

# 基于图像增强的高湿度环境下 野生二粒小麦籽粒硬度检测方法

刘定操

(河南经贸职业学院计算机工程学院, 河南郑州 450000)

**摘要:** 为有效检测高湿度环境下谷类籽粒硬度, 以某谷类食品加工厂生产的野生二粒小麦为试验对象, 采用高光谱图像成像系统获取野生二粒小麦高光谱图像, 通过基于匹配思想的自适应降噪方法 (PLS) 去除野生二粒小麦高光谱图像的带状噪声, 增强高湿度环境下野生二粒小麦高光谱图像质量, 在此基础上, 将野生二粒小麦光谱数据的平均值作为光谱数据, 构建高湿度环境下野生二粒小麦籽粒硬度预测模型, 实现对高湿度环境下谷类籽粒硬度的准确检测。仿真试验结果表明, 当加工环境湿度为 55% 时, 本文方法检测野生二粒小麦籽粒硬度值平均结果为 1745 g, 与标准红外检测方法得到的结果差值仅有 3 g; 当环境湿度提高到 75% 时, 本文方法检测结果为 1712 g, 与标准红外检测方法相差 42 g, 本文方法检测野生二粒小麦籽粒硬度结果精度高, 优于声振频带幅值特性法, 是一种高精度的高湿度环境谷类籽粒硬度检测方法。

**关键词:** 图像增强; 高湿度环境; 谷类籽粒; 硬度检测; 高光谱

**文章编号:** 1673-9078(2019)11-293-299

**DOI:** 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.11.040

## Testing Method of Wild Emmer Wheat Hardness in High Humidity Environment Based on Image Enhancement

LIU Ding-cai

(Henan Vocational College of Economics and Trade, College of Computer Engineering, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** In order to effectively detect the grain hardness in high humidity environment, the hyperspectral image of wild two-grain wheat produced by a cereal processing factory was obtained by hyperspectral image system. The adaptive denoising method (PLS) based on matching idea was used to remove the banded noise of hyperspectral image of wild two-grain wheat and enhance the quality of hyperspectral image of wild two-grain wheat in high humidity environment. On this basis, the average value of spectral data of wild two-grain wheat was taken as spectral data, and the prediction model of grain hardness of wild two-grain wheat in high humidity environment was constructed to realize the accurate detection of grain hardness in high humidity environment. The simulation results showed that when the humidity of processing environment was 55%, the average value of grain hardness of wild two-grain wheat detected by the proposed method was 1745 g, and the difference between the proposed method and the standard infrared detection method was only 3 g. When the ambient humidity was increased to 75%, the result of the proposed method was 1712 g, which is 42 g different from the standard infrared detection method. The proposed method had a high precision in detecting grain hardness of wild two-grain wheat, which is better than the acoustic vibration frequency band amplitude characteristic method.

**Key words:** image enhancement; high humidity environment; grain of cereal; hardness detection; hyperspectral

人们对食物感官质量评价受到人为因素影响, 还耗费大量的人力物力, 且对食物评价结果的客观性和可比性不准确。如何准确量化食品的质构特性指标, 准确分析食物的品质, 在未来的研究中应重点关注<sup>[1]</sup>。谷类制品是我国日常饮食的主要品种, 其中野生二粒小麦制品是我国广泛食用的谷类食品, 当前对野生二

粒小麦理化性质研究较多, 检验谷类质量的关键指标为谷类的籽粒硬度, 但目前缺少对谷类籽粒硬度的检测研究, 检测谷类籽粒硬度过程中受到较多因素的干扰, 特别是高湿度因素会导致谷类籽粒硬度检测结果误差降低<sup>[2]</sup>。

目前, 已有学者对其进行相关研究, 其中最常用的检测方法为声振频带幅值特性检测法。王志鹏<sup>[3]</sup>提出基于声振频带幅值特性法的作物硬度检测方法, 采用压电梁式传感器对作物硬度进行激励感测, 分析了

收稿日期: 2019-06-24

基金项目: 河南科技厅科技攻关项目 (182102210572)

作者简介: 刘定操 (1976-), 男, 讲师, 研究方向: 计算机图像处理

传感器采集的响应信号的稳定性,并在此基础上研究了频带幅值参数与作物硬度的相关性,利用频带幅值参数对其硬度进行主成分回归分析,最终建立作物硬度的检测模型。该方法具有检测稳定性高的优点,但该方法在高湿度环境中进行检测时存在检测精度较低的问题。

