

赤藓糖醇对南美白对虾肉玻璃化转变温度与状态图的影响

赵 亚, 张平平, 王淑敏, 石启龙*

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东淄博 255000)

摘要:南美白对虾肉(PV)冻藏期间极易出现蛋白质变性,为提高虾肉贮藏稳定性,研究了PV与按虾肉质量添加5%赤藓糖醇的虾肉(PV-E)的吸附等温线;测定了PV与PV-E的玻璃化转变温度(T_g)和冻结点温度(T_f)。采用Gordon-Taylor方程与Chen's方程拟合数据,探讨添加赤藓糖醇对虾肉状态图的影响。结果表明,PV与PV-E水分吸附均为III型等温线,GAB模型为描述虾肉水分吸附特性的最适模型。PV与PV-E的 T_g 随着湿基含水率升高而降低;相同含水率时,PV-E的 T_g 高于PV。PV与PV-E的 T_f 随着固形物含量的增加而降低。PV与PV-E最大冷冻浓缩溶液时的玻璃化转变温度 T'_g 分别为-77.09℃和-62.23℃,与之对应的溶质含量分别为0.672 g/g和0.686 g/g。赤藓糖醇可作为一种新型抗冻剂,用于提高虾肉冻藏期间的贮藏稳定性。

关键词:赤藓糖醇,南美白对虾,玻璃化转变温度,状态图,贮藏稳定性

Effects of erythritol on the glass transition temperature and state diagram of *Penaeus vannamei* meat

ZHAO Ya, ZHANG Ping-ping, WANG Shu-min, SHI Qi-long*

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: Protein denaturation is liable to occur during frozen storage of *Penaeus vannamei* (PV) meat. The effect of addition of erythritol on the glass transition temperature (T_g) and state diagram of *Penaeus vannamei* meat were investigated to improve the storage stability of *Penaeus vannamei* meat. Moisture adsorption isotherms of PV and *Penaeus vannamei* meat with addition of 5% (w/w) erythritol (PV-E) were determined at 25℃ by the gravimetric method. Differential scanning calorimetry was used to determine the T_g and freezing point (T_f) of samples equilibrated at various water activities. Gordon-Taylor equation and Chen's equation were employed to model the data of T_g and T_f , especially. The adsorption behavior of PV and PV-E displayed III type isotherms. The GAB model satisfactorily described the adsorption behavior of PV and PV-E. T_g of PV and PV-E decreased with increasing moisture content and T_f decreased with increasing solid content. At a given moisture content, T_g of *Penaeus vannamei* meat increased with the addition of erythritol. The state diagram yielded maximally-freeze-concentrated solutes at 0.672 g/g and 0.686 g/g solids with the characteristic temperature of glass transition being -77.09℃ and -62.23℃ for PV, and PV-E, respectively. Erythritol could be used as a novel cryoprotective agent and the storage stability and shelf life of *Penaeus vannamei* meat could be observably improved by the addition of erythritol.

Key words: *Penaeus vannamei*; erythritol; glass transition temperature; state diagram; storage stability

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2016)20-0317-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2016.20.054

南美白对虾(*Penaeus vannamei*)营养价值高并具有一定的保健功能,但其含水率高,极易被微生物污染,同时内源酶活性较强,故常温下极易腐败变质^[1-2]。冷冻/冻藏可最大限度地维持水产品营养价值,但是水产品冻结/冻藏过程中极易出现冰晶成

长,机械损伤致使细胞完整性破坏,蛋白质极易冷冻变性,导致解冻汁液流失量增加,虾肉质、口感随之下降^[3-4]。因此,蛋白质冷冻变性是水产品质量控制领域的研究热点和难点。目前,添加抗冻剂是缓解肉类冷冻变性经常采用的方法,水产品冻藏过程

收稿日期: 2016-05-06

作者简介: 赵亚(1974-),女,硕士,实验师,研究方向:农产品加工与贮藏, E-mail: zy0028014@sdut.edu.cn。

* 通讯作者: 石启龙(1974-),男,教授,研究方向:果蔬/水产品加工与贮藏, E-mail: qilongshi@sdut.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31171708)。

