

# 中国农业绿色发展研究会团体 标准编制说明

## 《盐碱地小麦遥感监测技术规范》

（征求意见稿）

《盐碱地小麦遥感监测技术规范》编制组

二〇二五年九月

## 目 录

一、团体标准制修订背景、目的和意义 .....	1
二、工作简况 .....	2
三、标准编制原则和依据 .....	3
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 .....	15
六、采用国际标准的程度及水平说明 .....	20
七、与现行法律法规、强制性标准和其他有关标准的关系 ..	21
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 .....	21

# 《盐碱地小麦遥感监测技术规范》

## 一、团体标准制修订背景、目的和意义

土壤盐渍化已成为制约农业生产和经济可持续发展的主要障碍之一。在我国，各类可利用的盐碱地约 5.5 亿亩，大面积盐碱地资源的合理开发利用对缓解耕地压力、开拓粮食生产潜力具有重要意义。在保障粮食安全的战略背景下，盐碱地小麦种植面积逐渐增加，以滨海黄河三角洲地区为例，小麦播种面积从 2004 年的 126.71 万亩显著增长至 2023 年的 383.67 万亩，同期总产量由 18.73 万吨跃升至 68.65 万吨，增幅达 266%。然而，小麦作为盐敏感作物，其出苗率、营养生长和产量形成等关键生育阶段均易受盐分胁迫影响，不合理的土壤资源配置会导致盐胁迫下小麦缺苗率高、物质分配失衡、产量下降等问题。因此，强化盐碱地小麦的动态监测能力，基于不同生育时期的监测结果及时调整灌溉、施肥等农艺措施，对实现盐碱地小麦稳产增产至关重要。

受土壤盐分空间异质性影响，盐碱地块普遍存在"斑块化"分布特征，导致田块间及田块内小麦生长均匀度差异显著，传统的人工调查方法不仅效率低下，其监测代表性也难以保证监测结果的准确性。随着低空遥感技术的快速发展，无人机平台凭借其操作灵活、时空分辨率高等优势，已成为农业管理部门和生产单位开展作物监测的重要技术手段，针对小麦等作物形成了相关的模型方法，但在盐碱地区，针对盐胁迫条件下的小麦监测指标、监测时期、数据获取、模型构建等

方法缺乏统一规范和标准，难以有效反映作物生长和土壤盐渍化之间的交互过程。为提高盐碱地小麦监测能力，需要制定盐碱地小麦监测标准，提高动态、精准的监测能力，不仅为盐碱地小麦精准灌溉、变量施肥提供技术支撑，更能为盐碱障碍消减、种植制度优化等宏观决策提供科学依据。

## **二、工作简况**

### **1. 任务来源**

根据中国农业绿色发展研究会《关于征集 2025 年中国农业绿色发展研究会团体标准项目的通知》，标准制定计划项目名称为《盐碱地小麦遥感监测技术规范》。本标准属于新制定标准。

### **2. 编制过程**

#### **2.1 工作基础**

近年来，起草单位在国家重点研发计划课题“盐碱地生态种植方式天空地协同监测技术研究”、“保护性耕作条件下作物状况动态监测与诊断技术研究”，区域重大项目“景泰县盐碱地综合利用试点项目监测与评价平台建设”，区域创新课题“京津冀盐碱区土壤盐分精准监测技术及系统”等项目的支持下，团队成员长期从事作物遥感监测、评价、诊断、预警等方面的科学研究工作，并通过多年的理论研究与应用实践探索，取得一定的阶段性成果，掌握并总结了盐碱地小麦缺苗率、长势、产量无人机多光谱遥感监测的一系列关键技术，为编制该技术规程打下坚实的基础。

## **2.2 田间调研、试验监测**

团队成员曾在山东、河北滨海盐碱地区开展了小麦无人机多光谱遥感监测试验，在小麦生长发育、植物营养、产量形成及遥感监测等方面具有扎实的理论基础，并积累了丰富的科研数据，基于研究成果总结制定了小麦缺苗率、长势、产量监测技术。在田间进行了应用实践和可行性调研分析，农业生产相关技术人员针对个别问题提出相应建议，丰富了该技术规程。

## **2.3 起草制定**

2025 年 1 月，北京派得伟业科技发展有限公司成立了标准起草小组，根据研究和调研资料，开展技术标准研究和实验验证等工作，经过反复讨论与分析总结后提出了盐碱地小麦遥感监测技术规范，并向中国农业绿色发展研究会提交了标准立项申请。

