

稻谷品种对电容法谷物水分测定仪测量准确度的影响



崔体运, 沈淘淘, 邬昕, 刘宇明, 张文东

上海市计量测试技术研究院, 上海 201203

【摘要】 电容法谷物水分测定仪作为快速测量谷物水分的仪器, 广泛应用于粮食的贸易结算环节, 属于国家实施强制管理的计量器具之一。基于电容法测量原理的水分仪, 稻谷含水率的测量准确度受到诸多因素影响。对稻谷品种这一影响因素作相关试验研究分析。通过在含水率约 11.5%、16.5% 两个水分点, 使用 3 台电容法水分仪分别对 7 种不同品种的稻谷进行含水率测量试验, 结果表明稻谷品种对电容法谷物水分仪的测量准确度有显著影响, 不宜使用同一台水分仪对不同品种的稻谷进行含水率测量。

【关键词】 计量学; 电容法; 水分测定仪; 含水率; 稻谷品种; 准确度

【中图分类号】 TB99

【文献标识码】 A

【文章编号】 2096-9015(2024)12-0077-06

DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2024.0106

【引用本文】 崔体运, 沈淘淘, 邬昕, 等. 稻谷品种对电容法谷物水分测定仪测量准确度的影响 [J]. 计量科学与技术, 2024, 68(12): 77-82.

Influence of Paddy Varieties on the Measurement Accuracy of Capacitive Grain Moisture Meters

CUI Tiyun, SHEN Taotao, WU Xin, LIU Yuming, ZHANG Wendong

Shanghai Institute of Measurement And Testing Technology, Shanghai 201203, China

【Abstract】 Capacitive grain moisture meters are widely used in grain trade settlements for rapid measurement of grain moisture and are among the measuring instruments under compulsory state management. The measurement accuracy of paddy moisture content using the capacitive method is influenced by various factors, including the variety of paddy. In this study, we investigate the effect of different paddy varieties on the measurement accuracy of capacitive grain moisture meters. The moisture content of seven different paddy varieties was measured using three capacitive grain moisture meters at two moisture levels, approximately 11.5% and 16.5%. The results indicate that paddy varieties significantly affect the measurement accuracy of capacitive grain moisture meters. Therefore, it is not advisable to use the same moisture meter to measure the moisture content of different paddy varieties without considering variety-specific calibrations.

【Key words】 metrology, capacitive method, moisture tester, moisture content, paddy varieties, accuracy

0 引言

含水率是谷物最关键的品质参数之一, 不仅在谷物加工、存储中具有十分重要的意义, 而且会影响到谷物贸易结算的价格^[1-3]。准确的含水率测定是适当调整价格的基础, 也是确保谷物安全储存的重要依据。由于水分含量的重要性, 贸易结算与谷物存储时往往都需要准确测定谷物含水率。

电容法谷物水分测定仪因成本低、操作简单、响应时间快、质量轻、易携带、无需对被测谷物样品进行复杂预处理等优势^[4], 在谷物贸易结算环节

得到普遍采用。但电容法水分测定仪是基于介电特性快速测量谷物含水率的方法, 其测量准确度受到诸多因素的影响。为了能够准确测量谷物含水率, 国内外众多科研工作者进行了大量的理论研究, 如在线式电容法水分仪的理论研究与建模设计, 新的水分测量方法研究, 以及小麦玉米稻谷等不同谷物种类、烘干时间、粉碎细度等对水分仪测量的影响及实验分析等^[5-23]。稻谷作为我国第一大粮食作物, 因其种植范围广、气候条件多样、品种数量繁多等, 给电容法谷物水分测定仪的准确度带来了极大

收稿日期: 2024-03-29; 修回日期: 2024-04-12

作者简介: 崔体运 (1985-), 上海计量测试技术研究院高级工程师, 研究方向: 湿度与水分、温度计量等, 邮箱: cuitiyun@simt.com.cn。

挑战,本文针对这种现象,以稻谷种类作为变量进行了相关试验研究分析。

1 测量原理

1.1 介电特性

介电常数是谷物的重要物理参数之一。在室温状态下,干燥状态时的谷物介电常数约为 2~4,水的介电常数约为 80,两者的介电常数有显著差异^[24]。不同含水率的谷物样品,其介电常数也有较大差异。研究表明,谷物的介电常数随含水率的增加而增加,两者具有明显的线性相关性^[25-26],构成了电容法水分仪对谷物含水率测量的理论基础。