中常采用糖类作为抗冻剂,蔗糖、山梨糖醇或二者混合物为常见的商用抗冻剂,但其热量与甜度过高^[5]。袁丽等^[6]研究表明,褐藻酸钠裂解物能抑制虾仁冻藏过程中冰晶的生成与成长,有效提高蛋白稳定性。马璐凯等^[7]研究发现,海藻糖与海藻胶能有效地降低冷冻虾仁解冻汁液损失,延缓蛋白质冷冻变性。近期研究表明,水产品冻藏过程中蛋白质变性与其最大冷冻浓缩溶液时的玻璃化转变温度(T_g')密切相关,不同含水率的虾肉在不同温度下所处的物理状态可通过状态图描述,同时状态图也可以预测食品的贮藏稳定性^[8]。石启龙等^[8-9]研究了蔗糖、菊糖、海藻糖、麦芽糊精等对南美白对虾肉玻璃化转变温度与状态图的影响,并将热力学转变参数与抗冻剂筛选结合,为水产品抗冷冻变性剂筛选提供一种新的方法。赤藓糖醇是一种新型发酵类低热量添加剂,常用于焙烤食品以延长货架期、保持产品新鲜度和柔软性^[10]。但是,赤藓糖醇能否作为抗冷冻变性剂尚未见报道。基于此,本文旨在研究赤藓糖醇对南美白对虾肉玻璃化转变温度与状态图的影响,探讨赤藓糖醇作为虾肉抗冷冻变性剂的可能性,为水产品尤其是虾肉的抗冷冻变性剂的筛选提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

南美白对虾 购于淄博海盛水产品批发市场,鲜虾冰温猝死后置于 $-76\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱中贮藏;氯化锂、六水氯化镁、氯化钠、醋酸钾、碳酸钾、亚硝酸钠、六水硝酸镁、五氧化二磷、氯化钾和麝香草酚 分析纯(AR);赤藓糖醇 食品级。

SJ203A-250 型多功能搅拌机 浙江苏泊尔股份有限公司;FD-1B-80 型冷冻干燥机 北京博医康实验仪器有限公司;SPX-250B-Z 型生化培养箱 上海博迅实业有限公司;Q2000 型差示扫描量热仪(DSC) 美国 TA 公司;LabSwift 型水分活度(a_w)测定仪 瑞士 Novasina 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品准备 南美白对虾 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 解冻,去头、去壳,虾肉匀浆成肉糜。将虾肉均分2份,一份按虾肉质量添加5%赤藓糖醇(PV-E),另一份为纯虾肉(PV)作为对照。将PV与PV-E分别置于低温冰箱中冷冻24 h,然后取出置于冻干机(冷阱温度 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、真空度 10 Pa)干燥3 d,冻干后虾肉研磨成粉,置于底部含有五氧化二磷的干燥器中备用。

1.2.2 吸附等温线与模型拟合 采用静态吸附法^[11]测定PV与PV-E的吸附等温线。准确称取 1.000 g 虾肉置于称量瓶中,然后放在含有不同饱和盐液的干燥器中,密封后放于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的培养箱中平衡。对于水分活度(a_w) >0.90 的样品,采用添加定量蒸馏水的方法得到^[11]。平衡后的样品测定干基含水率(X_{ws})、 a_w 与玻璃化转变温度(T_g)。采用GAB模型^[12]与BET模型^[13]拟合水分吸附数据:

$$X_{ws} = \frac{X_m C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \quad \text{式(1)}$$

$$X_{ws} = \frac{X_m C a_w}{(1 - a_w)[1 + (C - 1)a_w]} \quad \text{式(2)}$$

式中: X_m 为单分子层干基含水率, g/g ;C、K为模型参数。模型拟合精度采用误差平方和(SE)、均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)确定,同时残差分布也用于评判模型的拟合精度^[8,11]。

1.2.3 玻璃化转变温度(T_g)与模型拟合 采用DSC测定虾肉的 T_g 。对于含非冻结水的虾肉,采用单扫描程序^[14]。而对于含冻结水虾肉,则需采用退火处理^[8-9,11]。分析热流密度曲线,可得样品玻璃化转变温度范围(包括初始 T_{gi} 、中点 T_{gm} 和终点 T_{ge}),取 T_{gm} 作为样品的玻璃化转变温度。采用Gordon-Taylor方程进行拟合 $T_{gm}^{[15]}$ 。

$$T_{gm} = \frac{X_s T_{gs} + k X_w T_{gw}}{X_s + k X_w} \quad \text{式(3)}$$

式中: T_{gs} 为溶质的玻璃化转变温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{gw} 为水的玻璃化转变温度,取 $-135\text{ }^{\circ}\text{C}$; X_s 为溶质湿基含量, g/g ; X_w 为湿基含水率, g/g ;k为模型参数。