## **3. 主要起草人及分工**

标准编制工作由北京派得伟业科技发展有限公司，北京市农林科学院信息技术研究中心，中国农业科学院农业资源与农业区划研究所等单位负责人组成的标准起草小组完成，其中卢闯、董士伟、李银坤负责总体设计、标准撰写等工作；单东方、任艳敏、李淑华负责数据采集和处理分析；顾晓鹤、李存军负责结果验证；潘瑜春、刘玉、郜允兵负责收集各方意见；武雪萍、余强毅、李文娟、陆苗按照规程内容提出修订意见。

## **三、标准编制原则和依据**

## **1. 编制原则**

### **1.1 统一性原则**

标准内容与现行国家标准、行业标准、地方标准层级分明；标准中术语、单位、格式与现行标准统一；技术要求不低于现行标准；在内容上与现行法律法规、标准协调一致。

### **1.2 科学性原则**

《盐碱地小麦遥感监测技术规范》的制定严格遵循科学性原则，以田间试验数据和实际应用效果为基础，同时通过广泛调研、征求意见和示范验证，确保技术内容的科学性。

### **1.3 适用性原则**

在标准制定过程中征询了相关领域专家学者、农技人员和农业生产者意见，充分考虑了实际需求，确保标准内容与生产实践紧密结合。标准条款设计注重实用性和可操作性，便于推广应用。

## **2. 编制依据**

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。

依据我单位开展的国家重点研发计划课题“盐碱地生态种植方式天空地协同监测技术研究”、“保护性耕作条件下作物状况动态监测与诊断技术研究”，区域重大项目“景泰县盐碱地综合利用试点项目监测与评价平台建设项目”，区域创新课题“京津冀盐碱区土壤盐分精准监测技术及系统”等相关试验数据及实验流程，并参考国家和农业行业相关标准作为编制依据，确保内容科学准确、规范可行。

## 四、标准主要条文或技术内容及其确定依据

本文件主要内容包括范围、规范性引用文件、术语和定义、缩略语、无人机多光谱影像获取与处理、缺苗率监测、长势监测、产量监测、监测成果 9 个部分。

### 1. 范围

根据标准内容,规定了利用无人机多光谱影像进行盐碱地小麦缺苗率、长势、产量监测的处理流程、技术方法以及成果报告编写等要求。确定本文件适用于滨海盐碱地区小麦遥感监测。

### 2. 规范性引用文件

基于标准内容中必要的术语定义来源、测试方法参考、制图技术规范等内容,引用了 GB/T 42828.3 盐碱地改良通用技术 第 3 部分:生物改良,GB/T 30115 卫星遥感影像植被指数产品规范,GB/T 37804 冬小麦苗情长势监测规范,GB/T 20257.1 国家基本比例尺地图图式 第 1 部分:1:500 1:1 000 1:2 000 地形图图式,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,NY/T 2419 植株全氮含量测定 自动定氮仪法。

### 3. 术语和定义

基于厘清概念出发,定义了盐碱地、多光谱影像、植被指数、缺苗率、长势、产量、生育时期共 7 个术语。对于已存在的定义,直接进行引用并标注了来源,部分未明确定义的术语,则通过查阅相关标准、论文等资料进行确定,其中术语“缺苗率”根据 GB/T 37804 中

缺苗率监测方法进行定义，缺苗率监测方法为：测量 3 行、每行 3 m 内的缺苗（5 cm 以上无苗）、断垄（连续 10 cm 以上无苗）累计长度，折算方法为缺苗断垄总长 $\div$ 9，用百分比（%）表示。定义缺苗率为：作物单位面积或单位行长中，无苗区域所占的比例。

#### 4. 缩略语

本标准给出了 6 个缩略语，包括实时动态差分测量系统（RTK）、缺苗率（SDR）、综合长势指数（CGI）、叶面积指数（LAI）、地上生物量（AGB）、植株含氮量（NC），缩略语包括了在标准中出现的，经常用到但是没有明确的术语，或者是本行业常用的缩略语，符合简洁性的要求。

#### 5. 遥感影像获取与处理

本文件首先制定了盐碱地小麦遥感监测中无人机多光谱影像获取与处理的技术流程，涵盖设备选型、飞行参数、影像处理等关键环节，为后续小麦指标监测提供了一致性和通用性的数据基础。

