ICS 65.020.01
CCS B10

T/SSSC

中 国 土 壤 学 会 团 体 标 准

T/SSSC 047—2026

红壤旱地生物过程智慧监测及生物功能评价方法

Methods for Smart Monitoring of Biological Processes and Evaluation of Biological Functions in Red Soil Uplands

2026-11-27 发布　　2026-12-15 实施

中国土壤学会　发 布

目　　次

前　言 III
1 范围 1
2 规范性引用文件 1
3 术语和定义 2
4 监测点设置和监测指标 3
5 红壤旱地农田生态系统生物过程及土壤环境要素监测方法 4
6 远程数据传输与管理 7
7 红壤旱地农田土壤生物功能评价与智能应用 8
附录 A （资料性） 部分监测指标精度及指标分类 11
参考文献 12

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。

本文件由中国土壤学会提出并归口。

本文件起草单位：中国科学院南京土壤研究所、福建农林大学、江西农业大学。

本文件主要起草人：王晓玥、蒋瑀雾、栾璐、赵丽霞、樊剑波、刘晓利、滕应、叶英聪、解宪丽、刘杰、刘明、郑杰、陈玲。

红壤旱地生物过程智慧监测及生物功能评价方法

1 范围

本文件描述了红壤旱地生物过程智慧监测及生物功能评价方法，包括术语和定义，监测点设置和监测指标，植物地上部长势、植物根系生长、土壤生物活性、土壤环境和肥力等要素的智慧和人工监测方法，土壤生物功能评价与应用。

本文件适用于红壤旱地农田生态系统长期连续定位观测。

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 3440 物联网 智慧农业数据传输技术应用指南

GB/T 4883 数据的统计处理和解释正态样本离群值的判断和处理

GB/T 20533 生态科学数据元数据

GB/T 30989 高通量基因测序技术规程

GB/T 32740 自然生态系统土壤长期定位监测指南

GB/T 33027 森林生态系统长期定位观测方法

GB/T 33469 耕地质量等级

GB/T 39228 土壤微生物生物量的测定 熏蒸提取法

GB/T 41689 土壤质量 土壤样品直接提取 DNA 的方法

GB/T 42485 土壤质量 土壤硝态氮、亚硝态氮和铵态氮的测定 氯化钾溶液浸提手工分析法

GB/T 43858 陆地生态系统生物长期监测规范

GB/T 47361 土壤有机质的测定

NY/T 87　土壤全钾测定法

NY/T 88　土壤全磷测定法

NY/T 889　土壤速效钾和缓效钾含量的测定

NY/T 1119　耕地质量监测技术规程

NY/T 1121.1—2006　土壤检测 第 1 部分：土壤样品的采集、处理和贮存

NY/T 1121.2—2006　土壤检测 第 2 部分：土壤 pH 的测定

NY/T 1121.7—2014　土壤检测 第 7 部分：土壤有效磷的测定

NY/T 1121.19—2008　土壤检测 第 19 部分：土壤水稳性大团聚体组成的测定

NY/T 1121.24—2012　土壤检测 第 24 部分：土壤全氮的测定 自动定氮仪法

NY/T 3648　草地植被健康监测评价方法

HJ/T 166　土壤环境监测技术规范

TJ 7　工业与民用建筑地基基础设计规范

ISO 20130:2018　土壤质量 用微孔板中的比色底物测量土壤样品中的酶活性模式（Soil quality Measurement of enzyme activity patterns in soil samples using colorimetric substrates in micro-well plates）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

生物过程　Soil biological processes

是指土壤微生物和植物等生物通过其生命活动，驱动土壤生物地球化学循环过程、调节养分周转和生态系统服务的过程，主要包括植物地上与地下部生长，微生物活性，以及土壤碳、氮等元素循环过程。

