

低场核磁共振技术研究乳化凝胶贮藏过程中保水性和颜色变化之间的关系

邵俊花, 邓亚敏, 刘雪, 孙晓娜, 贾娜, 宋立, 刘登勇

(渤海大学食品科学与工程学院, 辽宁省食品安全重点实验室, 辽宁锦州 121013)

摘要: 本文应用低场核磁共振技术(Low Field NMR)研究了乳化凝胶在冷藏(0~4 °C)过程中水分的迁移规律,并结合相关性分析探讨了水分迁移与乳化凝胶颜色、保水性的关系。结果表明:贮藏前6 d,随贮藏时间延长,乳化凝胶截留自由水的能力先上升后下降,水分含量下降,离心失水率上升;后期尤其是第8 d后,乳化凝胶对3种相态水分的束缚能力均显著($p < 0.05$)增加,不易流动水含量显著($p < 0.05$)降低,结合水与自由水则有上升趋势,水分含量趋于稳定,离心失水率显著($p < 0.05$)低于第6 d。说明冷藏过程中乳化凝胶的水分特别是自由水损失较多,表现为一定的汁液流失。另外,黄度值(b^*)与水分含量呈极显著负相关,与贮藏时间呈极显著正相关。表明贮藏时间增加,水分含量降低,使得黄度值增加,最终影响乳化凝胶的品质。

关键词: 乳化凝胶, 颜色, 保水性, 低场核磁共振

LF-NMR analysis of the relationship between the water holding capacity and color change of meat emulsified gel during storage

SHAO Jun-hua, DENG Ya-min, LIU Xue, SUN Xiao-na, JIA Na, SONG Li, LIU Deng-yong

(College of Food Science and Technology, Bohai University;

Food Safety Key Lab of Liaoning Province, Jinzhou 121013, China)

Abstract: The relationship between water migration regulation and color change of meat emulsified gel during storage(0~4 °C) was investigated by the combination of LF-NMR and correlation analysis. Results showed that during the first 6 days, the emulsified gel capacity to hold free water was firstly increased and then decreased, water content was found to decrease, while centrifugal loss was observed to rise with the extension of storage time. However, in the later storage, particularly 8 days later, the emulsified gel binding ability to the three phases of water was significantly ($p < 0.05$) increased, the content of loosely combined water was decreased significantly ($p < 0.05$), and a rising trend was observed among the closely combined water and free water, but water content was stable, centrifugal loss was found to be significantly ($p < 0.05$) lower than the day 6. Then it could be concluded that during cold storage, water especially the free water lost more, which led to certain degree of juice loss. Moreover, for yellow value (b^*), a significant negative correlation was seen with water content and a significant positive correlation was showed with the storage time. This indicated that with increasing of storage time and the water loss in early storage, yellow value was observed to increase and finally the quality of the emulsified gel was inevitably affected.

Key words: emulsified gel; color; water-holding capacity; low field NMR

中图分类号: TS251.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2015)23-0049-05

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2015.23.001

低温乳化型香肠,属于乳化凝胶类产品,基本上是由斩拌均匀的肉类组织,脂肪组织、水及其他辅料组成。该类产品口感鲜嫩,清淡爽口,蛋白质含量丰富,且低温加工最大限度地保留了肉质中的营养成分,日益成为消费者喜爱的肉食制品之一^[1]。脂肪的

添加赋予肉制品丰富的口感、风味、多汁性及适口的嫩度。结构上,脂肪被斩拌成细小的脂肪颗粒,由盐溶性肌原纤维蛋白乳化包裹并镶嵌在蛋白凝胶基质中,以“填充物”或“共聚物”的形式在热加工工程中形成乳化凝胶,赋予产品良好的质构和口感。乳化

收稿日期:2015-01-28

作者简介:邵俊花(1980-),女,博士,副教授,研究方向:肉品加工与质量安全控制,E-mail:shaohj024@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(31301510);国家科技支撑计划课题(2012BAD28B03)。

凝胶类肉制品营养物质丰富,贮藏过程中容易腐败变质^[2],且随着贮藏时间的延长,产品的食用品质产生劣变的几率也会增大。肉制品的食用品质指标主要包括滋味、质地、多汁性和气味等,其中保水性是评价肉制品品质的重要指标之一,直接关系到肉制品的出品率、嫩度和风味等^[3]。此外,水分含量和分布状态在肉与肉制品加工、贮藏过程中呈动态变化,决定着肉与肉制品的质量和货架期^[4]。

