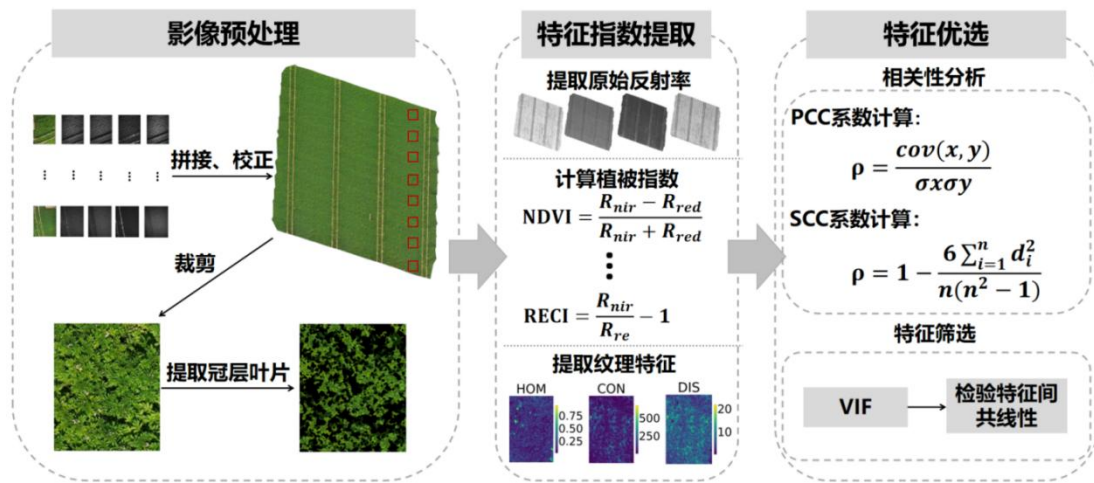


图 3 多光谱影像数据处理流程图

## 1.4 SPAD 值估测模型构建与性能评估

### 1.4.1 生育期识别模型构建

为检验冠层覆盖度、株高及特征筛选中表现稳定的特征变量对不同生育阶段的识别能力，并为后续 SPAD 值估测提供可自动获取的生育期标签，本研究基于随机森林分类器构建生育期识别模型。

首先，根据田间观测结果确定样本实测生育期标签，将样本划分为盛花期、块茎膨大期和成熟期三类，分别记为  $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$ 。其次，提取株高、冠层覆盖度及表现稳定的特征变量 RedEdge、NDRE、RECI、GNDVI 和 DIS 构建生育期识别特征集，作为模型的输入变量。株高和冠层覆盖度用于反映马铃薯植株形态；RedEdge、NDRE、RECI 和 GNDVI 用于表征冠层红边响应及叶绿素相关信息；DIS 用于反映冠层局部异质性。

然后，基于随机森林分类器建立盛花期、块茎膨大期和成熟期三分类模型，每棵决策树基于样本和随机特征子集进行训练，并对样本所属生育期进行投票判别。对于第  $i$  个样本的输入特征向量  $X_i$ ，第  $t$  棵决策树的分类结果记为  $h_t(X_i)$ ，则样本属于第  $k$  类生育期的识别概率可表示为：

$$P(y_i=C_k|X_i)=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^T I(h_t(X_i)=C_k) \quad (2)$$

$$X_i=[PH_i, CC_i, RE_i, NDRE_i, RECI_i, GNDVI_i, DIS_i] \quad (3)$$

式中,  $PH_i$  为株高,  $CC_i$  为冠层覆盖度,  $RE_i$ 、 $NDRE_i$ 、 $RECI_i$ 、 $GNDVI_i$ 、 $DIS_i$  分别为红边波段反射率、红边归一化差值植被指数、红边叶绿素指数、绿色归一化植被指数和相异性纹理特征;  $T$  为随机森林中决策树数量, 本文设置为 300;  $I(\cdot)$  为指示函数, 当第  $t$  棵树将样本判定为  $C_k$  时取 1, 否则取 0。最终识别生育期标签由最大类别概率确定:

$$\hat{y}_i = \arg \max P(y_i=C_k|X_i), k=1,2,3 \quad (4)$$

式中,  $\hat{y}_i$  为第  $i$  个样本的识别生育期标签。

为降低类别分布差异对评价结果的影响, 采用 5 折分层交叉验证进行精度验证。模型识别效果采用总体准确率、精确率、召回率、F1-score 和混淆矩阵进行评价, 并输出特征重要性。本文随机森林分类器设置为 300 棵决策树, 最大深度为 6, 最小分裂样本数为 4, 叶节点最小样本数为 2。

#### 1.4.2 多生育期 SPAD 值估测模型构建

为评价不同建模策略对马铃薯多生育期 SPAD 值估测的适用性, 并验证引入生育期信息对模型稳健性的影响, 本研究构建简单拼接模型、生育期显性约束模型、生育期特征交互模型和单生育期模型, 采用偏最小二乘回归 (PLSR)、随机森林 (RF)、支持向量回归 (SVR) 和极端梯度提升树 (XGBoost) 进行建模比较。四类模型分别用于评价不考虑生育期信息、直接引入生育期标签、引入生育期与特征变量交互关系以及分生育期独立建模条件下的 SPAD 值估测效果。

设第  $i$  个样本的 SPAD 实测值为  $y_i$ , 模型输入特征向量为:

$$X_i=[x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}] \quad (5)$$

式中,  $x_{ij}$  表示第  $i$  个样本的第  $j$  个特征变量,  $p$  为输入特征数量。特征变量包括 Red、Green、RedEdge、GNDVI、NDRE、RECI、OSAVI、CON 和 DIS。

