

# 中国农业绿色发展研究会团体标准 编制说明

## 《基于无人机和地面高光谱的旱地红壤有机质三维反演技术规程》

（征求意见稿）

《基于无人机和地面高光谱的旱地红壤有机质三维反演技术规程》编制组

二〇二六年四月

## 目 录

一、团体标准制修订背景、目的和意义 .....	1
二、工作简况 .....	4
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 .....	7
五、主要试验、验证及试行结果 .....	16
六、采用国际标准的程度及水平说明 .....	19
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 .....	20
九、贯彻该标准的要求、措施建议及预期效果 .....	20
十、其他应说明的事项 .....	20
参考文献 .....	21

# 《基于无人机和地面高光谱的旱地红壤有机质三维反演技术规程》

## 一、团体标准制修订背景、目的和意义

### 1、及时掌握旱地红壤有机质三维空间变异信息，是开展红壤退化阻控与治理的重要支撑之一

红壤在我国南方热带与亚热带地区耕地中占据较大比例。广义红壤是指该区域广泛分布的各类红色或黄色土壤，其典型特征为碱金属与碱土金属淋失显著、铁铝氧化物富集，整体呈酸性红色。红壤区光、热、水资源充足，生长季长，具备一年两熟乃至三熟的生产潜力。然而，红壤旱地多分布于丘陵山区坡耕地，地块规模小且分散、破碎化程度高，长期强烈风化导致其基础地力偏低。在高强度耕作与不合理利用引发的水土流失等因素叠加影响下，部分红壤旱地出现土壤贫瘠化、酸化等耕地质量问题。提升旱地红壤肥力水平，是释放其生产潜力的前提与基础。

有机质是评价农田土壤肥力的关键指标，它控制着土壤持水能力以及供植物生长所需的养分有效性。此外，土壤是陆地最大碳库，土壤有机碳的长期储存也与大气  $\text{CO}_2$  浓度直接相关。在农田尺度上，土壤有机质空间变异主要受地形条件和施肥等农业管理措施影响，这些因素不仅显著影响耕作层土壤有机质含量，也会改变其垂向分布格局。因此，制定合理的农业管理措施并科学评估其实施效果，需要准确获取农田土壤有机质的三维空间分布信息。

### 2、融合无人机与近地光谱数据开展农田土壤养分三维制图的研究已成为热点，相关技术的发展正助推绿色农业的发展

农田尺度土壤有机质水平及垂直变异性的准确刻画，即高精度土壤有机质三维制图，通常依赖大量、高密度、多深度的实测数据。传统的土壤采样与实验室理化分析方法耗时、费力且成本较高，且部分分析过程需要使用化学试剂，可能对环境造成一定影响，难以满足高精度土壤制图与动态监测的需求，也不契合绿色农业的发展理念。

近年来，近地土壤传感技术的快速发展为多深度土壤属性的快速测定与预测提供了新的技术途径。其中，可见—近红外漫反射光谱技术因具有快速、低成本、无污染和高通量等优势而受到广泛关注。该技术的光谱范围覆盖可见光和近红外波段，包含丰富的土壤化学组成信息。通过建立光谱数据与土壤属性之间的定量关系模型，可在一次光谱扫描中同时获取多种土壤属性信息，实现大量样本的快速预测。

已有多项研究表明,可见—近红外光谱技术对土壤有机质具有较好的预测能力。因此,该技术在数字土壤制图,尤其是田块尺度土壤有机质三维制图中具有良好的应用前景,能够快速、高密度获取土壤剖面有机质信息,显著降低采样与实验分析成本,提高制图效率与精度。

与此同时,随着高分辨率遥感器、近地传感器、机器学习和移动通信等技术的发展,融合无人机遥感与近地光谱观测的土壤信息获取技术逐渐成为精细尺度耕地质量监测的重要手段。针对南方红壤区多云多雨、农业劳动力短缺以及耕地地块规模小且空间破碎化程度高等特点,该技术在田块尺度土壤信息快速获取方面具有明显优势。高光谱成像将连续光谱信息与高分辨率空间信息相结合,显著提升了土壤属性空间制图能力,可实现大范围、高精度的土壤属性分布绘制。与卫星高光谱遥感相比,无人机高光谱遥感更适用于红壤丘陵区的耕地土壤质量监测。无人机平台能够获取厘米级空间分辨率的成像高光谱数据,具有更高的空间和光谱分辨率,并且受云层影响较小,飞行时间和航线规划灵活,可在作物轮作或裸土期获取土壤光谱信息,整体运行成本相对较低。基于可见—近红外反射光谱的机载高光谱遥感技术已被广泛应用于小区域表层土壤碳含量制图。

在此基础上,将地面近地光谱技术与无人机载高光谱影像相结合,可充分发挥二者在光谱精度与空间覆盖方面的互补优势,实现高分辨率条件下土壤有机质三维分布格局的精细化制图。具体而言,可利用地面近地光谱建立土壤有机质预测模型,并以无人机高光谱影像及其提取的高精度地形因子作为空间协变量,将点位预测结果扩展为田块尺度连续分布,从而实现耕地土壤有机质的三维空间制图。

### **3. 标准化监测是当前发展趋势**

**3.1 国家有要求。**近年来,国家高度重视耕地保护与质量提升工作,对耕地退化治理、耕地质量监测和数字农业建设提出了明确要求。2025 年中央一号文件提出要“加强东北黑土区侵蚀沟、南方酸化退化耕地治理”,并明确支持发展智慧农业,拓展人工智能、数据、低空等技术应用场景。这表明我国耕地保护工作已由单纯的数量保护逐步向数量、质量与生态并重转变,对耕地质量监测与评价提出了更高要求。

《“十四五”全国农业绿色发展规划》《全国智慧农业行动计划(2024—2028 年)》等政策文件也明确提出,要建立健全耕地质量监测网络,推进农业数字化转型,强化遥感、传感器和智能化技术在农业资源监测中的应用,并加快完善智慧农业技术标准体系和通用技术规范。这些政策为利用无人机遥感、近地传感和机器学习等技术开展农田土壤信息获取提供了重要政策依据。

**3.2 地方有需要。**在国家政策框架下,南方各省也相继出台相关政策,加强耕地质量监测与退化耕地治理工作。例如,福建省提出建

立健全全省耕地质量监测网络体系，加强耕地质量动态监测与预警指导；海南省提出完善耕地质量监测网络建设，持续跟踪耕地质量变化；江西省强调健全耕地数量与质量监测监管机制；广东省提出强化耕地质量监测监管并建立动态监测机制。通过这些政策部署，各省逐步形成了以监测网络建设、动态评价和信息化管理为核心的耕地质量监管体系。

