

基于多元非线性回归分析的马铃薯加工品质特性预测

许英超 王相友 印 祥 岳仁才 胡周勋 孙景彬
(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

摘要: 为快速准确检测马铃薯加工品质,对希森3号及希森6号马铃薯的加工品质指标干物质和还原糖含量在马铃薯内部的分布规律进行研究。通过试验得出,两种马铃薯干物质含量在马铃薯中呈与马铃薯形状相似的椭球分布,在中心部位有最小值。采用拟牛顿算法和通用全局优化算法,结合对试验数据进行多元非线性回归分析,得出希森3号和希森6号马铃薯干物质含量关于检测点坐标值 x 、 y 和 z 的回归模型,决定系数分别为0.909 9和0.912 3,均能有效预测马铃薯干物质含量。马铃薯还原糖含量在马铃薯中心位置含量最高,由中心向表皮还原糖含量逐渐降低,在马铃薯茎部的还原糖含量低于马铃薯顶部关于中心对称位置的还原糖含量。两种马铃薯还原糖含量的多元非线性回归模型,决定系数分别为0.833 6和0.824 6,可预测马铃薯内部各点还原糖含量。通过对试验数据归纳分析得出,马铃薯靠近表皮位置干物质含量高,还原糖含量低,适合加工薯片薯条。

关键词: 马铃薯; 加工品质; 干物质; 还原糖; 多元非线性回归分析

中图分类号: S532; S609⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0366-08

Potato Processing Quality Characteristics Prediction Based on Multivariate Nonlinear Regression Analysis

XU Yingchao WANG Xiangyou YIN Xiang YUE Rencai HU Zhouxun SUN Jingbin
(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Aiming to accurately detect potato processing quality, the distribution of processing quality index dry matter and reducing sugar in potato were investigated. It was concluded that potato dry matter had the ellipsoid distribution in potato and the minimum value was in the center part. The experimental data was analyzed by using quasi-Newton algorithm combined with universal global optimization method, and the regression model of dry matter content of Xisen 3 and Xisen 6 potato about testing point coordinates x , y , and z was received. The determination coefficients of regression models about dry matter content of Xisen 3 and Xisen 6 potato were 0.909 9 and 0.912 3, respectively, and regression models can effectively predict the potato dry matter content. The content of reducing sugar in the center of potato was the highest, and the reducing sugar content from the center to the epidermis was decreasing. The reducing sugar content in the stem of potato was lower than that on the top of potato. The determination coefficients of multivariate nonlinear regression models about two kinds of potato reducing sugar content were 0.833 6 and 0.824 6, respectively. The regression models could predict the contents of reducing sugar in potato. According to the analysis of experimental data, the potato close to the epidermis was higher in dry matter and lower in reducing sugar, which was suitable for processing potato chips and French fries. The average content of dry matter of Xisen 6 potato is more than 20%, and the average content of reducing sugar is less than 0.1%, which is suitable for processing. This research can help processors for effective utilization of potato for various types of processing products viz., chips, French fries and flour, and provide a theoretical basis for NIR nondestructive detection of potato processing quality.

Key words: potato; processing quality; dry matter; reducing sugar; multivariate nonlinear regression analysis

0 引言

马铃薯是全球重要的粮食作物^[1]。我国的马铃薯种植资源丰富,产量位于世界前列^[2]。

马铃薯的加工品质指标主要是干物质和还原糖含量。干物质含量直接影响企业的经济效益^[3],还原糖含量影响薯片、薯条的色泽^[4]。通常用于加工全粉的马铃薯干物质质量分数要求为马铃薯鲜质量的 20% 以上^[5]。而用于加工薯片、薯条的马铃薯干物质质量分数要求为鲜质量的 22% ~ 24%,还原糖质量分数低于鲜质量的 0.1%^[6]。薯片、薯条在加工过程中常出现薯条萎蔫及颜色过深等现象^[7],是因为马铃薯各成分在马铃薯内分布不均匀,存在加工指标含量超标的部位^[8]。因此需准确测量马铃薯加工品质指标含量,以保证产品质量和企业效益。目前,马铃薯加工品质指标含量主要采用化学方法进行测定。干物质含量采用干燥法^[9],还原糖含量采用液相色谱法^[10]或 3,5-二硝基水杨酸法(DNS)^[11]。这些方法测量准确,但存在耗时长、需破坏样品等问题,不适用于马铃薯加工业的快速检测。

近红外光谱技术可实现果蔬^[12]及粮食^[13]中各成分含量的快速无损检测。近红外光谱技术通常采用漫反射方式获取马铃薯内部信息,通过检测 C—H、O—H、N—H 等基团的振动和转动信息,确定物质成分含量。但近红外光谱穿透能力较弱,现有的近红外光谱仪只能获取马铃薯表层信息^[14],而马铃薯加工品质指标在马铃薯内部分布不均匀,表皮与中心的含量差异较大^[15],目前没有较好方法解决此问题。宋娟等^[16]和 RADY 等^[17]将马铃薯的赤道部分作为马铃薯加工品质指标检测的取样点,周竹等^[18]取马铃薯表皮下 10 mm 薄片测干物质含量,均具有局限性。因此,需研究马铃薯加工品质指标分布规律,建立分布模型,为后续建立近红外光谱无损检测检测点加工品质指标值与马铃薯加工品质指标均值间的关系,提高近红外无损检测技术的检测准确性提供理论基础。目前国内未见该研究相关文献。

