

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.042

基于近红外与中红外光谱技术的淀粉回生度检测

邹小波 崔雪平 石吉勇 胡雪桃 徐艺伟 薛瑾

(江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013)

摘要: 淀粉食品在加工、运输及储藏过程中会逐渐出现回生,其回生程度是影响淀粉食品品质的重要因素。利用近红外和中红外光谱技术快速、无损检测淀粉回生度。首先采集了储存不同时间淀粉的近红外和中红外光谱,分别利用近红外、中红外以及两者融合的光谱数据结合化学计量学方法(偏最小二乘法(PLS、iPLS、biPLS、siPLS))建立淀粉回生度检测模型。结果显示,近红外和中红外融合光谱技术的biPLS检测模型最佳,校正集和预测集相关系数分别为0.965 5和0.931 3。研究结果表明,红外光谱技术可以快速、无损检测玉米淀粉回生度,保障了富含淀粉食品的质量与安全。

关键词: 淀粉回生度; 近红外光谱; 中红外光谱; 偏最小二乘法

中图分类号: O657.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)03-0341-06

Detection of Retrogradation Degree of Starch Based on Near-infrared and Mid-infrared Spectroscopy

ZOU Xiaobo CUI Xueping SHI Jiyong HU Xuetao XU Yiwei XUE Jin
(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Starch food is easy to retrograde during processing, transportation and storage, and the degree of retrogradation seriously affects the nutritional value and shelf-life of starch food. Soretrogradation degree is really expected to determine rapidly and non-destructively during storage, that is near-infrared and mid-infrared spectroscopy. The near-infrared and mid-infrared spectra of starch in different storage times (0 d, 1 d, 2 d, 3 d, 4 d, 5 d, 10 d, 15 d and 20 d) were collected. There was a certain associations between spectra data and chemical reference detected by spectrophotometry, then chemometrics (partial least squares, PLS) were used to establish the prediction model of starch retrogradation with near-infrared, mid-infrared and fusion data, the best one that had higher correlation coefficient and lower error was chosen. The results showed that the backward interval partial least squares (biPLS) prediction model of fusion technology was the best one, the root mean square error of cross-validation (RMSECV) and root mean square error of prediction (RMSEP) were 6.79% and 9.52%, and the calibration and prediction correlation coefficient were 0.965 5 and 0.931 3, respectively. The results indicated that the fusion spectroscopy was superior to any single spectral technique, which could provide more accurately information of starch. Hence, the infrared spectroscopy could detect the retrogradation degree of corn starch rapidly and non-destructively, provide guidance for the processing of starchy food, and ensure the quality and safety of starchy food.

Key words: starch retrogradation degree; near-infrared spectroscopy; mid-infrared spectroscopy; partial least squares

0 引言

淀粉回生是指淀粉糊在室温或低温下储存一段时间后,分子状态从无序到有序的过程^[1]。回生会

改变淀粉的优良特性,影响淀粉食品的外观和口感,且对淀粉酶具有抗性,食用后易引发消化系统疾病;然而在某些食品加工过程中,又需要添加适当的回生淀粉,以增强食用口感和某些生理功能^[2-3]。所

收稿日期: 2017-07-08 修回日期: 2017-10-19

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD17B04)

作者简介: 邹小波(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品、食品品质无损检测研究, E-mail: zou_xiaobo@ujs.edu.cn

以需清楚淀粉在加工储存过程中回生度变化情况,为淀粉食品加工过程提供指导。

检测淀粉回生度的方法有很多,比如淀粉酶法^[4-5]、X-射线衍射法(XRD)^[6]、脉冲核磁共振法(PNRM)^[7]、光谱技术等。光谱技术能够检测待测物质中基团结构的变化情况^[8],从而对食品成分或品质进行定量、定性分析^[9-10]。中红外光谱主要呈现基团分子基频的伸缩或弯曲振动信息,近红外光谱主要呈现分子基团倍频、合频振动信息,具有方便快捷、成本低、可在线检测等优势^[11],在食品工业中应用非常广泛。一些研究者已经将红外光谱技术用于检测淀粉特性,如拉曼光谱检测淀粉中直链淀粉的含量^[12],中红外光谱技术表征淀粉回生过程中淀粉结构的变化情况^[13],还有运用傅里叶红外光谱中一些特征振动峰的相对强度与差示扫描量热法测定的回生焓值相关性来预测淀粉回生度^[14]。