南方地区普遍面临耕地酸化、养分流失和耕地质量退化等问题，一些省份已将酸化退化耕地治理列为重点任务。例如，湖南省在酸化耕地治理重点县建设中提出对低 pH 耕地开展集中治理并持续监测治理效果；广西壮族自治区也提出开展酸化耕地治理试点，并加强土壤质量监测与效果评价。这些治理任务对土壤监测技术提出了更高要求，需要能够在田块尺度获取精细、可靠且可重复的土壤属性信息，以支撑治理措施实施与效果评估。

随着数字农业和智慧农业建设的推进，各省普遍鼓励将遥感、传感器和无人机等新技术应用于农业资源监测和农田管理，逐步建立覆盖土壤、作物和环境要素的综合监测体系

#### **4. 新形势下存在的问题**

随着相关技术的发展，在新形势下仍面临一些挑战。一是技术体系尚不成熟。目前土壤有机质三维制图、无人机与近地光谱融合应用以及田块尺度三维反演监测仍主要停留在科研试验阶段，尚未形成稳定的业务化运行体系。二是标准规范尚不完善。经查询全国标准信息公共服务平台，现行与土壤有机质监测及数字土壤制图相关的标准主要集中在土壤检测、传统土壤制图和农业遥感专题制图领域。例如，国家标准《GB/T 47213—2026 数字土壤制图 土壤属性预测性制图规范》即将实施，《数字土壤制图 土壤类型预测性制图规范》也已启动立项；相关行业标准包括《NY/T 1121.6—2006 土壤检测 第 6 部分：土壤有机质的测定》《NY/T 4150—2022 农业遥感监测专题制图技术规范》《NY/T 4734—2025 农作物空间分布遥感制图技术规范》等。地方层面也已出现《DB1301/T 501—2024 耕地表层土壤有机质含量遥感监测规程》《DB50/T 1449—2023 茶园土壤有机质高光谱检测技术规范》等相关标准，表明地方已开始探索利用遥感和高光谱技术开展土壤有机质监测。但总体来看，现有标准多聚焦于土壤属性检测方法或表层二维遥感监测，对融合无人机高光谱与近地光谱数据开展田块尺度土壤有机质三维制图的技术流程、术语定义、数据处理方法和精度评价要求仍缺乏统一规范。

综上所述，红壤区耕地质量提升和退化治理迫切需要获取农田土壤有机质的三维空间分布信息。近年来，融合近地光谱与无人机高光谱遥感的多源传感技术为田块尺度土壤有机质三维制图提供了新的

技术途径，已成为数字土壤制图的一个重要发展方向。与此同时，国家和地方层面均对耕地质量监测、退化耕地治理和智慧农业建设提出了明确要求。然而，相关技术仍处于科研探索阶段，目前缺乏统一的技术规范和标准体系。因而，有必要制定基于无人机与近地光谱的旱地土壤有机质三维制图技术标准，以规范数据获取、模型构建和精度评价流程，其推广实施可有效提升监测结果的准确性与可比性，对于构建国家耕地质量监测网络、服务农业可持续发展具有重要战略意义。

## **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 2025 年第三批 4 项团体标准立项的公示》（农绿（培）〔2025〕8 号）文件，《基于无人机和地面高光谱的旱地红壤有机质三维反演技术规程》团体标准获立项制定，起草单位为中国科学院南京土壤研究所、南京信息工程大学、江苏第二师范学院、中国农业科学院农业资源与农业区划研究所。

### **2. 主要工作过程**

#### **2.1 立项前准备**

2024 年 3 月，根据中国农业绿色发展研究会《关于举办 2024 年团体标准缩写培训班的通知》（农绿（培）〔2024〕1 号）的要求，项目组安排解宪丽、邱诺曦等参加培训，了解农业绿色技术标准体系，掌握团体标准研制、编写规则，熟悉团体标准制修订程序和各阶段审定要求。2024 年 10 月，项目组安排解宪丽、郑光辉、邱诺曦、李开丽、刘杰等，根据中国农业绿色发展研究会的要求，结合国家农业重大科技项目课题“南方酸化红黄壤监测和治理智能决策技术研究”相关研究成果，开展资料收集、调研、技术标准研究、实验验证等工作，编写团体标准草稿，适时进行修改完善，尽快达到立项条件。2025 年 3 月，项目组按照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》要求提交了立项申请材料。

#### **2.2 项目组成员成立与任务分工**

2025 年 9 月，标准制定任务下达后，起草单位组织相关人员组建成立标准起草工作组，并对文献收集、标准起草、意见征求、标准审定、标准报批等工作进行分工，明确各自任务和职责，以确保标准制定任务的顺利实施。

#### **2.3 实地调研与专家咨询**

为提高本标准的适用性和规范性，起草工作组赴江西、湖南等红壤区省市进行调研，并与当地科研人员和技术推广人员进行座谈、交流与讨论，了解当地旱地红壤肥力现状、监测手段和技术要点等情况。

#### **2.4 资料收集与标准起草**

起草工作组收集整理了我国已发布与土壤质量、土壤监测、土壤遥感、土壤光谱、数字土壤制图、农业遥感、智慧农业、无人机遥感等相关的标准共 53 项，其中国家标准 14 项、行业标准 15 项、地方标准 24 项，土壤遥感监测、土壤光谱反演、土壤三维制图等相关论文和著作 30 余篇/本，并进行了深入细致的研究。结合近年来起草工作组的研究成果与生产经验，起草工作组按照国家标准 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》要求，确定了本标准的初步框架，并起草形成工作组讨论稿。在此基础上，起草工作组组织土壤遥感与土壤制图专家及起草人员召开标准起草征求意见会，集中对标准的范围、主要技术指标、最新技术采用等内容进行了讨论，最终确定了标准的主要内容，并起草形成标准文本及其编制说明的征求意见稿。

### 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
解宪丽	女	副研究员	中国科学院南京土壤研究所	组织、协调，确定标准框架；标准文本、编制说明等起草
郑光辉	男	教授	南京信息工程大学	标准文本、编制说明等起草
李开丽	女	讲师	江苏第二师范学院	标准文本、编制说明等起草
刘杰	男	助理研究员	中国科学院南京土壤研究所	技术内容和指标确定
陆苗	女	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
赵玉国	男	研究员	中国科学院南京土壤研究所	技术内容和指标确定
邱诺曦	女	研究生	中国科学院南京土壤研究所	标准文本、编制说明等起草；文献收集与整理、意见征求
史泽峰	男	研究生	南京信息工程大学	文献收集与整理、意见征求
方乐雅	女	研究生	中国科学院南京土壤研究所	文献收集与整理、意见征求