本文旨在寻找马铃薯加工品质指标干物质和还原糖在马铃薯内部的分布规律,建立分布模型,为有效利用马铃薯加工各种产品提供技术支持,为提高近红外光谱检测马铃薯加工品质的检测精度提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本文选取希森集团自主研发的希森 3 号和希森

6 号马铃薯作为研究对象。马铃薯均采自国家马铃薯工程技术研究中心山东滕州种植基地,采收当天通过冷链物流运达山东理工大学农业工程实验室。挑选表面平滑、大小均一、结构对称、无损伤的马铃薯,用自来水清洗,放置于恒温 23℃、恒湿 85% 的暗室贮藏 24 h。各品种马铃薯分别取样 20 个,其中单个样本质量为 159.1 ~ 201.8 g。

以马铃薯中心为坐标原点 O ,以生长轴线方向为 Y 轴,以径向为 X 轴,以垂直 XOY 平面方向为 Z 轴,如图 1a 所示坐标系,其中 Y 轴以指向茎部为正方向。马铃薯在 X 、 Y 和 Z 轴方向的尺寸分别用 B 、 L 、 T 表示。用 $\phi 10$ mm 的打孔器在图 1a 所示的马铃薯 13 个不同位置上由表皮向原点打孔取样,然后用手动切片机将所取试样由中心向两侧依次截取长度为 5 mm 的圆柱。以 XOY 平面为例的取样如图 1b 所示。将所取的 $\phi 10$ mm $\times$ 5 mm 圆柱用于测定马铃薯的干物质和还原糖含量。各品种各指标均取 10 个马铃薯,取均值进行分析。

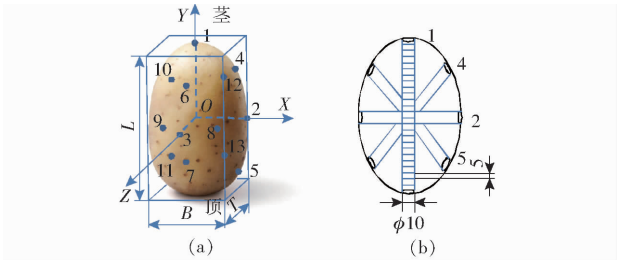


图 1 马铃薯取样图

Fig. 1 Sketches of potato sampling points

- 1. Y 轴方向 2. X 轴方向 3. Z 轴方向 4. XOY 平面上弧 $\widehat{12}$ 的中点 5. 与 4 点关于 X 轴对称 6. ZOY 平面上弧 $\widehat{13}$ 的中点 7. 与 6 点关于 Z 轴对称 8. XOZ 平面上弧 $\widehat{23}$ 的中点 9. 与 8 点关于 Z 轴对称 10 ~ 13. 马铃薯 4 等分的中心

1.2 主要设备与仪器

DHG - 9070A 型电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司);UV - 1700 型紫外可见分光光度计(日本岛津有限公司);HH - 6 型数显恒温水浴锅(龙口先科公司);ST - 208B 型手动切片机(广州安狮食品机械有限公司);镀铬游标卡尺(杭州量具厂);MesoQMR23 - 060H - I 型核磁共振成分分析仪(上海纽迈电子科技有限公司),磁体类型为永磁体,磁场强度(0.5 $\pm$ 0.08) T,探头线圈直径 70 mm。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 干物质含量

采用干燥法测定^[9],先将称量瓶编号,放于 110℃ 干燥箱中干燥 3 h,取出后放于盛有干燥剂的干燥器内,冷却 30 min 后称量记为 M_1 ,然后取 $\phi 10$ mm $\times$ 5 mm 的马铃薯圆柱放于称量瓶中,将称量瓶和样品总质量记为 M_2 ,将带有样品的称量瓶放

在 110℃ 的干燥箱中干燥 3 h,取出放于装有干燥剂的干燥器内,30 min 后称量记为 M_3 。干物质质量分数计算公式为

$$D = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100\%$$

(1)

1.3.2 还原糖含量

取 $\phi 10\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的马铃薯圆柱样品加 4 mL 85% 乙醇,研磨。在 80℃ 水浴中加热 20 min,其间摇匀数次。在 12 000 r/min 下离心 10 min。将上清液倒入量筒,记录体积 V 。用移液枪取上清液 1 mL,采用 3,5-二硝基水杨酸法^[11]测还原糖含量。

1.3.3 质量与尺寸

采用游标卡尺量取马铃薯试样在 X 、 Y 和 Z 轴方向外形尺寸 B 、 L 和 T ;用电子天平称取马铃薯质量。

1.4 数据处理方法

采用 Orign 8.5 和 Matlab 2016 软件对试验数据进行处理和制图,运用 1stOpt 软件采用拟牛顿算法和通用全局优化算法相结合的方法对试验数据进行多元非线性模型回归分析,建立回归模型。拟牛顿法是牛顿迭代法的改进方法,可有效减少每步迭代的计算量,并保持超线性的收敛速度^[19]。将拟牛顿法和全局优化算法相结合,可在无初始值的情况下全局搜索最优解,提高收敛速度和求解效率。

2 结果与分析

2.1 马铃薯基本参数

希森 3 号和希森 6 号马铃薯的基本参数如表 1 所示,基本参数为 20 个平行样品的平均值。马铃薯

纵横径比在 1 附近的为类球形马铃薯,纵横径比偏离 1 的则为类椭圆形马铃薯^[20]。其中,纵横径比计算公式为

$$A = \frac{L}{B}$$

(2)