低场核磁共振技术(Low Field NMR)利用物理学原理,可以分析肉与肉制品中水分的分布状态、不同状态水的含量以及迁移过程,同时还可以进行成像分析,以获取样品内部水分的空间分布信息,从而可以更好的分析肉与肉制品中水分与其他品质特性间的关系^[4-5]。低场核磁弛豫时间 T_2 与肉及肉制品系水力的一些传统测定方法之间有较强的相关性,可用于预测肉与肉制品的系水力^[6-7]。

因此,本文结合低场核磁弛豫时间 T_2 研究低温(75℃)热诱导乳化凝胶在贮藏(0~4℃)过程中水分分布的变化及迁移规律,并结合相关性分析探讨水分迁移与乳化凝胶颜色、保水性的关系,以期从水分分布及迁移规律的角度,揭示乳化肠在冷藏过程中发生汁液流失和品质变差的原因,为实际生产提供改善乳化肠贮藏特性的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜猪里脊肉、猪背膘 购于当地大润发超市;食盐、复合磷酸盐、冰水混合物(均为食用级)。

Stephan UMC-5C 真空斩拌机 德国 Stephan 机械有限公司;Beckman Avanti J-E 高速离心机 美国 Beckman Coulter 公司;NMI20 低场核磁共振仪 上海纽迈电子科技有限公司;HHS 电热恒温水浴锅 山西省文水医疗器械厂;CR-400 色彩色差计 杭州柯盛行仪器有限公司;DHG-9055A 电热鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司;BCD-215KAKM 海尔立式冷藏冰箱 青岛海尔股份有限公司;JB/7534 电子天平 梅特勒-托利多仪器上海有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 乳化凝胶的制备 制备方法参照 Youssef 等^[8]稍作修改。首先剔除里脊肉表面的可见结缔组织和脂肪,去除背膘上可见的肌肉组织,然后按比例分别称量里脊肉(44%)、背膘(25%)、食盐(2%)、磷酸盐(0.3%)、冰水混合物(28.7%)备用。将准备好的里脊肉、食盐和复合磷酸盐放入斩拌机,真空高速斩拌 1 min;然后加入猪背膘和 1/3 的冰水混合物,继续真空高速斩拌 2 min;最后加入剩余冰水混合物,继续真空高速斩拌 3 min。斩拌得到 1000 g 肉糜,斩拌终温 15℃。称取 35 g 斩拌好的肉糜于 50 mL 螺旋盖聚丙烯离心管中密封;按照 4℃、2300 r/min 的设定条件离心 5 min,以驱除剩余气泡;将装有肉糜的离心管置于 75℃ 水浴中恒温加热 30 min,取出室温冷却,得到乳化凝胶。

1.2.2 水分变化的测定 水分含量的测定:参照国标法 GB/T 5009.3-2003。离心失水率的测定:沿乳

化凝胶的中心部位取质量约 10 g 的样品,放置于天平上称质量 m g。称重后用滤纸将肉样包裹好放入 50 mL 的离心管中(内放入脱脂棉),按照 4℃、9000 r/min 的条件离心 20 min,取出样品,剥去滤纸,称肉样质量 m_0 g,离心前后重量的损失与原肉样重的百分比即为离心失水率。

$$\text{离心失水率}(\%) = \frac{m - m_0}{m} \times 100$$

1.2.3 乳化凝胶颜色的测定 采用色差仪(光源 D65,测量直径 8 mm)进行测定,测定前先进行校准。将乳化凝胶处理为高约 15 mm 的均匀肉样。用色差仪测量肉样的颜色和光泽,测量结果用亮度(L^*)、红度(a^*)和黄度(b^*)表示。每组设 3 个平行,实验重复 3 次。

