

冻干圣女果粉的水分吸附性质及玻璃化转变温度

刘 华¹, 钟业俊^{2,*}, 李资玲^{1,2}, 李积华^{2,3}, 林丽静³, 周 伟³

(1.江西科技师范大学生命科学学院, 江西 南昌 330013; 2.南昌大学 食品科学与技术国家重点实验室, 江西 南昌 330047; 3.中国热带农业科学院农产品加工研究所, 广东 湛江 524001)

摘 要: 根据吸附理论, 在水分活度为0.11~0.90范围内, 环境温度为25 °C条件下, 采用静态称质量法研究冻干圣女果粉的吸附和解吸等温线; 通过差示扫描量热仪 (differential scanning calorimeter, DSC) 测量不同水分含量下的玻璃态转变温度 (glass transition temperature, T_g), 并采用Gordon-Taylor方程对其进行了非线性拟合。结果表明: 冻干圣女果粉在25 °C条件下的吸附等温线和解吸等温线的类型都为J型, 属于III型等温线; 在水分活度为0.23~0.76范围内存在明显的解吸-吸附滞后现象, 属于H₃型等温线。GAB和Peleg模型都描述冻干圣女果粉的吸附特性。随着水分含量的增加, 冻干圣女果粉的 T_g 显著降低; Gordon-Taylor方程能够较好地拟合其玻璃化转变曲线。对比水分活度贮藏理论和玻璃化转变理论, 发现二者在预测冻干圣女果粉贮藏稳定性上存在一定的差异。

关键词: 圣女果; 吸附等温线; 玻璃化转变; 解吸等温线

Water Sorption Characteristics and Glass Transition Temperature of Freeze-Dried Cherry Tomatoes

LIU Hua¹, ZHONG Yejun^{2,*}, LI Ziling^{1,2}, LI Jihua^{2,3}, LIN Lijing³, ZHOU Wei³

(1. School of Life Science, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330013, China; 2. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China; 3. Agricultural Products Processing Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang 524001, China)

Abstract: Desorption and adsorption isotherms of freeze-dried cherry tomatoes were determined by gravimetric method at water activities ranging from 0.11 to 0.90 at 25 °C based on sorption theory. The glass transition temperatures at different moisture contents were measured by differential scanning calorimetry (DSC) and fitted with the Gordon-Taylor equation. Results indicated that the desorption and adsorption isotherms belonged to type III behavior and the hysteresis loop in the water activity range of 0.23 to 0.76 was type H₃ according to the classification method proposed by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). Both the GAB and Peleg models were suitable for fitting the moisture absorption isotherm of freeze-dried cherry tomatoes. The glass transition temperature of freeze-dried cherry tomatoes significantly decreased with increase in moisture content, and glass transition curve was well fitted with the Gordon-Taylor equation. A comparison of product stability criteria based on the concepts of water activity and glass transition temperature revealed that there was a considerable discrepancy in the temperature related to stability criteria predicted by the concepts of water activity and glass transition.

Key words: cherry tomatoes; adsorption isotherm; glass transition; desorption isotherm

中图分类号: TS255.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2015) 23-0095-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201523018

圣女果 (*Lycopersicon esculentum* Mill.), 又名樱桃番茄、小西红柿, 属于茄科番茄属中的小型果^[1-2]。其实具有色泽鲜艳、晶莹剔透、果肉多汁、风味甜美、酸甜适口等特点, 尤其是维生素含量远高于普通番茄, 其中VC的含量约为西瓜的10倍, 烟酸的含量则位居果蔬之首, 被联合国粮食及农业组织列为优先推广的“四大

水果”之一^[3-4]。圣女果不耐贮藏, 室温下一般只能保存5~7 d, 且圣女果具有产量高、成熟集中的特点, 市场上的鲜果难以一时售罄, 导致圣女果大量腐烂, 给果农带来巨大的经济损失^[5-6]。此外, Gärtner^[7]和Etminan^[8]等研究表明, 相比较直接食用新鲜番茄而言, 食用经过加工的番茄产品, 番茄中番茄红素更易于被血液和组织吸