如表 1 所示希森 6 号马铃薯的纵横径比为 1.1,是类球形马铃薯;希森 3 号马铃薯的纵横径比为 1.4,是类椭圆形马铃薯。

表 1 马铃薯样品概述

Tab.1 Overview of samples used

品种	质量/g	尺寸/mm			纵横 径比	样品 数量
		B	L	T		
希森 3 号	169.6	63.4	89.6	53.4	1.4	20
希森 6 号	175.0	68.6	77.2	59.4	1.1	20

2.2 干物质含量

希森 3 号马铃薯干物质质量分数的变化范围为 11.43% ~ 25.77%,平均值为 19.11%,偏差 2.89%。希森 6 号马铃薯干物质质量分数的变化范围较大,为 12.03% ~ 29.53%,平均值为 22.21%,偏差 3.76%。

2.2.1 干物质含量分布状态

图 2a、2b 分别为希森 3 号和希森 6 号马铃薯干物质含量在坐标轴各方向上的变化情况。如图 2 所示,两种马铃薯的干物质分布规律基本相同,均在马铃薯中心位置干物质含量最小,由中心沿各坐标轴正、负方向干物质含量逐渐增加,在最外层有最大值。靠近中心部位干物质变化较大,外层干物质含量变化较小。

用于试验的希森 3 号和希森 6 号马铃薯均结构

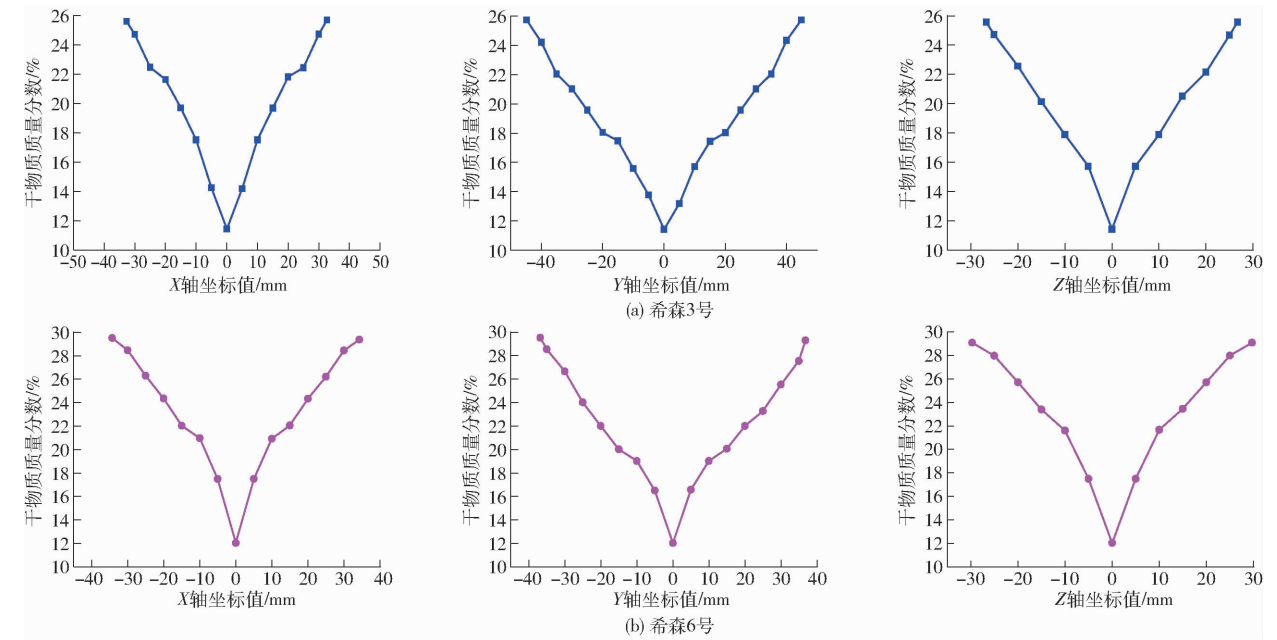


图 2 马铃薯干物质含量在坐标轴各方向上的变化
Fig.2 Changes of dry matter of potato at coordinate axis

对称,故将马铃薯近似看作标准椭球体。图 3 为希森 3 号和希森 6 号马铃薯的干物质含量在各坐标平面上的分布状态。颜色梯度条由上往下代表马铃薯干物质质量分数由低变高,图 3a ~ 3c 的范围为 11.40% ~ 25.77%,图 3d ~ 3f 的范围为 12.00% ~ 29.53%。

图 3a ~ 3c 为希森 3 号马铃薯干物质含量分布状态,其在各坐标平面分布基本相同,均呈与马铃薯形状相似的椭圆形分层分布。中心处干物质质量分数最小,为 11.43%,向外干物质含量逐层增大,最外层干物质质量分数为 25.77%,在距离表皮深度

约 10 mm 以内的位置干物质质量分数大于 22%。由图 3a 和图 3c 可以看出内层各椭圆在 Y 轴方向有尖角,说明在 Y 轴附近干物质含量比同椭球层其他位置干物质含量小。

图 3d ~ 3f 为希森 6 号马铃薯干物质含量分布状态,其分布规律与希森 3 号马铃薯干物质分布含量规律基本相同,均呈与马铃薯形状相似的椭圆形分层分布。希森 6 号马铃薯的干物质质量分数在中心最小,为 12.03%,最外层最高,可达 29.53%,在距离表皮深度约 20 mm 以内的位置干物质质量分数大于 22%。希森 6 号马铃薯干物质含量比希森 3 号高。

