

干燥过程中玉米水分质量分数均匀度的 高光谱图像无损检测

赵伟彦¹, 黄敏^{*1}, 张慜²

(1. 江南大学 轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 食品科学与技术国家重点实验室 江南大学, 江苏 无锡 214122)

摘要: 水分含量均匀度是干燥过程一个重要指标, 它是评价干燥食品质量和干燥工艺一个重要参数。作者以干燥过程中的玉米为研究对象, 研究高光谱图像技术检测水分质量分数均匀度的方法。采用均值特征和标准差特征结合偏最小二乘法(PLS)建立预测模型; 并用正交信号校正法对均值特征和标准差进行预处理。结果表明: 均值特征和标准差进行预处理后所建立的模型效果较好, 预测相关系数为 0.839, 预测均方根误差为 1.74%, 潜在变量的数目为 2 个。研究表明: 高光谱图像技术可用于水分质量分数均匀度的直接无损检测。

关键词: 粮食干燥; 高光谱图像技术; 均匀度; 正交信号校正法

中图分类号: S513; TS207.3 文献标志码: A 文章编号: 1673—1689(2015)07—0717—07

Non-Destructive Detection of Moisture Content Uniformity During the Drying Process of Maize by Hyperspectral Imaging Technology

ZHAO Weiyan¹, HUANG Min^{*1}, ZHANG Min²

(1. Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Moisture content uniformity is one of the primary parameters in a drying process, which is important to evaluate the quality of dried-foods and the drying technique. The moisture content uniformity detected by the hyperspectral imaging technology was studied in the drying process of maize. A prediction model was developed by the mean and standard deviation features combined with the partial least squares (PLS), where orthogonal signal correction method was used as the preprocessing method. The results showed that the prediction model developed by the mean and standard deviation features after preprocessing achieved the optimal performance with the correlation coefficient of 0.839 and the root mean square error of 1.74%, while the latent variables was reduced to 2 variables. Therefore, the hyperspectral imaging technology could be used as a non-destructive

收稿日期: 2014-09-13

作者简介: 国家自然科学基金项目(61271384, 61275155); 江苏省自然科学基金项目(BK2011148)。

* 通信作者: 黄敏(1974—), 女, 辽宁铁岭人, 工学博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事近红外成像和高光谱图像技术分析研究。

E-mail: huangmzqb@163.com

detection of moisture content uniformity.

Keywords: grain drying, hyperspectral imaging technology, uniformity, orthogonal signal correction

干燥是食品储藏、加工的一项重要技术。水分质量分数均匀度是反映干燥后食品质量的重要指标之一。干燥不均匀的食品,其安全储存期相对缩短,生物活性及储存稳定性相对降低,严重时会引起食品的腐烂变质,带来食品生产安全事故^[1-2]。传统的测量水分质量分数均匀度的方法破坏样本的完整性、操作复杂,费时费力^[3]。因此寻找一种快速的准确的无损的检测干燥后食品水分质量分数均匀度方法显的尤为必要。

从国内外已有的文献来看,国内外学者研究了多种食品中水分的快速无损检测方法^[4-9],但是对食品中水分质量分数均匀度直接无损检测方法还未见有关报道。在这些水分无损检测技术中,近红外技术和高光谱图像技术是两个应用最为广泛的技术。李晓丽等^[10]通过可见-近红外光谱采用支持向量机建立了初制绿茶含水率的预测模型,预测集相关系数达到 0.987 5;毛罕平等^[11]通过光谱分析技术采用主成分回归法建立了葡萄叶片干基含水率的定量分析预测模型,预测模型的相关系数达到 0.94,模型的检验误差为 0.15,Huang 等^[12]通过高光谱图像技术实现了对脱水毛豆水分质量分数的无损检测,预测集的相关系数达到 0.973,预测集的均方根误差为 4.6%。上述研究对水分的预测得到了很高的精度;但作者的研究发现,利用预测的水分质量分数进行水分质量分数均匀度计算却存在较大的误差,无法满足实际应用需要(参见本文的 2.3 结果)。如何利用近红外或高光谱图像技术进行水分质量分数均匀度的直接无损检测仍是一个需要研究的课题。作者以干燥过程中的玉米水分质量分数均匀度直接检测为研究目的,研究了采用正交信号校正法对光谱进行预处理后的所建模型的性能,以达到对水分质量分数均匀度快速的准确的无损检测和简化模型、优化模型性能的目的。