##### 5.1 监测设备

无人机多光谱影像获取系统由飞行器、云台、RTK 定位、多光谱传感器、电池、遥控器等部件组成，多光谱传感器应至少具备蓝波段、绿波段、红波段、红边波段、近红外波段。

其中，蓝波段对裸露土壤反射率高，在作物监测中可减少土壤干扰；绿波段在健康小麦叶片反射率较高，盐胁迫条件下反射率下降；红光波段能够反映小麦叶片的光合活性，盐胁迫下反射率升高；红边对叶绿素吸收和高生物量响应更加敏感；近红外波段能够敏感表征冠



层生物量和植被覆盖度。

## 5.2 监测时期与频次

在对易受土壤盐碱影响的小麦关键生育时期获取无人机多光谱影像，至少应包括小麦分蘖期、返青期、拔节期、孕穗期、开花期、乳熟期。

监测时期的设定依据为小麦对盐分胁迫的生理敏感性、形态响应规律以及田间管理的干预节点。分蘖期是小麦形成有效分蘖的关键时期，通过监测缺苗率可评估盐害程度，根据监测结果采取补苗或促进分蘖的管理措施；返青期缺苗率监测是调整春季管理措施并确保小麦群体恢复的关键依据；拔节期盐分影响茎秆机械强度，孕穗期盐胁迫导致穗分化异常，开花期盐害干扰花粉活力，在此三个时期进行长势监测能够评估春季盐害程度，优化田间管理，为小麦产量形成奠定基础；开花期、乳熟期是准确进行产量监测的重要窗口时期。

监测频率为每个关键生育时期至少监测 1 次，在春季返盐高峰期（如拔节期）以及田间灌水前、灌水后应适当加密监测。

关键生育期至少监测一次，能够获取小麦不同发育阶段的基准特征，建立生育期生长曲线；在春季返盐高峰期加密监测，确保捕捉快速变化的盐害特征；灌水前后加密监测，能够获取盐分胁迫水平，并评估水分的淋盐效应和小麦恢复动态。

### 5.3 监测基本要求

本部分规定了无人机空管、监测环境、监测时间、地面分辨率、辐射定标等方面的基本要求。其中，2cm地面分辨率可确保单个像元覆盖1株小麦，避免混合像元效应，实现缺苗区域精准识别，同时可减少土壤背景干扰，提升叶面积指数等长势指标的反演精度。

### 5.4 多光谱影像获取与处理

无人机多光谱影像获取与处理应按照NY/T 4151的规定执行。

本文件界定了常用植被指数包括归一化差值植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）、增强植被指数（Enhanced Vegetation Index, EVI）、归一化差异红边指数（Normalized Difference Red Edge, NDRE）、绿色归一化差异植被指数（Green Normalized Difference Vegetation Index, GNDVI）、叶绿素吸收比率指数（Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index, MCARI）、土壤调整植被指数（Soil-Adjusted Vegetation Index, SAVI），其中 NDVI 能够提高叶面积指数评估性能，EVI 减少高植被覆盖情况下的饱和问题，NDRE 增强高生物量期敏感性，GNDVI 适用于差异化覆盖度下的生物量及含氮量监测，MCARI 对叶绿素和含氮量变化较为敏感，SAVI 适用于早期生长和低覆盖度盐碱地小麦监测

## 6. 缺苗率监测

### 6.1 监测指标及监测时期

基于小麦分蘖期至返青期获取的无人机多光谱影像监测小麦缺

苗率，数值越大表示缺苗比例越高。

## 6.2 监测模型构建

### 6.2.1 植被指数筛选

基于遥感图像处理软件筛选植被指数，基于 Jeffries-Matusita 距离法（J-M 距离）评估各植被指数对小麦与土壤的区分能力，选择 J-M 距离值大于 1.0 且数值最大的植被指数。

J-M 距离通过计算类别间的统计可分性，能直接量化不同植被指数对小麦、土壤分类的判别能力，J-M 距离的数值范围是 $[0,2]$ ，J-M 距离值越大代表着目标两种地物之间差异越大，有利于目标地物分离。当  $0 \leq J-M < 1$  时，说明两个类别不具备可分性，需合并处理；当  $J-M \geq 1$  时，说明两个类别具有一定的可分性，需要对样本进一步筛选。