## 三、标准编制原则和依据

### 1. 编制原则

本技术规程的编制遵循《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》《中华人民共和国农业法》《中华人民共和国土地管理法》以及《国家标准管理办法》等法律法规和政策文件的有关规定，并参考相关国家标准、行业标准和地方标准的技术要求。在编制过程中，以科学性、先进性与实用性为核心原则，立足于土壤光谱反演、无人机遥感和数字土壤制图等相关技术的发展，以土壤有机质在可见—近红外波段的光谱响应机理为科学基础，构建基于近地高光谱数据与无人机高光谱影像融合的土壤有机质三维反演技术体系，确保技术方法具有可靠的科学依据和明确的技术路线。同时，注重业务导向，以构建可推广应用的地面光谱反演—无人机协变量扩展—三维空间表达技术流程为核心，充分考虑我国南方红壤区耕地地块规模小、空间破碎化程度高以及多云多雨等自然条件，优化数据获取、光谱反演和空间预测制图的技术路径，使技术方法既具有先进性，又具备良好的可操作性。此外，强化技术规范统一，对数据获取、数据预处理、光谱反演模型构建、空间预测制图及精度评价等关键环节提出明确技术要求，确保技术方法具有良好的可操作性、可重复性和可对比性。在编制过程中系统参考了数字土壤制图、农业遥感监测和土壤光谱分析等相关研究成果，并广泛征求遥感、土壤学和农业信息化等领域专家意见，使标准内容既吸收最新研究进展，又能够有效指导实际生产应用。最终，技术规程文本力求结构清晰、表述规范、逻辑严密，便于各级技术部门和从业人员理解与应用，实现无人机遥感与近地光谱技术在田块尺度旱地红壤土壤有机质三维监测中的先进性与实用性的统一。

## **2. 编制依据**

**2.1 以国家标准和管理要求为依据规范制定。**本标准依据国家标准 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。标准文本的编排采用中国标准编写模板 SET 2020 版进行排版，编制说明按照《中国农业绿色发展研究会团体标准暂行管理办法》的要求编写，确保标准文本和编制说明的规范性。

**2.2 以研究成果与实践经验为主要依据制定。**起草工作组核心成员长期致力于土壤遥感与近地传感、数字土壤制图、土壤资源调查等相关领域的研究与应用，主持或作为核心骨干参与国家农业重大科技项目课题“南方酸化红黄壤监测和治理智能决策技术研究”、科技部基础资源调查专项“我国土壤光谱库建立与《中国土壤光谱图谱》编制”、国家基金面上项目“多元地貌特征约束的土壤发生层预测与三维建模”等项目，相关研究成果形成的“田块尺度红壤有机质无人机遥感制图技术”已在江西鹰潭等典型红壤区进行了应用验证，为红壤耕地退化



监测提供了科学依据。同时，起草工作组成员解宪丽、郑光辉、赵玉国等专家参与了第三次全国土壤普查工作，长期在江西、安徽等红壤分布区域一线从事技术推广与验证工作，积累了丰富的实地观测与模型校正经验。

在标准起草过程中，以大量实地调查、模型分析与案例总结为基础，以起草工作组成员的长期研究成果与实践经验为主要依据，充分结合国内外已发布的土壤遥感、近地传感、土壤预测制图等领域标准、学术论文、专著及技术最新进展，优化集成当前土壤光谱反演与土壤预测制图的先进方法与技术流程，明确数据获取与处理、模型构建与精度验证等环节的技术指标，并充分考虑红壤区域的现实条件与业务化监测水平，着眼于天空地一体化的未来发展趋势，确保了本标准的前瞻性、引导性与先进性。

#### **四、标准主要条文或技术内容及其确定依据**

##### **1. 范围**

根据国家标准 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》中“5.1 按内容划分”的规定，结合本标准的框架结构和内在关系，范围部分涵盖了规范性技术要素，如基于无人机和地面高光谱进行旱地红壤有机质三维反演的技术流程、数据获取与预处理、不同深度土壤有机质光谱反演模型构建、不同深度土壤有机质制图模型构建以及质量控制等内容。本文件适用于使用地面分辨率 $\leq 10\text{cm}$ 、光谱分辨率 $\leq 10\text{nm}$ 、光谱范围包含 400nm~900nm 的无人机成像高光谱数据，和光谱分辨率 $\leq 10\text{nm}$ 、光谱范围包含 400nm~900nm 的近地高光谱数据，在田块尺度旱地红壤的有机质含量三维反演工作。

##### **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 14950 摄影测量与遥感术语

GB/T 23236 数字航空摄影测量 空中三角测量规范

GB/T 36197 土壤质量 土壤采样技术指南

CH/T 3006 数字航空摄影测量 控制测量规范

NY/T 1121.6 土壤检测 第 6 部分：土壤有机质的测定

NY/T 4151 农业遥感监测无人机影像预处理技术规范

### 3. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**光谱分辨率 spectral resolution**

光谱传感器能够分辨的最小波长间隔。

#### 3.2

**空间协变量 spatial covariate**

用于解释土壤属性空间变异的环境变量，如遥感光谱变量和地形因子。

#### 3.3

**土壤有机质光谱反演 spectral inversion of soil organic matter**

利用光谱信息及统计或机器学习模型估算土壤有机质含量的过程。

#### 3.4

**土壤有机质三维制图 three-dimensional mapping of soil organic matter**

基于样点不同深度土壤有机质含量信息，通过空间建模方法获取土壤有机质三维空间分布的过程。

#### 3.5

**遥感 remote sensing**

不接触物体本身，用传感器收集目标物的电磁波信息，经处理、分析后，识别目标物、揭示其几何、物理特征和相互关系及其变化规律的现代科学技术。

[来源：GB/T 14950—2009, 3.1]

### 4. 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

DEM: 数字高程模型 (Digital Elevation Model)

PLSR: 偏最小二乘回归 (Partial Least Squares Regression)

RF: 随机森林 (Random Forest)

RK: 回归克里格 (Regression Kriging)

RTK: 实时动态测量 (Real Time Kinematic)

SOM: 土壤有机质 (Soil Organic Matter)

SVM: 支持向量机 (Support Vector Machine)