稻谷的介电常数主要受测量时施加的电场频率 f 、含水率 M 、温度 T 等影响,另外霉变、杂质等也会对稻谷的介电常数带来干扰^[27-29]。因稻谷品种 k 不同,谷粒的形状、大小、稻壳与糙米的谷粒内间隙等不同,以及在使用电容法水分仪进行含水率测定时自然掉落堆密度、谷粒与谷粒之间的空隙都会不同,本文将这些因素统一考虑为稻谷品种的影响。稻谷介电常数 ε_1 的影响因素用式(1)表征。

$$\varepsilon_1 = f(\text{频率 } f, \text{含水率 } M, \text{温度 } T, \text{品种 } k) \quad (1)$$

1.2 测量模型

电容传感器将非电量的变化转化为电容量的变化,以实现物理量的测量^[30]。电容法谷物水分测定仪是利用谷物含水率与电容量变化量的对应关系设计制造的仪器。试验用电容式谷物水分测定仪采用的是同心圆筒式电容传感器,其结构如图 1 所示。

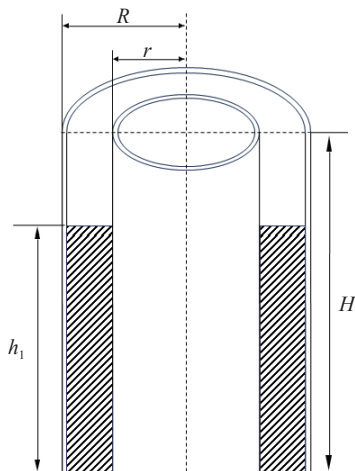


图 1 同心圆筒式电容传感器示意图

Fig.1 Schematic diagram of concentric cylindrical capacitance sensor

未加载谷物时,电容传感器的填充介质为空气。此时同心圆筒式电容传感器的简化数学模型如式(2)所示。

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{R}{r}} H \quad (2)$$

加载谷物时,电容传感器的填充介质是高度为 h_1 的谷物以及空气。此时同心圆筒式电容传感器测量稻谷含水率的简化数学模型如式(3)所示。

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_1}{\ln(R/r)} h_1 + \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(R/r)} (H - h_1) \quad (3)$$

通过式(2)与式(3)计算可知,电容变化量 ΔC 如式(4)所示。

$$\begin{aligned} \Delta C &= C - C_0 \\ &= \left(\frac{2\pi\varepsilon_1 h_1}{\ln(R/r)} + \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(R/r)} (H - h_1) \right) - \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(R/r)} H \\ &= \frac{2\pi h_1}{\ln(R/r)} (\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \\ &= \frac{2\pi m}{\ln(R/r) \pi (R^2 - r^2) \rho} (\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, C 、 C_0 分别表示加载状态与空载状态的电容量; H 、 h_1 分别表示电极的高度与稻谷加载的高度; m 、 ρ 分别表示加载的稻谷质量与自然落料堆密度; ε_1 、 ε_0 分别表示稻谷样品的介电常数与空气的介电常数。

2 材料与方法

2.1 试验材料与仪器

试验材料:沪软 1212、沪粳 137、秀水 134、秋优金丰、沪香粳 106、银香 38、南粳 46、花优 14、松早香 1013、崇明 9108、申优 26,产地均为上海市。

试验仪器:电容法谷物水分测定仪 3 台、分度值 0.1 mg 的 ①级电子天平、电热恒温干燥箱、铝盒、干燥皿等。

2.2 试验方法

2.2.1 样品制备

对试验用稻谷样品进行挑选,确保颗粒饱满、无杂质、无霉变。通过晾晒、低温烘干(不超过 40℃)的方式制备含水率约 11.5% 的样品,用注水加湿的方式制备含水率约 16.5% 的样品。制备的样品放置于密封袋内,再整体置于 5℃ 的冷藏箱内贮存。样品在注水加湿后的前 4 天,保证每天反复振荡样品 2 次以上,每次持续 1 min 左右。为了充分保障制备样品的均匀性,制备样品在冷藏箱内均贮