3.2

智慧监测 Smart monitoring

是指利用监测仪器或者传感器，通过特定的监测方法自动获取、处理和管理数据，或者在必要情况下经人工辅助完成监测数据的获取、处理和管理，实现对指定指标进行监测的过程。

3.3

田间型高通量表型分析系统 High-throughput field phenotyping analytical system

是指基于门式起重系统设计组建、以轨道式龙门架为固定监测平台，并配套可升降观测机械臂、搭载多光谱和高光谱等传感器的田间作物表型观测系统，可在短时间内快速完成作物植被指数、叶绿素含量和株高等数据的采集。

3.4

生物功能 biological function

本规范中指红壤旱地农田生态系统所发挥的生物功能，主要包括植物生产力、养分循环、碳固存及生物多样性保护。

4 监测点设置和监测指标

4.1 设置原则

监测点应设置在农业监测试验站、永久基本农田保护区等需要且可以进行长期稳定监测且具有代表性的地块，同时应远离高大建筑物、树木等障碍物。同时综合考虑土壤类型、种植制度、管理措施等因素。观测现场附近建设数据处理中心，用于存储、处理和分析观测数据。确保观测现场具备稳定的电力供应和网络通信条件，以便实现数据的实时传输和远程监控。建设监测点时调查内容参照 NY/T1119—2019 中第 5.1。

4.2 监测指标、频率及方法

指标、频率及方法详见表 1：

表 1 红壤旱地生物过程监测目的、指标、频率及方法

监测目的	监测指标	监测频率	监测方法
植物地上部长势要素	归一化植被指数（NDVI）*	1 次/周	设备监测（见 5.1.2.1）
	叶绿素指数*	1 次/周	

	作物覆盖度	1 次/周	
	株高	1 次/周	
	叶冠层指数	1 次/周	
	作物产量*	1 次/生长季	人工辅助监测 （见 5.1.2.2）
	地上部生物量*	1 次/生长季	
植物根系 生长要素	根长*	1 次/周	设备监测 （见 5.2.2.1）
	根直径*	1 次/周	
	根表面积	1 次/周	
	根体积	1 次/周	
	侧根密度*	1 次/周	
	地下部生物量*	1 次/生长季	人工辅助监测 （见 5.2.2.2）
土壤生物 活性要素	CO_2 通量*	10 次/h	设备自动监测 （见 5.3.2.1）
	CH_4 通量	10 次/h	
	N_2O 通量	10 次/h	
	NH_3 通量	10 次/h	
	土壤β葡萄糖苷酶活性*	3 次/生长季	人工辅助监测 （见 5.3.2.2）
	土壤亮氨酸酶活性*	3 次/生长季	
	土壤 N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶	3 次/生长季	
	土壤磷酸酶活性*	3 次/生长季	
	微生物生物量碳氮*	3 次/生长季	
	土壤微生物多样性	3 次/生长季	
土壤环境和肥力	土壤水分*	6 次/min	设备自动监测 （见 5.4.2.1）
	土壤温度	6 次/min	
	土壤电导率	6 次/min	
	土壤 pH*	1 次/生长季	人工辅助监测 （见 5.4.2.2）
	土壤有机质*	1 次/生长季	
	土壤全氮磷钾*	1 次/生长季	
	土壤硝态氮和铵态氮*	3 次/生长季	
	土壤有效磷*	3 次/生长季	
	土壤速效钾*	3 次/生长季	
	土壤团聚体	1 次/生长季	
	土壤质地	1 次/生长季	

注：*表示必测指标；未标注*的指标为推荐指标。

5 红壤旱地农田生态系统生物过程及土壤环境要素监测方法

5.1 植物地上部长势要素监测方法

5.1.1 监测设备

仪器配置：有条件的监测点宜安装搭载高光谱传感器的田间型高通量表型分析系统；不具备条件或监测田块面积较大时，可采用无人机搭载高光谱传感器的方式。

田间型高通量表型分析系统安装方法：地基宜采用混凝土材料，参照 TJ 7 标准修建；将轨道安装于地基之上，并埋设固定装置；完成龙门架组装，经校验与调试合格后，开展数据采集。