1.2.4 自旋-自旋弛豫时间 T_2 的测定 低场核磁弛豫时间的测定在低场核磁共振仪上进行,测定方法根据 Bertram 等^[9]稍作修改。测试条件为:质子共振频率为 22 MHz,测量温度为 32℃。大约 1.5 g 样品放入核磁管,而后放入分析仪中。自旋-自旋弛豫时间 T_2 用 CPMG 序列进行测量。所用参数为:重复扫描 32 次,重复间隔时间 TR 为 3000 ms,采样间隔 150 μ s,得到 2500 个回波,得到的图为指数衰减图形,每个测试有四个重复。CPMG 指数衰减曲线用仪器自带的 MultiExp Inv Analysis 软件进行反演,得到 T_2 值。采用弛豫图每个组分峰值对应的时间作为 T_2 ,而弛豫峰的宽度为基线上峰底的宽度。

1.2.5 数据统计 所有数据均用 Excel 建立数据库,通过 SPSS17.0 统计软件进行 ANOVA 方差分析,数据进行正态分布检验,符合正态分布的多重比较采用 Duncan 法,不符合正态分布的用 Kruskal-Wallis 检验,并应用 Pearson 系数进行相关性分析,差异显著性为 $p < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 贮藏过程中乳化凝胶水分的变化

乳化凝胶在贮藏过程中的水分变化情况如图 1 所示。本实验条件下,贮藏前 2 d 水分含量差异不显著,2 d 之后水分含量开始显著($p < 0.05$)下降,直至第 6 d 达到平稳状态,之后水分含量基本趋于 40%。可以看出:随贮藏时间的增加,水分含量总体呈下降趋势,这与韩隽帆等^[10]的研究结果一致,表明乳化凝胶类产品在贮藏过程中的水分含量的变化不容忽视,很可能会影响产品的最终品质。离心最易损失的水分主要是凝胶中结合最不紧密的自由水^[11],如图 1 乳化凝胶的离心失水率随贮藏时间的延长呈先上升后下降的趋势。贮藏 6 d 之内,乳化凝胶的离心失水率急剧($p < 0.05$)增大,第 6 d 达到最大值约 26%,随后乳化凝胶的离心失水率呈显著($p < 0.05$)下降,而第 8 d 之后又显著上升。出现这种非线性规律可能与自由水的迁移特点有关^[12]。

2.2 贮藏过程中乳化凝胶颜色的变化

色泽比较诱人的肉制品容易受消费者欢迎,因此颜色是影响产品消费的主要因素之一。 L^* 反映乳化凝胶的亮度,由图 2 可以看出,贮藏初期(第 0 d 到

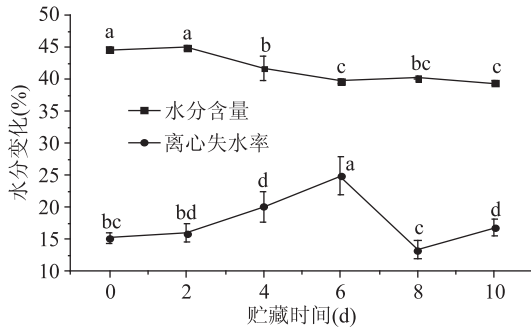


图1 贮藏过程中乳化凝胶水分的变化

Fig.1 Changes of water loss in emulsion gel during storage
注:标注有不同字母表示差异显著($p < 0.05$),图2~图4同。

第2 d)乳化凝胶的亮度(L^*)值显著($p < 0.05$)增加,可能由于贮藏初期乳化凝胶表面析出水分较多所致。而在随后的4 d,乳化凝胶的 L^* 显著($p < 0.05$)下降。结合贮藏过程中乳化凝胶水分含量的变化情况,可以推测,第2 d到第4 d的 L^* 降低可能与水分含量降低有关,而第4 d到第6 d的 L^* 有显著($p < 0.05$)上升则可能与自由水的被束缚能力下降而水分流动性增强,部分中层或内部水分向表层迁移有关^[12]。另一方面,随贮藏时间的延长,乳化凝胶的红度值(a^*)呈逐渐降低趋势,黄度(b^*)值则呈逐渐上升趋势,且 a^* 和 b^* 均在第6 d出现显著($p < 0.05$)差异,可能是因为随着贮藏时间的延长,乳化凝胶水分含量逐渐降低,色素(肌红蛋白)含量也随着水分分布的变化和汁液的流失而产生变化。另外,贮藏过程中的蛋白氧化,也会降低肌肉蛋白的持水性,从而使水分含量降低,颜色发生变化^[13-14]。