### 6.2.2 小麦行提取

采用最大类间方差法确定小麦与土壤的分割阈值，使用霍夫变换方法检测小麦行直线，角度容差 $\pm 2^\circ$ ，以行中心线为基准，按实际行距生成平行缓冲区。

在标准中采用最大类间方差法（Otsu 算法）确定小麦与土壤的分割阈值，主要依据是此方法在盐碱地复杂背景下具有一定的鲁棒性和计算高效性，通过最大化小麦与土壤的类间方差，自动寻找最优分割阈值，可适用于不同监测时期、不同盐渍化程度等场景；采用霍夫变换检测小麦行中心线，其抗干扰性强，能精准识别断裂、弯曲的麦行，容差 $\pm 2^\circ$ 的设计可兼容自然弯曲，满足缺苗率计算精度需求，进而判定缺苗场景。

### 6.2.3 缺苗检测

沿小麦行中心线以像元间隔（即影像地面分辨率）采样植被指数值，连续10 cm长的植被指数值低于分割阈值则记为缺苗。

### 6.2.4 缺苗率计算

监测区域缺苗率的计算公式如下

$$SDR = l / L \times 100\% \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$SDR$  ——小麦缺苗率，%；

$l$  ——统计单元内小麦缺苗长度，cm；

$L$  ——统计单元内小麦行总长度，cm。

## 6.3 精度验证

应用网格化抽样方法，在监测区内选取不少于30个样方进行地面调查，网格大小应按照无人机影像覆盖大小确定。地面调查时间与无人机多光谱影像获取时间前后相差不超过2天，在每个样方内按照GB/T 37804规定的方法调查小麦缺苗率，并使用RTK定位记录样方位置。

选择决定系数（ $R^2$ ）作为精度评价指标，按照公式（2）计算，决定系数 $R^2$ 应 $\geq 0.6$ ，精度验证不合格则应优化缺苗信息检测方法，直至满足精度要求。

## 7. 长势监测

### 7.1 监测指标及监测时期

小麦长势监测指标包括叶面积指数、地上生物量、植株含氮量，基于长势指标监测结果构建综合长势指数CGI，以综合反映小麦的生长状况。长势监测时期为小麦拔节期至开花期，每次监测需同步获取3项监测指标。

选择此3项指标进行监测，主要依据是其对盐胁迫的敏感性，以及无人机高效监测的可行性：研究表明盐胁迫下小麦叶片的长度、宽度生长受到显著抑制，体内光合作用受到影响，植株合成叶绿素的含量相对减弱，进一步导致干物质积累迟缓；另一方面，叶面积指数、地上生物量、植株含氮量的光谱响应明确，反演算法经过田间试验验证，能够满足动态监测需求，适合进行标准化推广。

### 7.2 长势监测指标模型构建与精度验证

#### 7.2.1 地面样品采集与测试

应用网格法均匀布设样方进行地面样品采集与测试，样方数量应满足模型构建和验证计算要求，一般不少于30个，网格大小应按照无人机影像覆盖大小确定。地面测试时间与无人机多光谱影像获取时间前后相差不超过2天。

在每个样方分别按照GB/T 37804、NY/T 4373、NY/T 2419中规定方法测试小麦叶面积指数、地上生物量、植株含氮量，并使用RTK定位记录样方位置。将地面测试数据按7:3比例划分为训练样本和验证样本，训练样本应用于构建预测模型，验证样本应用于检验模型精

度。

### 7.2.2 植被指数筛选

根据地面测试样方位置信息提取多种植被指数作为备选,运用相关性分析分别筛选出与小麦叶面积指数、地上生物量、植株含氮量相关系数高于 0.5 的敏感植被指数。

相关系数分析法作为一种常用的较为基础的变量筛选分析方法,具有较好的普适性,基于相关系数的指数筛选方法与后续不同机器学习反演模型均具有较好的契合度。训练样本 $\geq 21$ 时,相关性阈值设定为 0.5 属于中高度相关( $p < 0.05$  时,  $n=21$  的临界  $r$  值为 0.433;  $p < 0.01$  时,  $n=21$  的临界  $r$  值为 0.549),能有效排除随机噪声干扰。

### 7.2.3 反演模型建立

以敏感植被指数为自变量、长势指标地面测试数据为因变量,根据样本量、数据维度选择多元线性回归、随机森林、极端梯度提升、神经网络等机器学习方法,分别建立小麦叶面积指数、地上生物量、植株含氮量的反演模型。