1 材料与方法

1.1 实验原料

玉米籽粒采购于无锡市市场,选择饱满子粒并

清洗后放入温度为 4 ℃、相对湿度为 95%的冷藏室储存。每次实验前,回温 1 h 后,擦干玉米表面的水分后使用。

1.2 干燥设备

采用脉冲喷动微波真空干燥(PSMVD)设备对玉米粒进行干燥,该实验装置脉冲喷动系统带有一套空气处理装置及空气流量调节与分配装置^[13]。干燥设备的具体参数设置如下:脉冲喷动的频率设置为喷动间隔时间为 3 s,每次喷动时间维持 5 s。干燥仓内真空压力波动范围设定在 7~10 kPa,功率为 516 W,每次干燥样本质量为(200±0.5) g。为了获得较大范围的水分质量分数及其均匀度分布,以反映检测模型的适应性。设置了 10,20,30,40,50,60 min 共 6 个干燥时间,每个干燥时间实验重复 3 次。

1.3 高光谱图像采集系统

实验中使用高光谱反射图像采集系统如图 1 所示。该系统主要包括高光谱成像单元、光源系统、样本输送平台和装有图像采集卡的计算机组成。其中高光谱成像单元由 CCD 摄像机 (pixelfly QE IC*285AL,Cooke,USA) 和图像光谱仪 (1003A-10140 Hyperspec™ VNIR C-Series,Headwall Photonics Inc.,USA) 两部分组成;光源系统为 150 W 的直流卤素灯 (3250K,Technique,USA)。

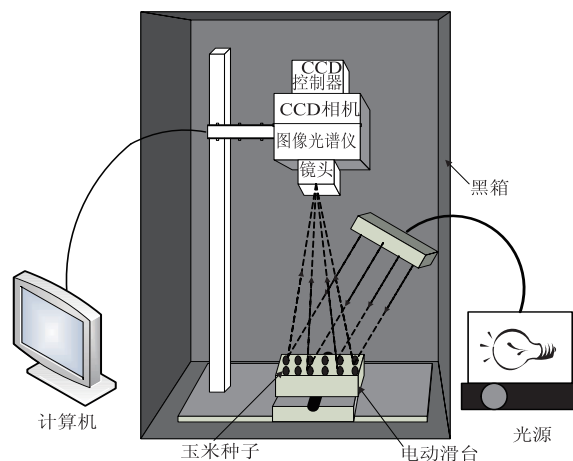


图 1 高光谱反射图像采集系统

Fig. 1 Schematic image of the hyperspectral reflectance imaging system

为了在获得最佳的图像采集效果,经过反复调试,确定出最佳系统参数如下:图像采集的曝光时间为 250 ms,物距 25 cm,线扫描步长 80 μm ,扫描宽度 50 mm,binning 为 10,即实际波段间隔为 6.44 nm,在 400~1 000 nm 波长范围内共获得 94 个波段。采集结束时得到大小为 1 392×625×94 的图像立方体。图像采集时将干燥玉米样本每 10 个为一组按两排排放到 20 cm×20 cm 的黑色载物板上,垂直放到高光谱扫描单元的下方,为了减弱外部光源的干扰整个采集过程在密闭黑箱中进行。每 6 组样本测量后,采集 1 次白板和暗电流图像,以用于图像校正。

1.4 标准值的测量和计算

在本实验研究中,水分质量分数均匀度定义为相对标准差(RSD),其计算如公式(1)所示^[3]。

$$\text{RSD}=(\text{SD}/\text{AME}) \quad (1)$$

式(1)中 AME 为 k 个样本的水分质量分数 MC 平均值;SD 为 k 个样本的水分质量分数 MC 标准差。实验中取 $k=8$ 。即每一干燥时间条件下,取 8 粒干燥玉米计算一个均匀度。本实验中,水分质量分数测量采用国标(GB/5009.3-2010)的烘箱方法^[14],按照公式(2)计算得到玉米水分质量分数。

$$\text{MC}=\frac{(m_t-m_d)}{m_d} \quad (2)$$

式(2)中 m_t 为玉米颗粒干燥时间 $t(\text{min})$ 的水分质量分数,g; m_d 为烘箱干燥后的干物质质量,g。

在本研究中一共得到 720(10~60 min 各 120 个样本)个水分含量样本,经计算后共得到 90(10~60 min 各 15 个样本)个水分质量分数均匀度样本。