收稿日期: 2015-02-06

基金项目: 农业部热带作物产品加工重点实验室开放基金项目 (KLTCPP-201404)

作者简介: 刘华 (1982—), 男, 讲师, 硕士, 研究方向为食品资源利用及开发。E-mail: liuhua9527@126.com

*通信作者: 钟业俊 (1982—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为食品科学与工程。E-mail: zhongyejun@126.com

收,有利于人体的健康^[9]。因此,把圣女果脱水干燥做成果干或者果粉成为其产业发展的一种重要的途径。

目前,圣女果的脱水干燥技术主要分为热风干燥、冷冻干燥、喷雾干燥和渗透脱水干燥^[9-10]。大多数脱水条件下得到的大部分产品都处于无定型状态,这主要是由于在干燥过程中,脱水速率太快,物质的结晶时间不够,严重影响了圣女果脱水干燥后的贮藏性质^[10]。因此,保持食品在加工和贮藏过程中的品质以及营养成分的稳定性,避免物料从玻璃态(稳定)向无定型态的转变对延长其保质时间具有重要的意义。

玻璃化转变是指非晶态的高聚物从玻璃态到橡胶态或从橡胶态到玻璃态的转变过程,其特征温度称为玻璃化转变温度(glass transition temperature, T_g)。当食品在玻璃态下贮藏时,可使其保持较长时间的稳定状态,这主要是由于物质低于玻璃化转变温度时,体系内的分子受到外界束缚,排列齐整,分子流动性较低,基本不与外界发生反应^[11]。近年来,通过测定物质的玻璃态转化温度和水分吸附等温线来评估和指导食品贮藏稳定性及货架期越来越受到了国内外学者的重视^[12-14]。然而对于圣女果及其制品的相关研究却鲜见报道,因此获得圣女果制品的水分吸附等温线和玻璃化转变温度对指导圣女果制品的加工生产及贮藏具有一定的意义。

本实验研究了冻干圣女果在25℃条件下的吸附等温线、解吸等温线及不同水分含量下的玻璃化转变温度;通过线性回归方法,选择了5种常见的数学模型对等温线进行拟合,获得了冻干圣女果粉的最优吸附模型;采用Gordon-Taylor方程,拟合分析了冻干圣女果粉的玻璃化转变曲线;为圣女果的干燥和贮藏条件的选择提供理论支持。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

圣女果(产地:海南陵水,品种:台蔬8号)。

氯化锂、醋酸钾、氯化镁、碳酸钾、硝酸镁、亚硝酸钠、氯化钠、氯化钾、硝酸钾均为分析纯, P_2O_5 、麝香草酚均为化学纯 国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

ALPHA 1-2LD PLUS型冻干机 德国Marin Christ公司; JHS-400型恒温恒湿培养箱 上海禾颖仪器仪表制造有限公司; ME204型分析天平、HR83水分测定仪梅特勒-托利多(中国)有限公司; DGG-9140B电热恒温鼓风干燥箱 上海森信实验仪器有限公司; Revco ULT-1786-6V型超低温冰箱 美国Thermo公司; CT410旋风式样品磨 丹麦FOSS公司。

1.2 方法

1.2.1 冻干圣女果的制备

将新鲜圣女果从4℃冰箱中取出,经挑选、去蒂、清洗、切片(厚薄均匀,厚度约为0.3 cm)等步骤后,先将圣女果切片放入-80℃冰箱内进行预冻,预冻完成后,在放入冷冻干燥机内进行冻干(冷阱温度-56℃,真空度8 Pa,干燥时间至少72 h)。将冻干好圣女果片粉碎,过80目筛,备用。

1.2.2 水分吸附实验

采用 P_2O_5 粉末将冻干粉碎后的样品脱水至5%以下(采用快速水分测定仪不定期进行测量),然后将10份1.0 g已脱水的样品放入,分别放入已干燥至恒质量的称量瓶中,再分别放入10支装有不同饱和盐溶液的干燥器上部,将称量瓶的盖子打开并保留在称量瓶上,密封干燥器后,放入25℃的恒温恒湿培养箱中进行平衡^[15]。水分活度(water activity, a_w)较高的干燥器内需置入约0.2 g的麝香草酚,以抑制霉菌的生长。定期测定样品的质量,待样品吸附达到平衡后,一部分样品采用称质量法测定样品的含水率,另一部分样品密封后,用于进一步实验。实验平行3次。