1.2.4 冻结点(T_F)测定与模型拟合 采用DSC测定不同含水率虾肉的 T_F ,采用Chen's方程拟合数据^[16]。

$$T_w - T_F = -\frac{\beta}{\lambda_w} \ln\left(\frac{1 - X_s - B X_s}{1 - X_s - B X_s + E X_s}\right) \quad \text{式(4)}$$

式中: T_w 为水的冻结点, $^{\circ}\text{C}$; β 为水的冻结常数,取 $1860\text{ kg}\cdot\text{K}/(\text{kg}\cdot\text{mol})$; λ_w 为水的分子质量;E为水与溶质的分子质量比。

1.2.5 货架期模型预测 采用Williams-Landel-Ferry(WLF)方程进行货架期模型预测^[17]。

$$\ln \frac{\tau}{\tau_g} = -\frac{C_1 (T - T_g)}{C_2 + (T - T_g)} \quad \text{式(5)}$$

式中: τ 为绝对温度为T时的时间常量; τ_g 为玻璃化转变温度时的时间常量; C_1 、 C_2 为常数,当体系的 T_F 远高于 T_g 时,其值取20和155。

1.3 统计分析

采用Matlab 7.0和Origin 7.5软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 吸附等温线及模型拟合

图1为南美白对虾肉(包括PV与PV-E)在温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的吸附等温线。PV与PV-E的干基含水率随 a_w 增加而增加,且2者均为III型等温线。相同 a_w 时,PV-E的干基含水率高于PV,尤其是当 $a_w > 0.529$ 时更为明显。这可能是由于赤藓糖醇分子中羟基与虾肉中水分子以氢键结合,进而增加了虾肉的持水能力的缘故。Shi等^[9]研究了麦芽糊精对南美白对虾肉吸附等温线影响,得到了类似的结论。

分别采用GAB模型和BET模型拟合虾肉水分吸附数据,模型参数如表1所示。可以看出,与BET模型相比,GAB模型具有较高的 R^2 和较低的SSE与RMSE值,且残差呈随机分布,因此GAB模型适宜描述南美白对虾肉的水分吸附特性。GAB模型参数C与K分别为单层吸附热与多层吸附热^[18]。由表1可以看出,PV与PV-E的单层吸附热均高于多层吸附

表1 吸附模型拟合的参数值

Table 1 Parameters of different models for the adsorption isotherms

模型	样品	模型参数			评价参数			
		X_m (g/g)	C	K	SE	R^2	RMSE	残差分布
GAB	PV	0.0758	8.01	0.996	0.00040	0.9971	0.0089	随机分布
	PV-E	0.0831	14.38	1.028	0.00014	0.9994	0.0053	随机分布
BET	PV	0.7175	0.29		0.00140	0.9898	0.0153	随机分布
	PV-E	0.6136	0.38		0.00339	0.9860	0.0238	规律分布

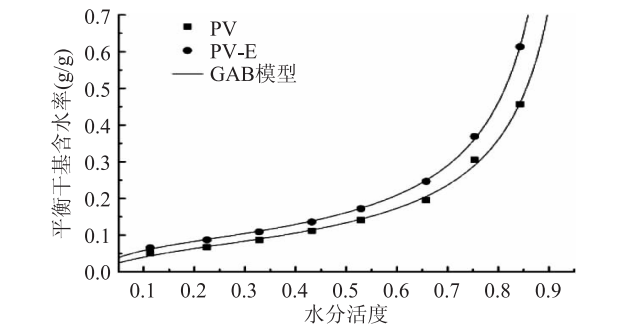


图1 南美白对虾肉的吸附等温线

Fig.1 Moisture adsorption isotherms of *Penaeus vannamei* meat

热,而且虾肉的单层吸附热随着赤藓糖醇的添加而增大。这可能是由于虾肉中亲水/疏水位点比例随赤藓糖醇的添加而改变,进而导致单层与多层之间的比例发生改变。单分子层水分是指与食品非水组分或强极性基团(如氨基、羧基等)以离子键或氢键结合的第1个水分子层的水,食品含水率低于其单分子层含水率时能最大限度地维持其稳定性^[9,11]。温度25℃时,PV与PV-E的单分子层干基含水率(X_m)分别为0.0758 g/g和0.0831 g/g,虾肉的单分子层含水率值随赤藓糖醇的添加而增加。因此,添加赤藓糖醇可以提高虾肉干制品的贮藏稳定性。