1.5 数据处理

1.5.1 高光谱图像的校正 为了降低光源波动和噪声对高光谱图像影响,原始玉米高光谱图像通过公式(3)校正:

$$T_R=\frac{(T_A-T_D)}{(T_C-T_D)} \quad (3)$$

式(3)中 T_R 为校正后的玉米粒的相对反射图像, T_A 、 T_C 、 T_D 分别是样本的反射图像、白板图像和 CCD 检测器的暗电流图像。后期所有的分析都在校正后的图像 T_R 的基础上进行。

1.5.2 玉米颗粒的高光谱图像特征提取 首先在 718.2 nm 波段下利用自适应阈值法提取干燥后玉米颗粒的轮廓,并进行必要的膨胀、腐蚀、开、闭运

算等预处理以减少微小的裂纹。在此之后,将 718.2 nm 波段下提取到的玉米轮廓投射到其它波段,作为对应波段下玉米的轮廓图像,在 400~1 000 nm 内共提取了 94 个波段下玉米轮廓范围内的光谱的平均值(Mean Value, M_v)。平均值的表达式如式(4)所示。

$$M_v=\frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i,j) \quad (4)$$

式(4)中 M 、 N 分别为样本在水平和垂直方向上的像素数目, $f(i,j)$ 为像素的相对反射光强。作者共提取了 720 粒玉米样本的光谱均值。

考虑到水分质量分数均匀度是由水分质量分数的标准差和平均水分含量共同决定,作者采用 k 个玉米样本的光谱均值的平均值和光谱均值的标准差(为了和单粒玉米的光谱均值区别,分别称之为均值特征 AF 和标准差特征 SDF)。需要说明的是,这里的 k 个玉米样本的选取应和计算水分质量分数均匀度所使用的样本对应。

1.6 正交信号校正法

光谱数据的预处理方法有很多种,如标准化处理(标准中心化、标准正态变量变换等),数据平滑和去噪(数据平滑、数据求导、小波去噪等);作者采用的是正交信号校正法(Orthogonal signal correction, OSC),正交信号校正法 1988 年由瑞典计量化学家 Svante Wold 提出来的^[15],后来又经过很多人对这种预处理方法作了改进与完善,主要应用于近红外光谱矩阵的预处理,用来消除光谱中与浓度无关的信息,增强浓度与光谱的相关性,作者将其应用到高光谱图像的光谱矩阵进行预处理中。其基本思想利用数学上正交的方法,将光谱矩阵与被测成分矩阵正交,滤除光谱与被测成分矩阵无关的信号,因此用正交信号校正法滤除掉的信息对于被测成分来说是无用的信息。采用 Tom Fearn 的正交信号校正法对提取的均值特征 AF 和标准差特征 SDF 进行预处理,其算法的具体步骤见参考文献[16]。

1.7 训练、测试样本划分及模型性能评价

采用偏最小二乘(partial least squares, PLS)作为建模工具。模型的潜在变量个数采用留一法交叉验证误差确定。

在建立 PLS 模型之前,需要将总体样本划分为训练和测试样本集合。其中训练集用于建立标准值的预测模型,测试集用于检验模型。作者对每种干

干燥时间条件下(10, ..., 60 min)的样本进行随机取样,抽取 3/4 样本组成训练集(68 个),剩余 22 个样本构成测试集。

模型的性能评价采用测试集样本的均方根误差 RMSEP,相关系数 R_p ,校正模型的潜在变量个数 LV 等作为评价模型性能的指标。RMSEP 越小, R_p 越高, LV 越少,模型的性能越好。考虑到模型的性能与建模样本密切相关,采用 10 次随机后平均的方法。

2 结果与分析

2.1 水分质量分数及水分质量分数均匀度的测量

表 1 给出了本实验 6 种干燥时间条件下获得

的共 720 个水分含量样本和 90 个水分质量分数均匀度样本的统计表。由表 1 可知玉米水分质量分数均匀度随着干燥时间的增加先增加然后逐渐减小,在 40 min 时达到最大。这可能的原因是由于这时处于干燥过程中第二阶段的结束和第三阶段开始之间,此时,样本的温度已接近设定的最高温度,高温可能导致样本内部结构发生变化,造成样本孔隙或细胞间隙减少,从而改变样本内部水分迁移的速率^[3]。