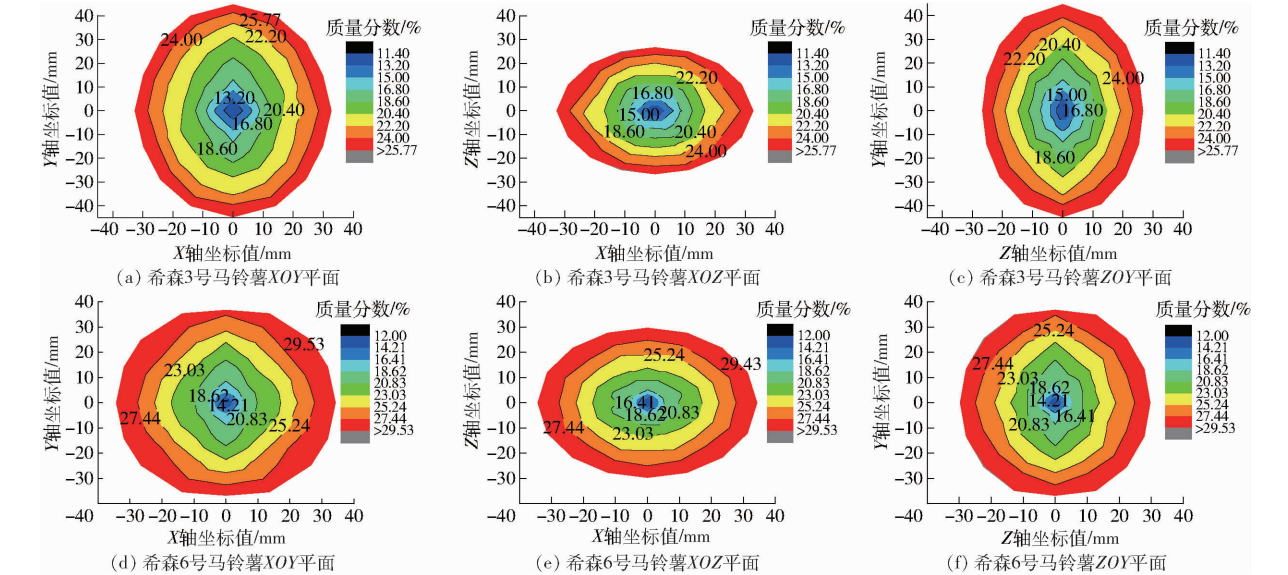


图 3 马铃薯干物质质量分数在坐标平面上的变化
Fig. 3 Changes of dry matter of potato at coordinate plane

2. 2. 2 核磁共振下水分的分布状态

马铃薯干物质含量的分布状态与马铃薯含水率分布状态有关,干物质含量越高,含水率越小。图 4 为马铃薯核磁共振 T1 加权图像,能直观表现出水分的分布状态,黑色越深表明水质子信号越强,该部位的含水率越高^[21]。图 4a、4b 为希森 3 号马铃薯 XOY 平面和 XOZ 平面图像,图 4c、4d 为希森 6 号马铃薯 XOY 平面和 XOZ 平面图像。如图 4a 和图 4c 所示,中间位置均有明显黑色竖线,表示该部位含水率较大,干物质含量较小,即 Y 轴周围干物质含量低。如图 4b 和图 4d 所示,中心位置黑色面积较大,由中心向表皮方向黑色面积逐渐减小,甚至消失。说明马铃薯中心部位含水率最高,向表皮方向含水率逐渐减小。干物质含量则为中心部位含量最低,向表皮方向干物质含量逐渐增加,如图 3b 和图 3e 所示。图 4a、4b 的整体颜色比图 4c、4d 黑,说明希森 3 号的含水率高,干物质含量低。在马铃薯的外围有黑白相间的圆环,是马铃薯的维管束环和皮层

位置,含水率略有增加,但由图 2 可以看出表皮层的干物质含量仍然呈增加趋势,只是增加较少。其原因可能是维管束环很细,皮层含水率低,最终仍呈增加趋势。

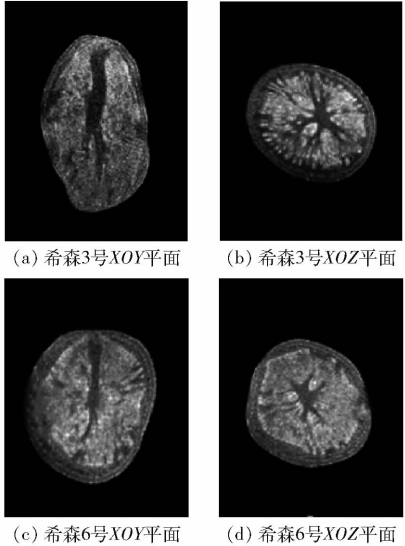


图 4 马铃薯核磁共振 T1 加权图像
Fig. 4 T1 weighted magnetic resonance images for potato

2.2.3 回归模型

通过分析马铃薯干物质含量的分布规律,发现马铃薯中检测点 X 、 Y 和 Z 轴的坐标值 x 、 y 和 z 对马铃薯的干物质含量有影响,且有一定的规律性,基于 1stOpt 软件采用多元非线性回归分析方法,构造检测点坐标值与干物质含量的回归模型,进一步解释干物质含量与检测点位置的关系,从而更准确地预测干物质含量,为光谱无损检测提供理论支持。