表1 25℃条件下饱和盐溶液的水分活度
Table 1 Water activity of saturated salt solution at 25℃

饱和溶液	LiCl	CH ₃ COOK	MgCl ₂	K ₂ CO ₃	Mg(NO ₃) ₂	NaBr	CuCl ₂	NaCl	KCl	BaCl ₂
a_w	0.11	0.23	0.33	0.43	0.53	0.58	0.67	0.76	0.84	0.90

1.2.3 水分解吸实验

将一定量已制备好的冻干圣女果样品置于具塞广口瓶中,用加湿器将湿空气通过广口瓶上端的导管加入到广口瓶内,每隔10 min翻滚一次,多次重复。然后将样品置于10℃,相对湿度为90%的恒温恒湿培养箱中,定时翻滚,放置24 h后,取出密封,再置于4℃条件下平衡24 h,获得调湿的样品^[16-17]。参照1.2.2节中的步骤,将已调湿的样品置于10个装有不同饱和盐溶液的干燥器中,待样品吸附达到平衡后,采用称质量法测定样品的含水率,实验平行3次。

1.2.4 玻璃化转变温度测定

样品在吸附平衡后,用于测量其 T_g 。对于 $a_w > 0.9$ 的样品,先称取一定质量的样品粉末,放于培养皿中,取适量的蒸馏水加入样品中,将称量瓶密封后放于干燥器中,而后置于冷藏柜中(4℃左右)平衡24 h。平衡后,一部分样品采用水分活度测定仪测定 a_w ,另取10~15 mg为进一步实验所用。

采用TA-Q2000型差示扫描量热仪(differential scanning calorimeter, DSC)测量样品的玻璃化转变温度。首先采用标准品钢(熔点为156.6℃,熔融热焓为28.44 kJ/kg)和蒸馏水(熔点为0℃,熔融热焓为

334 kJ/kg) 对仪器进行温度和灵敏度校准。样品经过称质量后密封于坩埚内, 然后放于DSC样品池内, 以空坩埚作为对照^[18]。

1.2.4.1 含非冻结水样品的玻璃化转变测定

将已吸附平衡好的样品, 取10~15 mg密封于坩埚中, 放入DSC样品池内。DSC设置的升温程序为: 先以10 °C/min的速率冷却至-100 °C, 平衡10 min; 再以10 °C/min的速率升温至50 °C, 平衡10 min; 然后再以10 °C/min的速率冷却至-100 °C, 平衡10 min; 最后以10 °C/min的速率升温至50 °C^[19]。通过Universal Analysis软件分析所得热流密度曲线, 计算出每组样品的 T_g 。

1.2.4.2 含冻结水样品的玻璃态转变测定

对于含冻结水样品, 为了获得准确的最大冷冻浓缩溶液时的 T_g , 需进行退火处理^[20]。根据Syamaladevi等^[21]的测试方法, 先根据1.2.4.1节的程序初步测定样品的热流曲线, 并获得表观玻璃化转变温度(T_{ga})及冻结终点温度(T_m'), 再进行退火程序处理。本实验采用的退火程序为: 样品以10 °C/min的速率降到-100 °C, 再以10 °C/min的速率升到($T_m'-1$) °C, 并在此保持30 min; 然后再以10 °C/min的速率从($T_m'-1$) °C降至-100 °C, 平衡10 min, 在以10 °C/min的速率升至50 °C, 分析热流曲线, 计算出每组样品的 T_g ^[22]。

1.2.5 模型拟合

选取5种常用的吸湿等温线模型(表2)对冻干圣女果在25 °C条件下的水分吸附过程进行拟合, 求得各模型中的常数项^[23]。采用决定系数(R^2)、残差平方和(residual sum of squares, SSE)和均方根误差(root mean square error, RMSE)来检验5个模型的拟合效果^[24]。