在实际应用中根据样本量、数据维度选择模型,多元线性回归通过建立植被指数与长势指标的线性组合方程实现快速反演,计算效率高;随机森林基于多棵决策树的集成学习,能自动筛选重要特征并处理高维数据,对噪声和过拟合具有较强鲁棒性;极端梯度提升适合小样本下的高精度反演;神经网络算法则通过多层非线性变换拟合复杂光谱—生理关系,对大数据集表现优异。

### 7.2.4 精度验证

基于验证样本对模型进行精度验证，选择决定系数 ( $R^2$ ) 作为精度评价指标，决定系数  $R^2$  应  $\geq 0.6$ ，精度验证不合格则应重新筛选敏感植被指数，更换或重新训练反演模型，直至满足精度要求。

盐胁迫下小麦长势变异性较大， $R^2 \geq 0.6$  可满足模型的最低实用精度要求，在异质环境下具有一定的泛化能力。

## 7.3 综合长势指数构建与分级

### 7.3.1 综合长势指数构建

利用敏感植被指数及训练好的反演模型对整个监测区域进行长势指标监测。叶面积指数、地上生物量、植株含氮量对于表征小麦长势的贡献度均等，构建小麦综合长势指数 CGI，综合评估冠层结构、生物量和氮代谢，避免片面判断，提升胁迫诊断全面性。

### 7.3.2 长势分级

基于综合长势指数，参考表1进行小麦综合长势分级。

表1 小麦综合长势分级

小麦综合长势分级	好 (1级)	较好 (2级)	正常 (3级)	较差 (4级)	差 (5级)
小麦综合长势指数区间	[0.80, 1.00]	[0.60, 0.80)	[0.40, 0.60)	[0.20, 0.40)	[0.00, 0.20)

## 8. 产量监测

### 8.1 监测指标及监测时期

基于小麦开花期至乳熟期获取的无人机多光谱影像进行产量遥感监测。

作为物质积累与营养代谢的最终体现，对产量进行监测具有核心价值，尤其在盐胁迫环境中，产量监测不仅可量化盐碱改良措施的实际效果，更能结合长势监测评估产量损失的关键生理环节。

将开花期至乳熟期作为产量监测窗口，能够兼顾监测效率与精度。研究表明，开花期和乳熟期是决定穗粒数和千粒重的关键时期，此时的遥感植被指数和成熟期产量具有较高的相关性，基于多时期影像的监测效果优于单一时期，无人机多光谱能通过植被指数变化进行产量监测并提前预警减产风险。

## 8.2 监测模型构建

按照 7.2.1 中的方法布设地面测产样方并划分训练样本和验证样本，地面测产时间为小麦成熟期，测产方法按照 NY/T 4373 规定执行。

根据地面测产样方位置信息提取开花期至乳熟期的多种植被指数作为备选，运用相关性分析筛选出与小麦产量相关系数高于 0.5 的敏感植被指数。

以敏感植被指数为自变量、地面测产数据为因变量，根据样本量、数据维度选择多元线性回归、随机森林、极端梯度提升、神经网络等机器学习方法，建立小麦产量的反演模型。

## 8.3 精度验证

基于验证样本，采用 6.3 中的方法进行模型精度验证，决定系数  $R^2$  应  $\geq 0.6$ ，精度验证不合格则应重新筛选敏感植被指数，更换或重新训练反演模型，直至满足精度要求。



## **9 监测成果**

### **9.1 专题制图**

制作小麦缺苗率、长势、产量的遥感监测空间分布专题图以及综合长势分级图，要素应包括图例、指北针、经纬度坐标、比例尺和图名等。

### **9.2 监测报告**

监测报告内容应包括监测时间、监测区域、无人机飞行参数、传感器参数、监测技术流程、模型构建和精度评价等信息。监测结果宜采用统计表格和图片等形式呈现，统计表格包括监测区小麦缺苗率、长势、产量的统计信息。图片信息应包括地面实测样方照片和小麦缺苗率、长势、产量的遥感监测空间分布专题图。

## **五、主要试验、验证及试行结果**

### **1. 研究区**

研究试验区位于山东省东营市黄河三角洲农业高新技术产业示范区的实验基地中，属滨海盐碱类型区，地下水埋深浅、矿化物高，土壤盐分重，主要以氯化物为主。该地区主要种植冬小麦、玉米和大豆等一年两熟作物。在研究区选择了3个不同盐渍化程度的试验田A、B、C进行试验和验证工作。

