

915MHz 和 2450MHz 下扇贝柱介电特性的研究

张文杰, 薛长湖*, 丛海花, 贾敏, 王兆琦

(中国海洋大学食品科学与工程学院, 山东青岛 266003)

摘要:利用介电网络分析仪测量温度 20~100℃, 频率 0.3~3GHz 下扇贝柱介电常数和介电损耗因数, 从而得出扇贝柱在微波加热过程中温度和频率对介电特性的影响。结果表明, 温度一定时, 介电常数和介电损耗因数都是先随着频率增加而降低, 随后变化不显著; 频率 915MHz 和 2450MHz 时, 介电常数与温度成负相关, 介电损耗因数与温度成正相关。且 915MHz 和 2450MHz 下, 穿透深度随温度的升高而减小。扇贝柱介电特性的研究为微波杀菌技术的研究提供了理论基础。

关键词:扇贝柱, 介电特性, 温度, 频率, 穿透深度

Study on the dielectric properties of scallop adductors at frequency of 915MHz and 2450MHz

ZHANG Wen-jie, XUE Chang-hu*, CONG Hai-hua, JIA Min, WANG Zhao-qi

(College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: The dielectric constant and dielectric loss factor of scallop adductors were measured by the RF network analyzer over the frequency range of 0.3~3GHz from the temperature 20℃ to 100℃. The effect of temperature and frequency on dielectric properties during microwave heating was found. The results showed that the dielectric constant and dielectric loss factor decreased with the growing of frequency at first at the same temperature, then they didn't change significantly. At frequency of 915MHz and 2450MHz, there was a negative correlation between the dielectric constant and temperature while the dielectric loss factor was positively correlated to temperature. In addition, the penetration depth decreased as temperature was growing. Study on the dielectric properties of scallop adductors provided theoretical basis for microwave sterilization.

Key words: scallop adductors; dielectric properties; temperature; frequency; penetration depth

中图分类号: TS254.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2014)01-0074-05

扇贝 (*Chlamys farreri*) 是味道鲜美、营养丰富的海珍品, 其肉质细嫩, 营养成分高, 富含蛋白质, 脂肪, 磷酸钙, 维生素 A、B、D 等, 具有重要的食用价值和经济价值。目前扇贝的实用方法除了直接食用外, 还有加工成冷冻鲜柱、扇贝精油、扇贝罐头等即食食品。近年来我国扇贝养殖规模和产量增加迅猛, 扇贝加工产业具有良好的发展前景, 而扇贝柱的杀菌环节是扇贝加工环节中至关重要的。目前扇贝柱的杀菌采用的是传统的水产品杀菌技术, 杀菌时间长, 致使营养物质和风味成分的破坏^[1]。微波杀菌是一种新型的无损的加工技术, 它能缩短加工时间, 并且提高产品质量^[2]。通过微波加热的方式, 使电磁场和介电材料之间相互作用, 在食物内部产生热量。

与传统的以水分和水蒸气为媒介的加热方式相比, 微波加热是更均匀、更快速的体积加热^[3]。由于微波加热产生热量的多少与材料的介电特性、热特性, 产品的大小、形状、组成, 微波加热腔配置有关^[4]。从而影响微波加热的温度分布, 导致食品内部温度分布的不均匀, 而介电特性描述了处于电磁场中的物质和电磁能相互作用介电行为, 是影响食品中热量分布的重要因素。目前关于食品介电特性的研究主要有果蔬、谷物、蛋奶肉类, 对关于水产品的研究很少。Cong Haihua^[5]研究了 915MHz 下温度对复水海参介电特性的影响; Yu Wang^[6]做了关于频率和温度对三文鱼介电特性的研究; Yu Wang^[7]研究了三文鱼不同部位介电特性的差异, 以及温度和频率对三文鱼介电特性的影响; Xiaopei Hu^[8]研究了去壳牡蛎的热特性以及 915MHz 和 2415MHz 下温度对其影响; F.Tanaka^[9]研究了从解冻到加热过程虾的介电特性变化; 贾敏^[1]做了温度和频率对鲍鱼介电特性的研究; 何天宝^[10]研究了温度和频率对鱼糜介电特性的影响; 张保艳^[11]研究了温度、频率和水分含量对罗非