建立因变量 G 与自变量 x_i ($i = 1, 2, \cdots, m$) 之间的多元非线性回归数学模型^[22] 为

$$G = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1^2 + \cdots + a_5x_1x_2^{m-1} + \cdots + a_mx_1^{m-1}$$

(3)

- 式中
- a_0 ——回归系数

a_m ——偏回归系数(m 为正整数)

x_1 ——检测点 X 轴坐标值 x , mm

x_2 ——检测点 Y 轴坐标值 y , mm

x_3 ——检测点 Z 轴坐标值 z , mm

G ——干物质质量分数, %

采用拟牛顿算法和通用全局优化算法相结合的方法,利用式(3)对试验数据进行非线性拟合,通过决定系数 R^2 和均方根误差进行评定。希森 3 号马铃薯和希森 6 号马铃薯干物质质量分数回归模型为

$$\hat{G}_3 = 16.5832 + 9.570 \times 10^{-3}x^2 + 4.471 \times 10^{-3}y^2 + 1.3568 \times 10^{-2}z^2$$

(4)

$$\hat{G}_6 = 19.4192 + 9.659 \times 10^{-3}x^2 + 7.231 \times 10^{-3}y^2 + 1.2617 \times 10^{-2}z^2$$

(5)

由式(4)和式(5)可以看出,马铃薯干物质质量分数是关于检测点坐标值 x 、 y 和 z 的椭球函数,说明马铃薯的干物质质量分数在马铃薯内部呈与马铃薯形状相似的椭球形分布。类椭球形马铃薯和类球形马铃薯均具有这种分布规律。

2.2.4 回归模型与试验数据比对照

将式(4)和式(5)的干物质质量分数预测值与建模集样本的试验值相比较,结果如图 5 和图 6 所示。希森 3 号的建模集样本数量为 335 个,希森 6 号的建模集样本数量为 344 个。希森 3 号马铃薯干物质质量分数的回归模型决定系数为 0.909 9,均方根误差为 1.101 1%。希森 6 号马铃薯干物质质量分数的回归模型决定系数为 0.912 3,均方根误差为 1.165 3%。如图 5、6 所示,两种马铃薯的预测值和实测值均能紧密分布在回归线两侧,希森 6 号马铃薯干物质质量分数的回归模型预测效果稍优于希森 3 号的,但两种马铃薯干物质质量分数的预测模型均能达到较好的预测效果。

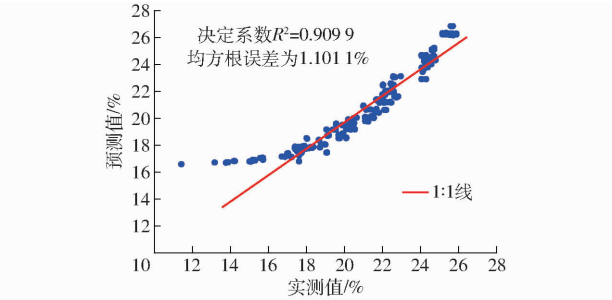


图 5 希森 3 号马铃薯干物质质量分数预测值与实测值拟合结果

Fig. 5 Potato dry matter prediction model and test data of Xisen 3

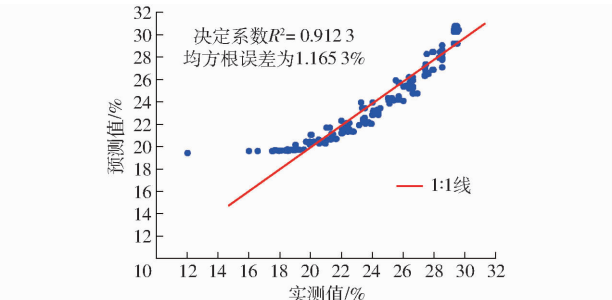


图 6 希森 6 号马铃薯干物质质量分数预测值与实测值拟合结果

Fig. 6 Potato dry matter prediction model and test data of Xisen 6

2.3 还原糖含量

马铃薯还原糖含量是影响马铃薯薯片和薯条品质的重要指标。还原糖含量与薯片脆度呈负相关性,与致癌物质丙烯酰胺的含量呈正相关性^[23],故还原糖含量越低越好。通常认为马铃薯还原糖质量分数低于马铃薯鲜质量的 0.1% 时可用于加工薯片和薯条。

希森 3 号和希森 6 号马铃薯还原糖质量分数分布情况如表 2 所示。希森 3 号马铃薯还原糖质量分数为 0.075 7% ~ 0.355 3%,希森 6 号马铃薯还原糖质量分数为 0.050 4% ~ 0.129 8%。

表 2 马铃薯还原糖质量分数

Tab. 2 Content of potato reducing sugar %

品种	最小值	最大值	均值	偏差
希森 3 号	0.075 7	0.355 3	0.156 7	0.082 1
希森 6 号	0.050 4	0.129 8	0.076 2	0.026 9

2.3.1 还原糖含量分布状态

图 7 为希森 3 号和希森 6 号马铃薯还原糖质量分数在坐标平面上的变化情况。图 7 中颜色梯度条由下往上代表马铃薯还原糖质量分数由低变高,图 7a ~ 7c 的范围为 0.075 7% ~ 0.355 3%,图 7d ~ 7f 的范围为 0.050 4% ~ 0.129 8%。由图 7 可以看