玉米淀粉在回生过程中分子内氢键数量及分子结构会发生改变,因此可利用近红外和中红外光谱技术检测淀粉结构变化情况,以分光光度法检测的回生度为化学参考值,建立快速检测淀粉回生度模型。本文分别运用近红外、中红外以及两者融合的光谱数据,结合偏最小二乘法(PLS、iPLS、siPLS和biPLS)建模,寻找最佳的检测方法,以达到快速、无损检测淀粉回生度的目的。

1 材料与方 法

实验所用玉米淀粉购自镇江市润州淀粉公司。

1.1 回生淀粉的制备

取 1 g 玉米淀粉悬浮于 19 mL 水中,加热至 100℃,均匀搅拌 1 h,使其完全糊化。淀粉糊在 4℃ 下储存不同时间(0、1、2、3、4、5、10、15、20 d),对不同储存时间的回生淀粉进行冷冻干燥,粉碎,然后按照四分法原则,随机抽取样本,每个储存时间取 10 个平行样本,9 个储存时间共 90 个样本,装入自封袋,贴好标签,然后保存在干燥器中,备用。

1.2 淀粉回生度的测定

本研究采用 α -淀粉酶法^[4-5]测定淀粉的回生度,具体步骤为:准确称取 25 mg 的样品,加入去离子水 8 mL,并震荡混匀,然后加入 3.5 u/mL α -淀粉酶溶液 2 mL 和 0.1 mol/L 醋酸盐缓冲溶液(pH 值 5.6) 2 mL。于 37℃ 条件下培养 10 min 后,加入 4 mol/L NaOH 溶液 5 mL 停止酶反应,再用 4 mol/L 的 HCl 调整溶液 pH 值至中性,最后定容到 100 mL。取出 10 mL 的水解液,加入 0.2% I_2 -2% KI 溶液 5 mL,再次定容至 100 mL,静置 20 min 之后,用紫外可见分光光度计在 625 nm 处测定其吸光度。回生

度的计算公式为

$$D = \frac{b - c}{a - c} \times 100\% \quad (1)$$

式中 D ——淀粉回生度, %

a ——总淀粉吸光度

b ——实验用淀粉吸光度

c ——完全糊化淀粉吸光度

1.3 红外光谱的采集和预处理

(1) 红外光谱数据采集

通过近红外光谱仪(美国赛默飞世尔公司)扫描回生淀粉,以仪器内置背景为参比,积分球漫反射,扫描波数为 4 000 ~ 10 000 cm^{-1} ,扫描次数为 16 次,分辨率为 8 cm^{-1} ,波数间隔为 3.853 6 cm^{-1} ,每条光谱包含有 1 557 个变量。通过中红外光谱仪(美国热电公司)扫描回生淀粉,采集区间 650 ~ 4 000 cm^{-1} ,扫描次数为 64 次,分辨率为 2 cm^{-1} ,每条光谱包含有 6 550 个变量。数据采集过程中,室内湿度基本保持不变,温度保持在 23℃ 左右。采集光谱时,每个样品采集 3 个点,并取平均值得到 1 条原始光谱。

(2) 红外光谱数据预处理

经扫描获得的 NIR(近红外)/MIR(中红外)光谱数据需预处理,由检测器检测到的光谱信号不仅包含样品待测成分信息,还有各种仪器杂噪声(高频随机噪声、基线漂移、样品背景等),这直接影响所建立模型的可靠性和稳定性,因此处理数据前,首先需要针对特定的光谱测量和样品体系,对测量的光谱数据进行合理的处理,减弱甚至消除各种非目标因素对光谱信息的影响^[15]。常用的预处理有数据标准化处理、数据平滑、去噪处理等方法。

1.4 数据处理方法

对采集得到的 90 个样品平均光谱数据应用 Matlab 软件进行分析,为减少或消除非目标因素对光谱数据的影响,常采用平滑和一阶导数预处理方法,提高信噪比、分辨率和灵敏度。经处理后的光谱图如图 1 所示, R 表示反射率。然后把 90 个样本划分为校正集(63 个)和预测集(27 个),并将光谱数据(近红外、中红外以及两者融合技术)与回生度化学值相关联,运用偏最小二乘法(PLS、iPLS、biPLS、siPLS)建立定量模型,然后根据交互验证均方根误差以及相关系数来选择最佳检测模型,最后得到淀粉回生度的最佳检测模型。