### 5. 技术流程图

基于无人机和地面高光谱的旱地红壤有机质三维反演技术流程包括数据获取与预处理、不同深度土壤有机质光谱反演模型、不同深

度土壤有机质预测制图、三维空间表达及质量控制,技术流程见图 1。

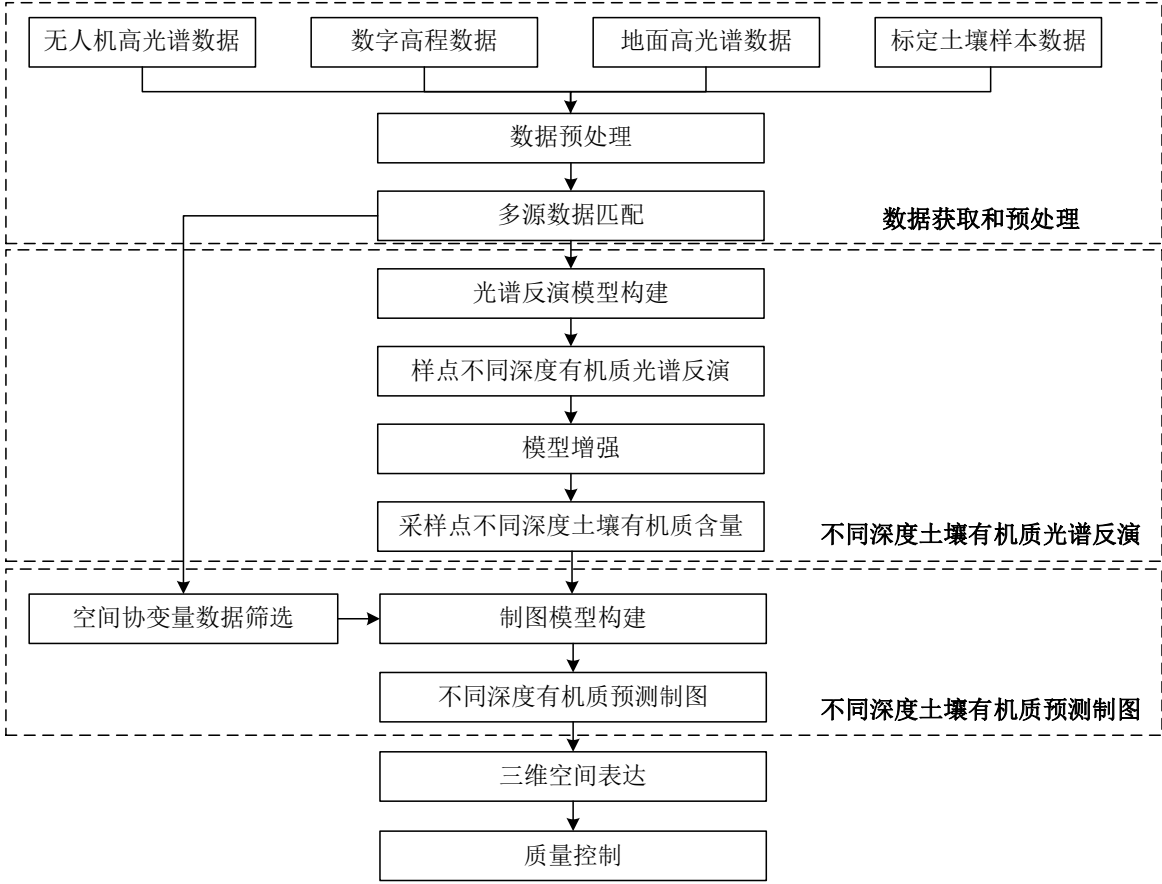


图 1 基于无人机和地面高光谱的旱地红壤有机质三维反演技术流程图

## 6. 数据获取和预处理

### 6.1 数据获取

#### 6.1.1 无人机高光谱数据

无人机高光谱影像数据用于提取土壤光谱信息和相关光谱指数,并作为空间预测模型的协变量。为确保无人机高光谱影像数据的质量与精度,本规程对传感器选择及数据获取、处理提出以下要求:

- 选择地面分辨率 $\leq 10\text{cm}$ 、光谱分辨率 $\leq 10\text{nm}$ 、光谱范围包含 $400\text{nm}\sim 900\text{nm}$ 的无人机高光谱传感器;
- 无人机高光谱影像的控制点布设、测量及质量控制,按 CH/T 3006 的规定执行;
- 按 NY/T 4151 规定的方法和步骤,获取无人机高光谱影像;
- 参考 NY/T 4151 辐射校正的具体方法,对无人机高光谱影像进行辐射校正,将原始数字量化值转换为地表反射率数据。校正时需包含黑帧(镜头盖关闭状态)和白帧(标准白板)的采集,以消除传感器噪声和光照影响;

- e) 参考 NY/T 4151 和 GB/T 23236 几何校正的步骤, 利用地面控制点(通过 GPS/RTK)和多项式模型(如二次或三次多项式), 结合 DEM 进行几何校正, 消除因无人机姿态、地形起伏等引起的几何变形, 确保影像空间位置与实际地理坐标一致;
- f) 将多幅无人机影像拼接成覆盖整个田块的完整影像, 确保影像在同一坐标系下, 空间分辨率和光谱分辨率一致, 相邻条带间光谱差异小于 5%;
- g) 根据田块边界进行裁剪, 去除冗余数据, 保留有效研究区域。

### 6.1.2 数字高程数据

用于提取地形因子, 并作为空间预测模型的协变量, 数据获取及要求如下:

- a) 地形数据宜采用无人机 RTK 数据生成的数字高程模型 (DEM) 或其他高精度 DEM 数据, 地面分辨率应 $\leq 10\text{cm}$ ;
- b) 基于 DEM 可计算的地形因子包括: 坐标、高程、坡度、坡向、曲率、地形湿度指数等。

### 6.1.3 地面高光谱数据

地面高光谱数据用于建立土壤有机质光谱反演模型, 可通过实验室测量或现场测量方式获取。

6.1.3.1 地面高光谱数据用于建立土壤有机质光谱反演模型, 可通过实验室测量或现场测量方式获取。

6.1.3.2 实验室光谱测量宜在暗室环境中进行, 并符合以下要求:

- a) 选择光谱分辨率 $\leq 10\text{nm}$ 、光谱范围包含  $400\text{nm}\sim 900\text{nm}$  的光纤光谱传感器, 配备  $1^\circ\sim 25^\circ$  视场角探头, 以及卤素灯、标准白板、测试软件和笔记本电脑;
- b) 测量前提前启动光谱仪, 连接工作笔记本电脑, 预热 0.5 小时以上;
- c) 测量在常温暗室环境进行, 控制外部光源干扰;
- d) 使用卤素灯作为光源, 根据光强需求调整灯与样品的距离及角度, 确保光线均匀覆盖样品;
- e) 保持探头与样品表面垂直, 根据探头视场角设置探头至样品表面距离, 确保样品表面没有阴影、视场范围小于样品表面;
- f) 将处理好的土壤样品放置位于探头视场范围之内的培养皿(如直径  $10\text{cm}$ 、深度  $2\text{cm}$ ), 表面刮平, 湿态土样应捏碎并除去混杂的动植物残体等, 风干土样应研磨过筛 ( $2\text{mm}$  以下);
- g) 传感器工作温度波动需控制在  $\pm 2^\circ\text{C}$  以内;
- h) 暗电流噪声占总信号的比例不超过 1%;