收稿日期: 2013-05-31 * 通讯联系人

作者简介: 张文杰 (1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工及贮藏。

基金项目: 国家 863 计划 (2011AA100803); 农业部“948”计划 (2011-225)。

鱼介电特性的影响;杨振超等^[12]对 915MHz 和 2450MHz 下温度和盐溶液浸渍对青鱼介电特性做了研究。目前还没有关于扇贝柱介电特性的研究,本文通过研究温度和频率对扇贝柱介电特性的影响,从而得出扇贝柱介电特性随温度、频率的变化规律,为微波杀菌提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

薛家岛扇贝柱 购于青岛水产品批发市场。

8714ET 安捷伦介电网络分析仪 深圳市盛腾仪器仪表有限公司,包括 Agilent 8714ET 矢量网络分析仪、Agilent 85070E 末端开路同轴探头、85070E 分析软件,计算机、加热循环系统;SY-X2/10L 循环油浴 郑州长城科工贸有限公司;HYF-7412 温度控制仪 上海霍宇仪器仪表有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 实验样品扇贝柱的准备 将扇贝去壳,去掉内脏团、生殖腺,取出扇贝柱,滤纸吸干表面水分,备用。

1.2.2 介电特性的测量 介电特性通过介电常数描述: $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$,其中 $j = \sqrt{-1}$, ϵ' 是介电常数,表征材料在电磁场中储藏电的能力, ϵ'' 代表介电损耗因数,反映材料电磁能向热能转化的能力。测量方法如下:

1.2.2.1 校正仪器 打开网络分析仪预热 30min,设定介电网络分析仪的测量频率为 0.3~3GHz,温度设定为当时室温,依次用空气、短电阻、超纯水与探头接触,从而校正探头。

1.2.2.2 装样测量 将扇贝柱装入加热套筒内,利用油浴控制扇贝柱温度,每隔 10℃ 测量一次介电常数(控制 3~4min 完成 10℃ 升温),测量温度范围为 20~120℃。取三组样品三次测量的平均值。

1.2.3 数据分析 取 3 次测量数据的平均值,用 Excel 分别对扇贝柱介电特性对温度和频率进行线性回归分析,得出线性回归方程。

2 结果与讨论

2.1 频率对扇贝柱介电特性的影响

图 1 为不同温度下扇贝柱介电常数随频率变化的曲线,由图 1 可以看出,在初始频率 180MHz 下,扇贝柱介电常数在 100℃ 下最高,数值达 98.8,而在 20℃ 下最低,为 81.3。介电常数的变化趋势是在小于 360MHz 频率下,随着频率增加而降低,随后变化不显著,并且随着温度升高,扇贝柱介电常数下降幅度越大。扇贝柱介电常数随频率变化的趋势,这与贾敏^[1]得出的鲍鱼介电常数、Yu Wang^[7]得到的三文鱼的介电常数及 F.Tanaka^[9]得出的虾的介电常数、张保艳^[11]得出的罗非鱼的介电常数对频率的变化规律一致。

根据介质极化理论,置于外加电场中的介质表面的电荷重新分布,正负电荷向反方向移动从而产生了与外电场相反的电场。低频下的电荷有足够的时间在导电区域的边缘积累,使样品的电容量增加,反映在介电常数 ϵ' 增加。可能因为扇贝柱的水分子大部分是以结合水的形式存在,所以介电常数 ϵ' 随

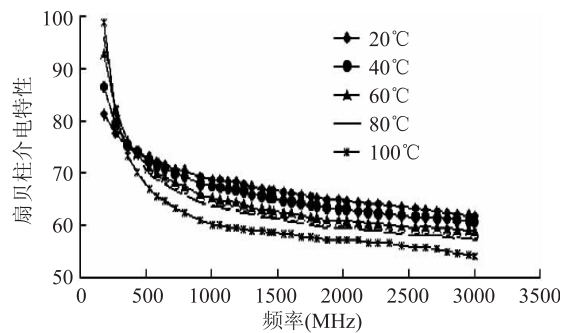


图 1 不同温度下频率对扇贝柱介电常数的影响

Fig.1 Effect of frequency on dielectric constant at different temperatures

着频率的增加而幅度不大。

图 2 为不同温度下扇贝柱随频率变化的介电损失因数。图 2 可以看出,在初始频率 180MHz 下扇贝柱介电损失因数在 100℃ 下最大,其数值达 221.7,而在 20℃ 下最小,达 98.0。不同温度下介电损耗因数随频率的变化趋势:在小于 1000MHz 的频率下,随着频率增大而减小,随着温度升高,减小的幅度增大,当频率大于 1000MHz 时,介电损失因数无明显变化。在频率小于 200MHz 时,离子传导对介电损失因数有重要作用,在微波频率下,自由水中偶极子旋转和离子传导有很重要作用:

$$\epsilon'' = \epsilon''_d + \epsilon''_\sigma = \epsilon''_d + \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega}$$