2 结果与分析

2.1 光谱分析

玉米淀粉回生的红外光谱曲线如图 1 所示,随

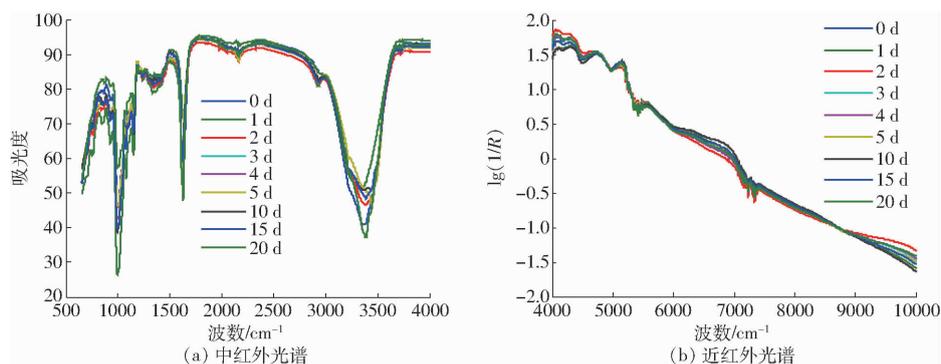


图1 不同储存时间的玉米回生淀粉中红外和近红外光谱图

Fig. 1 Mid-infrared spectra and near infrared spectra of corn starch with different storage times

回生度的增加光谱曲线走向没有很大差别,即光谱图的变化趋势基本相同,吸收峰的位置相同,但由于其基团含量不同,吸收强度稍有不同。如图1所示,650~1300 cm^{-1} 波段是化合物的特征指纹区,当分子结构略有变化时即可在吸收峰上表现出细微差异,该区间含有淀粉基本结构 α -D-吡喃葡萄糖环和淀粉结构(晶体区和无定形区)特征振动,1047 cm^{-1} 处淀粉结晶区域的特征振动,1022 cm^{-1} 处非结晶区域淀粉的特征振动^[16],920~960 cm^{-1} 区间内 α -1,4-糖苷键(C—O—C)的振动,764,860,1094 cm^{-1} 附近的C—C键伸缩振动、 CH_2 键变形振动、COH的弯曲振动等^[17],该区域内振动信息复杂多样;C—H键的弯曲振动和伸缩振动分别位于1450 cm^{-1} 和3000 cm^{-1} 附近,合频和一次倍频在4347 cm^{-1} 和5700 cm^{-1} 附近,O—H基团的弯曲振动和伸缩振动位于1350 cm^{-1} 附近和3600 cm^{-1} 附近,其合频位于5000 cm^{-1} 附近。这些基团的振动信息可以与淀粉回生度相关联来建立模型。

2.2 回生度分析

90个淀粉样本的回生度统计结果如表1所示,随着储存时间的增加,淀粉的回生度逐步增长,但增长速率明显下降。这是由于虽然直线型的直链淀粉和高度分支的支链淀粉都参与了淀粉的回生过程,然而,前者主要参与回生的最初阶段,即由直链淀粉的胶凝有序和结晶所引起,此过程较为迅速,可以在糊化后较短的时间内完成;而支链淀粉由于其分子结构自身的刚性在回生过程中所需时间较长,此为长期回生,即是由支链淀粉外侧短链的重结晶引起的,该过程是可逆的^[18]。0~1 d及1~2 d的回生度增长最快,均在20%以上,主要是淀粉的短期回生,其后增长速率较慢,主要是淀粉的长期回生。这与余世锋等^[19]所描述的玉米淀粉凝胶在4℃储藏时7 d回生过程基本结束相符。每个储存时间的样品随机选择7个作为校正集,3个样本作为预测集,校正集共63个样本,预测集共27个样本。