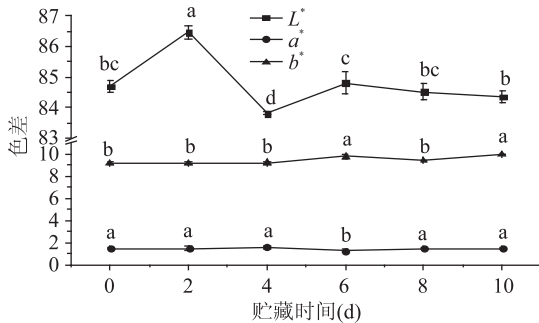


图2 贮藏过程中乳化凝胶颜色的变化规律

Fig.2 Color changes in emulsion gel during storage

2.3 贮藏过程中自旋-自旋弛豫时间 T_2 的变化

低场核磁横向弛豫时间 T_2 可以反映水分的自由度^[15],不同贮藏时间的乳化凝胶中水分子 T_2 弛豫特性见图3。拟合后的 T_2 分布按弛豫时间呈现3个峰: T_{20} , 0~20 ms; T_{21} , 31~133 ms; T_{22} , 230~470 ms。其中弛豫组分 T_{20} 表示乳化凝胶中与蛋白质紧密结合的水, T_{21} 表示乳化凝胶中的不易流动水,而 T_{22} 则表示乳化凝胶中截留的自由水^[16-17]。

由图3可以看出,弛豫时间 T_{20} 和 T_{21} ,在贮藏8 d之内基本无变化,差异不显著,第8 d之后,有不同程度的降低($p < 0.05$)。表明贮藏8 d之内,乳化凝胶内的结合水和不易流动水基本处于稳定状态,而8 d之后,乳化凝胶内的结合水与不易流动水被蛋白质

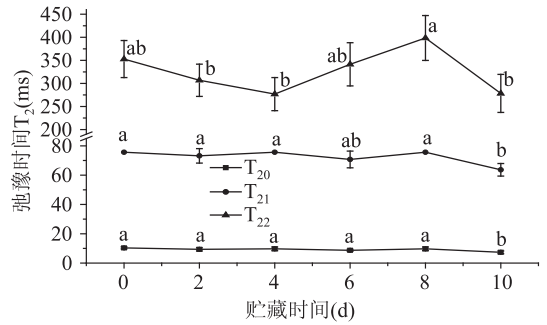


图3 贮藏过程中乳化凝胶弛豫时间 T_2 的变化规律

Fig.3 Changes of relaxation time T_2 in emulsion gel during storage

束缚的强度增加,流动性均显著($p < 0.05$)下降。

另一方面,乳化凝胶中的自由水随贮藏时间的延长,发生了不同程度的变化。贮藏4 d之内,乳化凝胶中的弛豫组分 T_{22} 逐渐降低,说明该部分水分受乳化凝胶的束缚增强。而贮藏第4 d至第8 d之间出现相反趋势,即随着贮藏时间的延长,乳化凝胶截留自由水的能力下降。第8 d时弛豫时间 T_{22} 达到最大值,超过8 d之后,弛豫时间 T_{22} 又开始逐渐下降。这一结果表明,贮藏过程中乳化凝胶对自由水的束缚并非呈单一的线性关系,这可能与贮藏过程中蛋白质的分阶段氧化造成的蛋白质功能特性改变有关^[11]。

2.4 贮藏过程中乳化凝胶弛豫组分峰面积比例的变化

图4表示贮藏过程中乳化凝胶各弛豫组分峰面积比例的变化情况。根据弛豫组分峰面积百分比,可以估算氢质子的相对含量,从而反映不同状态水分群的含量,而根据不同状态水分群含量的变化,可以评估各种状态水分群的迁移情况^[18]。