- i) 使用反射率 $\geq 95\%$ 的标准白板（如 Spectralon®）在与样本相同的光照条件下采集数据，归一化消除光照和传感器响应差异；
- j) 测量前要消除暗电流并测定标准白板，测量中间隔 1 小时对光谱仪进行 1 次优化和白板校正；
- k) 由于土样表面不均一会导致光谱各向异性，测量每件土样时需转动样品进行多次测试，每件样品至少测量 4 个方向，至少采集 20 条光谱曲线，算术平均后得到该土样反射光谱数据。

**6.1.3.2 现场光谱测量**可采用接触式探头或近距离光谱传感器进行，并符合以下要求：

- a) 测量前应进行暗电流校正和标准白板校正；
- b) 探头应保持与土壤表面垂直，并确保视场范围完全覆盖测量区域；
- c) 测量时应尽量避免强烈直射光或阴影干扰；
- d) 土壤样品可为田间自然状态土样或潮湿土样，测量前应去除明显的植物残体、石块等杂质；
- e) 每个样本宜进行多次测量，并取平均值作为该样本的光谱反射率。

#### **6.1.4 土壤样本数据**

**6.1.4.1 土壤样本采集**应符合 GB/T 36197 的规定。

**6.1.4.2 采样时间**应在旱地红壤的轮作间隙或者大部分为裸土时期；

#### **6.1.4.3 采样位置：**

- a) 水平方向采样应保证样点均匀分布，反映田块的土壤空间变异特征；
- b) 垂直方向采样可分为剖面整段样本采集或离散分层样本采集，剖面整段标本采集需使用特殊采样工具，采集地下 1 m~1.2 m 的整段样本，不破坏土壤结构；剖面离散样本采集应分层采集，至少包括表层土、亚表层土和底层土，每个层次采集的土样应独立标记，记录每个采集深度的垂直距离（h）。

### **6.2 数据预处理**

#### **6.2.1 无人机高光谱数据**

对无人机高光谱数据处理，遵循以下步骤：

- a) 根据采样区域土壤表面实际情况，必要时进行去除植被、阴影等无效像元处理；
- b) 根据噪声类型选择合适算法进行去噪，推荐使用滤波算法（如高斯滤波、小波滤波），提升数据质量；
- c) 可对光谱特征进行去铁处理，推荐使用的特征变量及验证方

法参见附录 A（资料性）；

- d) 使用专业软件（如 ENVI、SpecAnalysis）提取土壤采样点附近一定范围内像元平均反射率作为表层样点反射率数据。

### 6.2.2 数字高程数据

对 DEM 数据进行重采样，使其地面分辨率与无人机获取的成像光谱数据相匹配。

### 6.2.3 地面高光谱数据

包括光谱除噪平滑、异常值剔除与光谱特征去铁处理：

- a) 推荐采用 Savitzky-Golay 滤波（窗口宽度建议 7~15 波段）或中值滤波（窗口宽度 $\leq 3$  个波段）去除噪声，确保光谱特征峰完整性；
- b) 可对光谱特征进行去铁处理，推荐使用的特征变量及验证方法参见附录 A（资料性）。

### 6.2.4 标定土壤样本数据

按 NY/T 1121.6 的规定测定标定土壤样本有机质含量，处理要求如下：

- a) 按标准要求的风干、研磨和过筛；
- b) 采用重铬酸钾氧化-外加热法，测定有机质含量，记录结果；
- c) 按比例划分为训练样本和验证样本，训练样本宜占 70%~80%，验证样本宜占 20%~30%，样本划分以采样点（或剖面）为单位进行，即同一采样点不同深度土层样本应同时划入训练样本或验证样本。

## 6.3 多源数据匹配

将无人机高光谱数据、DEM 数据、地面土壤高光谱数据和土壤有机质数据进行空间匹配，基于采样点地理位置信息与无人机影像及 DEM 数据中的对应像元建立对应关系。

## 7. 不同深度土壤有机质光谱反演

### 7.1 光谱反演模型构建

#### 7.1.1 建模方式

以土壤样本实测有机质含量为因变量，以近地高光谱反射率或其衍生光谱特征变量为自变量，构建土壤有机质光谱反演模型。光谱反演模型可采用以下方式构建：

- a) 全局建模：将不同深度土层样本合并构建统一的光谱反演模型。
- b) 分层建模：当不同深度土层的光谱特征或土壤属性差异明显时，可分别构建不同深度土层的光谱反演模型。

#### 7.1.2 建模算法

光谱反演模型可采用 PLSR、SVM、RF 等方法构建。在满足模型精度要求的前提下，也可采用其他适宜的统计或机器学习方法。

### 7.1.3 模型参数优化

模型参数宜通过交叉验证或网格搜索等方法进行优化，其中交叉验证可采用 k 折交叉验证（k=5 或 k=10）。

### 7.1.4 精度评价

7.1.4.1 当样本数量充足时，采用验证样本评价光谱反演模型精度。当样本数量较少时，建议采用留一交叉验证方法评价光谱反演模型精度。

7.1.4.2 评价指标包括决定系数（ $R^2$ ）、均方根误差（RMSE）和平均绝对误差（MAE）。计算方法参见附录 B（资料性）。

7.1.4.3 模型精度应结合  $R^2$ 、RMSE 和 MAE 等指标综合评价，并满足应用需求。

7.1.4.4 当同一深度土层样本取值范围较窄时，模型评价不宜仅以  $R^2$  作为唯一判据，还应结合 RMSE、MAE 等指标综合评价模型性能。

7.1.4.5 当模型精度不满足应用要求时，可通过调整建模算法、优化模型参数或引入样本增强等方式进行改进。

## 7.2 样点不同深度有机质光谱反演

7.2.1 利用经验证的光谱反演模型对采样点不同深度土壤样本的有机质含量进行预测。不同深度土层宜按固定深度层进行预测，例如：0 cm~20 cm、20 cm~40 cm、40 cm~60 cm 等。

7.2.2 预测得到的采样点不同深度土壤有机质含量作为后续空间预测制图的基础数据。

## 7.3 模型增强

当目标深度土层样本数量不足、样本取值范围较窄或模型预测精度不理想时，宜采用样本增强方法提高模型稳定性和预测能力。

——样本加标：可从目标深度土层中选取少量具有代表性的样本加入光谱反演精度较高的建模样本集中（如表层样本集），对模型进行重新校准，以增强模型对目标深度土层样本特征的适应能力。

——样本迁移：当本地样本数量不足时，可引入外部土壤光谱库样本辅助建模。迁移样本的筛选宜综合考虑光谱相似性、环境条件相似性、土壤有机质含量范围一致性等因素，并通过本地验证样本评价模型性能。

## 8. 不同深度土壤有机质预测制图

### 8.1 空间协变量数据与筛选

#### 8.1.1 协变量数据

空间预测制图宜选取无人机高光谱影像和数字高程模型（DEM）衍生数据作为空间协变量。协变量可包括：无人机高光谱反射率；光谱指数；地形因子；空间坐标和深度信息等。常用地形因子包括高程、坡度、坡向、曲率和地形湿度指数等。