为解决上述问题,本文提出基于图像增强的高湿度环境下谷类籽粒硬度检测方法。图像增强技术是一种基本的图像预处理手段,其主要过程是对一幅给定的图像,通过扩展其对比度、增强图像中对象边缘的步骤完成图像的处理,从而实现突出并筛选出其中所需信息的目的,使结果对某种特定应用来说比原图像更合适。而该方法并不能增加原始图像的信息,反而会损失一些信息,但图像增强的可以提高对特定信息的识别能力,并增强图像中有效信息的特征。基于上述方法,对高湿度环境的谷类籽粒硬度进行检测,以提升谷类产品质量。

## 1 材料方法

### 1.1 试验材料

本文实验所需谷粒材料是从郑州智信粮食加工厂生产的两种来自不同产地随机选取的散装野生二粒小麦,不同类型野生二粒小麦需求量均为 2 kg;将上述材料放置在高湿度环境中 24 h 作为试验材料。

### 1.2 高光谱图像成像系统

高光谱图像技术是一种新型的食品无损检测技术,该技术结合光谱检测技术和计算机视觉技术,能对谷类农产品内部和外部特征信息的准确检测。

高湿度环境下谷类籽粒硬度的高光谱散射图像通过高光谱图像采集系统获取<sup>[4]</sup>,高光谱图像采集系统的装置示意图如图 1 所示:

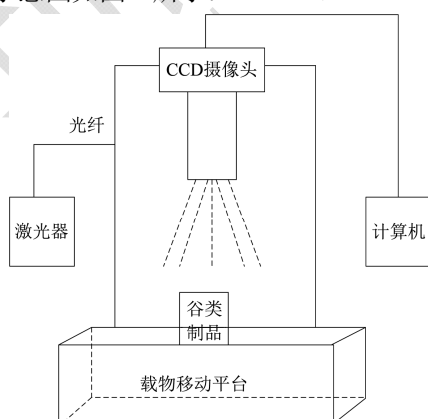


图 1 高光谱成像系统

Fig.1 High spectral imaging system

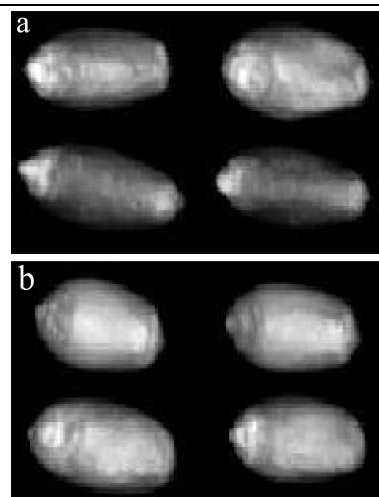


图 2 自适应去噪前后野生二粒小麦高光谱图像

Fig.2 Adaptive hyperspectral image of wild two wheat before and after denoising

注: a: 去噪前高光谱图像; b: 去噪后高光谱图像。

在采集高湿度环境下谷类高光谱图像前,设定高光谱 CCD 摄像头的曝光时间,保证载物移动平台的输送速度,避免获取图像尺寸偏大<sup>[5]</sup>,可有效降低图像空间分辨率的失真,本文试验设置 CCD 摄像头曝光时间为 200 ms,将试验材料不同品种的野生二粒小麦分别放置在高光谱成像系统的载物移动平台上,对各种类型野生二粒小麦在曝光时间内采集高光谱图像<sup>[6]</sup>,并对获取的图像进行预处理操作,增强图像质量。

本文采用基于匹配思想的自适应消噪方法去除野生二粒小麦高光谱图像的带状噪声<sup>[7]</sup>,基于匹配思想,将二维高光谱图像带状噪声问题简化为一维的信号去噪问题<sup>[8]</sup>,采用该方法进行高光谱图像去噪,应用性广泛,去噪效果佳,图 2 (a) 和 (b) 分别为去噪前后的光谱图像。

去噪过程如下:

(1)根据高光谱成像系统获取的野生二粒小麦图像获取携带带状噪声图像,从该图像获取列均值曲线<sup>[9]</sup>; (2)采用小波变换操作对列均值曲线实施去噪操作<sup>[10]</sup>,获取不携带带状噪声的列均值曲线,并将该结果作为匹配思想匹配调整的参考<sup>[11]</sup>; (3)依照公式(1)将初始包括带状噪声列均值匹配至新列均值,获取噪声消除后的高光谱图像。

$$I'_{i,j} = \mu + \frac{\sigma}{\sigma_j} (I_{i,j} - \mu_j), i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

公式(1)中  $I_{i,j}$  和  $I'_j$  分别表示匹配调整前后高光谱图像第  $i$  行和第  $j$  列的像素值,将初始包括带状噪声列均值去噪处理后第  $j$  列的新均值用  $\mu$  表示,将相应标准差用  $\sigma$  表示,  $\mu$  且  $\mu_j$  和  $\sigma_j$  分别代表初始图像第  $j$  列的均值和标准差。