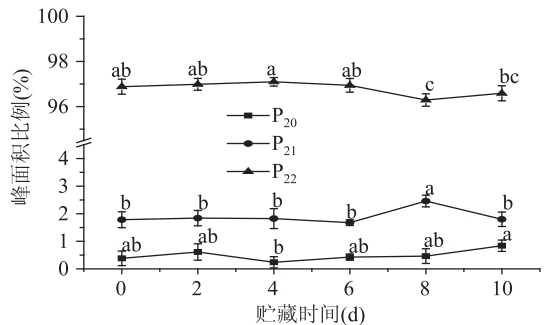


图4 贮藏过程中乳化凝胶弛豫组分峰面积比例变化规律

Fig.4 Changes of peaks area proportion in emulsion gel during storage

从图4可以看出,弛豫组分 T_{21} 所对应的峰面积比例(P_{21}),在贮藏前6 d之内均比较稳定,贮藏6 d之后,不易流动水的相对含量显著上升,第8 d达到最大值之后又显著($p < 0.05$)降低。而弛豫组分 T_{22} 所对应的峰面积比例(P_{22}),在贮藏前6 d之内也比较稳定,贮藏6 d之后却出现显著下降($p < 0.05$)趋势,第8 d之后趋于平稳。说明乳化凝胶中的自由水相对含量在贮藏6 d之内基本不变,贮藏6 d之后的相对含量变化情况则与不易流动水的相反,即贮藏

表1 相关性分析
Table 1 Analyses of correlation

项目	贮藏时间	a^*	b^*	水分含量	T_{20}	T_{21}	T_{22}	P_{20}	P_{21}
b^*	0.75 **	-0.44 *							
水分含量	-0.94 **	0.09	-0.74 **						
T_{20}	-0.64 **	0.20	-0.58 **	0.51 *					
T_{21}	-0.57 **	0.31	-0.76 **	0.45	0.67 **				
P_{20}	0.18	0.22	-0.06	-0.12	0.43 *	0.33	0.43 *		
P_{21}	-0.47 *	0.03	-0.22	0.40	0.27	0.23	0.13	-0.19	
P_{22}	0.33	-0.20	0.33	-0.25	-0.63 **	-0.59 **	-0.46 *	-0.50 *	-0.53 **

6~8 d显著($p < 0.05$)降低,8 d之后又出现上升趋势。弛豫组分 T_{20} 所对应的峰面积比例在贮藏 2 d 之后开始下降,随着贮藏时间的延长,从贮藏第 4 d 到第 10 d,峰面积总体呈升高趋势,即结合水所占比例逐渐增加,表明到贮藏后期,不易流动水部分转化为结合水与自由水,但总体看水的含量仍然趋于稳定。一般,乳化凝胶中不同状态的水分群之间存在动态平衡,相互之间会发生交换,因此,结合水、不易流动水和自由水可以相互转化,一直处于动态迁移状态。

2.5 相关性分析

如表 1 所示的相关性分析结果可知,水分含量与贮藏时间呈极显著负相关,即随贮藏时间的延长,水分含量显著降低。黄度值 b^* 与贮藏时间呈极显著正相关,这可能与水分含量降低及蛋白质氧化有关^[14]。此外,水分含量与 b^* 呈极显著负相关,水分含量的降低会显著增加 b^* 值。弛豫时间 T_{21} 和 T_{20} 均与贮藏时间呈显著($p < 0.05$)负相关,说明乳化凝胶中不易流动和结合水受乳化凝胶的束缚越来越大。而弛豫时间 T_{20} 和 T_{21} 与 b^* 值呈极显著负相关,说明结合水和不易流动水被乳化凝胶中的蛋白质束缚能力越强,相应的 b^* 值会越大,这一点与水分含量变化引起乳化凝胶颜色变化的结果一致。

3 结论

贮藏过程中,乳化凝胶不同组分的水分子群发生了一定程度的迁移与相互交换。总体来讲,随着贮藏时间的延长,水分含量逐渐降低;部分不易流动水转化为结合水、自由水,三种相态水分与蛋白质的结合均更加紧密;而自由水的相对含量则有一个先下降后稍微上升的过程。也可以说,贮藏过程中,乳化凝胶中的部分不易流动水转化为了自由水,而部分自由水则转化成汁液流失流出。另一方面,水分含量的减少也会显著增加乳化凝胶的颜色,尤其是黄色。因此,实际生产过程中,改善蛋白质结合自由水的能力,可以有效提高乳化型肉制品的部分品质特性,降低汁液流失和质量劣变的发生率。

参考文献

[1] 邵俊花,吴菊清,刘登勇,等.肌肉蛋白质乳化凝胶及保水机理研究进展[J].食品与发酵工业,2013,39(4):166-150.
[2] 蒋丽施,贺雅非,李洪军,等.不同贮藏温度西式火腿切片品质变化规律研究[J].食品科学,2012,33(16):274-279.