2.2 含非冻结水样品 DSC 测定与模型拟合

图2为PV与PV-E的 T_g 随湿基含水率变化曲线。虾肉 T_g 随湿基含水率的增加而降低。PV含水率由0.0484 g/g增加至0.3135 g/g时, T_{gm} 由42.67℃降低至-74.00℃;PV-E含水率由0.0616 g/g增加至0.2694 g/g时, T_{gm} 由56.98℃降低至-46.02℃。这主要是由于水分子对虾肉中无定形成分的塑化作用导致。相同水分活度时,虾肉 T_g 随着赤藓糖醇的添加而增加。采用Gordon-Taylor模型对PV与PV-E的 T_{gm} 进行非线性拟合,得到PV与PV-E的 T_{gs} 分别为:101.5和131.8℃。因此,虾肉的 T_{gs} 随赤藓糖醇的添加而增加。 k 值表示虾肉中水分子与非水组分结合能力强弱的物理量, k 值越大,水分子塑化作用越明显^[8]。PV与PV-E的模型参数 k 分别为6.45和5.79。说明虾肉的塑化作用随着赤藓糖醇的添加而降低。这与石启龙等^[8]报道的蔗糖、菊糖与海藻糖对虾肉 k 值影响规律基本吻合。

2.3 含冻结水样品 DSC 测定与模型拟合

对于含冻结水虾肉(PV, $a_w > 0.843$; PV-E, $a_w > 0.753$)的DSC曲线会出现明显的反玻璃化峰(图3)。其原因是快速冷却过程中导致溶液部分冷冻浓缩,

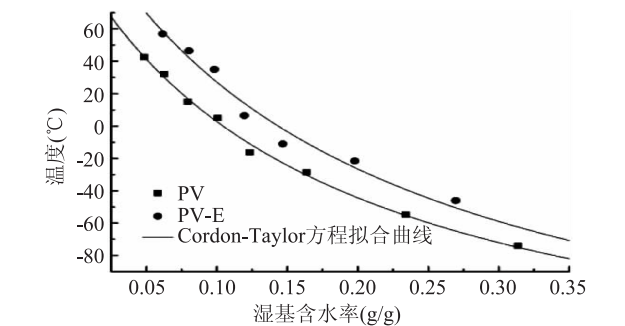


图2 南美白对虾肉 T_g 与含水率关系

Fig.2 Variation of T_g as a function of moisture content for *Penaeus vannamei* meat

无定形基质中的水分由于水分子的流动性而再结晶^[19]。当DSC热流曲线出现反玻璃化峰时会影响 T_g 值的准确性,因此需要采用退火处理来消除反玻璃化峰,提高 T_g 测定的准确度。PV与PV-E的冻结终了温度(T'_m)值分别为-32.67℃与-39.78℃,故PV与PV-E的退火温度分别为-34℃与-41℃。PV与PV-E分别在退火温度下保持30 min,反玻璃化峰消失且玻璃化转变区域较未经退火处理的样品更为明显(图3)。表2为含非冻结水虾肉样品的 T_g 。可以看出,随着虾肉含水率增加, T_g 值变化幅度很小。其原因是虾肉在玻璃化转变过程中所吸收的热量相比于冰融解潜热其热量影响可以忽略不计,这与石启龙等对竹荚鱼^[120]、扇贝肉^[11]、南美白对虾肉^[8,9]的研究结论基本一致。

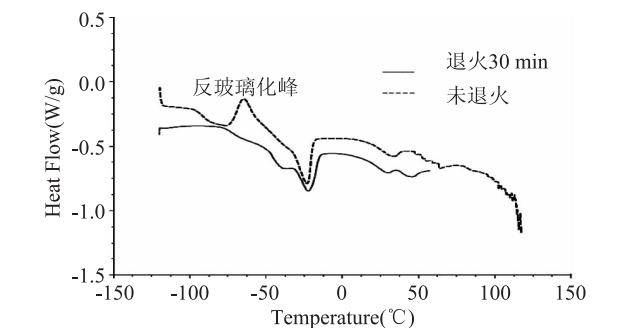


图3 含冻结水PV-E的DSC曲线($X_w = 0.701$ g/g)