5.1.2 监测指标的获取方法

5.1.2.1 自动监测指标的获取方法

在作物生长期，利用高光谱传感器对监测区域内作物每周进行 1 次高通量扫描，利用光谱传感器获取 NDVI、作物覆盖度，叶绿素指数，叶冠层指数等指标，并将数值输出并存储在数据采集终端记录器。

5.1.2.2 人工辅助监测指标的获取方法

在作物收获时，采用随机抽样对监测区域的作物产量、地上部生物量进行测定。参照 NY/T 1119-2019 中 6.2.3。

5.2 植物根系生长要素监测方法

5.2.1 监测设备

仪器配置：根系原位生态观测系统

安装：安装前清除周边石块和根系；采用根管专用打孔工具挖一个孔径略大于根管直径（1-2 cm）的管洞；采用斜插法（45°-60°）安装根管，深度以覆盖作物根际主要分布区为宜，管壁与土壤紧密接触，减少对土壤扰动；加盖可拆卸密封盖，安装防雨罩和动物啃咬装置。

5.2.2 监测指标的获取方法

5.2.2.1 自动监测指标的获取方法

在作物生长期，采用根系原位生态观测系统每周观测 1 次，记录根系动态、形态及发育状况，观测数据以图像形式保存。采用经校验的高通量根系图像分析软件提取根系形态性状参数，包括根长、根直径、根表面积、根体积和侧根密度。

5.2.2.2 人工辅助监测指标的获取方法

在作物收获后，随机抽样测定监测区域作物根部的生物量。根据田块大小，选取若干个 1 m^2 的

样方，取出作物根部，用纯水清洗经烘箱干燥后称重并记录。

5.3 土壤生物活性要素监测方法

5.3.1 监测设备

仪器：土壤温室气体监测系统。

安装：选择地势平坦的地表作为安装点，清除凋落物和杂草；PVC 材质基底圈垂直、平稳地插入土壤约 5 cm，使其与土壤紧密接触；土壤呼吸室按照说明书安装并检查系统供电后开机操作。监测指标精度要求见附表 1。

5.3.2 监测指标的获取方法

5.3.2.1 自动监测指标的获取方法

利用土壤温室气体观测系统，在作物生长期和秸秆还田后，每天全时段自动实时观测监测区域温室气体排放通量。每年采用标准气体对仪器进行校准。

5.3.2.2 人工辅助监测指标的获取方法

作物生育期采集表层土壤样品，测定土壤碳氮磷转化酶活性。土壤样品按采样时间和监测点编号并长期保存，具体采样、处理与保存方法参照 NY/T 1121.1—2006 执行，下同。土壤β葡萄糖苷酶、亮氨酸酶、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶和磷酸酶测定按 ISO 20130:2018 的规定执行。土壤微生物生物量碳氮测定按 GB/T 39228 的规定执行。微生物多样性测定参考 GB/T 41689 提取 DNA 和 GB/T 30989 高通量测序。

5.4 土壤环境和肥力要素监测方法

5.4.1 监测设备

仪器：土壤水分、温度和电导率传感器

安装：传感器水平插入 20 cm 深度，使探针与土壤紧密接触；安装完成后，按照原始土层顺序回填土壤，轻微压实，减少对原状土壤扰动；埋地部分线缆加装保护套管。每年根据实验室实测数据对传感器进行校准。