生育期标签采用离散类别变量表示, 盛花期、块茎膨大期和成熟期分别记为  $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$ , 并进一步转换为 one-hot 编码:

$$G_i=[g_{i1}, g_{i2}, g_{i3}] \quad (6)$$

式中,  $g_{ij}=1$  为第  $k$  个生育期第  $i$  个样本, 否则,  $g_{ij}=0$ 。四类模型均采用 5 折交叉验证进行训练与验证, 并对 PLSR、SVR、RF 和 XGBoost 四种算法进行比较。其中, PLSR 适用于分析线性关系; RF 和 XGBoost 适用于分析非线性关系, SVR 则适用于小样本条件下的非线性拟合。

##### (1) 简单拼接模型

简单拼接模型不引入生育期信息, 直接将盛花期、块茎膨大期和成熟期样本合并, 以特征变量  $X_i$  作为输入变量建立统一 SPAD 值估测模型:

$$\hat{y}_i = f(X_i) \quad (7)$$

式中,  $\hat{y}_i$  为第  $i$  个样本的 SPAD 估测值,  $f(\cdot)$  分别为 PLSR、RF、SVR 和 XGBoost 回归模型。该模型用于评价在不考虑生育阶段差异条件下, 多生育期样本直接统

一建模的估测效果。

### (2) 单生育期模型

单生育期模型将 3 个生育期独立构建 SPAD 值估测模型，模型输入以第  $k$  个生育期对应的特征变量  $X_i^{(k)}$  作为输入变量建立 SPAD 值估测模型：

$$\hat{y}_i^{(k)} = f_k(X_i^{(k)}) \quad (8)$$

式中， $\hat{y}_i^{(k)}$  为第  $k$  个生育期中第  $i$  个样本的 SPAD 估测值。该模型避免了不同生育期样本混合造成的响应关系干扰，可作为评价建模方法效果的参照。

### (3) 生育期显性约束模型

生育期显性约束模型在遥感特征之外引入生育期 one-hot 编码  $G_i$ ，将样本所属生育阶段作为辅助变量参与建模：

$$\hat{y}_i = f(X_i, G_i) \quad (9)$$

该模型通过生育期标签区分不同阶段样本，可用于检验直接引入生育期标签是否能够提高多生育期 SPAD 值估测精度。

### (4) 生育期特征交互模型

考虑到同一特征变量在不同生育阶段对 SPAD 值的响应关系可能存在差异，本研究进一步构建生育期特征交互模型。该模型在遥感特征和生育期 one-hot 编码的基础上，选取 NDRE、RECI 和 GNDVI 作为关键交互特征，构建生育期—特征交互项：

$$I_{ijk} = x_{ij}^{key} \times g_{ik} \quad (10)$$

式中， $x_{ij}^{key}$  为参与交互的关键特征，对应的 SPAD 值估测模型为：

$$\hat{y}_i = f(X_i, G_i, I_i) \quad (11)$$

该模型不仅能够区分样本所属生育阶段，还能够使模型分别学习不同生育期内关键光谱特征与 SPAD 值之间的响应关系，用于评价考虑生育期与特征变量交互关系后对估测精度的改善效果。

### 1.4.3 精度检验

本研究采用决定系数 (Coefficient of determination,  $R^2$ )、均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 和归一化均方根误差 (Normalized root mean square error, NRMSE) 作为模型的精度指标[19,32]。其中， $R^2$  用来评价实测值与模型预估值之间的拟合程度；RMSE 用来衡量实测值与模型预估值的偏差；NRMSE 用于表征模型估测误差相对于实测均值的大小。当  $R^2$  越大，RMSE 和 NRMSE 越小，模型拟合效果越好，精度越高，计算公式如下：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (13)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}} \times 100\% \quad (14)$$

式中,  $N$  为样本数量,  $y_i$  为第  $i$  个样本的 SPAD 实测值,  $\hat{y}_i$  为第  $i$  个样本的 SPAD 估测值,  $\bar{y}$  为 SPAD 实测值的平均值。

### 1.5 不同建模效果对比

基于实测生育期信息的马铃薯 SPAD 值估测模型精度如表 2 所示, 各模型的  $R^2$  介于 0.10~0.89, RMSE 介于 1.38~6.01, NRMSE 介于 3.07~15.32%, 不同建模策略和不同生育期之间的估测效果差异明显。说明马铃薯多生育期 SPAD 值估测不仅存在拟合程度差异, 也存在明显的误差水平差异, 有必要比较不同建模策略在跨期估测中的适用性。

简单拼接模型直接将不同生育期样本合并建模, 整体估测精度较差。盛花期和块茎膨大期的最高  $R^2$  仅为 0.67; 成熟期模型表现最差,  $R^2$  仅为 0.10~0.17, RMSE 为 5.47~6.01, NRMSE 为 13.94~15.32%, 说明忽略生育期差异、直接拼接样本会削弱模型对多生育期冠层响应的稳定性。

引入实测生育期信息后, 生育期显性约束模型精度明显提高。其中 XGBoost 在盛花期表现最优,  $R^2$  为 0.83, RMSE 为 1.79, NRMSE 为 3.98%; 在块茎膨大期和成熟期, XGBoost 的  $R^2$  分别为 0.69 和 0.45, RMSE 分别为 2.51 和 4.20, NRMSE 分别为 5.19% 和 10.71%。说明将生育期作为辅助变量输入模型后, 有助于区分不同阶段样本, 减弱跨生育期差异对 SPAD 值估测的影响。