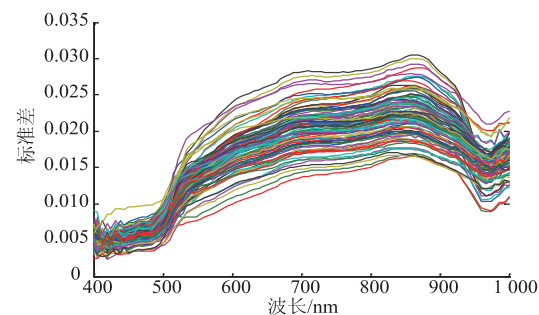
2.2 玉米粒光谱经 OSC 处理前后特征曲线

图 2 和 3 给出了均值特征 AF 和标准差特征 SDF 经 OSC 处理前后的特征曲线。特征经过 OSC 处理后总体趋势没有改变,处理后的特征曲线分布层次更加分明,不同干燥时间的特征曲线更加容易

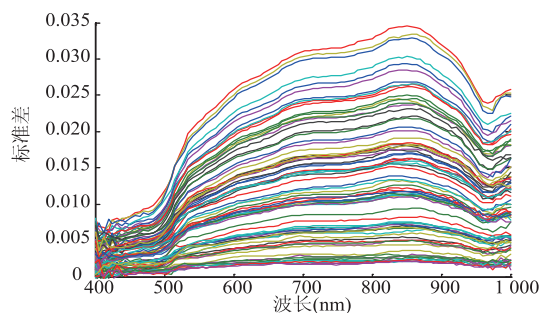
表 1 水分质量分数及水分质量分数均匀度统计表

Table 1 Statistics of moisture content and moisture content uniformity

干燥时间/min	水分质量分数				水分质量分数均匀度			
	最大值/%	最小值/%	平均值/%	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
10	71.690	61.686	66.628	0.018	0.042	0.008	0.027	0.011
20	62.031	48.740	55.664	0.025	0.060	0.012	0.035	0.015
30	44.353	27.414	34.927	0.033	0.123	0.032	0.071	0.026
40	21.485	11.194	15.656	0.025	0.162	0.025	0.085	0.042
50	12.862	7.134	9.886	0.011	0.141	0.017	0.063	0.035
60	10.148	5.950	8.323	0.005	0.123	0.017	0.060	0.029



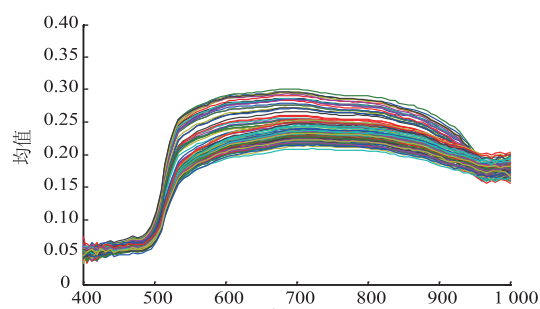
(a)标准差特征



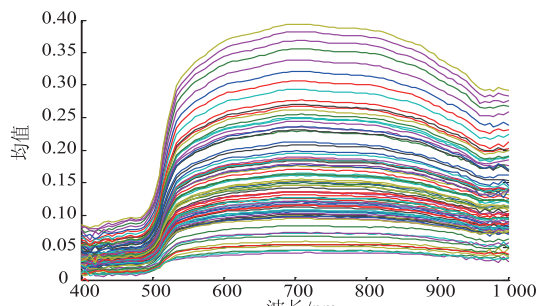
(b)OSC处理后的标准差特征

图 2 标准差特征用 OSC 处理前后的比较

Fig. 2 Comparison of standard deviation feature before and after preprocessing by OSC



(a)均值特征



(b)OSC处理后的均值特征

图 3 均值特征用 OSC 处理前后的比较

Fig. 3 Comparison of average feature before and after preprocessing by OSC

分开;说明经过 OSC 处理的保留的原始光谱中的有用信息,滤除了一些噪声信息。

2.3 玉米水分质量分数均匀度的无损检测

将经 OSC 处理后的标准差特征和均值特征串联作为偏最小二乘法(PLS)PLS 的输入变量,建立对玉米水分质量分数均匀度的预测模型。表 2 给出了经过 OSC 处理前后的建模结果比较。