5.4.2 监测指标的获取方法

5.4.2.1 自动监测指标的获取方法

利用土壤水分、温度和电导率传感器，在作物生长期和秸秆还田后，每天全时段自动实时监测各小区水分、温度和电导率并将数据存储在 SD 卡中。

5.4.2.2 人工辅助监测指标的获取方法

作物收获后采集表层土壤样品，测定耕地质地、土壤团聚体水稳性组成、土壤 pH、有机质和全氮磷钾指标检测方法应 GB/T 33469、NY/T 1121.19–2008、NY/T 1121.2–2006、GB/T 47361、NY/T 1121.24–2012 、NY/T 88 和 NY/T 87 的规定执行。作物关键生育期采集表层土壤样品测定有效磷、速效钾、铵态氮和硝态氮指标，检测方法应按 NY/T 1121.7–2014、NY/T 889 和 GB/T 42485 的规定执行。

6 远程数据传输与管理

6.1 数据传输

为确保数据传输效率、完整性和安全性，数据传输按照 GB/T 3440 的规定执行。

6.2 数据接收与处理

数据接收平台应具备高并发接入能力，能够稳定接收大量田间设备的数据流，并对原始数据进行有效性校验与清洗等处理。数据统计处理按 GB/T 4883 的规定执行。

6.3 数据存储与管理

采用时序或关系型数据库分类存储历史数据，建立完善的数据备份与恢复机制。数据库建立按 GB/T 20533 的规定执行。

6.4 数据监控

平台以地图、列表等形式，实时展示所有监测点设备在线状态、地理位置及最新数据。

7 红壤旱地农田土壤生物功能评价与智能应用

7.1 土壤生物功能评价方法

7.1.1 生物功能分类及其监测指标

土壤生物功能包括植物生产力、养分循环、碳固存及生物多样性保护 4 类，各功能建议监测指标见附表 2。

7.1.2 指标标准化及权重确定

根据指标数据与土壤生物功能间关系，即指标越接近某一数值，土壤生物功能越优为区间性指标；指标数值越大土壤生物功能越优为正向指标，否则为逆向指标。根据指标分类对土壤生物评价指标进行无量纲化处理，使用熵权系数法计算指标权重。

（1）指标数据标准化：正向指标： $P_{ji}=\frac{P_i-P_{min}}{P_{max}-P_{min}}$ （1）；逆向指标： $P_{ji}=\frac{P_{max}-P_i}{P_{max}-P_{min}}$ （2）

式中 P_{ji} 为标准化指标；j 为指标；P_i 为原始指标值；P_{max} 为原始指标最大值；P_{min} 为原始指标最小值。

（2）指标信息熵计算： $K=\frac{1}{ln（m）}$ （$0 \leqslant K \leqslant 1$） （3）；$H_j=-K\sum_{i=1}^{m}R_{ji}\times lnR_{ji}$ （$j=1,2,...n$） （4）；$R_{ji}=\frac{1+P_{ji}}{\sum_{i=1}^{m}(1+P_{ji})}$ （5）

式中 H_j 为第 j 个指标的信息熵值，m 为待评价对象数量，n 为指标数量，R_{ji} 为常数，K 为常数。

（3）指标信息熵权重计算：$w_j=\frac{1-H_j}{n-\sum_{j=1}^{n}H_j}$ （6）

式中 W_j 为第 j 个指标的熵权；

7.1.3 限制性乘数设定

基于红壤旱地特性，选取侵蚀因子作为限制性因素。土壤限制性因素量化为限制性指标，其标准化为 1~2 之间的数值为障碍因子。农田土壤受到单种障碍因子制约，其障碍因子为限制性乘数。侵蚀因子由耕地质地各组成和有机质含量代入 Williams EPIC 模型公式计算获取。

7.1.4 土壤生物功能计算

采用熵权系数法计算土壤生物评价指标得分与权重后，根据各生物功能的得分求和确定土壤生

物功能指数。

土壤生物功能评分计算：$FHx = f * \sum_{j=1}^{x} w_j \times R_{ji}$ （7）；$TFH = \sum_{i=1}^{4} FHx$ （8）