食品中的 T_g 一般采用Gordon-Taylor方程进行拟合, 见方程式(1)。

$$T_{gm} = \frac{X_s(T_{gs}) + kX_w(T_{gw})}{X_s + kX_w} \quad (1)$$

式中: X_s 为固体质量分数/%(以湿质量计); X_w 为水分质量分数/%(以湿质量计); T_{gm} 为混合物的玻璃态转变温度/°C; T_{gs} 为固体物质的玻璃态转变温度/°C; T_{gw} 为水的玻璃态转变温度(-135 °C); k 为Gordon-Taylor方程参数^[25]。

表2 吸湿等温线的拟合模型

模型	模型表达式
Mod-BET ^[23]	$X_{eq} = X_0 C a_w / [(1 - a_w)(1 - a_w + C a_w)]$
Henderson	$X_{eq} = [-\ln(1 - a_w) A]^{1/B}$
Oswin	$X_{eq} = A (a_w / (1 - a_w))^B$
GAB	$X_{eq} = X_0 C K a_w^C / (1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)$
Peleg	$X_{eq} = A a_w^C + B a_w^D$

注: Mod-BET为修正Brunauer-Emmett-Teller模型, 式中: $X_0 = A + Bt$, 为单层水分含量/%; GAB为Guggenheim-Anderson-de Boer模型; X_{eq} 为平衡含水率/%; A 、 B 、 C 、 K 、 D 为各模型常数^[23]。

1.3 数据分析

采用Matlab 7.0和Origin 8.5软件对上述实验结果进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 吸附-解吸等温线

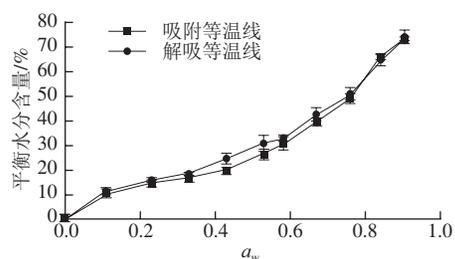


图1 冻干圣女果的吸附与解吸等温线及滞后现象

Fig.1 Adsorption and desorption isotherms of freeze-dried cherry tomatoes showing hysteresis

冻干圣女果粉在25 °C条件下的吸附-解吸等温线如图1所示。2种等温线中平衡水分含量都随着水分活度的增加逐渐增大, 在低水分活度区间上升幅度不大, 在高水分活度区间上升幅度显著增大。根据国际理论和应用化学联合会(International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC)的分类, 圣女果冻干粉的吸附等温线形状为J型, 属于III型等温线^[26]。表明圣女果粉颗粒中存在大量微孔, 因而外表面相对较小, 水分吸附能力主要受到微孔结构稳定性的影响, 这与Goula^[19]和Demarchi^[27]等研究的番茄果酱所观察到的结果一致。在水分活度为0.23~0.76范围内存在明显的解吸-吸附滞后现象, 相同水分含量下, 解吸等温线的平衡水分含量要大于吸附等温线。由于两条等温线之间呈现一定的角度, 介于垂直和水平之间, 根据IUPAC的规定, 可归属于H₃型。

2.2 等温线的模型拟合

表3 冻干圣女果吸附-解吸等温线的统计学参数与模型参数

Table 3 Model parameters and statistical coefficients for adsorption and desorption isotherms of freeze-dried cherry tomatoes