Fig.3 Typical DSC curves for PM-E containing freezable water ($X_w = 0.701$ g/g)

PV与PV-E的冻结点 T_f 如表2所示。 T_f 随着溶质含量的增加而降低。对于PV,溶质含量由0.3308 g/g增加到0.6016 g/g时, T_f 由-3.99℃下降到-18.17℃;对于PV-E,溶质含量由0.3117 g/g增

表2 含冻结水虾肉样品经退火处理的 T_g 及 T_F

Table 2 T_g and T_F of *Penaeus vannamei* meat containing freezing water after annealed treatment

样品	含水率(g/g)	T_{gi} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{gm} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{ge} ($^{\circ}\text{C}$)	T'_m ($^{\circ}\text{C}$)	T_F ($^{\circ}\text{C}$)
PV	0.6692 ^a	-75.65	-74.10	-69.62	-31.67	
	0.7142 ^a	-75.52	-72.82	-65.90	-33.66	
	0.3984 ^b	-80.01	-75.25	-71.55		-18.17
	0.4904 ^b	-80.75	-74.31	-71.18		-10.51
	0.6692 ^b	-75.22	-69.39	-64.25		-3.99
PV-E	0.3802 ^a	-89.10	-86.81	-83.23	-38.07	
	0.6260 ^a	-77.35	-72.44	-68.04	-40.13	
	0.6883 ^a	-76.05	-72.16	-67.97	-41.15	
	0.3802 ^b	-82.47	-79.06	-74.33		-17.17
	0.4316 ^b	-77.52	-73.24	-68.53		-15.32
	0.5339 ^b	-77.11	-71.80	-67.43		-9.40
	0.6260 ^b	-75.84	-70.65	-65.40		-4.97
	0.6883 ^b	-75.58	-70.40	-66.52		-3.52

注:^a 未经过退火处理的虾肉;^b 经过退火处理的虾肉。

加到 0.6198 g/g 时, T_F 由 -3.52°C 下降到 -17.17°C 。采用 Chen's 方程拟合虾肉 T_F , 得到 PV 与 PV-E 的模型参数 E 分别为 0.075 和 0.074。

2.4 状态图

图4为PV与PV-E的状态,图4(a)中,AB、CE分别代表PV的冻结曲线和玻璃化转变曲线,B点为最大冷冻浓缩溶液点,PV冻结终点温度 $T'_m = -32.67^{\circ}\text{C}$,溶质质量为 0.672 g/g,从B点垂直外推至玻璃化转变(D点),即得到PV在最大冷冻浓缩时的玻璃化转变温度 $T'_g = -77.09^{\circ}\text{C}$ 。图4(b)中,FG、HJ分别代表添加PV-E的冻结曲线和玻璃化转变曲线,K点为其最大冷冻浓缩溶液点,相应的 $T'_m = -39.78^{\circ}\text{C}$,溶质质量为 0.686 g/g。从G点垂直外推至玻璃化转变曲线(K点),即得到PV-E在最大冷冻浓缩时的玻璃化转变温度 $T'_g = -62.23^{\circ}\text{C}$ 。食品在冷冻过程中,为了最大限度地保持其品质特性,应该快速通过最大冰晶形成带区域^[8]。根据状态图可知,冻结终点温度至最大冷冻浓缩状态温度为最大冰晶形成带区域^[20]。由图4可得,PV与PV-E的最大冰晶形成带区域分别为 $-32.67 \sim -77.09^{\circ}\text{C}$ 与 $-39.78 \sim -62.23^{\circ}\text{C}$ 。由此可知,添加赤藓糖醇可以提高虾肉的 T'_g ,也可以缩短最大冰晶形成带区域,因此能提高虾肉速冻及冻藏品质。石启龙等^[8-9]研究了蔗糖、菊糖、海藻糖对南美白对虾肉玻璃化转变温度与状态图的影响,通过比较可以发现:糖类添加均提高了虾肉的 T'_g ,其提高效果高低顺序依次为:菊糖与海藻糖 > 赤藓糖醇与蔗糖。理论上,赤藓糖醇可以替代蔗糖作为低热量肉类抗冷冻变性剂。PV与PV-E的最适贮藏温度为虾肉 T'_g ,即 -77.09°C 与 -62.23°C ;而当虾肉贮藏温度高于 T'_g 时,可通过WLF方程(式(5))预测其货架期。假定PV与PV-E分别在温度 -18°C 贮藏,根据WLF方程,可计算得到其货架期分别为 29.24 d 和 86.11 d。