存 30 天以上, 给予充足的时间消除稻谷谷粒与谷壳之间水分不一致的影响。

本次试验在含水率约 11.5%、16.5% 两个水分点附近, 分别制备了 7 份不同稻谷品种的样品, 共计 14 份稻谷样品, 每个样品约 500g。其中较低含水率分布在 11.3%~11.9% 之间, 较高含水率分布在 15.8%~17.0% 之间。

2.2.2 样品实际含水率测定

谷物水分测定方法较多, 众多学者对各种方法进行了相关的研究^[31], 本文稻谷样品的实际含水率用 105℃ 恒重法测定^[32], 步骤如下:

1) 取 30 g 左右的谷物样品粉碎, 粉碎细度通过 1 mm 试验筛不少于 90%。

2) 取 2 份约 3 g 左右的粉碎样品均匀平摊于 2 个已知质量的铝盒中, 分别称量并记录谷物样品与铝盒总质量。

3) 将 2 个装有样品的铝盒放置于温度已达到平衡的 105℃ 电热恒温干燥箱内, 将铝盒盖子打开, 烘干 3 h。

4) 烘干后, 迅速盖紧盒盖并取出, 放入干燥皿内冷却至室温, 称量并记录总质量。

5) 按照上述方法进行复烘, 每隔 1h 取出冷却后称量并记录, 直至前后两次总质量差不超过 4 mg 为止。

样品通过烘干失去的水分质量与加入铝盒的原质量之比(约 3 g)即为稻谷的含水率。若测得的

2 份样品含水率之差不超过 0.2%, 取平均值作为样品的实际含水率, 若 2 个样品含水率之差超出 0.2%, 重新试验。

2.2.3 示值误差(准确度)测量

测量前, 从冷藏箱内取出待测稻谷样品, 与 3 台水分仪放在同一个实验室环境中等温 16 h 以上, 使水分仪、稻谷样品的温度与环境温度一致。

测量时, 先将密封袋中的稻谷样品充分摇匀, 然后用水分测量该样品(P1 档: 梗谷), 同一样品重复测量 4 次, 分别记录水分仪的含水率示值。取 4 次测量值的平均值作为含水率测量值, 示值误差(测量准确度)结果可表达为式(5)。

$$\Delta M = M_1 - M_2 \quad (5)$$

式中, ΔM 表示水分仪的示值误差; M_1 表示水分仪的含水率测量值; M_2 表示稻谷样品的实际含水率。

3 试验结果与分析

为了便于实验分析, 将 3 台电容法谷物水分测定仪分别编号为 1#、2#、3#; 将 14 组不同品种、不同含水率的稻谷样品依次标记为 $k_1 \sim k_{14}$ 。

使用 3 台水分仪对 $k_1 \sim k_{14}$ 稻谷样品进行含水率测量, 结果数据见表 1、表 2。测量过程中, 使用水分仪配备的固定体积落料筒以自然落料的方式加载稻谷, 即对同一稻谷样品测定时, 加料的总质量、落料堆密度、孔隙率等尽量保持一致, 保障对同一稻谷样品的测量重复性。

表 1 较低含水率下的测量结果

Tab.1 Measurement results at lower moisture content

单位: %

稻谷品种	沪软1212	沪粳137	秀水134	秋优金丰	沪香粳106	银香38	南粳46
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
M_2	11.8	11.3	11.3	11.9	11.3	11.9	11.9
1# M_1	12.7	11.6	12.5	12.1	12.3	12.2	11.7
ΔM	0.9	0.3	1.2	0.2	1.0	0.3	-0.2
2# M_1	12.7	11.5	12.4	11.9	12.1	12.2	11.5
ΔM	0.9	0.2	1.1	0.0	0.8	0.3	-0.4
3# M_1	12.6	11.4	12.2	11.8	12.1	12.1	11.4
ΔM	0.8	0.1	0.9	-0.1	0.8	0.2	-0.5