进一步加入生育期信息与关键特征的交互项后, 生育期特征交互模型中 XGBoost 取得最优估测效果, 散点分布如图 8 所示, 在盛花期、块茎膨大期和成熟期的  $R^2$  分别为 0.89、0.80 和 0.68, RMSE 分别为 1.38、1.95 和 2.53, NRMSE 分别为 3.07%、4.03% 和 6.45%。该结果表明, 构建生育期—特征交互项能够更充分地表达不同生育期下关键光谱特征与 SPAD 值之间的响应阶段性变化。

与单生育期模型相比, 生育期特征交互模型在统一框架下同时利用了全生育期样本信息和阶段差异信息, 在保持较高估测精度的同时, 避免了按生育期分别建模带来的重复建模问题。总体来看, 显式引入生育期信息, 尤其进一步考虑特征作用随生育期变化的交互关系, 是提高马铃薯多生育期 SPAD 值估测稳定性和一致性的关键。这表明, 针对生育期差异构建估测模型, 对于实现马铃薯全生育期 SPAD 值连续监测具有重要意义。

表 2 马铃薯 SPAD 值估测模型精度

| 输入变量      | 建模方法    | 盛花期    |      |         | 块茎膨大期  |      |         | 成熟期    |      |         |
|-----------|---------|--------|------|---------|--------|------|---------|--------|------|---------|
|           |         | $R^2$  | RMSE | NRMSE/% | $R^2$  | RMSE | NRMSE/% | $R^2$  | RMSE | NRMSE/% |
| 简单拼接模型    | PLSR    | 0.49** | 3.07 | 6.82    | 0.40** | 3.49 | 7.22    | 0.11** | 6.01 | 15.32   |
|           | RF      | 0.61** | 2.69 | 5.98    | 0.61** | 2.82 | 5.83    | 0.16** | 5.47 | 13.94   |
|           | SVR     | 0.67** | 2.45 | 5.45    | 0.67** | 2.59 | 5.36    | 0.10** | 5.61 | 14.30   |
|           | XGBoost | 0.46** | 3.17 | 7.05    | 0.61** | 2.79 | 5.77    | 0.17** | 5.47 | 13.94   |
| 生育期显性约束模型 | PLSR    | 0.62** | 2.65 | 5.89    | 0.38** | 3.53 | 7.30    | 0.18** | 5.45 | 13.89   |
|           | RF      | 0.81** | 1.86 | 4.13    | 0.67** | 2.58 | 5.34    | 0.47** | 4.17 | 10.63   |
|           | SVR     | 0.80** | 1.91 | 4.25    | 0.68** | 2.54 | 5.25    | 0.33** | 4.31 | 10.99   |
|           | XGBoost | 0.83** | 1.79 | 3.98    | 0.69** | 2.51 | 5.19    | 0.45** | 4.20 | 10.71   |
| X+G+I     | PLSR    | 0.76** | 2.00 | 4.45    | 0.67** | 2.48 | 5.13    | 0.39** | 4.13 | 10.53   |
|           | RF      | 0.88** | 1.42 | 3.16    | 0.79** | 1.99 | 4.12    | 0.56** | 2.90 | 7.39    |

|           |         |        |      |      |        |      |      |        |      |       |
|-----------|---------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|-------|
| 生育期特征交互模型 | SVR     | 0.83** | 1.66 | 3.69 | 0.79** | 1.98 | 4.10 | 0.53** | 3.07 | 7.83  |
|           | XGBoost | 0.89** | 1.38 | 3.07 | 0.80** | 1.95 | 4.03 | 0.68** | 2.53 | 6.45  |
| 单生育期模型    | PLSR    | 0.74** | 2.18 | 4.85 | 0.60** | 2.83 | 5.85 | 0.34** | 4.31 | 10.99 |
|           | RF      | 0.79** | 1.95 | 4.33 | 0.68** | 2.54 | 5.25 | 0.41** | 3.61 | 9.20  |
|           | SVR     | 0.76** | 2.12 | 4.71 | 0.68** | 2.52 | 5.21 | 0.44** | 3.20 | 8.16  |
|           | XGBoost | 0.82** | 1.83 | 4.07 | 0.67** | 2.59 | 5.36 | 0.46** | 3.18 | 8.11  |

注：X 表示特征筛选后保留的多源遥感特征；G 表示实测生育期 one-hot 编码；I 表示生育期编码与关键特征变量构建的交互项；Xk 表示第 k 个生育期样本对应的多源遥感特征，k=1,2,3。\*和\*\*分别表示实测值与估测值之间相关性在  $P<0.05$  和  $P<0.01$  水平上显著。