对原始高光谱图像去噪后得到的列均值曲线仍然

携带大部分原始列均值曲线特征,仅有效去除带状噪声,即将带状噪声对列均值影响降至最低<sup>[12]</sup>。经列均值匹配后,既降低了带状噪声干扰,又保持原始图像的反射特征,不会产生矩匹配失真现象。因此可通过基于匹配思想的自适应消噪方法,提升高湿度环境下谷类的高光谱图像质量,使谷类硬度检测结果精度增强<sup>[13]</sup>。

分析图2可知,去噪后的自适应去噪前后野生二粒小麦高光谱图像更加清晰,有效去除掉野生二粒小麦图像的阴影或不清晰的部分,提高了硬度预测的精度,消除噪声的干扰。

1.3 高湿度环境下谷类籽粒硬度预测模型

偏最小二乘回归(Partial least square regression, PLS)是一种用于多元统计数据分析方法,主要用于研究多因变量对多自变量的回归模型,为降低拟合过度现象以及保证野生二粒小麦籽粒硬度预测结果的真实性,在进行高湿度环境下野生二粒小麦籽粒硬度预测时,将试验对象随机平均为四份,其中三份用于构建籽粒硬度预测模型,另外一部分试验对象用于验证模型有效性。

实际检测过程中,将每个待测野生二粒小麦颗粒均按相同方向放置难度较大<sup>[14]</sup>,且检测时极易出现野生二粒小麦颗粒多度接触,造成野生二粒小麦破损,因此计算各个野生二粒小麦颗粒光谱数据的平均值<sup>[15]</sup>,将该结果作为光谱数据,构建高湿度环境下谷类籽粒硬度预测模型。

1.4 数据分析

高湿度环境下野生二粒小麦光谱数据的分析过程在携带PLS的MATLAB环境下实现。对高湿度环境下野生二粒小麦籽粒硬度预测模型的评估采用预测均方差(RMSEP)、预测相关系数 $R_p$ 、校正均方差(RMSEC)和校正相关系数 $R_c$ 四个参数。

2 结果与讨论

2.1 样本集分类

实验为验证本文谷类籽粒硬度检测方法的有效性,以某地区的谷类加工厂为研究场所,设置环境温度为26℃,实验湿度分别为55%和75%。野生二粒小麦为研究对象,由于实验操作等问题的存在会产生误差样本,而误差样本可能会对野生二粒小麦籽粒硬度预测结果产生影响,需对500个样本进行错误样本处理,将其中12个错误样本剔除,将剩余488个样本

以籽粒硬度值从小到大排列,任意选择4个样本,其中3个样本作为校正集用于构建籽粒硬度预测模型,剩下1个样本作为预测集样本,用于验证模型的预测结果。最终校正集和预测集分别包括366个和122个样本。表1为试验野生二粒小麦籽粒硬度测量统计值。

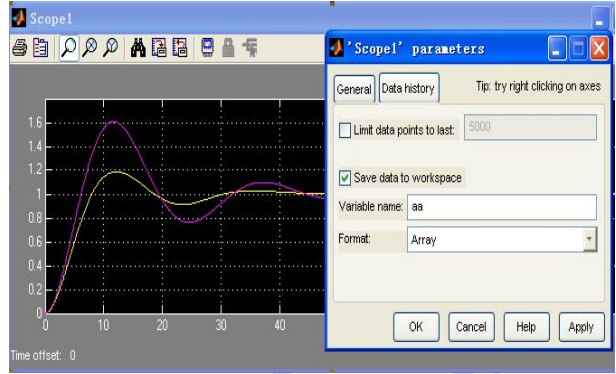


图3 示波器显示屏

Fig.3 Oscilloscope display screen

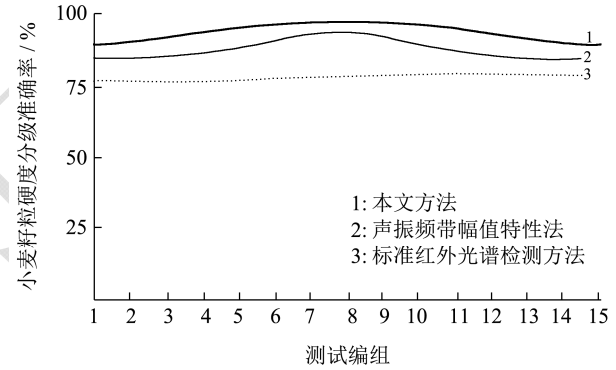


图4 野生二粒小麦籽粒硬度分级准确率

Fig.4 Classification accuracy of grain hardness of wild two-grain wheat

表1 试验野生二粒小麦籽粒硬度测量统计值

Table 1 Statistical values of Grain hardness Measurement of

| Wild two-grain Wheat |                 |                  |                  |
|----------------------|-----------------|------------------|------------------|
| 籽粒硬度/<br>(kN/m)      | 全部样本<br>数量(488) | 校正集样本<br>数量(366) | 预测集样本<br>数量(122) |
| 平均值                  | 48.47           | 48.45            | 48.52            |
| 标准值                  | 17.11           | 17.13            | 17.13            |
| 最小值                  | 10.51           | 10.51            | 12.66            |
| 最大值                  | 99.27           | 99.27            | 87.24            |