σ (S/m) - 离子导电率, ω - 角频率, ϵ_0 (rad/s) - 自由空间或真空下的介电常数^[13]。湿食品的水带有各种离子,因为有导电性,而溶有离子的水溶液的导电性在加热过程中会随着频率的降低而增强,由公式 1.1 的第二部分决定,图 2 显示在介电加热过程中,偶极子旋转和离子传导的综合作用结果是介电损耗随频率增加而减小,进而说明湿食品中自由水中偶极子的旋转造成的介电损失随着频率增加而增加,而且增加的效应大于离子传导造成的损失效应。这结果也在其他的水产品鲍鱼^[1]、虾^[9]、复水海参^[5]、罗非鱼^[11]研究结果中得到验证,这些水产品的介电损失因数随频率变化的规律与扇贝柱的一致,而扇贝柱的含水量 $78.5\% \pm 2.9\%$ 与鲍鱼的 74.4% ^[1]、虾的 78.4% ^[9] 接近。

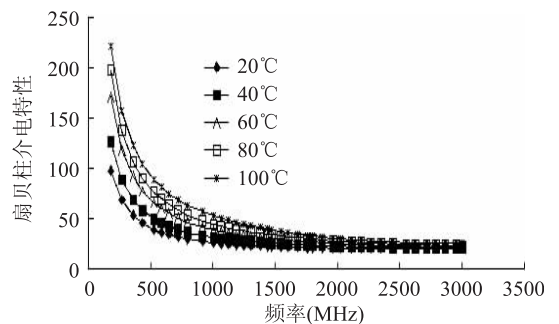


图 2 不同温度下频率对扇贝柱介电损耗因数的影响

Fig.2 Effect of frequency on dielectric loss factor at different temperatures

2.2 温度对扇贝柱介电特性的影响

温度对介电特性的影响与很多因素有关,其中包括食品组成、含水量、含盐量等。静态介电常数反映了静态电场下分子极化和布朗运动间的动态平衡,温度升高,布朗运动速率加快,静态介电常数降低。温度对介电常数的影响主要是由样品中自由水和结合水的含量和比例决定的,由于样品中存在自由水,介电常数随水分含量增加而增加^[14]。因此自由水和结合水的比例关系决定了介电常数和温度的关系。本实验选用 915MHz 和 2450MHz 两个频率,因为食品工业中常使用 915MHz 和 2450MHz 两个频率,915MHz 下微波能达到更大的穿透深度(约 3cm)^[15],2450MHz 是一般家用微波炉的频率。图 3 中可以看出,随着扇贝柱介电常数与温度呈负相关,随温度由 20℃ 上升到 100℃,915MHz 下扇贝柱介电常数由 69.18 下降到 60.83,2450MHz 下由 63.43 下降到 56.10。F.Tanaka^[9] 等研究的 915MHz 和 2450MHz 下,虾随着温度从 20℃ 上升到 100℃,介电常数下降;Yu Wang^[7] 等研究的 915MHz 下三文鱼的介电常数随温度下降;Cong Haihua^[5] 等研究的海参在 915MHz 下随温度升高,介电常数下降;Xiaopei Hu^[8] 等研究的海参在 915MHz 和 2150MHz 下,介电特性随温度升高而下降,这些结果与本实验结果一致。

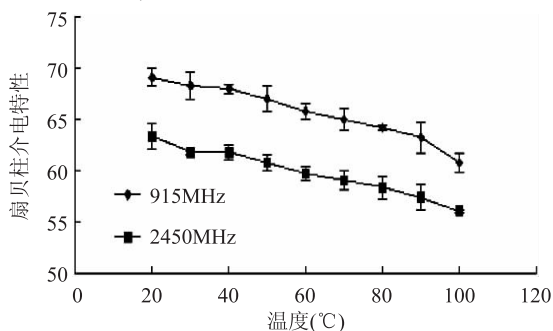


图3 915MHz 和 2450MHz 下温度对扇贝柱介电常数的影响
Fig.3 Effect of temperature on dielectric constant at 915MHz and 2450 MHz