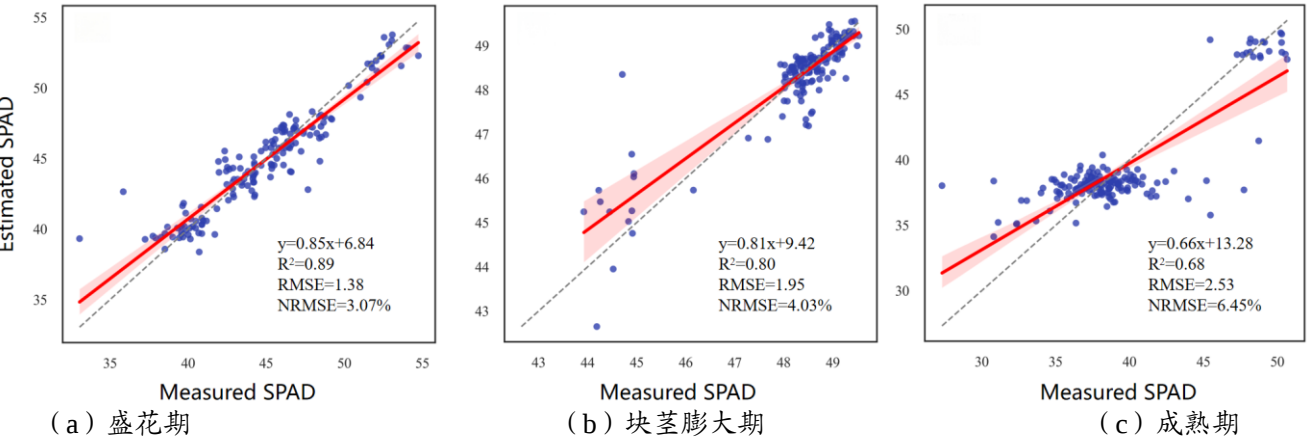


图 4 马铃薯不同生育期最佳 SPAD 值估测结果

## 2. 在黑龙江齐齐哈尔克山农场马铃薯长势监测实验结果

2022 年针对试验区域内马铃薯生长的不同生育期进行了 3 次数据采集。

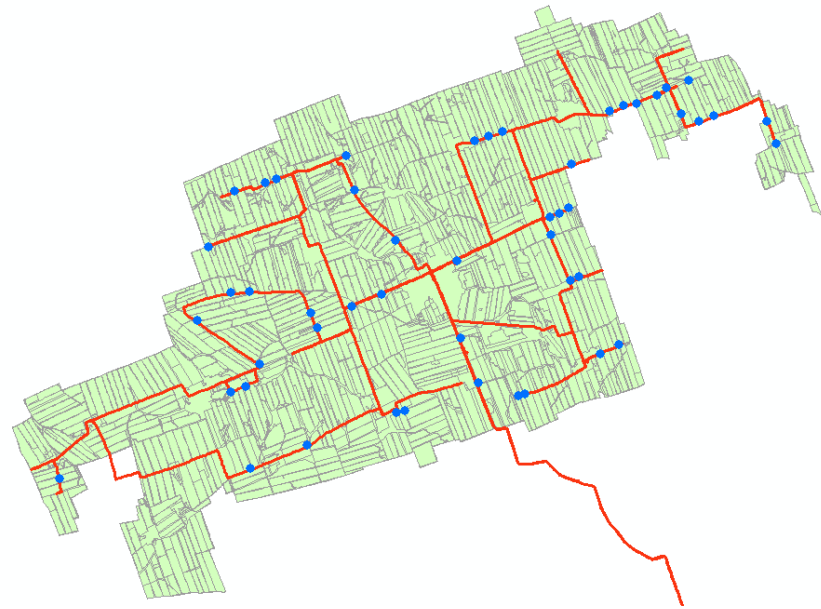


图 5 马铃薯表型信息采样点（50 个）分布

2023 年从 4 月份开始，先后完成了马铃薯表型性状数据、无人机数据的采集工作。

2024 年完成了土壤养分数据、马铃薯表型性状数据、无人机数据的采集工作。

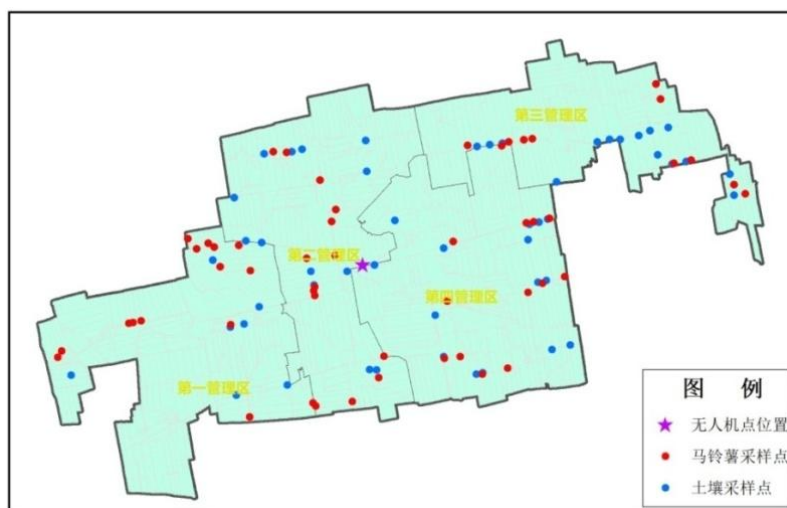


图 6 马铃薯、土壤采样点及无人机点位置分布图

2023 年从 6 月下旬开始，到 2023 年 9 月上旬为止，以 10 天左右为一个周期，共完成了八期无人机影像 RGB 及多光谱数据的采集工作；2024 年从 7 月至 8 月之间，以 10 天左右为一个周期，完成了 6 期无人机影像 RGB 及多光谱数据的采集工作。