表 2 水分质量分数均匀度的预测结果

Table 2 Prediction results of moisture content uniformity

类别	LVs	R_c	RMSEC	R_p	RMSEP
原始	13	0.921	0.011 2	0.823	0.017 5
OSC	2	0.946	0.009 5	0.839	0.017 4

注:LVs 为潜在变量的数目; R_c 、 R_p 分别为校正集、预测集的相关系数;RMSEC、RMSEP 分别为校正集、预测集的均方根误差。

由表 2 可知,高光谱图像信息直接去预测水分质量分数均匀度能取得较好的预测效果;无论是原始的光谱还是经过 OSC 处理的光谱所建立模型的预测精度都能达到 82%以上;和原始光谱所建立的模型相比,经过 OSC 预处理(滤除 3 个 OSC 因子)后所建立的预测模型得到明显的优化和简化,潜在变量的数目由 13 个降为 2 个,预测模型的相关系数由 0.823 提到 0.839,预测精度提高了 1.79%,预测均方根误差由 0.017 5 变为 0.017 4;结果表明在保证模型预测精度的前提下,经过 OSC 预处理后能够删除光谱中的冗余信息,保留了有效的光谱信息,模型得到简化同时模型的预测能力也能得到一定程度的提高。

玉米水分质量分数均匀度预测集模型的散点图分别如图 4 所示,图中横坐标表示水分质量分数均匀度的真实值,纵坐标表示水分质量分数均匀度的预测值。由图可知水分质量分数均匀度的真实值和预测值保持着较好的相关性,说明通过高光谱技术对玉米水分质量分数均匀度的检测是可行的,基本能够实现对玉米水分质量分数均匀度快速无损检测。

根据国内外的研究报道,利用近红外和高光谱图像技术进行食品水分质量分数的无损检测均可获得较高的预测精度。能否由预测的水分质量分数计算水分均匀度。

为了便于直接比较,将 720 粒玉米划分成 $68 \times 8 = 544$ 粒的建模样本和 $22 \times 8 = 176$ 测试样本。利

用其经 OSC 处理后的光谱平均值 M_v 作为 PLS 模型的输入特征,建立水分质量分数的 PLS 预测模型,可获得 $R_p=0.993$ 、 $RMSEP=0.028$ 的预测结果(如图 5 所示)。从图中可以看出利用高光谱图像预测的水分质量分数和真实水分质量分数之间具有良好的相关性。