式中 f 为限制性乘数，x 为各功能包含指标数，*FHx* 为各土壤生物功能评分；*TFH* 为土壤总生物功能评分。

7.1.5 土壤生物功能等级划分

根据土壤生物功能评分分布情况，对土壤生物功能状况给予定性评级，分级情况见表 2。

表 2 土壤生物功能等级划分

土壤生物功能评分	<0.2	0.2~0.4	>0.4
等级	低级	中级	高级

7.2 结果可视化与智能应用

7.2.1 结果可视化

以农业生产条件符合性和土壤生物功能评价结果为依据，以田块为基本单元，采用色带渲染不同功能等级，生成田块尺度的生物功能等级分布图，分功能得分专题图，限制性因子标识图，田块级别功能结构可视化雷达图等。对同一田块不同年份的核心指标进行历史对比，以折线图展示变化趋势。支持多田块间指标的平行对比，快速识别不同农田管理方式的优劣。

7.2.2 智能应用

功能短板自动识别：对每个田块，系统计算各 *FHx* 得分相对于区域内同类田块参考基准的偏离程度，自动输出排名前三的短板功能维度。若 *TFH* 等级为“低”且短板集中于单一维度，则诊断为“单功能制约型”；若多个维度同步偏低，则诊断为“系统性低功能型”。

阈值预警：对 *FHx* 得分持续下降并接近 0.2（低级阈值）的田块，或侵蚀因子标准化值接近 2.0 上限的田块，系统应向管理人员推送预警。

7.2.3 平台与运维

所有可视化与决策功能应集成于统一的智慧农业云平台，支持 Web 端与移动端访问，确保数据同步与操作便捷。建立评价结果与数据的定期更新机制，建议每年至少进行一次全面评价更新，田

间实时检测指标可根据传感器数据实现季度或实时更新，确保决策支持的时效性与准确性。

附录 A

（资料性）

部分监测指标精度及指标分类

附表 A.1 温室气体原位监测设备观测内容、范围及精度

观测指标	测量范围	精度
CO_2	380～5000 ppm	＜300 ppb+0.05%读数
CH_4	1.5～12 ppm	＜7 ppb+0.05%读数
N_2O	0.3～200 ppm	＜10 ppb+0.05%读数
NH_3	0～300 ppm	＜3 ppb+0.05%读数

附表 A.2 土壤生物功能分类及其建议监测指标

生物功能类型	监测指标
植物生产力	NDVI、叶绿素指数、作物覆盖度、叶冠层指数、作物产量、地上部生物量、地下部生物量
养分循环	土壤全氮磷钾、硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾、N_2O 通量、NH_3 通量、土壤亮氨酸酶活性、土壤 N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶、土壤磷酸酶活性
碳固存	土壤有机质、CO_2 通量、CH_4 通量、土壤β葡萄糖苷酶活性、pH、土壤团聚体、质地
生物多样性保护	土壤β葡萄糖苷酶活性、土壤亮氨酸酶活性、土壤 N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶、土壤磷酸酶活性、微生物生物量碳氮、土壤微生物多样性

参考文献

[1] DB22/T 2283—2015　耕地土壤肥力监测技术规程

[2] 陈洋, 李蕴峰, 李涛涛, 王 岑, 李超腾. 基于 RUSLE 模型的东北平原黑土区土壤侵蚀趋势及因子相关性分析[J]. 地质与资源, 2026, 35(2): 193-202.

[3] Shi, Y., Luan, L., Wang, X., Zhu, G., Ye, Y., Fan, J., Zhou, S., Jiang, Y. Multifunctional soil health assessment of long-term manure application to ferric acrisol[J]. European Journal of Soil Science. 2024, 75(6), e70022.

[4] Muller, L., Schindler, U., Berendt, A., Smolentseva, E., Smolentsev, B., Eulenstein, F.. The Müncheberg Soil Quality Rating (SQR). Field manual for detecting and assessing properties and limitations of soils for cropping and grazing[M]. Muenchenberg, Germany: Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), 2007