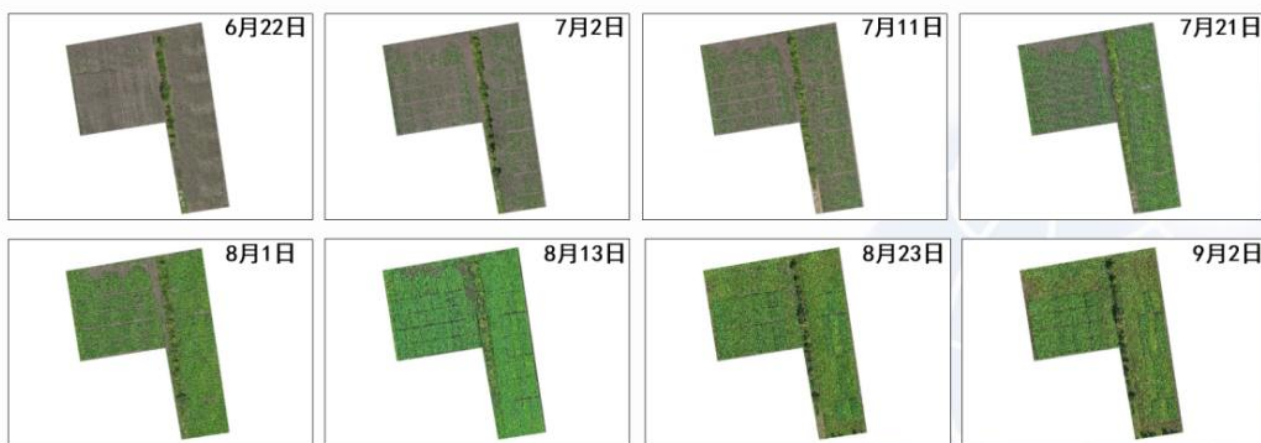


图 7 2023 年克山分院示范区无人机影像图

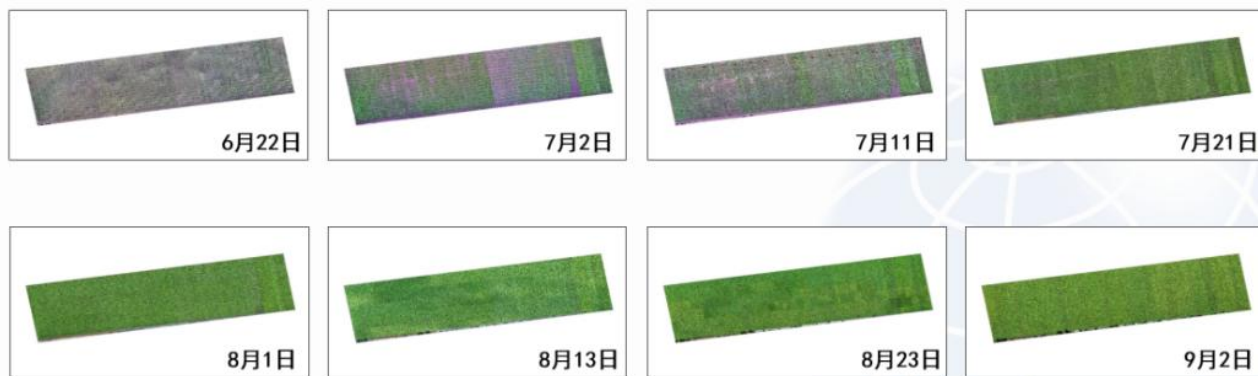


图 8 2023 年克山农场示范区无人机影像图

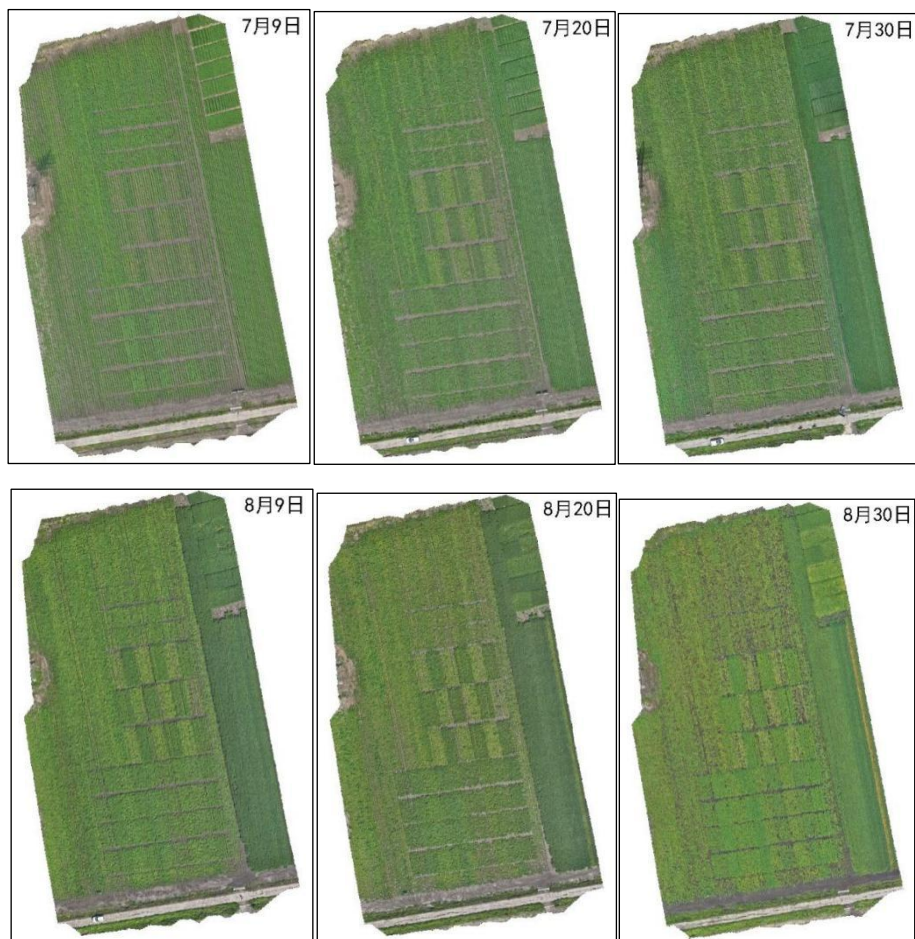


图 8 2024 年克山分院示范区无人机影像图

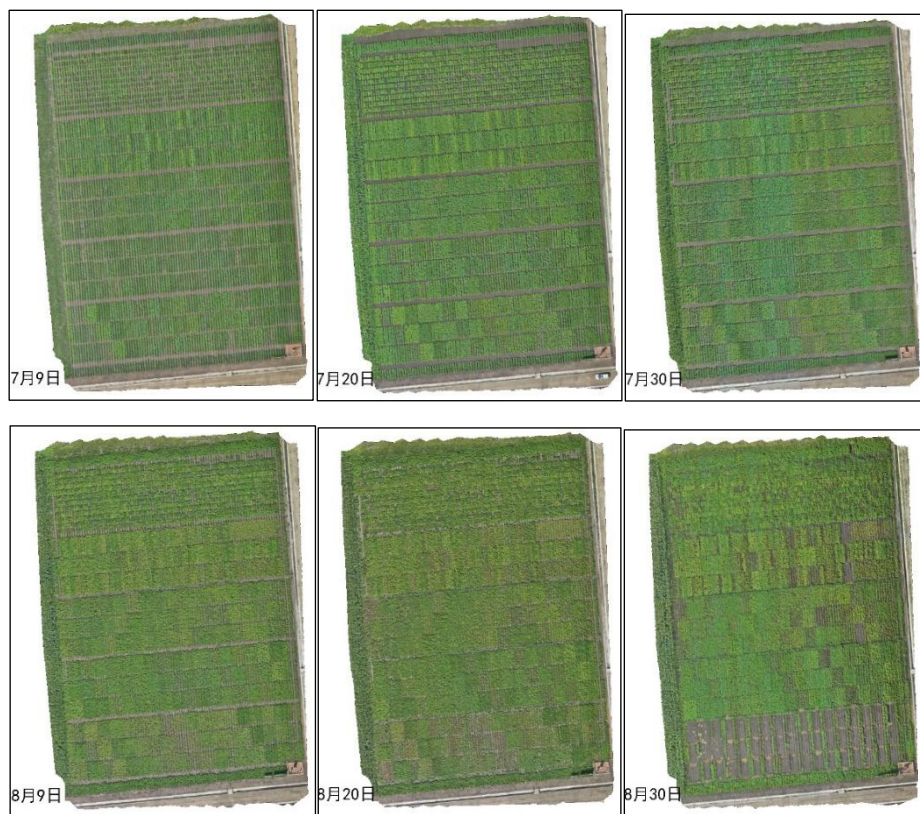


图 9 2024 年克山农场示范区无人机影像图

## 六、采用国际标准的程度及水平说明

### 1. 采用国际标准的程度

本标准编制前期，工作组系统检索了国际标准化组织（ISO）下属无人航空器系统、地理信息、农业数字技术等相关技术委员会发布的现行标准与在研标准清单，覆盖民用无人机飞行管控、遥感传感器几何与辐射定标、遥感数据质量评价、地理空间数据质控、数据驱动农业应用等多个技术领域。

当前国际层面已形成较为成熟的无人机系统运行、通用遥感数据处理基础标准体系，相关技术要求可为马铃薯无人机长势监测提供通用底层技术参考。但经全面核实，截至本标准编制阶段，尚未发现与“基于无人机多光谱遥感的马铃薯全链条长势监测”技术场景、全流程环节直接对应的专项国际标准：现有通用国际标准并未针对马铃薯专属的生育期窗口、垄作种植结构、块茎发育特异参数，形成涵盖影像采集、地面长势指标同步调查、遥感特征变量筛选、长势反演模型构建与精度核验、长势分级制图、监测成果输出全链路的细分领域统一技术规范。

因此，本标准未等同或修改采用任何现有国际专项标准，而是在借鉴国际无人机运行安全、遥感数据辐射与几何质控等通用技术要求的基础上，充分衔接我国现行农情遥感、农机作业相关国标行标体系，结合国内马铃薯主产区差异化的生产条件，自主研发适配我国马铃薯大田生产场景的专业化无人机多光谱长势监测技术规程。