为优化野生二粒小麦籽粒硬度检测方法,得到更准确的检测结果,需按硬度对野生二粒小麦籽粒进行分级。在全部样本中任意选取30个样本,其中设置1~15号为硬质野生二粒小麦,16~30号为软质野生二粒小麦,两个样本为一组。分别采用本文方法、声振频带幅值特性法以及标准红外光谱检测方法对硬质野生二粒小麦和软质野生二粒小麦籽粒进行硬度分级,以从软质野生二粒小麦中分离出硬质野生二粒小麦。本

节采用 Matlab 仿真软件进行分级测试, 并利用 Scope 模块构建示波器显示屏, 可通过其显示分级结果, 示波器结构如图 3 所示, 检测结果如图 4 所示。由图 4 可知, 在对测试集野生二粒小麦样品级别分类中, 本文方法分级准确率约为 93%, 声振频带幅值特性法分级准确率为 83%, 标准红外光谱检测方法下的硬麦分级准确率为 75%。由此可知本文方法能有效区分软质野生二粒小麦和硬质野生二粒小麦。

2.2 PLS 参数选择

实验采用径向基核函数来描述野生二粒小麦光谱值与籽粒硬度间的关系, 采用 PLS 构建模型时需要核参数  $\delta^2$  和正则化参数 (惩罚系数 C), 正则化参数和核参数的选取可采用 4 折交叉验证网格寻优法。因为进行网格优化时序耗费较多时间, 因此将惩罚函数和核函数的选取范围设定在  $C \in (1, 1000)$  和  $\delta^2 \in (1, 1000)$  之间, 在 4 折交叉验证后得到正则化参数和核参数均方差的均值最小值, 将最小值结果作为正则化参数和核函数的最优值。由于 4 折交叉验证网格寻优法需考虑到步长的选取问题, 因此给出表 2 野生二粒小麦籽粒硬度在不同步长时的正则化参数和核参数, 并给出对应步长时的  $R_C$ 、RMSEC、 $R_p$  和 RMSEP 值。

表 2 野生二粒小麦籽粒硬度在不同步长下寻优得到不同正则化参数和核参数及对应的  $R_C$ 、RMSEC、 $R_p$  和 RMSEP 值

| Table 2 Optimization of grain hardness of wild two-grain wheat under different step sizes to obtain different regularization parameters and nuclear parameters and corresponding $R_C$ , RMSEC, $R_p$ and RMSEP values |       |       |       |       |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 步长                                                                                                                                                                                                                     | 正则化参数 | 25    | 55    | 55    | 105   |
|                                                                                                                                                                                                                        | 核参数   | 55    | 55    | 25    | 105   |
| 寻优结果                                                                                                                                                                                                                   | 正则化参数 | 706   | 956   | 956   | 806   |
|                                                                                                                                                                                                                        | 核参数   | 356   | 856   | 486   | 406   |
| RMSEC, RP and RMSEP values                                                                                                                                                                                             |       |       |       |       |       |
| $R_C$                                                                                                                                                                                                                  |       | 0.813 | 0.776 | 0.807 | 0.811 |
| RMSEC/(kN/m)                                                                                                                                                                                                           |       | 10.07 | 10.88 | 10.21 | 10.13 |
| $R_p$                                                                                                                                                                                                                  |       | 0.786 | 0.805 | 0.794 | 0.789 |
| RMSEP/(kN/m)                                                                                                                                                                                                           |       | 10.58 | 10.17 | 10.41 | 10.52 |

从表 2 数据结果可知, 高湿度环境下野生二粒小麦籽粒硬度最佳的正则化参数和核参数值分别为 956 和 486。

2.3 仿真分析

表 3 为采用 PLS 最优正则化参数和核参数, 构建的野生二粒小麦籽粒硬度训练模型和预测模型的评价参数值, 为比较 PLS 在构建高湿度环境下野生二粒小麦籽粒硬度预测模型的有效性, 将采用 LS-SVM 法建

立的野生二粒小麦籽粒硬度训练模型和预测模型的评价参数值作为参照值。

表 3 采用 LS-SVM 和 PLS 建模结果比较

Table 3 Comparison of ls-svw and PLS modeling results

| 指标    | 野生二粒小麦籽粒硬度/(kN/m) |        |
|-------|-------------------|--------|
| 方法    | PLS               | LS-SVW |
| $R_C$ | 0.807             | 0.744  |
| RMSEC | 10.1              | 11.4   |
| $R_p$ | 0.794             | 0.743  |
| RMSEP | 10.3              | 11.3   |