### **8.1.2 协变量筛选**

协变量宜进行相关性分析或特征筛选，以减少变量冗余和共线性，提高模型稳定性。特征筛选方法可包括相关性分析、共线性检验、递归特征消除等。

## **8.2 制图模型训练样本**

空间预测制图所使用的训练样本为采样点不同深度土层土壤有机质含量数据。该数据可包括实验室实测结果和第7章光谱反演预测结果，并应与对应位置的空间协变量进行匹配，用于构建空间预测模型。

## **8.3 制图模型构建**

### **8.3.1 建模方式**

制图模型可采用以下方式构建：

#### **8.3.1.1 分层建模**

以采样点各深度土层土壤有机质含量为因变量，以筛选后的空间协变量和空间坐标为自变量，分别构建各深度土层的空间预测模型。

#### **8.3.1.2 全局建模**

将所有深度土层样本合并，以土壤有机质含量为因变量，以筛选后的空间协变量、空间坐标及深度信息为自变量，构建统一的空间预测模型。

#### **8.3.1.3 表层建模与深度函数参数建模**

当采样点不同深度土层土壤有机质与深度关系可稳定拟合时，可采用表层建模与深度函数参数建模相结合的方式构建三维空间预测模型。具体步骤如下：

- a) 以采样点表层土壤有机质含量为因变量，以筛选后的空间协变量和空间坐标为自变量，构建表层土壤有机质预测模型；
- b) 对采样点不同深度土层土壤有机质含量与深度关系进行拟合，提取有机质深度函数参数；
- c) 以采样点的深度函数参数为因变量，以筛选后的空间协变量和空间坐标为自变量，构建深度函数参数预测模型；
- d) 结合表层土壤有机质预测值和深度函数参数，构建三维空间预测模型。

### **8.3.2 建模算法**

空间预测模型与深度函数参数预测模型可采用 RF、SVM、RK 等方法。深度函数可采用指数函数、幂函数、等积样条函数等。在满足预



测精度要求的前提下，也可采用其他适宜的预测方法或深度函数。

### 8.3.3 模型参数优化

模型参数宜通过交叉验证或网格搜索等方法进行优化，其中交叉验证可采用 k 折交叉验证（k=5 或 k=10）。

### 8.3.4 精度评价

8.3.4.1 制图预测模型精度宜通过交叉验证方法进行评价，常用方法包括 k 折交叉验证（k=5 或 k=10）或留一交叉验证。当样本数量较少时，宜采用留一交叉验证。

8.3.4.2 评价指标可包括决定系数（ $R^2$ ）、均方根误差（RMSE）和平均绝对误差（MAE）。计算方法参见附录 B（资料性）。模型精度应结合  $R^2$ 、RMSE 和 MAE 等指标综合评价，并满足应用需求。

8.3.4.3 当模型精度不满足应用要求时，可通过调整建模算法、优化模型参数或改进协变量选择等方式进行改进。

8.3.4.4 当进行不同深度土层土壤有机质预测制图时，应分别对各深度土层的预测精度进行评价。

## 8.4 不同深度有机质预测制图

基于空间协变量，利用制图模型对研究区不同深度土壤有机质进行空间推测，生成不同深度土壤有机质分布图。不同深度土层宜分别进行预测制图，例如：0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 等。

## 9. 三维空间表达

旱地红壤有机质三维结果表达方式主要包括：

- a) 采用三维可视化软件（如 ArcScene、Surfer 等）展示反演结果，直观呈现田块内 SOM 含量的三维空间变化；
- b) 绘制 SOM 含量等值线图 and 专题地图，展示不同深度 SOM 含量的水平分布特征，为农业生产管理提供决策依据。

## 10. 质量控制

### 10.1 数据质量控制

数据质量要求包括：

- a) 定期检查无人机和近地高光谱设备的校准参数，确保辐射校正和几何校正的准确性；
- b) 对土壤样品进行平行样检测，相对偏差应 $\leq 5\%$ 。

### 10.2 模型质量控制

模型质量具体要求包括：

- a) 光谱反演模型应进行精度评价，评价方法见 7.1.5；
- b) 空间预测模型应进行精度评价，评价方法见 8.2.4；
- c) 模型训练过程中应避免过拟合（验证集 RMSE 与训练集差异

≤10%), 必要时可对模型预测结果进行不确定性评估, 不确定性评估方法可包括 Bootstrap 重采样等方法。

- d) 定期对模型进行更新和改进, 根据新采集的数据和研究区域土壤特性的变化, 调整模型结构和参数, 模型更新需记录版本号、更新原因、验证结果, 并存档旧版本以备追溯。

### 10.3 结果质量控制

结果质量具体要求包括:

- a) 对反演结果进行质量检查, 通过与实际调查数据对比、专家评估等方式, 验证反演结果的合理性和准确性;
- b) 在结果表达过程中, 空间分布图应检查是否存在明显异常值或不合理空间模式, 保证图件和报告的规范性和准确性, 对关键信息进行标注和说明 (如坐标系、空间分辨率、数据来源等)。

## 五、主要试验、验证及试行结果

### 1. 研究区

研究区域位于江西省鹰潭市某处旱地实验田块 (图 2)。该处位于低丘缓坡, 土壤母质为第四纪红黏土, 属于典型红壤。

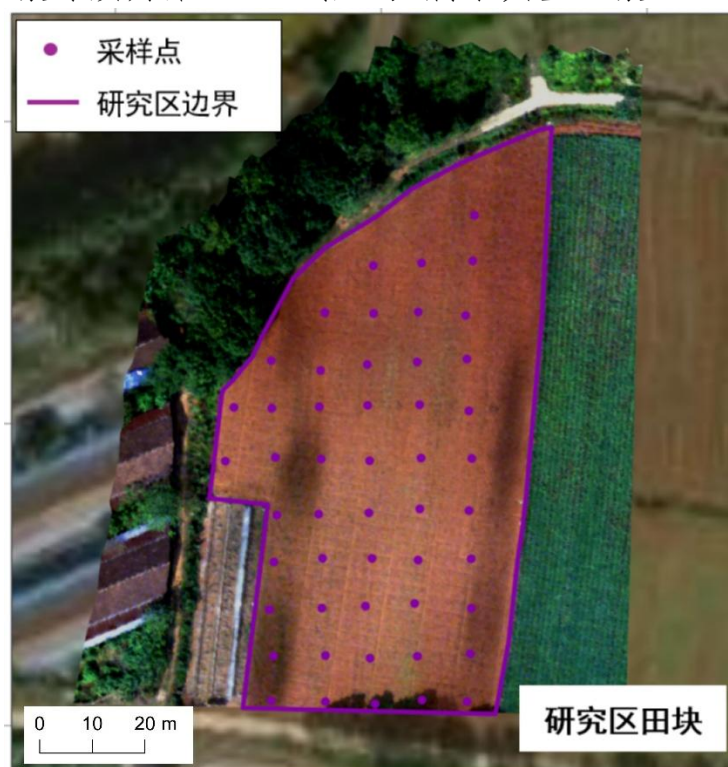


图 2 研究区

### 2. 土壤样本数据获取和预处理

土壤采样于 2023 年 11 月初进行,采用网格布点方式,共设置 50 个采样点,每个点按 0 cm~10 cm、10 cm~20 cm 和 20 cm~40 cm 三个深度分层采集土壤样本,共计 150 个样品。采集后的土壤装入密封袋中运输,并立即送至实验室进行处理。抽取标定使用的 30 个样点共计 120 个样本,经风干、研磨及过筛后,采用重铬酸钾氧化-外加热法测定有机质含量(描述性统计见表 1)。