### 2. 国际同类标准水平对比情况

当前全球无人机多光谱作物长势监测技术正快速从定性目视判读，向定量化参数反演、智能化胁迫识别、多源数据融合分析方向迭代。国际上，多光谱+红边高灵敏度感知、作物生理参数无损反演、机器学习跨场景泛化等技术成果不断落地，应用模式已从单一植被指数监测，逐步拓展至多生育期连续追踪、空天地多源数据协同的综合监测体系。国内在无人机农业专用平台集成、细分作物场景适配、轻量型 AI 模型落地等方向进展较快，但在跨区域作业流程统一、地面采样规范统一、模型普适性校验、不同主体监测结果可比等标准化维度，仍存在明显的补齐提升空间，整个行业正朝着定量化、智能化、多源融合、业务化的方向快速发展。

本标准直指当前国内马铃薯无人机长势监测领域的核心痛点：作业流程不统一、数据处理口径差异大、跨场景结果不可比，充分衔接现有国家、行业通用标准与国内外最新技术成果，适配我国马铃薯大田垄作的生产实际，针对性规范了航拍环境与适宜监测窗口期、多光

谱影像采集与预处理、地面长势指标同步调查、遥感特征变量遴选、长势反演模型构建与精度核验、长势分级制图、监测报告编制全流程关键环节，形成从原始数据获取到最终业务化成果输出的完整闭环技术体系，为全国范围内马铃薯无人机长势监测提供统一可直接落地的技术依据。

本标准的先进性与产业适用性集中体现在三个核心维度：

（1）依托无人机多光谱高时空分辨率优势采集马铃薯冠层精细光谱信息，结合厘米级可见光纹理信息开展协同解译，相较传统全地面调查模式，监测效率提升 10 倍以上，可精准捕捉地块内部米级长势空间异质性，大幅提升长势监测的客观性与田间精细化管理水平。