表 2 较高含水率下的测量结果

Tab.2 Measurement results at higher moisture content

单位: %

稻谷品种	沪软1212	沪粳137	花优14	松早香1013	南粳46	崇明9108	申优26
	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}
M_2	15.8	16.5	17.0	17.0	16.6	16.1	15.8
1# M_1	15.8	17.0	17.6	17.5	17.5	16.1	16.0
ΔM	0.0	0.5	0.6	0.5	0.9	0.0	0.2

续表 2

稻谷品种		沪软1212	沪粳137	花优14	松早香1013	南粳46	崇明9108	申优26
		k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}
2#	M_1	15.9	16.9	17.4	17.5	17.5	16.1	15.9
	ΔM	0.1	0.4	0.4	0.5	0.9	0.0	0.1
3#	M_1	15.7	16.9	17.3	17.4	17.5	15.9	15.8
	ΔM	-0.1	0.4	0.3	0.4	0.9	-0.2	0.0

3.1 稻谷品种对测量准确度影响分析

在本文系列试验中,使用3台水分仪测量不同谷物品种的样品含水率时,按照水分仪说明书要求,采用固定体积的落料筒,以自然落料的方式完成测量。实验数据表明,自然落料的方式保证了水分仪对同一谷物品种同一含水率样品的测量重复性不大于0.1%,即对水分仪测量准确度影响的分析中,因水分仪测量重复性引入的影响不予考虑。

实验过程中,实验室环境温湿度及谷物温度 T 恒定,测量过程中施加的电场频率 f 固定不变,稻谷样品介电常数 ϵ_1 仅是含水率 M 与品种 k 的函数。由式(4)可知,电容变化量取决于被测稻谷的介电常数 ϵ_1 与堆密度 ρ 。在使用固定体积落料筒自然落料的情况下,堆密度 ρ 直接受稻谷品种颗粒外形、大小、含水率等影响,为稻谷品种 k 、含水率 M 的函数。结合式(1)与式(4),含水率与电容变化量的关系可简化表示如式(6)。

$$M = g(\Delta C, k) \quad (6)$$

由稻谷及水分的物理特性可知,水的介电常数远大于干燥状态下稻谷的介电常数。当谷物中水分含量越大,占干燥谷物与水分构成的复合介电常数的权重就越大,谷物样品的复合介电常数 ϵ_1 就越大。由电容法水分仪测量原理可知,电容变化量 ΔC 与含水率 M 呈单值对应关系。水分仪测得电容变化量 ΔC 的大小,直接表征了介电常数 ϵ_1 较 ϵ_0 产生的变化量,最终反应了被测谷物样品中水分含量的大小。即电容变化量 ΔC 越大,谷物含水率 M 越大,反之亦然。

通过式(6)可知,谷物品种 k 对谷物含水率 M 与电容变化量 ΔC 的函数关系有直接影响。以表1中 k_2 、 k_3 稻谷样品为例,其实际含水率 M_2 均为11.3%,在不考虑稻谷品种影响的情况下,理论上简单分析,谷物水分测定仪测得的电容变化量 ΔC 应一致。观察1#水分仪的测量结果, k_2 、 k_3 的测量含水率 M_1 分别为11.6%、12.5%,与实际含水率的差值分别为0.3%、1.2%,且两者之间的的测量结果也存

在0.9%的差值。

在最理想测量状态下, k_2 、 k_3 的测量结果应均为11.3%,符合水分仪预设的 $M \sim \Delta C$ 函数关系。观察最终测量数据,结合式(4)、(6)分析可知,被测 k_2 、 k_3 稻谷品种的样品介电常数 ϵ_1 均较预设的介电常数产生了不同程度的正偏离,在稻谷样品实际含水率一样的情况下,实际测得的电容变化量 ΔC 有不同程度的变大,最终导致了谷物水分仪的在 k_2 、 k_3 稻谷品种测量时,分别产生了0.3%、1.2%的测量误差。由此可见,在实际含水率一致的情况下,稻谷品种的改变导致了电容变化量不一致,最终影响了水分仪的测量准确度。