[3] 李雨露,刘丽萍.提高肉制品保水性方法的研究进展[J].食品工业科技,2012,(20):398-400.
[4] 夏天兰,刘登勇,徐幸莲,等.低场核磁共振技术在肉与肉制品水分测定及其相关品质特性中的应用[J].食品科学,2011,(21):253-256.
[5] Bertram HC, Engelsen SB, Busk H, et al. Water properties during cooking of pork studied by low-field NMR relaxation: effects of curing and the RN-gene [J]. Meat Science, 2004, 66(2):437-446.
[6] Li C, Zhang L D, Ren F Z, et al. Study on different chilling factors influencing water-holding capacity of pork based on low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(23):243-249.
[7] Bertram HC, Purslow PP, Andersen HJ. Relationship between meat structure, water mobility and distribution; A low field nuclear magnetic resonance study [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2002, 50(4):824-829.
[8] Youssef, MK, Barbut, S. Physicochemical effects of the lipid phase and protein level on meat emulsion stability, texture, and microstructure [J]. Journal of Food Science, 2010, 75(2):S108-S114.
[9] Bertram HC, Andersen RH, Andersen HJ. Development in myofibrillar water distribution of two pork qualities during 10-month freezer storage [J]. Meat Science, 2007, 75(1):128-133.
[10] 韩隽帆,李洪军,贺雅非.不同季节运输酱卤类低温肉制品品质变化研究[J].食品工业科技,2013,34(10):326-331.
[11] 李银,李侠,张春晖,等.羟自由基导致肉类肌原纤维蛋白氧化和凝胶性降低[J].农业工程学报,2013,29(12):286-292.
[12] 吕舒,杨勇,曹春廷,等.四川香肠加工贮藏过程中表层、中层及内层脂肪的变化规律[J].食品工业科技,2014,35(8):323-327.
[13] 孟少华,傅琳秋,王令建,等.低温熏煮香肠的贮藏特性研究[J].现代食品科技,2010,26(3):244-246.
[14] Jongberg S, Terkelsen LS, Miklos R, et al. Green tea extract impairs meat emulsion properties by disturbing protein disulfide cross-linking [J]. Meat Science, 2015, 100(2):2-9.
[15] Li CB, Liu DY, Zhou GH, et al. Meat quality and cooking attributes of thawed pork with different low field NMR T_{21} [J]. (下转第 58 页)