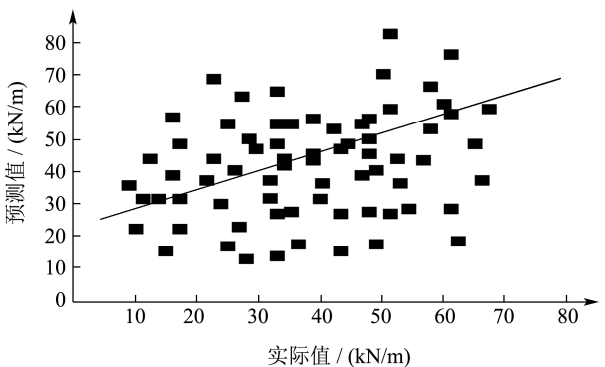


图 5 LS-SVW 野生二粒小麦籽粒硬度建模预测图

Fig.5 Modeling and prediction map of grain hardness of ls-svw wild two-grain wheat

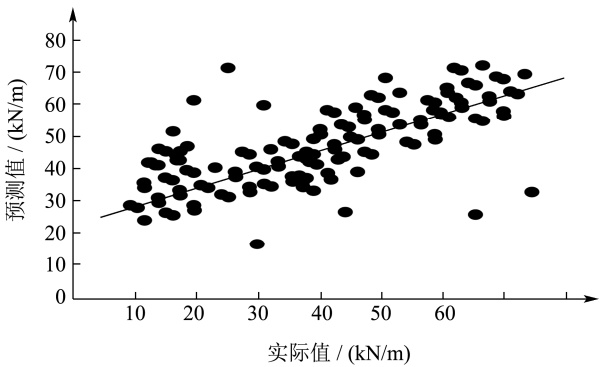


图 6 PLS 野生二粒小麦籽粒硬度建模预测图

Fig.6 Modeling and prediction map of grain hardness of pls wild two-grain wheat

从表 3 数据可得, 采用 PLS 构建模型的  $R_C$  和  $R_p$  相较采用 LS-SVW 构建模型分别高 0.063 和 0.051, 而 RMSEC 和 RMSEP 则分别降低 1.3 (KN/m) 和 1.0 (KN/m), LS-SVW 可优化野生二粒小麦样本数值间的非线性关系, 解决高光谱散射图维数高的问题上有显著效果。并将两种建模方法的野生二粒小麦籽粒硬度的预测值和实测值关系图分别用图 3 和图 4 描述。

对比分析图 5 和图 6 可以看出, 本文采用 PLS 构建的高湿度环境下谷类籽粒硬度预测模型与实际籽粒硬度预测结果较接近, 而采用 LS-SVW 构建模型的预测性能与实际值相差较大, 说明采用 PLS 所建的预测

2.4 检测结果比较

分别采用本文方法、基于声振频带幅值特性的高湿度环境下谷类籽粒硬度检测方法以及标准红外光谱检测方法，对实验谷类加工厂中野生二粒小麦加工环境湿度是 55%和 75%情况下，三种方法检测某类型野生二粒小麦籽粒硬度结果，为使实验结果真实可靠，实验采用分级后的 15 组作为实验样本进行检测，籽粒检测结果分别如表 4 和表 5 所示。

表 4 湿度是 55%时野生二粒小麦籽粒硬度结果

| Table 4 The results of grain hardness of the wild two-grain wheat when the humidity is 55% |        |             |              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------|--------------|
| 测试编号                                                                                       | 本文方法/g | 声振频带幅值特性法/g | 标准红外光谱检测方法/g |
| 1                                                                                          | 1780   | 1540        | 1750         |
| 2                                                                                          | 1684   | 1362        | 1720         |
| 3                                                                                          | 1852   | 1954        | 1850         |
| 4                                                                                          | 1790   | 2014        | 1745         |
| 5                                                                                          | 1750   | 1514        | 1800         |
| 6                                                                                          | 1786   | 1327        | 1800         |
| 7                                                                                          | 1654   | 1947        | 1721         |
| 8                                                                                          | 1754   | 1457        | 1702         |
| 9                                                                                          | 1785   | 1654        | 1764         |
| 10                                                                                         | 1725   | 1957        | 1728         |
| 11                                                                                         | 1684   | 2147        | 1722         |
| 12                                                                                         | 1695   | 1247        | 1705         |
| 13                                                                                         | 1735   | 1342        | 1745         |
| 14                                                                                         | 1748   | 1468        | 1734         |
| 15                                                                                         | 1754   | 2314        | 1745         |
| 均值                                                                                         | 1745   | 1682        | 1748         |