温度对介电损耗因数的影响,与频率、水分含量、离子导电率有关^[16]。图 4 表明了温度对扇贝柱介电损耗因数的影响,随着温度的上升,915MHz 下扇贝柱介电损耗因数由 28.02 上升到 57.09,2450MHz 下介电损耗因数上升幅度较小,其数值由 20.97 上升到 26.97。表 1 给出了 915、2450MHz 下,20~100℃ 时扇贝柱的介电特性。贾敏^[1] 等研究的 915MHz 和 2450MHz 下鲍鱼的介电损耗因数的规律与本研究结论一致;Cong Haihua^[5] 等研究的 915MHz 下海参的介电损耗因数也随着温度升高而上升;Xiaopei Hu^[8] 等做的关于去壳牡蛎介电损耗因数的研究,915MHz 下规律与本研究一致,2450MHz 下规律不同,此频率下先下降后上升,虾^[9] 在 915MHz 下随温度升高而增大,2450MHz 下介电损耗因数也是先下降后上升,这表明介电特性不仅与温度、频率有关,也与组成、物理和化学状态有关^[17]。Bengtsson^[18] 等通过实验表明,低频时起主导作用的电导损失与温度成正相关,高频下,起主导作用的水分的损耗因子与温度成负相关,因此,不同频率下,温度与介电损失的相关性

不一致。低频(低于 2000MHz)下占主导作用的是离子的导电性,随着温度升高,离子溶液的粘度降低,粒子流动性增强,离子溶液中的电导率随温度的升高而增加,根据公式 1, ϵ'' 随温度升高而增加,从而增加了 ϵ'' 。

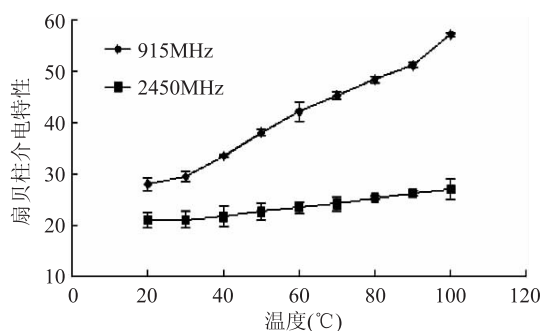


图4 915MHz 和 2450MHz 下温度对扇贝柱介电损耗因数的影响

Fig.4 Effect of temperature on dielectric loss factor at 915MHz and 2450MHz

表 1 给出了 915MHz 和 2450MHz 下扇贝柱介电特性随温度变化的线性回归方程,回归系数都在 0.96 以上,较好的反映了介电常数和介电损耗因数与温度的关系。为了预测方程的准确性,本研究对介电常数和介电特性的实验值和拟合值进行比较,结果如图 5 所示,从图中可以看出,实验结果的预测值与实验值都具有较好的一致性。

表 1 915MHz 和 2450MHz 下扇贝柱介电特性的线性回归方程

Table 1 Predictive equations for the dielectric properties of scallop adductors as a function of temperature (T) at 915MHz and 2450MHz

f (MHz)	介电特性	线性回归方程	R ²
915	e'	y = -0.0973T + 71.605	0.9653
	e''	y = 0.3645T + 19.566	0.9919
2450	e'	y = -0.0851T + 64.963	0.9845
	e''	y = 0.0811T + 18.697	0.9806

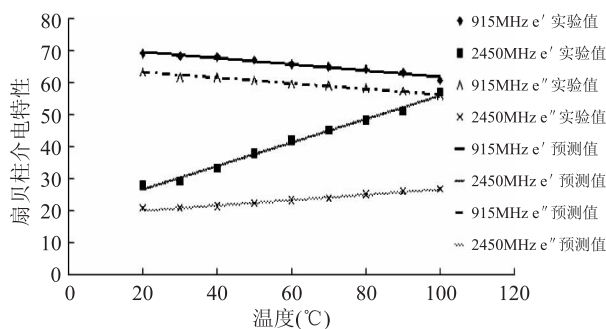


图5 915MHz 和 2450MHz

下扇贝柱介电特性实验值和预测值比较

Fig.5 Comparison of experimental and predictive value of the dielectric properties of scallop adductors at 915MHz and 2450MHz