表1 不同储存时间淀粉的回生度

Tab. 1 Retrogradation degree of starch at different storage times

样品储存时间/d	样本数	回生度/%		
		范围	平均值	标准偏差
0	10	14.793 3 ~ 17.512 9	15.991 4	0.907 2
1	10	44.902 5 ~ 47.257 6	45.935 2	1.004 8
2	10	66.760 7 ~ 68.793 0	67.791 2	0.880 5
3	10	77.015 3 ~ 79.076 9	78.069 5	0.751 3
4	10	84.384 6 ~ 86.564 1	85.623 5	0.878 9
5	10	90.282 1 ~ 92.682 9	91.236 0	0.732 8
10	10	94.026 5 ~ 95.769 2	94.985 2	0.471 3
15	10	96.479 8 ~ 97.794 9	97.068 5	0.460 9
20	10	98.358 9 ~ 99.176 2	98.742 2	0.365 2

2.3 近红外和中红外光谱模型

本研究分别采用近红外和中红外光谱数据与淀粉回生度化学值进行PLS、iPLS、biPLS、siPLS建模,以校正集的交互验证均方根误差值为区间选择依据,以实测值与预测值的相关系数为模型选择依据,对模型进行优选以获得最佳模型。

如表2、3所示,就近红外光谱建模而言,模型较佳的是全光谱PLS模型以及siPLS模型,其校正集相关系数和交互验证均方根误差,以及预测集相关系数和预测均方根误差分别是0.903 7和11.5%,0.862和13.2%,0.897 8和11.8%,0.858 8和16.2%。且模型的入选区间均包括第3区间,即4804.12~5201.39 cm^{-1} 波段,该区间含有O—H的合频信息,与淀粉回生的特性相关。就最佳模型来说,综合考虑选择siPLS模型,就相关系数来说PLS的预测能力最好,但其含有1557个变量,变动性较大,而siPLS模型与PLS的相关系数仅相差0.003 2~0.005 9,但只包含415个变量,极大的提高了模型的鲁棒性。

对于中红外光谱来说,模型较佳的是biPLS和siPLS模型,其模型的校正集相关系数和交互验证均

方根误差,以及预测集相关系数和预测均方根误差分别是 0.932 和 9.65%,0.881 和 12.9%,0.930 4 和 9.96%,0.881 6 和 12.8%。且 3 种模型的入选区间均包含第 4 区间(1 322.7 ~ 1 770.29 cm^{-1}),该区间含有 O—H 的弯曲振动信息,同样与淀粉回生的特性相关。就最佳模型来说,综合考虑选择 siPLS 模型,较 biPLS 模型,siPLS 使变量数从 3 939 降低至

1 885,而相关系数仅降低 0.001 6,极大地简化了模型,提高了稳定性。

总体来说,较近红外光谱来说,中红外光谱所建立的模型更佳。原因是中红外到近红外,光谱的灵敏度及其信息量随着倍频的增加以数量级的速度衰减,到高级倍频时丢失了大量有用信息^[20],中红外可以呈现更多的信息。

表 2 PLS、iPLS、biPLS、siPLS 谱区模型筛选统计

Tab. 2 PLS, iPLS, biPLS and siPLS spectral model screening statistics

技术	模型	主因子数	入选区间序号	交互验证均方根误差/%	预测均方根误差/%
近红外光谱技术	PLS	10		11.50	13.20
	iPLS	4	3	21.30	23.60
	biPLS	6	1,3,12	14.70	18.50
	siPLS	7	1,3,12,15	11.80	16.20
中红外光谱技术	PLS	12		10.60	15.80
	iPLS	8	4	10.70	16.90
	biPLS	10	1,2,3,4,5,10,11,12,14	9.65	12.90
	siPLS	9	1,4,10,11	9.96	12.80
近红外、中红外融合光谱技术	PLS	12		8.43	12.60
	iPLS	10	5	14.60	16.80
	biPLS	11	1,2,3,4,5,7,9,12,13	6.79	9.52
	siPLS	9	1,2,11,13	9.04	13.10

2.4 近红外和中红外融合光谱模型

近红外和中红外光谱技术均可较为快速、无损地预测淀粉回生度,但它们的预测机制不同,为获取更好的预测模型,可将近红外和中红外光谱融合建模,即同时将特征分子基团(羟基)的基频以及倍频、合频振动信息与回生度化学值相关联,结合化学计量学方法建立模型。具体来说选择将近红外光谱的优选区间(1、3、12、15)以及中红外的优选区间(1、4、10、