表 1 土壤有机质 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 的描述性统计特征

土层	样本数	最大值	最小值	平均值	中位数	标准差	变异系数	偏度	峰度
第一层	40	22.62	12.22	17.46	17.57	2.13	0.12	-0.34	0.36
第二层	40	16.14	6.18	12.46	12.91	2.3	0.18	-0.80	0.29
第三层	40	9.49	3.79	6.54	6.44	1.42	0.22	0.26	-0.56
汇总	120	22.62	3.79	12.15	12.58	4.9	0.40	0.01	-1.27

### 3. 近地光谱数据获取和预处理

测量所有 150 个样本的可见-近红外近地光谱数据。将风干、研磨及过筛土样均匀平铺于直径 10 cm、深 2 cm 的培养皿中,在暗室环境下,采用 FieldSpec4 光谱仪(波长范围 350 nm~2500 nm,分辨率 1 nm)采集土壤光谱。光源为 50 W 卤素灯,距样品 30 cm,天顶角  $15^\circ$ ,探头视场角为  $8^\circ$ ,垂直置于样品上方 18 cm 处。培养皿放置于反射率接近零的黑色橡胶垫上。每个样品采集 20 条光谱(5 次扫描 $\times$ 4 个方向),取平均值作为该样品的光谱反射率。

### 4. 无人机高光谱数据获取和预处理

选择天气晴朗、无风的条件,于 12:00~15:00 进行数据采集。通过 Cubert S185 高光谱成像仪(波长范围 450–950 nm,光谱分辨率 4 nm)获取高光谱影像(图 2)。飞行前进行白板校准与暗电流校正。飞行高度设置为 50 m,飞行速度为 5 m/s,前向重叠率 80%,侧向重叠率 70%,影像的空间分辨率为 1.4 cm。使用 Pix4D 软件基于同步搭载的 DJI Phantom 4 RTK 无人机机载 GPS 系统完成地理配准。

### 5. 数字高程数据获取和预处理

使用 Pix4D 软件,基于 DJI Phantom 4 RTK 无人机获取的高精度数字表面模型(DSM)数据,提取研究区的数字高程模型(DEM)。使用 ArcGIS 软件生成坐标、高程、坡度、坡向、曲率等。

### 6. 不同深度土壤有机质光谱反演

针对 120 个标定样本,按土层深度分别进行异常值剔除处理;采用随机抽样方法,抽取 70%剖面作为训练集,剩余 30%作为验证集;抽样过程中确保同一土壤剖面的样本不拆分。采用全剖面样本统一训练、分层独立评估的策略,确保光谱反演模型对各深度土层有机质反

演的适用性。

对光谱数据进行 SNV 标准化与 Savitzky-Golay (S-G) 一阶微分预处理, 以消除噪声干扰、增强光谱特征信息。采用偏最小二乘回归 (PLSR) 建模; 初始主成分数 (ncomp) 设为训练集样本数量的 1/5, 绘制均方根误差 (RMSE) 随主成分数变化的曲线, 曲线拐点对应的主成分数作为最佳主成分数。采用决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 (RMSE) 作为评价模型精度 (表 2)。模型验证合格后, 输入剩余 10 个样点 (30 个样本) 的光谱数据, 反演获得其有机质含量。

表 2 土壤有机质光谱反演模型精度

训练集 (十折交叉验证)					验证集		
训练集 (25 个样点)	算法	ncomp	$R^2$	RMSE ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	验证集 (11 个样点)	$R^2$	RMSE ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
n=75	PLSR	14	0.95	1.04	第一层 n=11	0.69	0.69
					第二层 n=11	0.60	1.49
					第三层 n=11	0.67	0.92

7. 不同深度土壤有机质预测制图

以无人机高光谱影像与数字表面模型 (DSM) 为基础数据源, 提取高光谱反射率、采样点坐标、高程、坡度、坡向、曲率等参数, 作为土壤有机质预测的环境协变量。以实验室实测的 120 个土壤样本有机质含量、光谱反演得到的 30 个土壤样本有机质含量, 共同作为模型训练数据, 先完成训练数据与环境协变量的坐标匹配、空间对齐, 确保数据一致性。

采用分层建模思路, 运用随机森林 (RF) 算法构建不同深度土壤有机质预测制图模型。通过分析特征重要性曲线拐点, 确定各层模型的最优特征个数; 采用五折交叉验证方法优化模型参数 (包括 mtry、ntree), 采用留一交叉验证方法评估模型制图精度, 精度评价指标包括决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE) (最优模型参数及制图精度见表 3)。利用分层构建的最优预测制图模型, 反演整个田块不同深度有机质的空间分布 (制图结果见图 3)。

表 3 土壤有机质预测性制图精度

	最优特征数	mtry	ntree	$R^2$	RMSE ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	MAE ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
第一层	3	1	300	0.52	1.08	0.86
第二层	5	2	200	0.35	1.22	0.97