为了更直观的观测稻谷品种对测量准确度的影响,将稻谷品种与示值误差(测量准确度)的对应关系绘制图2、图3。

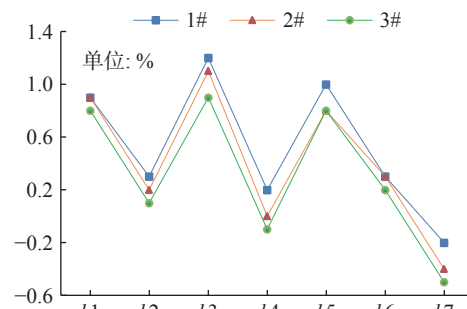


图2 水分仪示值误差(较低含水率)
Fig.2 Errors of moisture meter readings (lower moisture content)

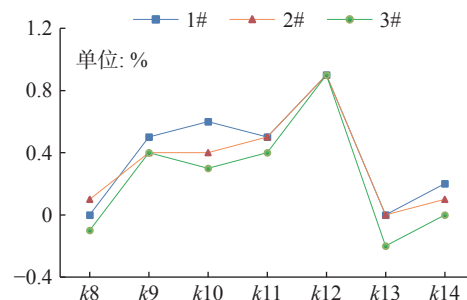


图3 水分仪示值误差(较高含水率)
Fig.3 Errors of moisture meter readings (higher moisture content)

从图 2、图 3 可知,因被测稻谷品种的改变,3 台水分仪测量准确度 ΔM 的变化趋势存在较强的一致性,其测量准确度受稻谷品种的影响有显著改变。以稻谷品种 k3 与 k7 为例进行对比,1#、2#、3# 水分仪的示值误差分别由 1.2%、1.1%、0.9% 变为 -0.2%、-0.4%、-0.5%,其改变量分别达到了 1.4%、1.5%、1.4%。对于准确度等级为 0.5 级的谷物水分测定仪,因稻谷品种的改变,导致其示值误差超出最大允许误差(MPE: $\pm 0.5\%$),影响水分仪的正常使用。

综上所述,因稻谷品种(粳谷)的不同,其颗粒形状、大小、饱满程度,稻壳内间隙,稻壳与糙米质量占比等参数均有差异,导致不同品种的稻谷样品即使在实际含水率一样的情况下,在测量腔内稻谷颗粒间的分布规则、孔隙率占比、稻壳内间隙以及稻壳质量占比等不同,进一步引起稻谷样品的实际介电常数 ϵ_1 与堆密度 ρ 的不同。本文实验数据表明,水分仪测量含水率与电容变化量的 $M \sim \Delta C$ 函数关系,因稻谷品种的不同发生偏离,造成不同稻谷品种间的测量准确度有较大的差异。

3.2 测量准确度对水分仪使用影响分析

为了便于分析不同稻谷品种之间的测量数据是否可相互采信,分别取 k1 ~ k7 稻谷较低含水率标准值的平均值 11.63%、k8 ~ k14 稻谷较高含水率标准值的平均值 16.40%、以及 1#、2#、3# 水分仪分别在 k1 ~ k7、k8 ~ k14 的测量结果平均值(记为 x)绘制表 3。

表 3 水分仪测量数据分析

Tab.3 Analysis of measurement data of moisture meters

实际含水率平均值(%)	水分仪编号	测量结果平均值 x (%)	x 的示值误差(%)	x 的标准偏差(%)
16.40	1#	16.79	0.39	0.33
	2#	16.75	0.35	0.31
	3#	16.64	0.24	0.38
11.63	1#	12.16	0.53	0.51
	2#	12.06	0.43	0.54
	3#	11.94	0.31	0.53

观察表 3 中 1#、2#、3# 水分仪在两个水分测量点的分析处理结果,可知 x 的示值误差与标准偏差相当,说明测量结果受稻谷品种影响过大,不宜使用同一台水分仪对不同品种的稻谷进行含水率测量。若使用其他稻谷品种标定的水分仪,应使用被测稻谷样品予以验证或重新标定。在计量检测过程中,建议对电容法水分测定仪使用某种稻谷进行标定或出具证书报告时,注明所使用的稻谷品种。