2.3 扇贝柱穿透深度

微波进入物料后,物料吸收微波能并将其转化

为热能,从而达到加热的效果。穿透深度的大小与频率有关,频率越高,波长越短,穿透力越弱。微波具有穿透力强的特点,能深入到物料内部加热,使物料表面和内部同时升温加热。

表2为915MHz和2450MHz下扇贝柱的穿透深度,从中可以看出,随着温度升高,穿透深度减小,且高频率下的穿透深度高于低频率下的穿透深度。

表2 915MHz和2450MHz下扇贝柱的穿透深度
Table 2 The penetration depth of scallop adductors at 915MHz and 2450 MHz

温度(°C)	穿透深度(mm)	
	915MHz	2450MHz
20	15.79 ± 0.14	20.08 ± 0.89
30	15.01 ± 1.34	19.84 ± 0.56
40	13.23 ± 1.78	19.28 ± 0.17
50	11.64 ± 1.82	18.33 ± 1.53
60	10.52 ± 0.07	17.55 ± 1.23
70	9.78 ± 0.23	16.96 ± 0.81
80	9.18 ± 1.71	16.13 ± 1.02
90	8.68 ± 0.91	15.45 ± 0.47
100	7.76 ± 0.85	14.88 ± 0.35

表3是扇贝柱穿透深度的线性回归方程,由R²可以看出,穿透深度与温度有较好的拟合度。为进一步预测方程准确性,对穿透深度的实验值和拟合值进行比较。见图6。由图可以看出,扇贝柱微波穿透深度的实验值与预测值有较好的拟合度。

表3 915MHz和2450MHz

下扇贝柱穿透深度的线性回归方程

Table 3 Predictive equations for the penetration depth of scallop adductors as a function of temperature(T) at 915MHz and 2450MHz

f(MHz)	穿透深度的回归方程	R ²
915	y = -0.1018T + 17.395	0.9626
2450	y = -0.0694T + 21.775	0.9925

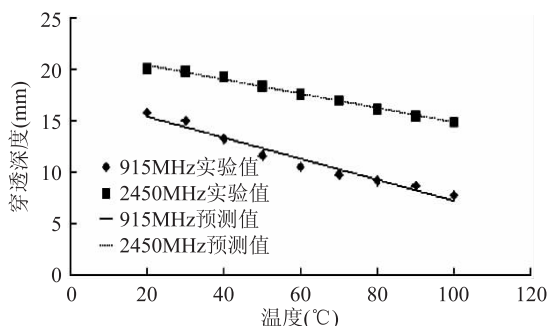


图6 915MHz和2450MHz

下扇贝柱穿透深度实验值和预测值比较

Fig.6 Comparison of experimental and predictive value of the penetration depth of scallop adductors at 915MHz and 2450MHz

3 结论

扇贝柱的介电常数和介电损耗因数与频率成负相关,介电常数与温度成负相关,介电损耗因数与温

度成正相关。915MHz和2450MHz下扇贝柱的穿透深度随温度升高而下降。并且介电常数、介电损耗因数、穿透深度与温度的线性回归方程有较好的拟合度,能对扇贝柱的介电特性进行有效预测。本研究结论为微波杀菌技术提供了理论基础,随着微波技术发展,介电特性的研究对水产品品质的提高具有重要意义。

参考文献

[1] 贾敏,薛长湖,丛海花,等.频率和温度对鲍鱼介电特性的影响[J].食品工业科技,2012,33(18):182-198.

[2] R B Pandit, J Tang, F Liu, et al. A computer vision method to locate cold spots in food in microwave sterilization process [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(12): 3667-3676.

[3] Z Tang, J Tang, G Mikhaylenko. Microwave sterilization of sliced beef in gravy in 7-oz trays [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(4): 375-383.

[4] Y Wang, M H Lau, J Tang, et al. Kinetics of chemical marker M-1 formation in whey protein gels for developing sterilization processes based on dielectric heating [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 64(1): 111-118.