出两种马铃薯的还原糖质量分数均在中心位置有最大值,由中心向表皮方向还原糖质量分数逐渐减小,在最外层有最小值。如图 7b 与图 7e 的等高线图所示,马铃薯还原糖质量分数在 XOZ 平面上呈关于中心对称的椭圆分布状态。由图 7a、图 7c、图 7d 和图 7f 的等高线图可知,各点还原糖质量分数关于 Y 轴对称分布,马铃薯茎部 Y 轴周围的还原糖质量分数比周围的还原糖质量分数高,马铃薯茎部还原糖质量分数要低于马铃薯顶部关于原点对称位置的还原糖质量分数。WEAVER 等^[24]研究表明马铃薯油

炸后顶部比根部颜色深。由于还原糖含量与马铃薯油炸后颜色正相关,故说明马铃薯茎部还原糖含量低于根部。马铃薯茎部 Y 轴周围还原糖含量稍高的部位与图 4a 和图 4c 的中间黑色部位相对应,此处是马铃薯的内髓位置含水率高,而大部分还原糖溶于水,故还原糖含量偏高。

由图 7 等高线可以看出,希森 3 号马铃薯在距表皮深度约 10 mm 内还原糖质量分数低于 0.1%,希森 6 号马铃薯在距表皮深度约 20 mm 内还原糖质量分数低于 0.1%,适宜加工薯片薯条。

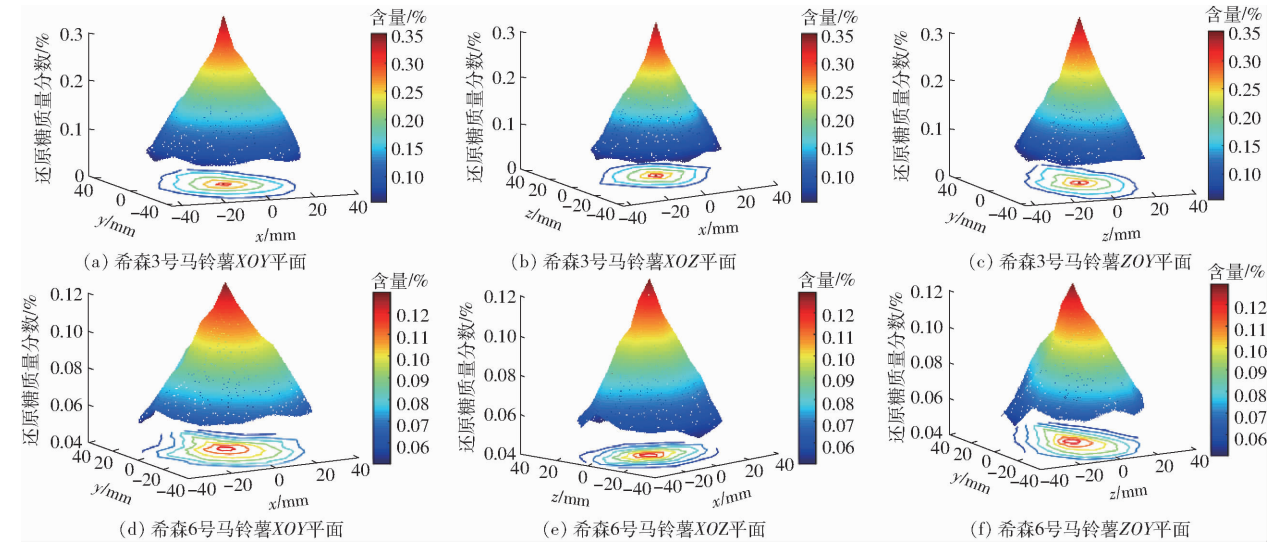


图 7 马铃薯还原糖质量分数在坐标平面上的变化

Fig. 7 Changes of reducing sugar of potato at coordinate plane

2.3.2 还原糖质量分数回归模型

将式(3)中的干物质质量分数 G 替换为还原糖质量分数 H ,采用拟牛顿算法和通用全局优化算法相结合的方法,对还原糖质量分数试验数据进行非线性回归拟合,通过决定系数 R^2 和均方根误差进行评定。希森 3 号马铃薯和希森 6 号马铃薯还原糖质量分数计算公式为

$$\hat{H}_3 = 0.2428 - 1.8790 \times 10^{-4}x + 1.9235 \times 10^{-4}x^2 - 1.0691 \times 10^{-4}y^2 - 1.7458 \times 10^{-4}z^2 \quad (6)$$

$$\hat{H}_6 = 0.1075 - 1.913 \times 10^{-5}x - 1.9203 \times 10^{-4}y - 1.0536 \times 10^{-4}z - 4.558 \times 10^{-5}x^2 - 3.931 \times 10^{-5}y^2 - 4.835 \times 10^{-5}z^2 \quad (7)$$

希森 3 号马铃薯还原糖质量分数的回归模型为式(6),该回归模型的决定系数为 0.833 6,均方根误差为 0.028 4%。式(7)为希森 6 号马铃薯还原糖质量分数的回归模型,该回归模型的决定系数为 0.824 6,均方根误差为 0.009 7%。