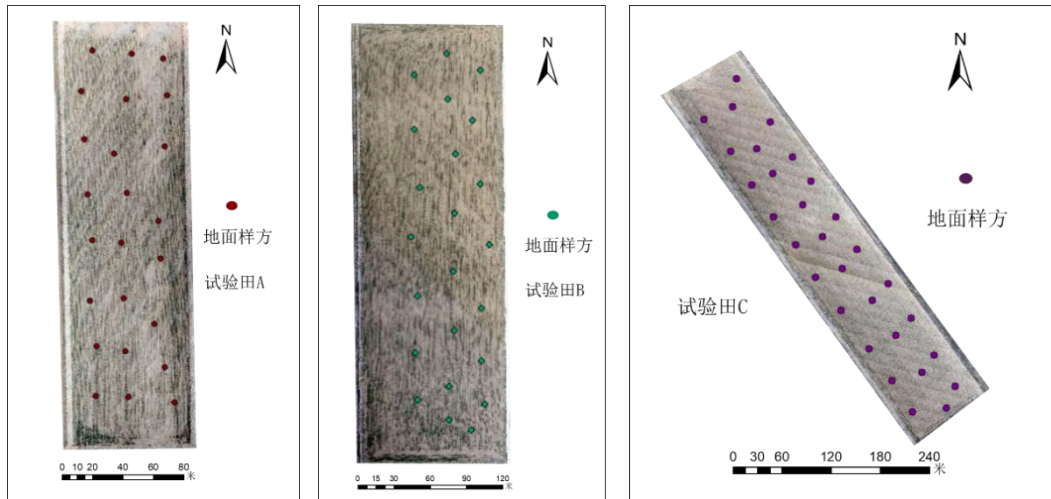


图 1 研究区位置

## 2. 无人机影像获取和处理

影像采集设备是大疆精灵 4 多旋翼无人机，搭载 P4M 多光谱相机，蓝波段  $450\text{ nm} \pm 16\text{ nm}$ ，绿波段  $560\text{ nm} \pm 16\text{ nm}$ ，红波段  $650\text{ nm} \pm 16\text{ nm}$ ，红边波段  $730\text{ nm} \pm 16\text{ nm}$ ，近红外波段  $840\text{ nm} \pm 26\text{ nm}$ ，200 万像素。无人机拍摄时间为晴朗无云无风天气的 11:00-13:00。起飞前手动将无人机放置于 20%、60%、99% 三块反射率定标板的正上方，拍摄反射率板照片。飞行航线由 DJI GS Pro 以当前的方位角自动计算后规划得出。影像分辨率为 1.6 cm。无人机飞行高度为 30 m，飞行速度 2m/s，航向重叠率为 80%，旁向重叠率为 75%。利用大疆制图软件进行影像处理，使用 ArcGIS 软件进行图像裁剪和光谱指数提取。

## 3. 地面样本采集

使用网格法在监测区布设地面测定样方，在分蘖期和返青期测定小麦缺苗率(%)；在拔节期至开花期测定叶面积指数，在样方内取 10 茎小麦的全部绿色叶片，测量面积和占地面积，计算出叶面积指数；

将叶面积指数测定的 10 茎小麦放入鼓风干燥箱内，105 °C 密封条件下高温处理 30 min，再将温度调至 75 °C 烘至恒定质量，称取样品干重，根据取样面积换算为每亩地上生物量干重；利用凯氏定氮仪法测定植株含氮量；在成熟期测量小麦产量。

#### 4. 缺苗率监测

基于小麦返青期获取的无人机多光谱影像对试验田 A 进行缺苗率监测。首先通过 Jeffries-Matusita 距离法 (J-M 距离) 评估了多种植被指数对小麦与土壤的区分能力，结果显示土壤调整植被指数 SAVI 的 J-M 距离达到 1.53，优于其他指数。随后采用最大类间方差法确定了小麦与土壤的分割阈值为 0.21，低于阈值则为土壤。利用霍夫变换方法检测小麦行直线（角度容差 $\pm 2^\circ$ ），生成行中心线平行缓冲区。沿小麦行中心线以 1.6 cm 像元间隔采样 SAVI 值，统计连续 10 cm 长的 SAVI 值低于阈值的区域为缺苗。最终计算得到监测区地块平均缺苗率为 8.7%，试验证实植被指数结合 J-M 距离法能有效支持盐碱地小麦缺苗率的精准监测。