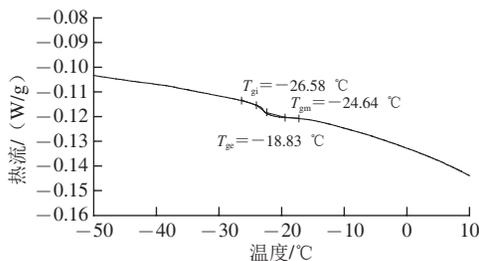
等温线	拟合模型	A	B	C	D	X_0	K	R^2	SSE	RMSE
吸附	Henderson	3.331	1.178					0.981 4	0.006 2	0.024 6
	Oswin	0.262	0.478					0.983 5	0.005 8	0.026 8
	Peleg	0.758	0.188	3.141	0.251			0.996 3	0.001 6	0.009 8
	Mod-BET			234.283		0.091		0.946 3	0.032 7	0.053 2
	GAB			5.964		0.143	0.843	0.988 9	0.003 5	0.022 0
解吸	Henderson	3.592	1.340					0.989 8	0.002 3	0.017 1
	Oswin	0.287	0.434					0.987 9	0.003 9	0.022 1
	Peleg	0.609	0.295	3.256	0.456			0.990 9	0.002 9	0.023 4
	Mod-BET			325.172		0.092		0.932 7	0.060 1	0.087 8
	GAB			7.052		0.164	0.809	0.992 7	0.002 4	0.017 2

采用5种常见的数学模型,对实验所得关于 (X_w, a_w) 的数据系列,进行非线性回归统计分析,结果如表3所示。根据统计学参数和表达模式参数等因素进行综合分析,吸附等温线模拟的拟合效果依次为: Peleg>GAB>Oswin>Henderson>Mod-BET; 解吸等温线各模型的拟合效果依次为: GAB>Peleg>Henderson>Oswin>Mod-BET; 由于GAB模型能够拟合获得圣女果粉的单层水分含量值。综合考虑,描述圣女果粉水分吸附特性的适宜模型为GAB模型。

单层水分含量值 (X_0) 在食品贮藏和劣变过程中是一个重要的参数^[20]。Mod-BET和GAB模型都能拟合得到 X_0 值。从2个模型的拟合结果得出,GAB模型的拟合效果优于Mod-BET模型,这与Peng Guilan等^[28]的报道相一致。利用GAB模型获得圣女果粉的吸附和解吸 X_0 分别为14.3%和16.4%(以干质量计)。

2.3 玻璃态转变温度的测定及模型拟合

玻璃化转变是非晶态高分子材料固有的性质,是高聚物无定形部分从冻结状态到解冻状态的一种松弛现象,属于一种二级相变,其变化过程受到热动力控制,一般发生在一个温度区间内而不是在某个特定的单一温度处^[18]。在测量过程中,体系发生玻璃化转变时,吸热曲线会出现一个“Z字型台阶”,此时的温度就是 T_g ,其通常出现在熔融峰之前^[29],如图2所示。



T_{gi} : 玻璃化转变的起始温度; T_{gm} : 玻璃化转变的中点温度; T_{go} : 外推起始温度。

图2 含非冻结水的圣女果粉的DSC曲线及 T_g 的确定

Fig.2 A typical DSC thermogram to determine glass transition of freeze-dried cherry tomatoes for plasticized sample

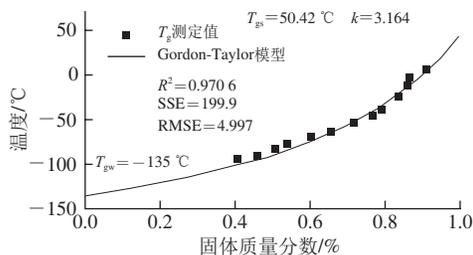


图3 冻干圣女果的玻璃化转变温度与固体含量之间的关系

Fig.3 Relationship between glass transition temperature and water content of freeze-dried cherry tomatoes

不同水分含量样品的 T_g 如图3所示,可以看出,随着水分含量的增加,冻干圣女果粉的 T_g 显著降低;当水分含量从14.23%增加到20.93%时,样品的 T_g 从 -12.32 °C降到了 -40.18 °C;这主要是由于水分子的流动性较强,在无定形基质中比较容易活动,从而提供分子链运动所需的空间,因此对物料具有较好的塑化作用^[30]。此外,圣女果粉中含有蛋白质、脂类及其他碳水化合物,此类物质含有大量的羟基,可以在分子间或分子内形成氢键作用,使得分子的结构刚性较大;而水作为一种极性小分子,能够与分子上的极性基团形成相互作用,降低了圣女果粉内分子之间的氢键作用,导致其刚性下降,柔性增加,从而使得 T_g 发生显著的降低^[31]。