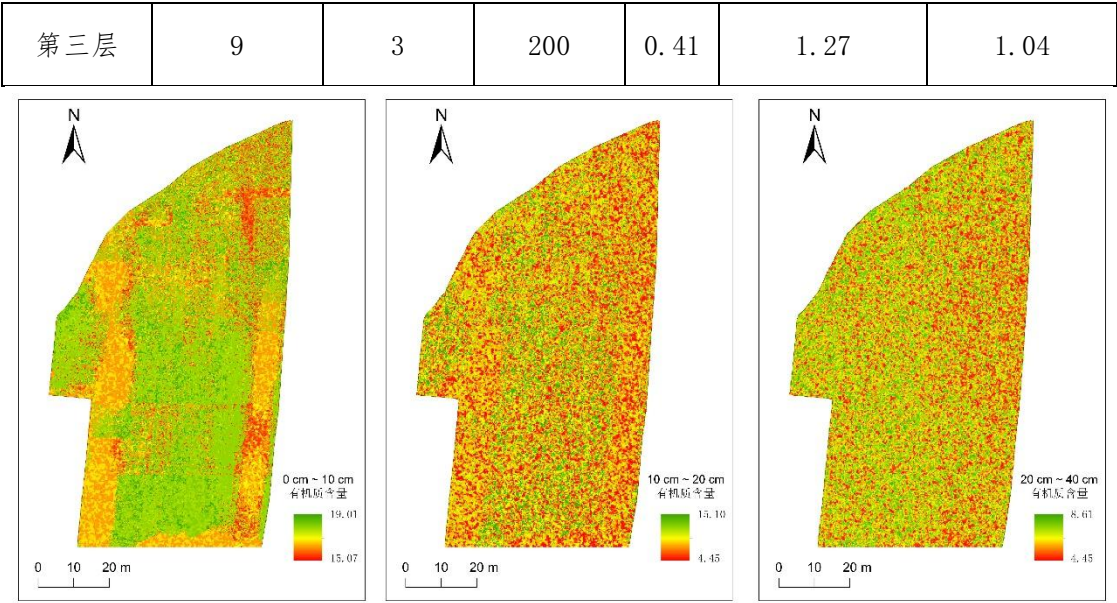


图 3 研究区不同深度土壤有机质分布图

六、采用国际标准的程度及水平说明

无。

七、与现行法律法规、强制性标准和其他有关标准的关系

本标准的编制遵循《中华人民共和国标准化法》《中华人民共和国农业法》《中华人民共和国土地管理法》《中华人民共和国土壤污染防治法》《中华人民共和国环境保护法》等法律法规为准则，以国内外相关标准和文献资料为基础，结合无人机遥感、近地光谱传感和数字土壤制图等技术在南方红壤区耕地监测应用实际，按照标准编写要求，对数据获取、数据预处理、光谱反演模型构建、空间预测制图和三维表达等技术流程进行统一规范。标准技术内容遵循现行法律法规和相关技术标准的规定，在保证技术统一性的同时，对难以统一的技术参数提出适应性指导意见。

本标准编制过程中，严格按照国家标准 **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》** 的要求进行编写。标准文本采用中国标准编写模板进行排版，编制说明按照《中国农业绿色发展研究会团体标准暂行管理办法》的有关要求进行编写，以保证标准文本及编制说明的规范性和一致性。在标准编制过程中，参考了农业遥感监测、无人机遥感影像处理、土壤光谱分析以及数字土壤制图等相关国家标准、行业标准和地方标准，并根据本技术规程的应用场景进行合理吸收和补充。

综上所述，本标准内容符合现行法律法规和强制性标准的要求，与现行农业遥感监测、土壤检测和数字土壤制图相关标准之间保持协调一致，是对现有耕地土壤信息监测技术体系的重要补充，不存在与

现行标准冲突的情况。

## **八、重大分歧或重难点的处理经过和依据**

本标准制定过程中，未出现重大分歧意见和重难点。

## **九、贯彻该标准的要求、措施建议及预期效果**

本标准发布实施后，建议中国农业绿色发展研究会和标准起草单位要不定期组织开展技术培训，提高大家对标准的理解，并达成共识，进一步提高标准的可操作性，促进标准的有效实施。同时，注意收集标准应用过程中发现的不足问题，为今后标准的修订工作提供依据。此外，拓展标准培训形式，通过线上线下相结合的方式发放（发送）标准文本、开展专家解读及现场指导，进一步规范基于无人机和地面高光谱进行农田土壤三维动态监测工作的标准化，促进我国农业信息化的高质量发展。

## **十、其他应说明的事项**

无。



## 参考文献

- [1] GB/T 14950 摄影测量与遥感术语
- [2] GB/T 18834 土壤质量 词汇
- [3] GB/T 23236 数字航空摄影测量 空中三角测量规范
- [4] GB/T 36197 土壤质量 土壤采样技术指南
- [5] GB/T 47213 数字土壤制图 土壤属性预测性制图规范
- [6] NY/T 1121.6 土壤检测 第6部分: 土壤有机质的测定
- [7] NY/T 4151 农业遥感监测无人机影像预处理技术规范
- [8] NY/T 3527—2019 农作物种植面积遥感监测规范.
- [9] CH/T 3006 数字航空摄影测量 控制测量规范
- [10] DB1411/T 43-2022 旱地大豆种植技术规程
- [11] DB1301/T 501—2024 耕地表层土壤有机质含量遥感监测规程.
- [12] DB50/T 1449—2023 茶园土壤有机质高光谱检测技术规程.
- [13] 李庆逵, 熊毅. 中国土壤(第二版). 北京: 科学出版社, 1987: 1–39.
- [14] McBratney A B, Mendonça Santos M L, Minasny B. On digital soil mapping. *Geoderma*, 2003, 117(1–2): 3–52.
- [15] Viscarra Rossel R A, Adamchuk V I, Sudduth K A, McKenzie N J, Lobsey C. Proximal soil sensing: An effective approach for soil measurements in space and time. *Advances in Agronomy*, 2011, 113: 243–291.
- [16] Viscarra Rossel R A, McBratney A B, Minasny B. *Proximal Soil Sensing*[M]. Dordrecht: Springer, 2010.
- [17] Stenberg B, Viscarra Rossel R A, Mouazen A M, Wetterlind J. Visible and near infrared spectroscopy in soil science. *Advances in Agronomy*, 2010, 107: 163–215.
- [18] Wang J, Zhao X, Deuss K E, Cohen D R, Triantafilis J. Proximal and remote sensor data fusion for 3D imaging of infertile and acidic soil. *Geoderma*, 2022, 424: 115972.
- [19] Zhang Y, Ji W J, Saurette D D, Easher T H, Li H Y, Shi Z, Adamchuk V I, Biswas A. Three-dimensional digital soil mapping of multiple soil properties at a field scale using regression kriging. *Geoderma*, 2020, 366: 114253.
- [20] Zhang Y, Biswas A, Ji W, Adamchuk V I. Depth-specific prediction of soil properties in situ using vis–NIR spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81: 993–1004.
- [21] Zhao D, Arshad M, Wang J, Triantafilis J. Soil exchangeable cations estimation using Vis–NIR spectroscopy in different depths: Effects of multiple calibration models and spiking. *Computers and Electronics in*

Agriculture, 2021, 182: 105990.

[22] Jiang Q, Li Q, Wang X, Wu Y, Yang X, Liu F. Estimation of soil organic carbon and total nitrogen in different soil layers using VNIR spectroscopy: Effects of spiking on model applicability. *Geoderma*, 2017, 293: 54–63.

[23] Zhou Y, Biswas A, Hong Y, et al. Enhancing soil profile analysis with soil spectral libraries and laboratory hyperspectral imaging. *Geoderma*, 2024, 450: 117036.