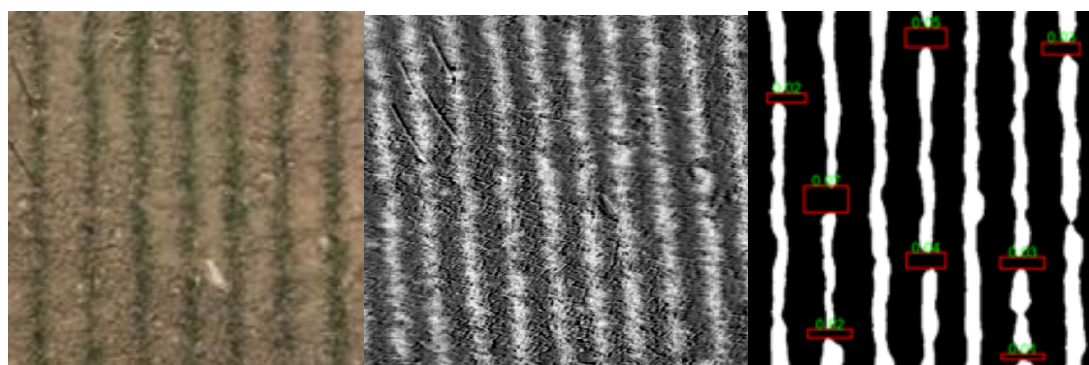


图2 小麦分割与缺苗检测结果

#### 5. 长势监测

对试验田 C 进行长势监测。随机抽取 70% 的样本用于模型训练，

30%的样本用于模型验证。将基于拔节期无人机多光谱影像获取到的植被指数与小麦叶面积指数、地上生物量、植株含氮量进行相关性分析，结果如表 2 所示，选择相关系数>0.5 的植被指数作为自变量构建长势监测模型。

表2 小麦植被指数与地面长势监测指标的相关性分析

植被指数	叶面积指数	地上生物量	植株含氮量
NDVI	0.547*	0.574*	0.503*
EVI	0.402	0.424*	0.425
NDRE	0.504*	0.521*	0.435*
GNDVI	0.446*	0.454*	0.469*
MCARI	0.449*	0.415	0.518*
SAVI	0.489*	0.444*	0.405

分别采用多元线性回归（MLR）、随机森林（RF）、极端梯度提升（XGBoost）方法构建长势反演模型。采用决定系数（ $R^2$ ）对模型性能进行评估。模型的验证精度结果见表 3。可以看出，对于不同指标反演，三种机器学习模型的验证  $R^2$  值均大于 0.60，表明三种机器学习模型均能有效满足精度要求，其中，XGBoost 模型表现最佳，叶面积指数、地上生物量、植株含氮量的验证  $R^2$ 值分别达到了 0.69、0.71、0.66。

表3 机器学习模型精度统计

监测指标	模型	训练集		验证集	
		$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
叶面积指数	MLR	0.68	0.17	0.63	0.18
	RF	0.69	0.14	0.65	0.19
	XGBoost	0.74	0.11	0.69	0.17
地上生物量 (g/m <sup>2</sup> )	MLR	0.68	5.12	0.61	6.46
	RF	0.73	4.90	0.69	6.36
	XGBoost	0.75	4.84	0.71	5.94
植株含氮量 (%)	MLR	0.66	0.29	0.61	0.40
	RF	0.64	0.33	0.61	0.39
	XGBoost	0.7	0.26	0.66	0.30