采用Gordon-Taylor模型对实验所得的数据进行非线性拟合,拟合的曲线及模型参数如图3所示。从图中可以看出:拟合的 $R^2=0.9706$, $RMSE=4.997$,说明Gordon-Taylor模型对实验数据的拟合程度较好。

2.4 基于 a_w 和 T_g 理论的贮藏稳定性

水分活度和玻璃化转变温度都已被广泛用于研究和评估食品的贮藏稳定性,根据水分活度理论,食品在其单分子层含水率以下贮藏是非常稳定的,而玻璃化转变理论则认为食品在其玻璃化转变温度(或以下)贮藏是稳定的。然而,以上2种保藏理论都存在各自的缺陷,例如,水分活度贮藏理论不能够应用于预测冷冻食品的理化性质的变化;而玻璃化转变理论在应用于预测微生物生长和非扩散限制化学反应时,其实用性明显较低和不可靠^[14]。因此,进一步研究水分活度、玻璃化转变和贮藏稳定性三者之间的相互关系具有一定必要性。

冻干圣女果粉的水分吸附等温线和玻璃化转变曲线如图4所示。

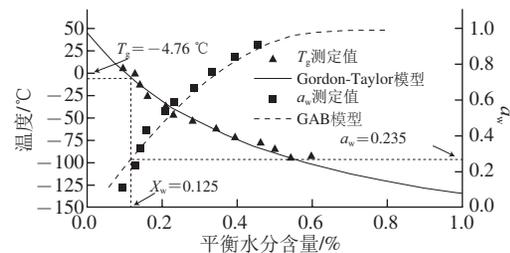


图4 玻璃化转变温度、水分活度和平衡水分含量之间的关系图谱

Fig.4 Variation in glass transition temperature and water activity with moisture content of freeze-dried cherry tomatoes

由图4得出吸附模型和玻璃化转变模型所对应的临界参数,以及由此计算得到的对应贮藏参数。基于水分活度贮藏理论,当物料的贮藏温度为 25 °C时,根据GAB模型拟合的吸附等温线可以得到样品的单分子层含水率为14.30%(以干质量计,表2),换算成湿质量为12.51%,此时,图谱所对应的 a_w 为0.235,从玻璃化转变曲线所获得的 T_g 为 -4.76 °C。

基于玻璃化转变理论时,当冻干圣女果粉的 T_g 为25℃时,根据Gordon-Taylor曲线计算得到其对应的水分含量为4.78% (以湿质量计),通过GAB模型得到其对应的 a_w 为0.047,这一结果远低于通过吸附等温线拟合得到的 X_0 值及 a_w 值。

结合图4、Gordon-Taylor模型和GAB模型可知,当含水率一定时,由玻璃化转变理论估计的 T_g 值会远远小于水分活度理论下的安全贮藏温度值^[31]。这与Shi Qirong^[14]、Sablani^[20]和Fabra^[32]等研究的结果一致。这可能是由于圣女果在冻干后含有较高含量的多糖和酸类物质,这些会导致其本身玻璃化转变温度的降低^[14,18]。

综上所述,水分活度贮藏理论对 T_g 的预测值会低于安全贮藏温度,而玻璃化转变理论对 a_w 的预测也会低于其安全 a_w 值。因此,二者在预测冻干圣女果粉的贮藏稳定性上有一定的差异。

3 结论

冻干圣女果粉在25℃条件下的吸附等温线和解吸等温线的类型都为J型,属于III型等温线;在 a_w 为0.23~0.76范围内存在明显的解吸-吸附滞后现象,属于H₃型。通过5种常见的数学模型拟合结果比较,发现GAB和Peleg模型都能较好地对实验结果进行拟合;此外,利用GAB模型还获得了圣女果粉的吸附和解吸 X_0 ,分别为14.3%和16.4% (以干质量计)。

