

# 团 体 标 准

T/CAMA 141—2025

## 基于可见/近红外光谱技术的柑橘冻伤检测 技术规范

Technical specifications for detection of citrus freezing damage based on  
visible/near-infrared spectroscopy

2025 - 11 - 27 发布

2026 - 01 - 01 实施

## 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。

本文件由中国农业机械化协会提出并归口。

本文件起草单位：浙江大学、浙江开浦科技有限公司、西北农林科技大学、深圳市鼎为科技有限公司。

本文件主要起草人：应义斌、徐惠荣、李麟、田世杰、谢宜超、饶秀勤、田昊、谢丽娟。

本文件是首次制定。

全国团体标准信息平台

# 基于可见/近红外光谱技术的柑橘冻伤检测技术规范

## 1 范围

本文件规定了基于可见/近红外光谱技术的柑橘冻伤检测技术的术语和定义、一般要求、柑橘冻伤检测模型校准。

本文件适用于配置有可见/近红外光谱检测系统和机器视觉系统的水果分选装备检测柑橘冻伤。

## 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 2760 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准  
GB 2762 食品安全国家标准 食品中污染物限量  
GB 2763 食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量  
GB/T 12947 鲜柑橘  
NY/T 2721 柑橘商品化处理技术规程

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**可见/近红外光谱技术** visible/near-infrared spectroscopy

利用物质对可见光/近红外波长光的吸收来识别和定量其化学组成的技术。

### 3.2

**果实尺寸** fruit size

用果实横径表示，垂直果柄和果蒂连线最大横切面的最大直径。

### 3.3

**透射方式** transmission mode

将光源和探测器分别布置在果实两侧，通过测量透过果实的光通量来分析果实的内部品质与缺陷的方法。

### 3.4

**吸收光谱** absorption spectrum

果实对不同波长光的吸光度值。

### 3.5

**光谱预处理** spectral preprocessing

对光谱数据进行提高信噪比的前期操作。

### 3.6

**光谱修正** spectral correction

校正果实尺寸对吸收光谱影响的操作。

### 3.7

**检测模型** detection model

利用化学计量学方法建立的样品近红外光谱与对应标准方法实测值之间关系的数学模式。

### 3.8

**机器视觉系统** machine vision

通过成像技术进行图像分析获取对象信息的装置。

## 3.9

**光谱检测系统** spectral detection system

用于获取和分析果实光谱数据的装置，一般包括光源、光谱仪、光纤、准直镜和计算机。

## 3.10

**特征波长** characteristic wavelength

对果实中某一特定化合物或成分最敏感或最具代表性的波长。

## 3.11

**冻伤** freezing damage

果实因低温而在细胞内部形成冰晶，导致细胞结构破坏和水分流失的现象。

## 3.12

**冻伤指数** freezing damage index

柑橘中发生冻伤的橘瓣数占全部橘瓣数的百分比。

## 3.13

**冻伤等级** freezing damage grade

柑橘发生冻伤的严重程度，分为轻微冻伤、一般冻伤和严重冻伤三个等级。

## 3.14

**参比球** reference ball

用于校准光谱检测系统采集的光谱信息的标准球体。

## 3.15

**暗场光谱** dark field spectrum

光谱检测系统处于黑暗状态下采集的光谱。

## 4 检测原理

柑橘果实发生冻伤时会在细胞内部形成白色冰晶，内部结冰的形成会破坏橘瓣细胞结构，最终造成其细胞水分的流失，导致橘瓣脱水。这种细胞内部结晶及脱水现象会使柑橘在可见/近红外光谱中的吸收光谱值降低，尤其是在 700 nm~850 nm 波长范围内。以透射方式获得柑橘在可见/近红外光谱波长的吸收光谱，通过化学计量学方法建立柑橘吸收光谱与内部冻伤之间的映射关系，从而实现利用可见/近红外光谱技术对柑橘冻伤的快速无损检测。

## 5 一般要求

## 5.1 果实

感官和理化指标应符合 GB/T 12947 的规定，卫生指标应符合 GB 2760、GB 2762 和 GB 2763 的规定，且无病虫害、无畸形、无损伤、不带叶和无包装。

## 5.2 水果分选装备

水果分选装备应至少包含上料输送部分、机器视觉系统、光谱检测系统和分级出口等，能实时获取果实尺寸和吸收光谱信息。水果分选装备的安装使用区域应符合 NY/T 2721 的规定。