11)进行融合,得到 2 270 个光谱变量,将融合后的光谱数据与淀粉的回生度进行 PLS、iPLS、biPLS、siPLS 建模,其结果如表 2 所示,biPLS 模型预测能力最好,其在选择 9 个子区间(1、2、3、4、5、7、9、12、13)联合时交互验证均方根误差最小,为 6.79%。此时校正集和预测集的相关系数 r 分别为 0.965 5 和 0.931 3,如表 3 所示。最佳预测模型的玉米淀粉回生度预测值与实测值的散点图如图 2 所示。

表 3 各个模型相关系数比较

Tab. 3 Comparison of correlation coefficient of each model

建模方法	中红外技术		近红外技术		近红外和中红外融合技术	
	校正集相关系数	预测集相关系数	校正集相关系数	预测集相关系数	校正集相关系数	预测集相关系数
PLS	0.917 7	0.824 8	0.903 7	0.862 0	0.948 0	0.896 6
iPLS	0.916 7	0.815 6	0.610 4	0.548 8	0.842 0	0.806 3
biPLS	0.932 0	0.881 0	0.834 5	0.773 1	0.965 5	0.931 3
siPLS	0.930 4	0.881 6	0.897 8	0.858 8	0.938 5	0.896 9

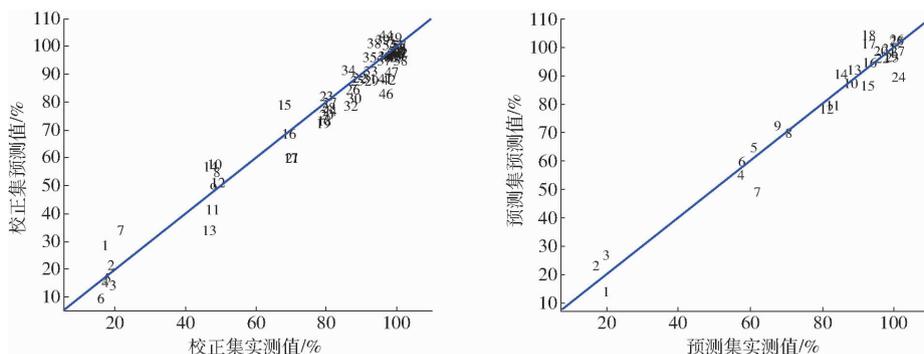


图 2 biPLS 最佳模型的样本预测值与实测值关系

Fig. 2 Relationships between predicted and actual values from biPLS models

2.5 模型可靠性检验

重新取该批次玉米淀粉样本 27 份,来校验淀粉回生度预测模型的可靠性。同 1.2 节方法处理,每一个储存时间有 3 个平行样本。样本经近红外、中红外光谱仪扫描后用 2.4 节的模型进行预测,样本的预测结果见图 3。同时将样品的回生度与预测值进行配对 *t*-检验,在 95% 的置信区间内,其双侧 sig. 值

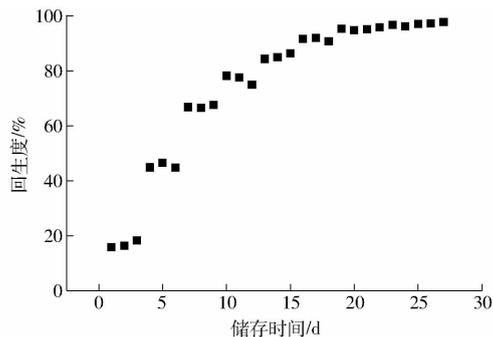


图 3 不同储存时间淀粉回生度的预测结果

Fig. 3 Predictive result of retrogradation degree at different storage times

为 0.627,即 $p > 0.05$,两者差异不显著。由此证明该模型可靠。

3 结束语

利用近红外、中红外以及两者融合技术实现了淀粉中回生度的快速检测。将储存不同时间的回生淀粉样品进行近红外和中红外光谱扫描,分别将近红外、中红外以及两者融合的光谱数据与化学值结合建立 PLS 模型。结果显示,近红外和中红外融合光谱技术 biPLS 预测模型效果最佳,对应的交互验证均方根误差和预测均方根误差分别为 6.79% 和 9.52%,校正集和预测集相关系数分别为 0.9655 和 0.9313,且测试集 *t*-检验显示预测结果与实际值差异不显著。研究结果表明,近红外和中红外融合光谱技术优于近红外和中红外单一的光谱技术,能更准确地预测淀粉回生度信息,因此,近红外和中红外光谱法可快速、高效、无损检测玉米淀粉的回生度。