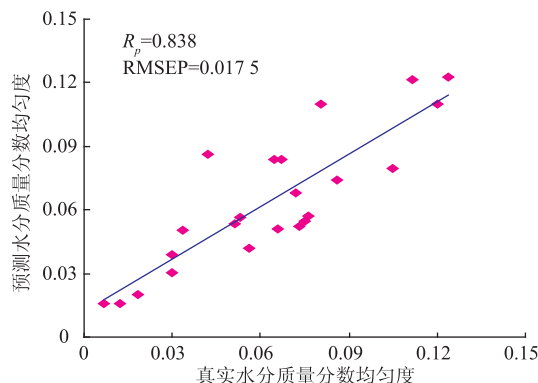


图 4 水分质量分数均匀度的散点图

Fig. 4 Scatter diagram of moisture content uniformity

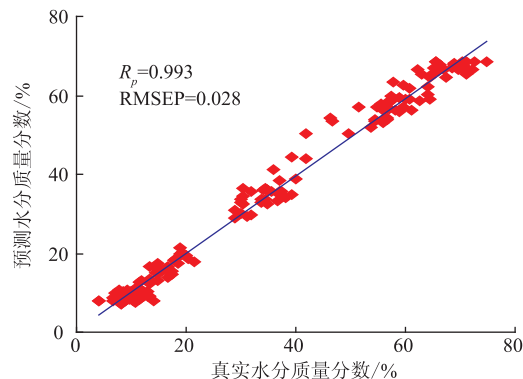


图 5 水分质量分数的散点图

Fig. 5 Scatter diagram of moisture content

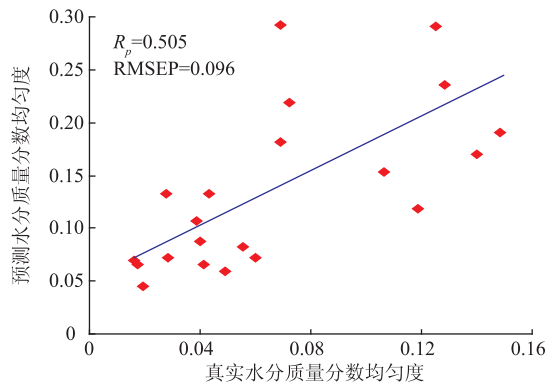


图 6 间接法求水分质量分数均匀度的散点图

Fig. 6 Scatter diagram of moisture content uniformity using indirect method

图6给出了利用176个测试样本集的预测水分,得到的水分质量分数均匀度计算值(本文称之为间接法)和真实的水分质量分数均匀度的散点图。从图中可以看出尽管水分的预测相关系数达到0.993,但通过水分质量分数均匀度的间接计算值和真实值之间的相关系数只有0.505,这样的结果远不能满足实际的需要。造成这样结果的原因可能是由于均匀度是由样本的水分质量分数标准差和水分含量均值共同决定的。图7给出了利用176个预

测样本计算得到的22个水分质量分数均匀度,水分质量分数标准差和水分质量分数均值曲线。从图中可以看出,间接法计算得到的水分质量分数均值AME和真实的水分质量分数均值间偏差较小;但是计算获得的水分质量分数标准差和真实的水分质量分数标准差之间仍然存在较大的偏差;从而导致间接法获得的水分质量分数均匀度和真实的水分质量分数均匀度存在较大的误差。

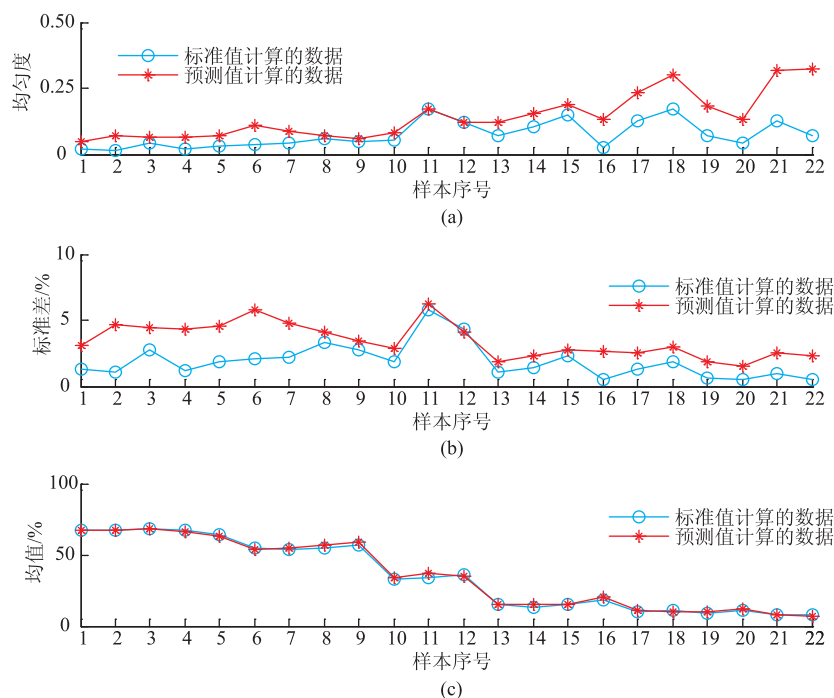


图7 预测集计算所得均匀度,标准差,均值的关系图

Fig. 7 Curves of uniformity, average feature, standard deviation feature calculating by the prediction set

3 结 语

研究了干燥过程中的玉米水分质量分数均匀度快速无损检测方法。对于水分质量分数均匀度来说,通过正交信号校正法对原始数据进行预处理后建立的模型的预测精度为0.839,预测均方根误差

为1.74%,潜在变量的数目为2个。相比于利用高光谱图像进行水分检测,并在此基础上计算水分质量分数均匀度的间接测量方法,作者采用的方法可显著提高测量精度,可用于水分质量分数均匀度的直接无损检测。

参考文献:

- [1] Hashemi S J, Murray Douglas W J. Moisture nonuniformity in drying paper: measurement and relation to process parameters[J]. *Drying Technology*, 2003, 21(2): 329-347.
- [2] 王丹阳, 李成华, 金宏亮, 等. 稻谷固定深床干燥均匀度的研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2009, 40(4): 458-464.
WANG Danyang, LI Chenghua, JIN Hongliang, et al. Study on the moisture uniformity of paddy drying in a deep fixed-bed[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2009, 40(4): 458-464. (in Chinese)
- [3] Wang Y C, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Study of drying uniformity in Pulse-Spouted Microwave-Vacuum drying of stem