3.3 测量准确度修正因子的探讨

为了消除谷物品种对测量准确度的影响,小麦含水率的测量引入容重参数作为修正因子,玉米含水率测量时对颗粒大小进行了简单区分,但罕见相关文献对稻谷含水率测量准确度的修正研究。考虑到此类电容法谷物水分仪均有便携、体积小、使用方便的需求,本文也采用容重这一参数对测量准确度进行修正。以 k1 ~ k7 为例,含水率在 11.3% ~ 11.9% 之间,以 3 台水分仪在 k1 ~ k7 的测量结果 ΔM 的平均值与 k1 ~ k7 的容重关系绘制曲线,如图 4 所示。

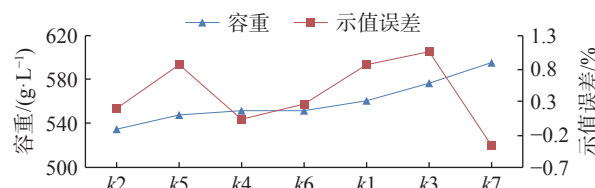


图 4 容重与水分仪示值误差关系图

Fig.4 Relationship between bulk density and moisture meter reading error

观察图 4 可知,1)在含水率接近的情况下,因稻谷颗粒形状、饱满程度、稻壳质量比重等诸多因素影响,不同品种稻谷的容重差异较大,本文选取的稻谷品种,其容重由约 530 g/L 至 600 g/L 不等;2)水分仪示值误差并未随稻谷容重单调递增,而是呈现出锯齿形波动。可见,无法单纯采用容重对含水率测量结果进行修正,以实现水分仪较高的测量准确度[33]。

4 结果与讨论

受限于稻谷品种以及水分仪的统计样本数量,有以下结论供参考。

1) 稻谷品种对水分仪的测量准确度有显著影响,且影响了水分仪的正常使用。因稻谷品种改变,在 11.5% 测量点附近,水分仪的示值误差改变量值高达 1.5%;在 16.5% 测量点附近,水分仪的示值误差改变量值高达 1.0%。

2) 在计量检测过程中,对电容法水分测定仪使用稻谷进行标定或出具证书报告时,应注明所使用的稻谷品种。

3) 因稻谷容重对水分仪准确度的影响非线性,无法单纯采用容重单一因子对测量结果进行修正,以实现水分仪较高的测量准确度。

通过本文的试验研究得知,电容法水分仪对稻谷样品含水率测量时, $M \sim \Delta C$ 函数关系不具有普

适性,影响了水分仪测量准确度,应通过积累、分析更多、更广泛的基础实验数据,研究稻谷品种对水分仪测量准确度的影响因素,建立更合理的含水率测量模型,实现水分仪测量值和参考值之间的最佳拟合。