参 考 文 献

- 田耀旗. 淀粉回生及其控制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
TIAN Yaoqi. Research and inhibitory techniques of starch retrogradation[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011. (in Chinese)
- 安红周, 吕建华, 赵琳. 淀粉回生研究进展——水分子再分布对淀粉回生的影响[J]. 食品科技, 2006(10):38-42.
AN Hongzhou, LÜ Jianhua, ZHAO Lin. New research progress on starch retrogradation—water redistribution on starch recrystallization[J]. Food Science and Technology, 2006(10):38-42. (in Chinese)
- 朱平, 孔祥礼, 包劲松. 抗性淀粉在食品中的应用及功效研究进展[J]. 核农学报, 2015,29(2):327-336.
ZHU Ping, KONG Xiangli, BAO Jinsong. Advances in the application and efficacy of resistant starch in food[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015,29(2):327-336. (in Chinese)
- HARUHIITO T P D, HISHIDA M, IWASAKI H, et al. Enzymatic evaluation for the degree of starch retrogradation in foods and foodstuffs[J]. Starch-Starke, 1990,42(6):213-216.
- KIM J O, KIM W S, SHIN M S. A comparative study on retrogradation of rice starch gels by DSC, X-Ray and α -amylase methods [J]. Starch-Starke, 1997,49(2):71-75.
- 王良东, 顾正彪. DSC、EM、NMR 及 X-射线衍射在淀粉研究中的应用[J]. 西部粮油科技, 2003,28(4):39-44.
WANG Liangdong, GU Zhengbiao. Application of DSC, EM, NMR and X-ray diffraction in starch research[J]. China Western Cereals & Oils Technology, 2003,28(4):39-44. (in Chinese)
- 丁文平, 王月慧, 夏文水. 脉冲核磁共振和 DSC 测定淀粉回生的比较研究[J]. 粮食与饲料工业, 2006(1):43-44.
DING Wenping, WANG Yuehui, XIA Wenshui. A comparative study on starch nuclear magnetic resonance and DSC determination of starch regeneration[J]. Cereal & Feed Industry, 2006(1):43-44. (in Chinese)
- 谢芳. 浅谈中红外光谱和近红外光谱在油品分析中的技术比较[J]. 化工管理, 2014(6):67-68.
XIE Fang. A Study on the comparison of mid-infrared spectroscopy and near infrared spectroscopy in oil analysis[J]. Chemical Management, 2014(6):67-68. (in Chinese)
- 韩东海, 常冬, 宋曙辉, 等. 小型西瓜品质近红外无损检测的光谱信息采集[J/OL]. 农业机械学报, 2013,44(7):174-178. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130730&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.030.
HAN Donghai, CHANG Dong, SONG Shuhui, et al. Information collection of mini watermelon quality using near-infrared non-destructive detection[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(7):174-178. (in Chinese)
- 陈华舟, 陈福, 石凯, 等. 基于随机森林的鱼粉蛋白近红外定量分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015,46(5):233-238. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150533&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.033.
CHEN Huazhou, CHEN Fu, SHI Kai, et al. Near-infrared analysis of fishmeal protein based on random forest[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(5):233-238. (in Chinese)