- lettuce slices with regard to product quality[J]. **Drying Technology**, 2013, 31(1):91-101.
- [4] Bü ning-Pfaue H. Analysis of water in food by near infrared spectroscopy[J]. **Food Chemistry**, 2003, 82(1): 107-115.
- [5] 刘洁, 李小昱, 李培武, 等. 基于近红外光谱的板栗水分检测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 338-341.
LIU Jie, LI Xiaoyu, LI Peiwu, et al. Determination of moisture in chestnuts using near infrared spectroscopy [J]. **Transactions of the CSAE**, 2010, 26(2): 338-341. (in Chinese)
- [6] 陈卫江, 林向阳, 阮榕生, 等. 核磁共振技术无损快速评价食品水分的研究[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(4): 125-127.
CHEN Weijiang, LIN Xiangyang, RUAN Rongsheng, et al. Study on quickly and non-destructive estimate the moisture content of food using NMR[J]. **Food Research and Development**, 2006, 27(4): 125-127. (in Chinese)
- [7] 张文昭, 刘志壮, 周文真. 电容法猪肉含水率快速检测的研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 272-275.
ZHANG Wenzhao, LIU Zhizhuang, ZHOU Wenzhen. Quick detection of water content for pork by capacitance method [J]. **Transactions of the CSAE**, 2012, 28(20): 272-275. (in Chinese)
- [8] Sundaram J, Kandala C V, Govindarajan K N, et al. Sensing of moisture content of In-shell peanuts by NIR reflectance spectroscopy[J]. **Journal of Sensor Technology**, 2012, 2(1): 1-7.
- [9] Mizukami Y, Sawai Y, Yamaguchi Y. Moisture content measurement of tea leaves by electrical impedance and capacitance[J]. **Biosystems Engineering**, 2006, 93(3): 293-299.
- [10] 李晓丽, 程术希, 何勇. 基于漫反射光谱的初制绿茶含水率无损检测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 195-200.
LI Xiaoli, CHENG Shuxi, HE Yong. Nondestructive measurement of moisture content of green tea in primary processing based on diffuse reflectance spectroscopy[J]. **Transactions of the CSAE**, 2010, 26(5): 195-200. (in Chinese)
- [11] 毛罕平, 张晓东, 李雪, 等. 基于光谱反射特征葡萄叶片含水率模型的建立[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2008, 29(5): 369-372.
MAO Hanping, ZHANG Xiaodong, LI Xue, et al. Model establishment for grape leaves dry-basis moisture content based on spectral signature[J]. **Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition**, 2008, 29(5): 369-372. (in Chinese)
- [12] Huang M, Wang Q G, Zhang M, et al. Prediction of color and moisture content for vegetable soybean during drying using hyperspectral imaging technology[J]. **Journal of Food Engineering**, 2014, 128: 24-30.
- [13] 王玉川. 葛苡颗粒负压微波高效节能均匀干燥机理及工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.
- [14] GB/5009.3-2010, 食品安全国家标准 - 食品中水分的测定[S].
- [15] Wold S, Antti H, Lindgren F, et al. Orthogonal signal correction of near-infrared spectra [J]. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, 1998, 44(1): 175-185.
- [16] Fearn T. On orthogonal signal correction[J]. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, 2000, 50(1): 47-52.

会 议 信 息

会议名称(中文): 中国菌物学会 2015 年学术年会

所属学科: 动植物微生物学, 作物学及林木育种、生物学

开始日期: 2015-09-20

结束日期: 2015-09-22

所在城市: 上海市 徐汇区

具体地点: 上海光大会展中心

主办单位: 中国菌物学会

承办单位: 中国科学院上海生命科学研究院植物生理生态研究所 上海市农业科学院 国家食用菌工程技术研究中心

会议主席: 王成树 研究员

摘要截稿日期: 2015-08-15

联系人: 孟 晶

联系电话: 021-54924170

E-MAIL: mengjing@sibs.ac.cn

会议网站: http://www.msfungi.org.cn/templates/T_Content/index.aspx?nodeid=8&page=ContentPage&contentid=661

会议背景介绍: 经中国菌物学会研究决定, 中国菌物学会 2015 年学术年会将于 9 月 20-22 日在上海市召开。