参考文献

- [1] International Organization for Legal Metrology. Moisture meters for cereal grains and oilseeds. Part 1: Metrological and technical requirements: R 59-1 Edition 2016 (E) [S]. OMIL, 2016.
- [2] 蔡泽宇, 刘政, 张光跃, 等. 谷物含水率测量技术研究进展 [J]. 中国农机化学报, 2021, 42(4): 99-109.
- [3] 陈建伟, 贾继荣, 周广斌. 粮食“国标水分”和“安全水分”的区别和应用 [J]. 粮油科学与工程, 2024, 38(1): 1-2,6.
- [4] 张晓波, 顾晓红, 单红, 等. 便携式谷物水分测定仪的精密度和准确度分析 [J]. 粮食与饲料工业, 1999, 5, 44-45.
- [5] Li C, Zhao C, Ren Y, *et al.* Microwave traveling-standing wave method for density-independent detection of grain moisture content[J], Measurement, 2022, 198.
- [6] B. S J, Sheng W. , Dani O . Dielectric Measurement of Agricultural Grain Moisture —Theory and Applications [J]. Sensors, 2022, 22 (6): 2083-2083.
- [7] 郭文川, 王婧, 朱新华. 基于介电特性的燕麦含水率预测 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 272-279.
- [8] Li C. , Yu X. , Chen Z. , Song Q. , Xu Y. Free space traveling-standing wave attenuation method for microwave sensing of grain moisture content[J]. Measurement and Control, 2021, 54 (3-4): 336-345.
- [9] 梁尹明, 章祖民, 张伟金, 等. PM-8188New 谷物水分仪烘干稻谷适宜测定时间探讨 [J]. 中国稻米, 2018, 24(6): 50-52,55.
- [10] 陈小玉. 一种新型的快速检测粮食含水率的装置的设计 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [11] Amira N R M , Hafiz M R F , Munirah L K , *et al.* . A New Method of Rice Moisture Content Determination Using Voxel Weighting-Based from Radio Tomography Images. [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2021, 21(11): 3686-3686.
- [12] 徐宗季, 王平东, 袁华山, 等. 不同水分磨的粉碎细度对粮食水分含量的影响 [J]. 粮食储藏, 2021, 50(1): 48-52.
- [13] 阎晓光, 杜艳伟, 李洪, 等. 玉米籽粒水分的快测法误差分析 [J]. 作物杂志, 2020(5): 170-173.
- [14] Song Q , Wei X , Sun W , *et al.* Design of Capacitive Paddy Moisture Sensor Based on Electrical Impedance Spectroscopy Analysis[J]. Applied Sciences, 2020, 10(11): 3968.
- [15] 张越, 赵进, 赵丽清, 等. 基于介电特性谷物水分在线测量仪的设计与试验 [J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 105-110.
- [16] 王润. 粮食温度对谷物水分测定仪结果的影响 [J]. 粮油仓储科技通讯, 2023, 39(1): 45-47.
- [17] Héctor P , Karina J , Mario G , *et al.* Determination of Moisture in Rice Grains Based on Visible Spectrum Analysis[J]. Agronomy, 2022, 12(12): 3021-3021.
- [18] Sun W, Wan L, Che G, *et al.* Design and Experiment of Capacitive Rice Online Moisture Detection Device.[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2023, 23(12): 5753.
- [19] 孙文胜. 电容式水稻在线水分检测装置的优化设计与试验研究 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2023.
- [20] 赵晨宇. 基于微波空间驻波法的谷物含水率无损检测方法及其装置研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.
- [21] 黄健, 李南. 基于射频技术的谷物水分快速检测方法与标准方法的比较与分析 [J]. 现代食品, 2023, 29(5): 186-188,192.
- [22] 孟敏刚, 张雪峰, 李成杰, 等. 稻谷落入姿势对电阻式水分仪检测精度的影响 [J]. 农机化研究, 2024, 46(9): 192-197.
- [23] 徐永阳, 邓安, 邱伟强, 等. 不同含水率稻谷电学物理量变化规律 [J]. 食品工业, 2024, 45(2): 114-120.
- [24] 李泽峰, 金诚谦, 刘政, 等. 谷物联合收获机水分在线检测装置设计与标定 [J]. 中国农机化学报, 2019, 40(6): 145-151.
- [25] 张越, 赵进, 赵丽清, 等. 基于介电特性谷物水分在线测量仪的设计与试验 [J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 105-110.
- [26] 应火冬. 谷物介电性质及其在含水量测量中的应用 [J]. 农业工程学报, 1992(3): 113-119.
- [27] 周显青, 赵希雷, 张玉荣, 等. 谷物水分检测技术现状与展望 [J]. 粮食加工, 2015, 40 (4): 29-34.
- [28] 罗承铭. 基于电容法的谷物水分检测系统研究与设计 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011.
- [29] 罗承铭, 师帅兵. 电容法粮食物料含水率与介电常数关系研究 [J]. 农机化研究, 2011, 33(4): 149-151.
- [30] 陈育中. 基于电容式传感器的水分测试仪的设计与实现 [J]. 制造业自动化, 2011, 33(24): 84-87.
- [31] 董娜, 李伟航, 杨忠宝. 粮食水分测定方法与设备 [J]. 粮食加工, 2021, 46(5): 87-91.
- [32] 全国物理化学计量技术委员会. 电容法和电阻法谷物水分测定仪检定规程: JJG891-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [33] 刘志壮, 吕贵勇. 基于电容法的稻谷含水率检测 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 179-182.

本文编辑: 江迪

(上接第 20 页)

- [56] PUNEETH S, GOEL S. Novel 3D printed microfluidic paper-based analytical device with integrated screen-printed electrodes for automated viscosity measurements[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(7): 3196-3201.
- [57] JANG I, BERG K E, HENRY C S. Viscosity measurements utilizing a fast-flow microfluidic paper-based device[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 319: 128240.

本文编辑: 江迪