- 11 赵杰文, 孙永梅. 现代食品检测技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2008.
- 12 ALMEIDA M R, ALVES R S, NASCIMBEM L B, et al. Determination of amylose content in starch using Raman spectroscopy and multivariate calibration analysis[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2010, 397(7): 2693–2701.
- 13 BAO J, SHEN Y, JIN L. Determination of thermal and retrogradation properties of rice starch using near-infrared spectroscopy[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 46(1): 75–81.
- 14 吴跃, 陈正行, 林亲录, 等. FT-IR 光谱法测定籼米淀粉回生[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2011, 32(5): 545–551.
WU Yue, CHEN Zhengxing, LIN Qinlu, et al. Retrogradation of long-shaped rice starch by FT-IR spectra[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2011, 32(5): 545–551. (in Chinese)
- 15 胡雪桃, 朱瑶迪, 邹小波, 等. 近红外光谱技术快速预测镇江香醋乙醇脱氢酶活性的研究[J]. 中国调味品, 2016(2): 20–25.
HU Xuetao, ZHU Yaodi, ZOU Xiaobo, et al. Research on alcohol dehydrogenase activity of seed vinegar culture during solid-state fermentation of Zhenjiang aromatic vinegar[J]. China Condiment, 2016(2): 20–25. (in Chinese)
- 16 KARIM A A, NORZIAH M H, SEOW C C. Methods for the study of starch retrogradation[J]. Food Chemistry, 2000, 71(1): 9–36.
- 17 KIZIL R, IRUDAYARAJ J, SEETHARAMAN K. Characterization of irradiated starches by using FT-Raman and FTIR spectroscopy[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2002, 50(14): 3912–3918.
- 18 何璐, 杨英, 林亲录. 大米淀粉回生机理、检测及控制方法的研究现状[J]. 食品工业科技, 2015(8): 365–369.
HE Lu, YANG Ying, LIN Qinlu. Research status on the mechanism, detection and control methods of rice starch retrogradation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015(8): 365–369. (in Chinese)
- 19 余世锋, 张永春, 林佳楠, 等. 玉米淀粉、绿豆淀粉和皱皮豌豆淀粉热特性及回生性质的比较[J]. 食品科技, 2013(9): 136–140.
YU Shifeng, ZHANG Yongchun, LIN Jia'nan, et al. Comparing the thermal and retrogradation properties of corn starch and mung bean starch and wrinkled pea starch[J]. Food Science and Technology, 2013(9): 136–140. (in Chinese)
- 20 刘多强, 关绍春, 孙建章, 等. 中红外光谱和近红外光谱在油品分析中的技术比较[J]. 石油化工应用, 2010, 29(6): 1–3.
LIU Duoqiang, GUAN Shaochun, SUN Jianzhang, et al. The technology compare between mid-infrared and near-infrared spectroscopy in oil analysis[J]. Petrochemical Industry Application, 2010, 29(6): 1–3. (in Chinese)

(上接第 417 页)

- 12 白志富, 韩先国, 陈五一. 基于 Lagrange 方程三自由度并联机构动力学研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(1): 51–54.
BAI Zhifu, HAN Xianguo, CHEN Wuyi. Study of a 3-DOF parallel manipulator dynamics based on Lagrange's equation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(1): 51–54. (in Chinese)
- 13 LIU M J, LI C X, LI C N. Dynamics analysis of the gough-stewart platform manipulator[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(1): 94–98.
- 14 陈修龙, 冯伟明, 赵永生. 五自由度并联机器人机构动力学模型[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 236–243. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130144&journal_id=jcsam. DOI = 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.044.
CHEN Xiulong, FENG Weiming, ZHAO Yongsheng. Dynamics model of 5-DOF parallel robot mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 236–243. (in Chinese)
- 15 落海伟, 张俊, 王辉, 等. 3-RPS 并联机构弹性动力学建模方法[J]. 机器人, 2014, 36(6): 737–743, 750.
LUO Haiwei, ZHANG Jun, WANG Hui, et al. An elastodynamic modeling method for a 3-RPS parallel kinematic machine[J]. Robot, 2014, 36(6): 737–743, 750. (in Chinese)
- 16 LEE K M, SHAH D K. Dynamic analysis of a three degrees of freedom in-parallel actuated manipulator[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 7(5): 634–641.
- 17 ZHANG J, DAI J S, HUANG T. Characteristic equation-based dynamic analysis of a three-revolute prismatic spherical parallel kinematic machine[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2015, 10(2): 021017–021017–13.
- 18 LI Q, WANG M, HUANG T, et al. Compliance analysis of a 3-DOF spindle head by considering gravitational effects[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(1): 1–10.
- 19 HUANG Z, LI Q, DING H. Theory of parallel mechanisms[M]. Dordrecht Heidelberg New York London: Springer, 2012.
- 20 ZHAO T, GENG M, CHEN Y, et al. Kinematics and dynamics hessian matrices of manipulators based on screw theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(2): 226–235.
- 21 孙桓, 陈作模, 葛文杰. 机械原理[M]. 7 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.