（2）通过统一规范外业飞行作业、影像预处理、地面采样、模型构建与精度评价全链条技术要求，彻底解决不同服务商、不同设备产出数据口径脱节的行业痛点，实现跨产区、跨时期监测结果的可比性与技术方法的可复现性，为马铃薯长势监测全国性常态化业务运行筑牢标准化根基。

（3）融合无人机多光谱遥感信息与地面同步实测数据，可定量反演马铃薯株高、冠层覆盖度、SPAD 值、叶面积指数、叶片氮含量等核心长势参数，按需完成单参数分级与综合长势评价，直接为水肥精准调控、灾害早期预警、产能预估等田间精细化管理动作输出可执行的决策数据。

围绕本标准核心的跨区域通用马铃薯长势参数反演方法，编制组已同步启动相关国家发明专利的申请工作，形成“技术迭代-标准固化-知识产权保护”的完整布局。。

## 七、与现行法律法规、强制性标准和其他有关标准的关系

### 1. 与现行法律法规，强制性标准和其他有关标准的协调关系

本标准的编制遵循《中华人民共和国标准化法》《团体标准管理规定》等有关法律法规和标准化管理要求，在科学研究成果和实践经验基础上开展标准研制，并充分考虑与现行国家标准、行业标准和其他相关标准之间的协调衔接。《中华人民共和国标准化法》和《团体标准管理规定》明确规定，团体标准的技术要求不得低于强制性标准的相关技术要求。本标准属于马铃薯无人机多光谱遥感长势监测技术规程，所规定内容主要涉及遥感数据获取与处理、地面调查、模型构建、长势分级和成果表达等技术要求，经对照现行相关法律法规和强制性国家标准，未发现本标准技术条款与其存在冲突。

本标准涉及民用无人驾驶航空器飞行及遥感空间数据获取，无人机作业应遵守《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》等有关规定。与无人机系统及运行相关的强制性国家标准主要包括 GB 42590—2023

《民用无人驾驶航空器系统安全要求》、GB 46750—2025《民用无人驾驶航空器系统运行识别规范》和 GB 46761—2025《民用无人驾驶航空器实名登记和激活要求》等。本标准不对无人驾驶航空器产品安全、实名登记、运行识别及空域管理等内容另行规定，实际监测作业应符合国家现行无人驾驶航空器管理规定及相关强制性标准。同时，本标准涉及遥感影像定位、空间数据处理和专题图制作等内容，《中华人民共和国测绘法》规定国家建立和采用全国统一的测绘基准和测绘系统。2000 国家大地坐标系（CGCS2000）为我国现行国家大地坐标系，本标准规定最终正射影像、监测结果图及其他空间数据成果统一采用 CGCS2000，与国家现行测绘基准和测绘管理要求相协调。

在具体技术内容方面，本标准充分衔接现有国家标准、行业标准和气象行业标准，对已有成熟技术原则上直接引用或参考，不作重复规定。其中，无人机航空摄影、飞行管理及数据成果质量控制与 GB/T 39610《倾斜数字航空摄影技术规程》、GB/T 39612《低空数字航摄与数据处理规范》、GB/T 18316《数字测绘成果质量检查与验收》和 GB/T 45631《无人机遥感测绘飞行管理信息要求》等标准相衔接；无人机遥感影像预处理和专题制图与 NY/T 4151《农业遥感监测无人机影像预处理技术规范》、NY/T 4150《农业遥感监测专题制图技术规范》相衔接；农作物物候、地面样方和植株调查与 NY/T 4618《农作物物候期遥感监测技术规范》、NY/T 4619《农作物地面样方遥感调查技术规范》、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》等标准相衔接；马铃薯生育时期及有关地面观测内容参考 QX/T 300《农业气象观测规范 马铃薯》。在现有通用技术规范基础上，本标准进一步针对马铃薯大田垄作生产场景，对无人机多光谱数据获取、地面长势指标调查、遥感变量筛选、模型构建与精度评价、长势分级制图及监测报告编制等环节进行衔接和细化，形成马铃薯无人机多光谱长势监测的完整技术流程。

## 2. 与国内外同类标准的对比情况

国际同类专项标准情况已在第六章中进行了说明，目前尚未检索到与本标准监测对象、无人机多光谱平台及全过程技术内容直接对应的国际标准。国内已发布若干与无人机遥感作物长势和营养监测相关的地方标准。其中，DB3205/T 1149—2024《常绿果树养分诊断无人机多光谱遥感监测技术应用规范》主要针对常绿果树养分诊断，规范无人机多光谱数据获取、叶片缺素诊断、健康指数分级及监测成果等内容；DB15/T 4024—2025《多光谱无人机遥感监测大豆苗期长势及等级划分》主要针对大豆苗期，利用无人机多光谱影像和 NDVI 构建苗情遥感监测模型并进行等级划分；DB42/T 2371—2025《水稻群体

长势无人机监测技术规程》则针对水稻群体长势，对植被覆盖度、叶面积指数和干物质量等指标的无人机监测进行了规定。上述标准在无人机遥感数据获取和作物长势评价方面具有较好的参考价值，但在监测对象、生育时期、长势指标和具体技术路线方面与马铃薯长势监测存在明显差异。