由表 4 数据结果可知，加工环境湿度是 55%时，本文方法检测野生二粒小麦籽粒硬度值平均结果与标准红外检测方法得到结果相似，差值仅有 3 g，而声振频带幅值特性法检测得到硬度值平均结果为 1682 g，较标准红外检测方法低 66 g，说明在环境湿度是 55%时本文检测野生二粒小麦籽粒硬度值结果精度高，比较在不同测试编号下，三种方法检测野生二粒小麦籽粒硬度值差异情况，将表 4 数据结果用图 5 描绘：

由图 7 可以看出，在环境湿度是 55%时，在不同实验测试编号下，本文方法检测野生二粒小麦籽粒硬度值与标准红外光谱检测结果相近，且各次检测结果相差不大，说明环境湿度是 55%时，本文方法检测野生二粒小麦籽粒硬度结果稳定性强；而声振频带幅值特性法各次检测得到的野生二粒小麦籽粒硬度结果波

动较大，与标准红外光谱检测结果大相径庭，表明本文方法用于检测高湿度环境下野生二粒小麦籽粒硬度结果佳。当环境湿度是 75%时，三种方法检测野生二粒小麦籽粒硬度结果见表 5。

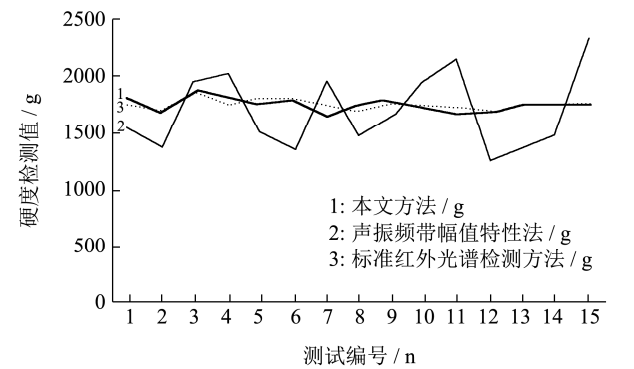


图 7 三种方法对野生二粒小麦籽粒硬度检测结果  
Fig.7 Test results of compressive hardness of wheat by three methods

表 5 湿度是 75%时野生二粒小麦籽粒硬度检测结果

| Table 5 Test results of wheat grain hardness at 75% humidity |        |             |              |
|--------------------------------------------------------------|--------|-------------|--------------|
| 测试编号                                                         | 本文方法/g | 声振频带幅值特性法/g | 标准红外光谱检测方法/g |
| 1                                                            | 1700   | 1236        | 1700         |
| 2                                                            | 1680   | 1235        | 1702         |
| 3                                                            | 1688   | 1436        | 1680         |
| 4                                                            | 1705   | 1856        | 1715         |
| 5                                                            | 1745   | 2354        | 1421         |
| 6                                                            | 1736   | 2417        | 1424         |
| 7                                                            | 1700   | 2684        | 1706         |
| 8                                                            | 1722   | 1347        | 1725         |
| 9                                                            | 1714   | 1684        | 1724         |
| 10                                                           | 1700   | 1584        | 1684         |
| 11                                                           | 1704   | 2410        | 1721         |
| 12                                                           | 1725   | 2013        | 1714         |
| 13                                                           | 1723   | 2011        | 1706         |
| 14                                                           | 1715   | 2564        | 1720         |
| 15                                                           | 1720   | 1568        | 1705         |
| 平均值                                                          | 1712   | 1893        | 1670         |

分析表 5 数据结果可知，当环境湿度提高到 75%时，三种方法检测野生二粒小麦籽粒硬度值结果存在差异，分析三种方法检测野生二粒小麦籽粒硬度值平均结果可知，本文方法检测结果为 1712 g，与标准红外检测方法相差 42 g，而声振频带幅值特性法检测野生二粒小麦籽粒硬度平均值与标准红外光谱检测方法相差 223 g，结果表明，环境湿度提高到 75%情况下，本文方法检测野生二粒小麦籽粒硬度结果精度高，同样分析在不同测试编号下，三种方法检测野生二粒小