[5] H Cong, C Xue, F Liu, et al. Dielectric properties of sea cucumbers (Stichopus japonicus) and model foods at 915MHz [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(3): 635-639.

[6] Y Wang, J Tang, B Rasco, et al. Dielectric properties of salmon fillets as a function of temperature and composition [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87(2): 236-246.

[7] Y Wang, J Tang, B Rasco et al. Using whey protein gel as a model food to study dielectric heating properties of salmon (Oncorhynchus gorbuscha) fillets [J]. LWT - Food Science and Technology, 2009, 42(6): 1174-1178.

[8] X Hu, P Mallikarjunan. Thermal and dielectric properties of shucked oysters [J]. LWT - Food Science and Technology, 2005, 35(5): 489-494.

[9] F Tanaka, P Mallikarjunan, Y C Hung. Dielectric properties of shrimp related to microwave frequencies; from frozen to cooked stages [J]. Journal of Food Process Engineering, 1999, 22: 455-468.

[10] 何天宝,程裕东.温度和频率对鱼糜介电特性的影响[J].水产学报,2005,29(2):252-257.

[11] 杨振超,程裕东,金银哲.915MHz和2450MHz频率下温度和盐溶液浸渍对青鱼介电特性的影响[J].食品工业科技,2013,34(10):138-158.

[12] 张保艳,于海洋,程裕东,等.温度、频率和水分含量对罗非鱼介电特性的影响[J].水产学报,2012,36(11):1785-1792.

[13] 【德】 Helmar Schubert, Marc Regier. 食品微波加工技术 [M]. 北京:中国轻工业出版社,2008.18-22.

[14] Kent M. Complex permittivity of fish meal: a general discussion of temperature, density and moisture dependence [J]. Microwave Power, 1977, 12(4): 341.

[15] RE Mudgett. Microwave food processing [J]. Food technology, 1989, 43(1): 117-126.

(下转第82页)

表明, PV 随 AM 和 AM-脂类复合物的增加而减少。Chung 等^[9]认为 FV 值和 AM 含量呈负相关, SB 可能与浸出的 AM 分子量和数量、糊化淀粉的残余物有关。本研究表明在本实验范围内, 直链淀粉含量越高的粳米, 其淀粉的崩解值越小, 而糊化温度和回升值越大, 这与贾良等^[10]的研究一致。

淀粉的分支链长是影响粳米糊化特性的重要因素, Patindol, J.A.^[11]表明 PV 主要受到 AP 分子大小的影响。Hamaker 等^[12]研究表明分子量较大的 AP 和其他 AP 分子相互作用, 不易分散, 从而降低了 BD 值。本实验进一步表明淀粉中 B1 链含量较多、短 A 链较少的粳米, 其淀粉峰值粘度和崩解值较低, 热浆粘度、冷浆粘度和回升值较高。

3.2 淀粉特性与粳米食用性能的关系

蔡一霞等^[5]认为非糯稻米品种的支链淀粉长分支链比率高, 则其米饭的硬性和凝聚性大、松弛性和黏附性小, 米饭的口感较硬, 咀嚼有渣感。Ramesh 等^[13]研究表明米饭的质地主要由淀粉分子的长链含量决定, 包括直链淀粉在内的所有的长链都参与糊化过程中分子间的相互作用。本研究通过逐步回归分析建立了硬度、粘着性、弹性、内聚性、回复性和感官得分等食用性能指标的线性回归方程, 通过回归方程对粳米的食用性能进行预测, 得到优良食用性能(硬度小、粘性大、适口性好、感官得分高)的粳米, 其支链淀粉 B1 链含量和结晶度较低。

一般崩解值大回升值绝对值小的米饭食味更佳, 此类品种口感好, 软而不粘^[14], 根据淀粉特性与糊化特性的关系, 直链淀粉含量和支链淀粉 B1 链含量较少、而短 A 链含量较多的粳米, 其淀粉的崩解值越大, 回升值越小。因此, 食用性能较好的粳米直链淀粉和支链淀粉 B1 链含量较少, 而短 A 链含量较多。