在现有马铃薯遥感标准方面，NY/T 4380.1—2023《农业遥感调查通用技术 农作物估产监测技术规范 第1部分：马铃薯》规定了马铃薯种植面积监测、长势监测、产量估算和产值估算等内容，主要适用于采用空间分辨率优于 30 m 的中高分辨率光学卫星遥感数据开展马铃薯主产区监测。其中，长势监测主要依据关键生育期植被指数及其多年变化情况进行等级判定。本标准则面向马铃薯大田垄作生产场景，以无人机多光谱遥感为主要技术手段，重点开展株高、冠层覆盖度、SPAD 值、叶面积指数、叶片氮含量等长势指标的地块尺度定量反演，并进一步规范变量筛选、模型构建、独立样本精度评价以及长势分级制图等环节。因此，两项标准在遥感平台、监测尺度、指标体系和技术方法方面存在明显区别，在马铃薯遥感监测技术体系中具有衔接和互补关系。

综上，国内现有标准已分别对农业无人机影像处理、农作物长势监测、马铃薯卫星遥感监测以及其他作物无人机遥感应用等内容进行了规定，但尚未形成针对马铃薯大田生产场景，以无人机多光谱为主要数据源，并覆盖地面长势调查、指标定量反演、模型精度评价、长势分级制图和监测报告编制全过程的专项技术规程。本标准是在充分衔接现有国家标准、行业标准和地方标准的基础上，对马铃薯无人机多光谱长势监测技术进行细化和补充，与现行相关标准不存在重复或矛盾，可进一步完善马铃薯精准监测及农业无人机遥感应用相关标准体系。

## 八、重大分歧或重难点的处理经过和依据

无。

## 九、贯彻该标准的要求、措施建议及预期效果

### 1. 贯彻该标准的要求和措施建议

为保障本标准落地转化为产业实际生产力，建议建立分层宣贯、试点先行、全域对接的三级落地推进体系，配套四项可执行的落地保障措施：

(1) 构建分级宣贯培训体系，实现核心岗位人员全覆盖

标准正式发布后，由标准归口管理单位牵头组建省级主产区师资培训专班，面向内蒙古、甘肃、河北、云南等四大马铃薯优势产区的各级农业遥感监测机构、农技推广部门、规模化种植基地、遥感技术服务商的一线作业人员开展分层系统培训。培训内容覆盖标准中全流程操作细节：包括无人机多光谱飞行作业参数设置、影像辐射校准与质量质控、地面长势同步采样规范、核心反演参数选取、模型精度核验方法、长势分级制图规则、标准化监测报告编制等全链条内容，确保一线操作人员完全理解标准的技术逻辑，熟练掌握所有规定动作，从人员能力层面保障标准执行不走样。

#### （2）推动业务场景强制对标，统一产业数据基准

建议将本标准纳入全国马铃薯主产区农情监测、产能预估、产业调度的统一技术规范，各级农业遥感监测机构在开展马铃薯长势调查、产量预估、灾害预警等官方业务工作时，严格对本标准规定的技术路径开展作业，彻底摒弃以往不同地区、不同机构各自为政、数据口径脱节的碎片化监测模式，从源头保障跨产区、跨年度监测数据的一致性、准确性和可比性，为全国马铃薯产业统一调度搭建标准化数据底座。

#### （3）建设标准化应用示范基地，形成可复制推广样板

依托乌兰察布、定西等核心马铃薯产区建设标准应用示范基地，严格按照标准全流程开展常态化长势监测试点，总结提炼一套可直接落地的县域级应用操作手册，通过示范基地的可视化效果，让种植主体直观感受到标准化遥感监测在节本增效、减灾稳产上的实际价值，带动全行业主动对标采用本标准开展业务。

#### （4）建立标准动态更新机制，适配技术迭代需求

同步搭建标准应用反馈收集渠道，定期汇总一线使用过程中的优化建议，结合无人机遥感技术迭代、产业新需求完成标准的版本修订，长期保持标准的技术先进性和生产适配性。

### 2. 贯彻该标准的预期效果

本标准的全面落地实施将填补马铃薯无人机长势监测领域的标准空白，实现行业监测作业从“经验驱动”向“标准驱动”的本质转变，形成显著的综合效益：

**社会效益：**推动我国马铃薯长势监测体系从传统“人工抽样巡查+经验判断”模式，全面转向“空天地协同遥感精准感知”的标准化业务模式，带动马铃薯生产管理全流程的信息化、规范化升级。通过技术下沉与基层农技人员能力提升，可快速加速农业遥感先进科技成果的转化落地，有效缓解北方旱作区、西部欠发达地区农技人员不足、农情覆盖效率低的痛点，形成一套可复制、可推广的主粮作物智能化

监测技术范式，为其他旱作粮食作物的遥感监测标准化提供参考样板，全方位支撑国家粮食安全监测体系建设。

**经济效益：**通过标准化流程替代高成本的全人工田间排查，直接将千亩级连片基地的长势监测人工成本降低 60%以上；依托统一标准输出的精准长势数据，可精准指导水肥变量调控、病虫害早期干预、灾害针对性防控，据主产区前期试点测算，规范化应用本标准后，马铃薯主产区氮肥利用率可提升 20%以上，因灾减产损失可降低 15%-25%，整体种植生产成本可压缩 8%-12%，全面提升马铃薯产业的整体盈利水平。

**生态效益：**依托标准支撑的精准变量管理体系，可从源头针对性减少化肥、农药的过量投入，有效降低马铃薯种植区的农业面源污染风险，同步提升水肥资源利用效率，大幅减少传统大水大肥种植模式造成的土壤板结、地下水超采等生态问题，推动马铃薯产业从“增量导向”全面转向“绿色高质量发展导向”，为我国旱作农业区的低碳可持续生产提供标准化技术支撑。

## 十、其他应说明的事项

无。