麦籽粒硬度情况,如图8所示。

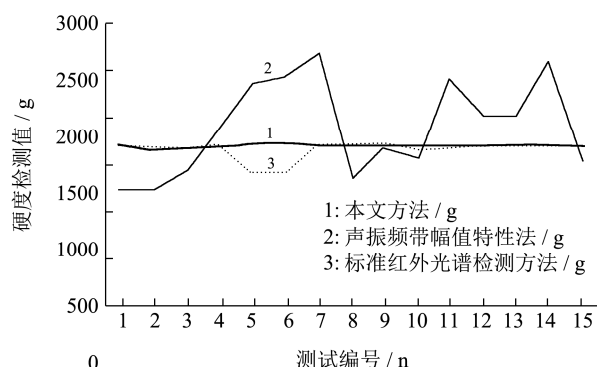


图8 三种方法对野生二粒小麦硬度检测结果

Fig.8 Hardness test results of wheat by three methods

从图8可以看出,环境湿度是75%时,各次实验测试中声振频带幅值特性法检测得到野生二粒小麦籽粒硬度结果变化幅度较大,而本文方法各次检测结果几乎一致,变化较小,对比图6三条曲线可知,本文方法各次检测野生二粒小麦籽粒硬度结果与标准红外光谱检测结果拟合度高,说明在高湿度环境中,本文方法在检测野生二粒小麦籽粒硬度上效果显著。

### 3 结论

本文提出的基于图像增强的高湿度环境下谷类籽粒硬度检测方法,采用高光谱图像成像系统获取高湿度环境下野生二粒小麦图像,根据该图像包括的光谱信息构建高湿度环境下野生二粒小麦籽粒硬度预测模型。实验通过比较采用PLS和LS-SVW构建的野生二粒小麦籽粒硬度预测模型的 $R_C$ 、RMSEC、 $R_p$ 和RMSEP值,说明采用PLS构建的高湿度环境下野生二粒小麦籽粒硬度预测模型结果精度高。通过比较本文方法、声振频带幅值特性法和标准红外光谱检测方法检测环境湿度是65%和75%时,野生二粒小麦品种籽粒硬度结果可知,本文方法与标准检测结果相似度高,是一种高精度的高湿度环境谷类籽粒硬度检测方法,说明本文在检测高湿度环境中的谷类籽粒硬度应用中,具有较强的应用价值。

### 参考文献

- [1] 汪东芳,巨筱.基于改进Retinex的雾天图像增强研究[J].激光杂志,2016,37(4):58-61  
WANG Dong-fang, JU Xiao. Research on fog image enhancement based on improved Retinex [J]. Laser Journal, 2016, 37(4): 58-61
- [2] 毕晓君,潘铁文.基于改进的教与学优化算法的图像增强方法[J].哈尔滨工程大学学报,2016,37(12):1716-1721  
BI Xiao-jun, PAN Tie-wen. An image enhancement method

- based on improved teaching-learning-based optimization algorithm [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(12): 1716-1721
- [3] 王志鹏,吴杰,赵正强,等.基于声振响应法的香梨硬度无损检测[J].农业工程学报,2016,32(4):277-283  
WANG Zhi-peng, WU Jie, ZHAO Zheng-qiang, et al. Non-destructive detection of Korla pear stiffness based on acoustic vibration measurement [J]. Transaction of the CSAE, 2016, 32(4): 277-283
- [4] HUANG Yu-qing, DING Wen-rui, LI Hong-guang. Haze removal method for UAV reconnaissance images based on image enhancement [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(3):592-601
- [5] 王茜,蔺佳哲,杨硕.基于LabVIEW Vision的雨雾环境下景象匹配末制导图像处理技术[J].海军工程大学学报,2017, 29(5):77-81  
WANG Qian, LIN Jia-zhe, YANG Shuo. Image processing techniques of scene matching guidance in rainy and foggy environment based on LabVIEW Vision [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2017, 29(5): 77-81
- [6] 肖明霞,鲁昌华,韦海成,等.基于航拍图像去雾增强的秸秆焚烧监测技术研究[J].电子测量与仪器学报,2017,31(4): 543-548  
XIAO Ming-xia, LU Chang-hua, WEI Hai-cheng, et al. Study on monitoring technology of straw burning based on UAV aerial image dehazing enhancement algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(4): 543-548
- [7] 王胜军,梁德群.一种基于图像方向信息测度算法的自适应表格图像增强算法[J].中国图象图形学报,2018,11(1):60-65  
WANG Sheng-jun, LIANG De-qun. An algorithmic adaptive enhancement algorithm of form image based on image information measure [J]. Journal of image and graphics, 2018, 11(1): 60-65
- [8] 徐义春,陈炼,于海洋,等.一种改进的色调不变的彩色图像增强算法[J].计算机仿真,2015,32(9):281-285  
XU Yi-chun, CHEN Lian, YU Hai-yang, et al. An improved preserving hue color image enhancement algorithm [J]. Computer Simulation, 2015, 32(9): 281-285
- [9] 钱钧,李良福,周锋飞,等.基于结构特征引导滤波的深度图像增强算法研究[J].应用光学,2016,37(2):203-208  
QIAN Jun, LI Liang-fu, ZHOU Feng-fei, et al. Depth image enhancement algorithm based on structure feature guidance filter [J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(2): 203-208
- [10] 崔燕,钱平,余坚勇.压缩干粮硬度临界值的确定[J].食品工