- [4] 张绪坤, 苏志伟, 王学成, 等. 污泥过热蒸汽与热风薄层干燥的湿分扩散系数和活化能分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 226-235.
- [5] 黄小丽. 稻谷过热蒸汽干燥过程中的力学及干燥动力学特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [6] Mulet A. Drying modelling and water diffusivity in carrots and potatoes[J]. Journal of Food Engineering, 1994, 22(1): 329-348.
- [7] Kiranoudis C T, Maroulis Z B, Marinos-Kouris D. Heat and mass transfer model building in drying with multiresponse data[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(3): 463-480.
- [8] Lu R, Siebenmorgen T J. Moisture diffusivity of long-grain rice components. [J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(6): 1955-1961.
- [9] Li Z, Kobayashi N, Watanabe F, et al. Sorption drying of soybean seeds with silical gel [J]. Drying technology, 2002, 20(1): 223-233.
- [10] 李业波, 于庆龙. 土豆干燥过程中内部传热传质的实验研究[J]. 农业工程学报, 1996, 12(4): 62-65.
- [11] Elbert G, Tolaba M P, Aguerre R J, et al. A diffusion model with a moisture dependent diffusion coefficient for parboiled rice [J]. Drying Technology, 2001, 19(1): 155-166.
- [12] 高思源, 李增华, 杨永良, 等. 煤低温氧化活化能与温度关系实验[J]. 煤矿安全, 2011, 42(7): 23-27.
- [13] Simal S, Garau M C, Femenia A, et al. A diffusional model with a moisture-dependent diffusion coefficient [J]. Drying Technology, 2006, 24(11): 1365-1372.
- [14] Hacıhafızoğlu O, Cihan A, Kahveci K. Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice [J]. Food and Bioproducts processing, 2008, 86(4): 268-275.
- [15] Cihan A, Ece M C. Liquid diffusion model for intermittent drying of rough rice [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49(4): 327-331.
- [16] Chen C, Wu P. Thin-layer drying model for rough rice with high moisture content [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 80(1): 45-52.
- [17] 李栋, 毛志怀, 曹崇文. 低温下水稻的薄层干燥模型[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(2): 37-39.
- [18] 曹崇文, 刘玉峰. 水稻干燥模型与干燥机性能预测[J]. 北京农业工程大学学报, 1995, 15(2): 58-65.
- [19] 梁礼燕, 丁超, 杨国峰. 稻谷薄层干燥特性及工艺研究[J]. 粮食储藏, 2012, 40(6): 39-44.
- [20] 梁礼燕. 热风, 微波薄层干燥稻谷品质研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2012.
- [21] 衣淑娟, 冷志杰, 许春林, 等. 水稻薄层干燥的实验研究[J]. 哈尔滨: 东北农业大学学报, 1999, 30(4): 376-381.
- [22] 邱学岚. 干燥后稻米品质分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2005.
- [23] 贾富国, 周玉龙. 储藏条件下糙米水分扩散规律研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(1): 87-90.
- [24] 孟岳成, 王雷, 陈杰, 等. 姜片热风干燥模型适用性及色泽变化[J]. 食品科学, 2014, 21: 100-105.
- [25] 刘启觉. 高水分稻谷干燥工艺实验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 135-139.
- [26] Steffe J F, Singh R P. Diffusion coefficients for predicting rice drying behaviour [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1982, 27(6): 489-493.
- [27] Poomsaad N, Soponronnarit S, Therdyotin A. Diffusion model of paddy drying by fluidization technique: Proceedings of the 14th Memorial CIGR World Congress, Japan, 2000 [C].
- [28] 王剑平, 王成芝. 谷粒内部水分扩散系数的确定[J]. 东北农业大学学报, 1996, 27(1): 63-67.
- [29] 朱志良. 正确理解活化能和温度的关系[J]. 化学教育, 1993, 5: 48-50.
- [30] 王清成. 活化能与温度关系的探讨[J]. 四川建材学院学报, 1989, (1): 51-58.
- [31] 杨玲, 陈建, 杨屹立, 等. 甘蓝型油菜籽热风干燥特性及其数学模型[J]. 现代食品科技, 2014, 30(8): 144-150.
- [32] Demiray E, Tulek Y. Thin-layer drying of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Rio Grande) slices in a convective hot air dryer [J]. Heat and Mass Transfer, 2012, 48(5): 841-847.
- [33] O Callaghan J R, Menzies D J, Bailey P H. Digital simulation of agricultural drier performance [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1971, 16(3): 223-244.
- [34] Agrawal Y C, Singh R P. Thin-layer drying studies on short-grain rough rice [M]. American Society of Agricultural Engineers, 1977.
- [35] Diamante L M, Munro P A. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices [J]. Solar Energy, 1993, 51(4): 271-276.
- [36] Chhinnan M S. Evaluation of selected mathematical models for describing thin-layer drying of in-shell pecans [J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(2): 610-615.
- [37] Wang C Y, Singh R P. A single layer drying equation for rough rice [J]. ASAE paper, 1978, 78: 3001-3006.
- [38] Chandra P K, Singh R P. Applied numerical methods for food and agricultural engineers [M]. CRC Press, 1994.
- (上接第 52 页)
- Meat Science, 2012, 92(2): 79-83.
- [16] McDonnell CK, Allen P, Duggan E, et al. The effect of salt and fibre direction on water dynamics, distribution and mobility in pork muscle: A low field NMR study [J]. Meat science, 2013, 95(1): 51-58.
- [17] 杨慧娟, 于小波, 胡忠良, 等. 低场核磁共振技术研究超
- 高压处理对乳化肠质构和水分分布的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(4): 96-104.
- [18] Pearce KL, Rosenfold K, Andersen HJ, et al. Water distribution and mobility in meat during the conversion of muscle to meat and ageing and the impacts on fresh meat quality attributes—A review [J]. Meat Science, 2011, 89(2): 111-124.