基于反演的监测区叶面积指数、地上生物量、植株含氮量构建小麦综合长势指数分布如图 3 所示。

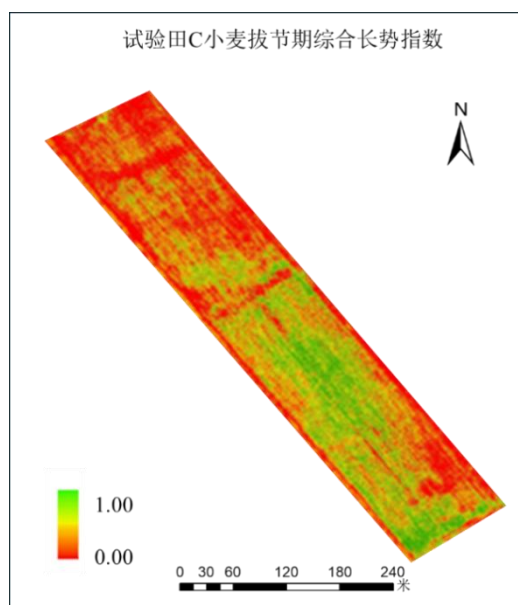


图3 拔节期综合长势分布图

## 6. 产量监测

对试验田 B 进行产量监测，基于小麦开花期和乳熟期获取的无人机多光谱影像，首先运用相关性分析筛选与产量显著相关的植被指数。结果显示，开花期 NDVI ( $r=0.62$ )、EVI (0.63)、NDRE (0.58)、GNDVI (0.55)，乳熟期 NDVI ( $r=0.55$ )、EVI (0.57)、NDRE (0.53)、GNDVI (0.50) 与产量的相关性较高（表 4）。随后，基于筛选的植被指数和地面实测产量数据，分别采用多元线性回归（MLR）、随机森林（RF）和极端梯度提升（XGBoost）构建产量反演模型。模型精度对比表明（表 5），XGBoost 在训练集和验证集均表现最优（验证集  $R^2=0.78$ 、RMSE=41.3 kg/亩），优于 RF（验证集  $R^2=0.74$ ，RMSE=43.3 kg/亩）和 MLR（验证集  $R^2=0.65$ ，RMSE=50.5 kg/亩）。最终采用 XGBoost 模型生成产量空间分布图，监测区域平均产量为 386.7 kg/

亩。试验验证了多时相植被指数结合机器学习方法可有效提升盐碱地小麦产量监测精度。

表4 植被指数与产量的相关系数

生育时期	NDVI	EVI	NDRE	GNDVI	MCARI	SAVI
开花期	0.62*	0.63*	0.58*	0.55*	0.48	0.45
乳熟期	0.55*	0.57*	0.53*	0.50*	0.40	0.48

表5 产量监测模型精度对比

模型	训练集		验证集	
	R <sup>2</sup>	RMSE (kg/亩)	R <sup>2</sup>	RMSE (kg/亩)
MLR	0.71	44.7	0.65	50.5
RF	0.82	36.7	0.74	43.3
XGBoost	0.85	34.0	0.78	41.3

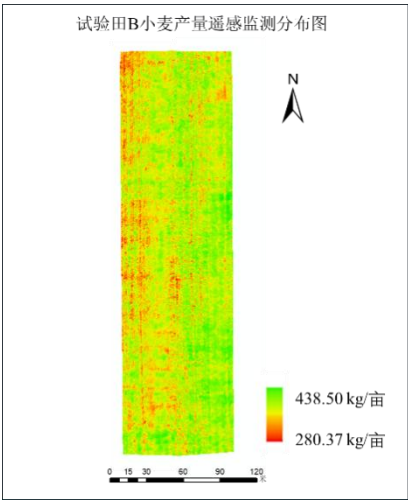


图 4 试验田 B 小麦产量遥感监测分布图

六、采用国际标准的程度及水平说明

在小麦监测标准方面，虽然目前已经有《中高分辨率卫星主要农作物长势遥感监测技术规范》（NY/T 3922-2021），但是该标准适用于卫星遥感监测，不适用于盐分时空间变异下小麦快速变化过程监测，无人机遥感具备厘米级分辨率、按需观测的灵活性，可精准识别盐碱

斑块分布下的小麦胁迫响应特征，在基于无人机多光谱影像的小麦监测方面，国内外目前尚无同类标准。

## **七、与现行法律法规、强制性标准和其他有关标准的关系**

本标准符合《中华人民共和国标准化法》、《中华人民共和国标准化法实施条例》、《国家标准管理办法》、《中华人民共和国统计法》等国家有关法律法规的规定。无与本标准有冲突、矛盾和相关的强制性（国家、行业、地方）标准，具备协调一致性。

## **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、强化标准宣贯与培训**

在标准发布后，联合农业科研院所、技术推广站等单位，通过举办专题培训会、现场观摩会等形式，向农业管理部门、种植户及农技人员系统讲解标准内容，重点培训无人机数据采集规范、植被指数应用及模型构建方法，提升从业人员的技术执行能力。

### **2、建立典型示范区**

在盐碱地典型区域设立标准化监测示范点，展示规范化的无人机航测流程、数据处理方法及田间测试方法，通过实际案例验证标准对小麦缺苗率诊断、长势评估和产量预测的优化效果，增强推广力度。

## **十、其他应说明的事项**

无