- 业科技,2016,37(11):100-102
- CUI Yan, QIAN Ping, YU Jianyong. Determination of compressed food of hardness critical value [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(11): 100-102
- [11] 袁翠平,田纪春,王永军.野生二粒小麦品种籽粒硬度测定方法比较研究[J].麦类作物学报,2016,24(2):106-109
- YUAN Cui-ping, TIAN Ji-chun, WANG Yong-jun. Comparison on the methods for testing wheat grain hardness [J]. Journal of triticeae crops, 2016, 24(2): 106-109
- [12] 古文君,田有文,张芳,等.基于高光谱成像的蓝莓内部品质检测特征波长选择方法研究[J].沈阳农业大学学报,2017, 48(5):584-590
- GU Wen-jun, GU Wen-jun, ZHANG Fang, et al. Characteristic wavelength selection method of the detection of internal quality of blueberry based on hyperspectral image [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(5): 584-590
- [13] 马兴,张静,于尧,等.ICP-OES 法测定饮用天然矿泉水中总硬度[J].食品研究与开发,2016,37(20):167-168
- MA Xing, ZHANG Jing, YU Yao, et al. Determination of total hardness in drinking natural mineral water by ICP-OES [J]. Food Research and Development, 2016, 37(20): 167-168
- [14] 刘燕德,谢庆华,王海阳,等.不同成熟度双孢菇硬度的拉曼光谱无损检测[J].发光学报,2016,37(9):1135-1141
- LIU Yan-de, XIE Qing-hua, XIE Qing-hua, et al. Non-destructive detection of different maturity agaricus bisporus firmness based on raman spectroscopy [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(9): 1135-1141
- [15] 薛璐,刘小路,鲁晓翔,等.近红外漫反射无损检测蓝莓硬度的研究[J].浙江农业学报,2015,27(9):1646-1651
- XUE Lu, LIU Xiao-lu, LU Xiao-xiang, et al. Non-destructive detection of blueberry hardness based on near-infrared diffused spectroscopy [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2015, 27(9): 1646-1651
- [16] 赵镭,解楠,汪厚银,等.基于心理物理学食品硬度参比样建立研究[J].食品科学,2015,36(21):41-45
- ZHAO Lei, XIE Nan, WANG Hou-yin, et al. Establishment of food hardness references based on psychophysical law [J]. Food Science, 2015, 36(21): 41-45
- 
- (上接第 269 页)
- [13] 郑瑞生,许爱萍,任丽花,等.固相微萃取与气-质联用法分析鲍鱼烘烤前后挥发性成分的变化[J].现代食品科技,2014, 30(7):252-257
- ZHENG Rui-sheng, XU Ai-ping, REN Li-hua, et al. Changes of volatile components in abalone before and after baking by SPME coupled with GC-MS [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(7): 252-257
- [14] Michael D Flythea, James B Russell. The effect of pH and a bacteriocin (Bovicin HC5) on *Clostridium sporogenes* MD1, a bacterium that has the ability to degrade amino acids in ensiled plant materials [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2004, 47(2): 215-222
- [15] Lund B M, Peck M W. The Microbiological Safety and Quality of Food [M]. Gaithersburg, MD: Aspen Publishers Inc, 2000: 1057-1109
- [16] Walter de Gruyter. Recommended methods for the structural identification of biologically active compounds in food and flavor chemistry [J]. Chemistry International, 2014: 36(4): 14
- [17] 金君,武伦福,王沂东,等.乳酸菌发酵对半干罗非鱼挥发性成分的影响[J].暨南大学学报(自然科学版),2011,32(5):473-479
- JIN Jun, WU Lun-fu, WANG Yi-dong, et al. Effects of fermentation by lactic acid bacteria on the volatile components of damp-dry tilapia [J]. Journal of Jinan University (Natural Science), 2011, 32(5): 473-479
- [18] 舒宏,福新.合成食用香料手册[M].北京:化学工业出版社,2005:405
- SHU Hong, FU xin. Handbook of New Synthetic Flavorings [M]. Beijing Chemical Industry Press, 2005: 405
- [19] Guillen M D, Errecalde M C, Salmeron J, et al. Headspace volatile components of smoked swordfish (*Xiphias adius*) and cod (*Gadus morhua*) detected by means of solid phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Chemistry, 2006, 94(1): 151-156
- [20] Guillaume D, Vincent M C, Marie C, et al. Determination of volatile compounds to characterize fish spoilage using headspace /mass spectrometry and solid-phase microextraction /gas chromatography/mass spectrometry [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2006, 86(4): 600-611
- [21] Muriel E, Antequera T, Petron M J, et al. Volatile compounds in Iberian dry-cured loin [J]. Meat Science, 2004, 68(3): 391-400