## 5.3 参比球

参比球应采用白色聚四氟乙烯制作，实心且表面光滑，直径应与柑橘果实尺寸均值相近。

## 5.4 人员

操作人员应经过专业技术培训合格，熟悉光谱采集、水果分选装备使用及果实特点，辅助人员应具备基本的设备使用常识。

## 6 柑橘冻伤检测模型校准

## 6.1 光谱采集

### 6.1.1 采集模式

将水果分选装备的光谱检测系统设置为透射方式。

### 6.1.2 光谱采集步骤

采用透射方式采集暗场光谱、参比球光谱和柑橘光谱，按照公式（1）对柑橘原始光谱进行吸收光谱转换。

$$Ab = -\lg\left(\frac{In-Da}{Re-Da}\right) \dots\dots\dots(1)$$

式中：

$Ab$ ——柑橘吸收光谱；

$In$ ——柑橘原始光谱；

$Re$ ——参比光谱；

$Da$ ——暗场光谱。

### 6.2 果实尺寸检测

用水果分选装备的光谱检测系统的机器视觉系统检测果实尺寸，误差应小于1 mm。

### 6.3 果实冻伤等级信息采集

按公式（2）计算柑橘冻伤指数。

$$F_I = \left(\frac{F_N}{A_N}\right) \times 100\% \dots\dots\dots(2)$$

式中：

$F_I$ ——冻伤指数,即冻伤橘瓣数占柑橘总橘瓣数的百分比, %;

$F_N$ ——检测柑橘已冻伤的橘瓣数, 个;

$A_N$ ——检测柑橘总橘瓣数, 个。

切开柑橘并观察橘瓣，按公式（2）计算柑橘冻伤指数并分级：冻伤指数<10%时，为轻微冻伤果实；10%≤冻伤指数<40%时，为一般冻伤果实；冻伤指数≥40%时，为严重冻伤果实。

### 6.4 光谱预处理

运用平滑、多元散射校正或标准正态变换等方式对吸收光谱进行预处理，去除或减少数据中的非系统噪声、基线漂移和光散射效应等干扰因素，提升数据质量。

### 6.5 光谱修正

#### 6.5.1 相关性权值计算

按公式（3）计算柑橘吸收光谱在不同波长光的吸光度值与果实尺寸的相关性权值。

$$r = \frac{\sum(X-\bar{X})(Y-\bar{Y})}{\sqrt{\sum(X-\bar{X})^2 \sum(Y-\bar{Y})^2}} \dots\dots\dots(3)$$

式中：

$r$ ——测量波长下的吸光度值和果实尺寸的相关性权值；

$X$ ——单个柑橘样本在测量波长下吸收光谱中的吸光度值；

$Y$ ——单个柑橘样本的果实尺寸, mm；

$\bar{X}$ ——所有柑橘样本在测量波长下吸收光谱中吸光度值的平均值；

$\bar{Y}$ ——所有柑橘样本果实尺寸的平均值, mm。

#### 6.5.2 光谱修正

将样本吸收光谱每个波长点与果实尺寸的相关性权值进行统计比较，记录与果实尺寸相关性权值最高波长点。将每一个柑橘吸收光谱除以该柑橘最高波长点处的吸光度值，得到该柑橘的修正光谱。

### 6.6 冻伤检测模型校准方法及判别规则

#### 6.6.1 样本选择

选取不同果实尺寸且包含轻微冻伤、一般冻伤和严重冻伤等3种冻伤等级的样本作为建模样本，各冻伤等级样本不应少于30个样本。

### 6.6.2 数据集划分

在建模样本随机抽取 $m$ 个样本的吸收光谱和其对应的冻伤等级划作为训练集，剩余的 $n$ 个样本的吸收光谱和其对应的冻伤等级划作为测试集，划分训练集和测试集的 $m:n$ 应基本符合 $2:1$ 。

### 6.6.3 特征波长选择

通过波长寻优算法获得与柑橘冻伤高度相关的光谱范围，得到特征波长。

### 6.6.4 判别规则

从训练集的吸收光谱中抽取特征波长对应的吸收光谱值及训练集对应的冻伤等级值，采用偏最小二乘判别分析算法（或其他机器学习、深度学习算法）校准柑橘冻伤检测模型。

将测试集数据输入柑橘冻伤检测模型得到测试集判别结果，比较测试集判别结果和测试集冻伤等级值，计算轻微冻伤、一般冻伤和严重冻伤类柑橘和全部柑橘的判别准确率。

判别准确率应不低于85%，如不符合要求，则从6.6.1开始重新校准，直至判别准确率符合要求，得到最优柑橘冻伤检测模型。

## 6.7 冻伤检测模型更新

应定期选取不同产地、不同年份的果实样本，采用6.6的方法更新冻伤检测模型。

---