3 结论

3.1 PV与PV-E的水分吸附特性呈III型等温线,

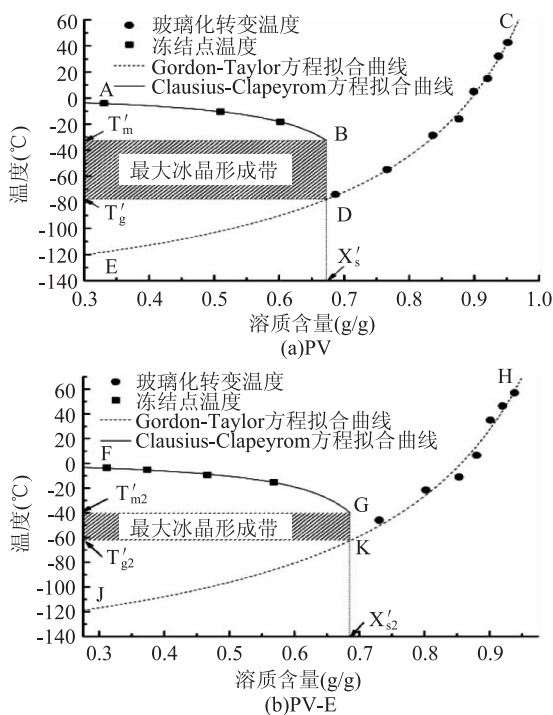


图4 南美白对虾肉的状态图

Fig.4 State diagram of *Penaeus vannamei* meat

GAB模型为描述虾肉吸附特性的最适模型。PV与PV-E的干基含水率随 a_w 增加而增加;相同 a_w 时,PV-E的干基含水率高于PV,尤其是当 $a_w > 0.529$ 时更为明显。PV与PV-E的单层吸附热均高于多层吸附热,而且虾肉的单层吸附热随着赤藓糖醇的添加而增大。

3.2 PV与PV-E的 T_g 随湿基含水率增加而降低;相同含水率时,虾肉 T_g 随赤藓糖醇的添加而提高。

3.3 PV最大冷冻浓缩溶液的玻璃化转变温度 T'_g 随赤藓糖醇添加而显著提高,最大冰晶形成带区域随赤藓糖醇的添加而缩短。因此,添加赤藓糖醇可提高虾肉贮藏稳定性、延长虾肉货架期。

参考文献

- [1] 谢丽丹,李蕾蕾,王素英,等.冰温贮藏中南美白对虾特定腐败菌的分离鉴定及其腐败能力分析[J].食品工业科技,2016,37(5):171-176.
- [2] 谢丽丹,李蕾蕾,王素英,等.低温贮藏南美白对虾特定腐败菌的分离鉴定及腐败能力分析[J].食品与发酵工业,2016,42(3):67-72.
- [3] Boonsumrej S, Chaiwanichsiri S, Tantratian S, et al. Effects of freezing and thawing on the quality changes of tiger shrimp (*Penaeus monodon*) frozen by air-blast and cryogenic freezing [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(1): 292-299.
- [4] 胡晓亮,王易芬,郑晓伟,等.抗冻剂在水产品冻藏中的应用研究[J].中国农学通报,2015,31(35):38-42.
- [5] Carvajal P A, MacDonald G A, Lanier T C. Cryostabilization mechanism of fish muscle proteins by maltodextrins [J]. Cryobiology, 1999, 38(1): 16-26.
- [6] 袁丽,高瑞昌,薛长湖,等.褐藻酸钠裂解物提高凡纳滨对虾保水性机理的研究[J].水产学报,2011,35(10):1547-1553.
- [7] 马璐凯,张宾,王强,等.海藻糖、海藻胶及寡糖对南美白对虾蛋白质冷冻变性的抑制作用[J].现代食品科技,2014,30(6):140-145.
- [8] 石启龙,赵亚,曹淑敏,等.糖类对南美白对虾肉玻璃化转变温度与状态图的影响[J].农业机械学报,2015,46(11):236-244.
- [9] Shi Q L, Lin W W, Zhao Y, et al. Thermal characteristics and state diagram of *Penaeus vannamei* meat with and without maltodextrin addition [J]. Thermochimica Acta, 2015, 616: 92-99.
- [10] 杨柳,陈宇飞,张一.利用 NMR 研究赤藓糖醇对糙米面包贮藏期间保水性的影响[J].食品科学,2015,36(6):
- (上接第 316 页)
- Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2013, 19: 210-217.
- [13] Kent M, Oehlenschläger J, Mierke - klemeyer S, et al. Estimation of the quality of frozen cod using a new instrumental method [J]. European Food Research and Technology, 2004, 219(5): 540-544.
- [14] 李伟明,王鹏,陈天浩,等.基于阻抗特性和神经网络的鸡胸肉冻融次数鉴别方法[J].农业工程学报,2014,30(7):250-257.
- [15] Chen T H, Zhu Y P, Wang P, et al. The use of the impedance measurements to distinguish between fresh and frozen-thawed chicken breast muscle [J]. Meat Science, 2016, 116: 151-157.
- [16] 周光宏.肉品加工学[M].北京:中国农业出版社,2008:93-94.
- [17] Lund M N, Hviid M S, Claudi-Magnussen C, et al. Effects of dietary soybean oil on lipid and protein oxidation in pork patties during chill storage [J]. Meat Science, 2008, 79(4): 727-733.
- [18] Pietrasik Z, Janz J A M. Influence of freezing and thawing on the hydration characteristics, quality, and consumer acceptance of whole muscle beef injected with solutions of salt and phosphate [J]. Meat Science, 2009, 81(3): 523-532.
- [19] Joo S T, Kauffman R G, Kim B C, et al. The relationship of