3.3 食用性能的评价方法

通过测定与大米食味品质相关的特征性指标, 利用数学方法建立评价模型进行大米食味评定, 成为目前研究的热点。周晓晴^[14]、张玉荣^[15]等利用主成分分析法对大米的理化指标、蒸煮特性、质构特性等指标进行数据统计分析, 构建食味品质预测评价模型, 与感官评价法具有很好的一致性。本实验对粳米的淀粉特性与食用性能进行逐步回归分析, 得出粳米的淀粉特性与食用性能的回归模型, 对粳米的硬度、粘性、适口性和感官得分等食用性能指标进行初步预测, 为优良食用性能的粳米选育提供相关的基础。

4 结论

通过粳米淀粉特性与其糊化特性的相关性分析, 并建立淀粉特性与食用性能的回归方程, 得到粳米食用性能主要受到直链淀粉含量、结晶度和 B1 链等因素的影响, 且直链淀粉含量、B1 链含量和结晶度较低的品种食用性能较好。利用粳米的淀粉特性与

食用性能的回归模型, 对粳米的食用性能进行初步预测, 对于优质粳米的选育具有一定指导意义。

参考文献

- [1] Patindol J, Gu X, Wang Y J. Chemometric analysis of cooked rice texture in relation to starch fine structure and leaching characteristics [J]. *Starch-Stärke*, 2010, 62(3-4): 188-197.
- [2] 金丽晨. 稻米淀粉理化特性及分子结构与食味品质的关系 [D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [3] Yang C, Lai H, Lii C. The modified alkaline steeping method for the isolation of rice starch [J]. *Food Science*, 1984, 11: 158-162.
- [4] 芦鑫, 张晖, 姚惠源. 不同提取方法对粳米淀粉结构的影响 [J]. *食品科学*, 2008, 29(1): 102-106.
- [5] 蔡一霞, 王维, 朱智伟, 等. 不同类型水稻支链淀粉理化特性及其与米粉糊化特征的关系 [J]. *中国农业科学*, 2006, 39(6): 1122-1129.
- [6] 薛应龙, 上海植物生理学会. *植物生理学实验手册* [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- [7] Cooke D, Gidley M J. Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinisation: origin of the enthalpic transition [J]. *Carbohydrate Research*, 1992, 227: 103-112.
- [8] Vandeputte G, Derycke V, Geeroms J, et al. Rice starches. II. Structural aspects provide insight into swelling and pasting properties [J]. *Journal of Cereal Science*, 2003, 38(1): 53-59.
- [9] Chung H J, Liu Q, Lee L, et al. Relationship between the structure, physicochemical properties and in vitro digestibility of rice starches with different amylose contents [J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(5): 968-975.
- [10] 贾良, 丁雪云, 王平荣, 等. 稻米淀粉 RVA 谱特征及其与理化品质性状相关性的研究 [J]. *作物学报*, 2008, 34(5): 790-794.
- [11] Patindol J A, Gonzalez B C, Wang Y J, et al. Starch fine structure and physicochemical properties of specialty rice for canning [J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 45(2): 209-218.
- [12] Han X Z, Hamaker B R. Amylopectin fine structure and rice starch paste breakdown [J]. *Journal of Cereal Science*, 2001, 34(3): 279-284.
- [13] Ramesh M, Zakiuddin Ali S, Bhattacharya K. Structure of rice starch and its relation to cooked-rice texture [J]. *Carbohydrate Polymers*, 1999, 38(4): 337-347.
- [14] 舒庆尧, 吴殿星, 夏英武, 等. 稻米淀粉 RVA 谱特征与食用品质的关系 [J]. *中国农业科学*, 1998, 31(3): 25-29.
- [15] 周晓晴, 付桂明, 刘成梅, 等. 大米食味品质预测评价模型的建立及应用 [J]. *食品工业科技*, 2013, 34(2): 94-96.
- [16] 张玉荣, 张秀华, 周显青, 等. 主成分分析法综合评价大米的食味品质 [J]. *河南工业大学学报: 自然科学版*, 2008, 29(5): 1-5.

(上接第 77 页)

[16] K Rajnish, M Calay. Predictive equations for the dielectric properties of foods [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 1995, 29: 699-713.

[17] S O Nelson, P G Bartley Jr. Measuring frequency and temperature dependent dielectric properties of food materials [J].

American Society of Agricultural Engineers, 2000, 43(6): 1733-1736.

[18] N E Bengtsson, P O Risman. Dielectric properties of foods at 3GHz as determined by a cavity perturbation technique [J]. *Microwave Power and EM Energy*, 1971, 6: 107-123.