图 8 和图 9 分别为希森 3 号和希森 6 号马铃薯还原糖质量分数预测值与建模集样本的实测值的比较结果。希森 3 号的建模集样本数量为 335 个,希

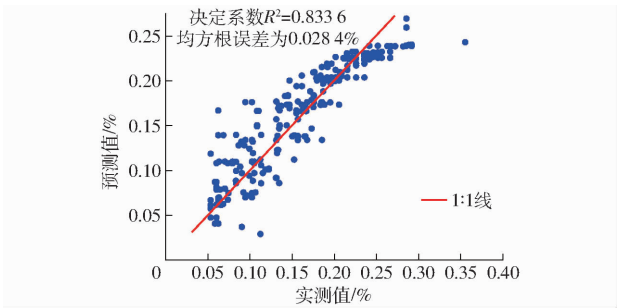


图 8 希森 3 号马铃薯还原糖质量分数预测值与实测值拟合结果

Fig. 8 Potato reducing sugar prediction model and test data of Xisen 3

森 6 号的建模集样本数量为 344 个。由图 8、9 可以看出两种马铃薯还原糖含量回归模型的预测结果相似。在还原糖含量较小时有部分点偏离 1:1 线较远,但均方根误差较小,仍有一定的预测效果。出现这种结果的原因可能是还原糖含量过低,样本取样质量小,操作误差被放大。

综上所述,两种马铃薯靠近表皮处的干物质含量高,还原糖含量低,更适宜加工薯条和薯片,希森 3 号马铃薯建议使用距表皮约 10 mm 内的位置,希

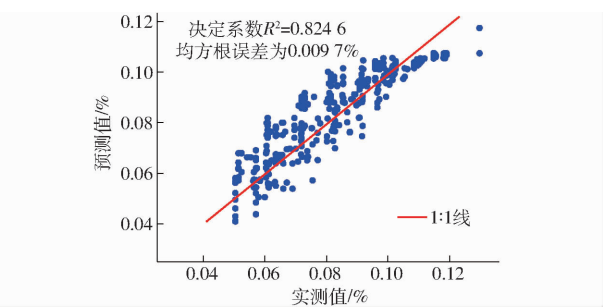


图9 希森6号马铃薯还原糖质量分数预测值与实测值拟合结果

Fig.9 Potato reducing sugar prediction model and test data of Xisen 6

森6号马铃薯建议使用距表皮约20 mm 内的位置。希森6号马铃薯干物质平均质量分数为22.21%，大于20%；还原糖平均质量分数为0.076 2%，小于0.1%，适宜作为加工薯使用。可将加工薯内髓部位加工净菜，其余部位加工薯条薯片，对马铃薯各部位进行不同的深加工，能有效减少能耗，提高企业效益。

赵萍等^[9]和石瑛等^[25]对马铃薯贮藏期间干物质含量变化进行研究，认为同一贮藏条件下，相同品种的马铃薯干物质含量在贮藏期间无显著变化。故本研究结果适用于新采收和同一条件下贮藏的马铃薯。但不同品种的马铃薯因品种差异各成分含量会有不同，针对不同品种马铃薯应建立各自对应的回归模型。马铃薯还原糖含量会随着贮藏时间和贮藏条件发生变化^[26]，故马铃薯还原糖含量回归模型适用于新采收马铃薯，贮藏期间马铃薯还原糖的回归

模型还需进一步研究。

3 结论

- (1)希森3号为类椭圆形马铃薯，希森6号为类球形马铃薯，两类马铃薯的干物质在马铃薯内部均呈与马铃薯形状相似的近似椭球分布，在中心部位含量最小，表皮含量最高，Y轴部位干物质含量略低于周边含量。
- (2)采用拟牛顿算法和通用全局优化算法相结合的方法对试验数据进行多元非线性回归分析，得出的希森3号和希森6号马铃薯干物质含量回归模型是关于检测点坐标值 x 、 y 和 z 的椭球函数，决定系数分别为0.909 9和0.912 3，均能有效预测马铃薯内部各点干物质含量。
- (3)希森3号和希森6号马铃薯还原糖含量在马铃薯中心位置含量最高，由中心向表皮还原糖含量逐渐降低。马铃薯茎部的还原糖含量低于马铃薯顶部关于中心对称位置的还原糖含量。
- (4)希森3号和希森6号马铃薯还原糖含量的多元非线性回归模型，决定系数分别为0.833 6和0.824 6，可预测马铃薯内部各点还原糖含量。
- (5)两种马铃薯均在靠近表皮的位置，干物质含量高，还原糖含量低，适合加工薯片薯条。希森6号马铃薯干物质平均质量分数大于20%；还原糖平均质量分数小于0.1%，适宜作为加工薯使用。

参 考 文 献

1 曾诗淇. 农业部举办马铃薯主食产品及产业开发国际研讨会[J]. 农产品市场周刊, 2015(31):19.

2 刘俊霞,贾金荣. 中国马铃薯国际贸易趋势分析[J]. 西北农林科技大学学报:社会科学版, 2012,12(4):57-62.

LIU Junxia, JIA Jinrong. Analysis on trend of China international trade for potato[J]. Journal of Northwest A&F University: Social Science Edition,2012,12(4):57-62. (in Chinese)

3 KLEINKOPF G E, WESTERMANN D T, WILLIE M J, et al. Specific gravity of Russet Burbank potatoes[J]. American Potato Journal, 1987,64(11): 579-587.

4 杨炳南,张小燕,赵凤敏,等. 不同马铃薯品种的不同加工产品适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2015,31(20):301-308.

YANG Bingnan, ZHANG Xiaoyan, ZHAO Fengmin, et al. Suitability evaluation of different potato cultivars for processing products [J]. Transactions of the CSAE,2015,31(20):301-308. (in Chinese)

5 RADY A M, GUYER D E. Rapid and nondestructive quality evaluation methods for potatoes: a review [J]. Computers & Electronics in Agriculture,2015,117:31-48.

6 BANDAN A, SHARMA V, KAUSHIK S K, et al. Variation in biochemical parameters in different parts of potato tubers for processing purposes[J]. Journal of Food Science & Technology, 2016, 53(4):1-7.