262-266.

- [11] 石启龙,林雯雯,赵亚,等.冻干扇贝肉玻璃化转变温度与状态图研究[J].农业机械学报,2014,45(8):225-230.
- [12] van den Berg C, Bruin S. Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects [M]. Rockland: Academic Press, New York, 1981.
- [13] Brunbauer S, Emmett P, Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers [J]. Journal of the American Chemical Society, 1938, 60(2): 309-319.
- [14] 石启龙,林雯雯,赵亚.南美白对虾肉玻璃化转变温度测定的影响因素[J].现代食品科技,2014,30(11):48-52.
- [15] Gordon M, Taylor J S. Ideal copolymers and the second-order transitions of synthetic rubbers. 1. Non-crystalline copolymers [J]. Journal of Applied Chemistry, 1952, 2(9): 493-500.
- [16] Vasquez C, Diza-Calderon P, Enrione J, et al. State diagram, sorption isotherm and color of blueberries as a function of water content [J]. Thermochimica Acta, 2013, 570: 8-15.
- [17] 刘红英,高瑞昌,戚向阳.食品化学[M].北京:中国质检出版社,2013.
- [18] Knani S, Aouaini F, Bahloul N, et al. Modeling of adsorption isotherms of water vapor on Tunisian olive leaves using statistical mechanical formulation [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Application, 2014, 400: 57-70.
- [19] Shi Q L, Zhao Y, Chen H H, et al. Glass transition and state diagram for freeze-dried horse mackerel muscle [J]. Thermochimica Acta, 2009, 493(1/2): 55-60.
- [20] Roos Y H. Glass transition temperature and its relevance in food processing [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2010, 1: 469-496.
- sarcoplasmic and myofibrillar protein solubility to colour and water-holding capacity in porcine longissimus muscle [J]. Meat Science, 1999, 52(3): 291-297.
- [20] 陈天浩,韩敏义,王鹏,等.基于阻抗技术的腌肉盐分含量快速无损检测[J].食品与机械,2015(6):75-78.
- [21] Zhang L, Shen H, Luo Y. A nondestructive method for estimating freshness of freshwater fish [J]. European Food Research and Technology, 2011, 232(6): 979-984.
- [22] Omana D A, Xu Y, Moayed V, et al. Alkali-aided protein extraction from chicken dark meat: Chemical and functional properties of recovered proteins [J]. Process Biochemistry, 2010, 45(3): 375-381.
- [23] 张丽娜,沈慧星,罗永康.草鱼贮藏过程中导电特性变化规律的研究[J].淡水渔业,2010,40(5):59-62.
- [24] Songsaeng S, Sophanodora P, Kaewsritthong J, et al. Quality changes in oyster (*Crassostrea belcheri*) during frozen storage as affected by freezing and antioxidant [J]. Food Chemistry, 2010, 123(2): 286-290.
- [25] Vidacek S, Janci T. Differencing sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets frozen in different conditions by impedance measurements [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2012, 47(8): 1757-1764.