7 TIAN J, CHEN J, YE X, et al. Health benefits of the potato affected by domestic cooking: a review[J]. Food Chemistry, 2016, 202(1):165-175.

8 PRITCHARD M K, SCANLON M G. Mapping dry matter and sugars in potato tubers for prediction of whole tuber process quality [J]. Canadian Journal of Plant Science, 1997,77(3):461-467.

9 赵萍,巩慧玲,赵瑛,等. 不同品种马铃薯贮藏期间干物质与淀粉含量之间的关系[J]. 食品科学, 2004,25(11):103-105.

ZHAO Ping, GONG Huiling, ZHAO Ying, et al. Relationship between contents of dry material and starch of potato during storage [J]. Food Science, 2004, 25(11):103-105. (in Chinese)

10 YANG Y, ACHAERANDIO I, PUJOLÀ M. Influence of the frying process and potato cultivar on acrylamide formation in French fries[J]. Food Control, 2016, 62:216-223.

- 11 杨俊慧, 郑岚, 马耀宏, 等. 马铃薯中还原糖不同测定方法的比较[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(6): 104 – 108.
YANG Junhui, ZHENG Lan, MA Yaohong, et al. Comparison of different determination of reducing sugar in potato[J]. Food Research and Development, 2011, 32(6): 104 – 108. (in Chinese)
- 12 SU W H, HE H J, SUN D W. Non-destructive and rapid evaluation of staple foods quality by using spectroscopic techniques: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(5): 1039 – 1051.
- 13 CAPORASO N, WHITWORTH M B, FISK I D. Protein content prediction in single wheat kernels using hyperspectral imaging[J]. Food Chemistry, 2018, 240(2): 32 – 42.
- 14 SUBEDI P P, WALSH K B. Assessment of potato dry matter concentration using short-wave near-infrared spectroscopy[J]. Potato Research, 2009, 52(1): 67 – 77.
- 15 PRITCHARD M K, SCANLON M G. Mapping dry matter and sugars in potato tubers for prediction of whole tuber process quality[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1997, 77(3): 461 – 467.
- 16 宋娟, 吴晨. 基于高光谱成像技术的马铃薯多种营养成分同时检测[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2016, 37(1): 60 – 66.
SONG Juan, WU Chen. Simultaneous detection of quality nutrients of potatoes based on hyperspectral imaging technique[J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2016, 37(1): 60 – 66. (in Chinese)
- 17 RADY A M, GUYER D E, KIRK W, et al. The potential use of visible/near infrared spectroscopy and hyperspectral imaging to predict processing-related constituents of potatoes[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 135(2): 11 – 25.
- 18 周竹, 李小昱, 高海龙, 等. 马铃薯干物质含量高光谱检测中变量选择方法比较[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 128 – 133, 185. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120226&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.026.
ZHOU Zhu, LI Xiaoyu, GAO Hailong, et al. Comparison of different variable selection methods on potato dry matter detection by hyperspectral imaging technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 128 – 133, 185. (in Chinese)
- 19 王宪彬, 施树明, 刘丽, 等. 基于遗传算法和拟牛顿法的车辆动力学平衡点混合求解方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(4): 120 – 127.
WANG Xianbin, SHI Shuming, LIU Li, et al. Vehicle dynamics equilibriums solution search based on hybridization of genetic algorithm and quasi-Newton method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(4): 120 – 127. (in Chinese)
- 20 郑冠楠, 谭豫之, 张俊雄, 等. 基于计算机视觉的马铃薯自动检测分级[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 166 – 168, 156.
ZHENG Guannan, TAN Yuzhi, ZHANG Junxiong, et al. Automatic detecting and grading method of potatoes with computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 166 – 168, 156. (in Chinese)
- 21 廖媛媛, 欧昌荣, 汤海青, 等. 三种冻结方式对大黄鱼品质的影响[J]. 现代食品科技, 2014, 30(7): 218 – 223.
LIAO Yuanyuan, OU Changrong, TANG Haiqing, et al. Effects of three freezing methods on the quality changes of *Pseudosciaena crocea*[J]. Modern Food Science & Technology, 2014, 30(7): 218 – 223. (in Chinese)
- 22 杨帆, 刘超, 汤方平, 等. 带可调进口导叶轴流泵装置水力性能数值分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 51 – 58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140508&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.008.
YANG Fan, LIU Chao, TANG Fangping, et al. Numerical simulation on hydraulic performance of axial-flow pumping system with adjustable inlet guide vanes[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 51 – 58. (in Chinese)
- 23 李钦. 油炸马铃薯片中丙烯酰胺含量的控制方法研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
LI Qin. The study on control method of acrylamide in fried potato chips[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 24 WEAVER M L, HAUTALA E, NONAKA M, et al. Sugar-end in Russet Burbank potatoes[J]. American Potato Journal, 1972, 49(10): 376 – 382.
- 25 石瑛, 秦昕, 卢翠华, 等. 不同马铃薯品种贮藏期间还原糖及干物质的变化[J]. 中国马铃薯, 2002(1): 16 – 18.
- 26 田甲春, 田世龙, 程建新, 等. 贮藏温度对马铃薯品质和采后生理的影响[J]. 保鲜与加工, 2017(3): 16 – 20.
TIAN Jiachun, TIAN Shilong, CHENG Jianxin, et al. Impact of storage temperature on quality and postharvest physiology of potato tubers[J]. Storage & Process, 2017(3): 16 – 20. (in Chinese)