冻干圣女果粉的 T_g 随着水分含量的增加而显著降低,这是由于水分子的塑化作用及减弱了原物料内部的氢键作用。利用Gordon-Taylor方程对其 T_g 进行非线性拟合,发现Gordon-Taylor模型能够较好地对实验结果进行拟合。基于水分活度贮藏理论,对 T_g 的预测值会低于安全贮藏温度;同样地,基于玻璃化转变理论,对 a_w 的预测也会低于其安全 a_w 值。因此,应结合这二者理论,综合性地对冻干圣女果粉的加工、贮藏及包装进行理论指导。

参考文献:

- LU Yinglin, XU Yangchun, SHEN Qirong, et al. Effects of different nitrogen forms on the growth and cytokinin content in xylem sap of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) seedlings[J]. Plant and Soil, 2009, 315(1/2): 67-77.
- JORGE A, ALMEIDA D M, CANTERI M H G, et al. Evaluation of the chemical composition and colour in long-life tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.) dehydrated by combined drying methods[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 49(9): 2001-2007.
- 蒋红芝, 义崇宽, 林小菲, 等. 樱桃番茄干燥工艺的研究[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(4): 100-104.
- SLIMESTAD R, VERHEUL M. Review of flavonoids and other phenolics from fruits of different tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(8): 1255-1270.
- 魏岩梅, 陈晓燕. 圣女果气调保鲜包装技术研究[J]. 中国包装工业, 2006(12): 58-60.
- 王庆惠, 李忠新, 杨劲松, 等. 圣女果分段式变温变湿热风干燥特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 271-276.
- GÄRTNER C, STAHL W, SIES H. Lycopene is more bioavailable from tomato paste than from fresh tomatoes[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1997, 66(1): 116-122.
- ETMINAN M, TAKKOUCHE B, CAAMAÑO-ISORNA F. The role of tomato products and lycopene in the prevention of prostate cancer: a meta-analysis of observational studies[J]. Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention, 2004, 13(3): 340-345.
- 范君. 圣女果渗透脱水及渗后热风干燥特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- TELIS V R N, SOBRAL P J A. Glass transitions for freeze-dried and air-dried tomato[J]. Food Research International, 2002, 35(5): 435-443.
- GUIZANI N, AL-SAIDI G S, RAHMAN M S, et al. State diagram of dates: glass transition, freezing curve and maximal-freeze-concentration condition[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99(1): 92-97.
- SMAN R G M, MEINDERS M B J. Prediction of the state diagram of starch water mixtures using the Flory-Huggins free volume theory[J]. Soft Matter, 2011, 7(2): 429-442.
- 胡庆兰, 阙婷婷, 任西营, 等. 玻璃化转变在食品贮藏中的应用研究进展[J]. 中国酿造, 2013, 32(8): 1-4.
- SHI Qirong, WANG Xihai, ZHAO Ya, et al. Glass transition and state diagram for freeze-dried *Agaricus bisporus*[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(4): 667-674.
- WANG Xihai, SHI Qirong, ZHAO Ya, et al. Moisture adsorption isotherms and heat of sorption of *Agaricus bisporus*[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2013, 37(4): 299-305.
- 刘焕龙. 饲料的吸湿解吸平衡规律和颗粒饲料冷却的模型拟合[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- 王明洁, 吴小丽, 袁建, 等. 小麦粉水分的吸附与解吸特性[J]. 食品科学, 2012, 33(19): 45-51.
- TONON R V, BARONI A F, BRABET C, et al. Water sorption and glass transition temperature of spray dried açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 94(3): 215-221.
- GOULA A M, KARAPANTSIOS T D, ACHILIAS D S, et al. Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(1): 73-83.
- SABLANI S S, SYAMALADEVI R M, SWANSON B G. A review of methods, data and applications of state diagrams of food systems[J]. Food Engineering Reviews, 2010, 2(3): 168-203.
- SYAMALADEVI R M, SABLANI S S, TANG J, et al. State diagram and water adsorption isotherm of raspberry (*Rubus idaeus*) [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(3): 460-467.
- BAI Y, RAHMAN M S, PERERA C O, et al. State diagram of apple slices: glass transition and freezing curves[J]. Food Research International, 2001, 34(2): 89-95.
- POLATOGLU B, BESE A V, KAYA M, et al. Moisture adsorption isotherms and thermodynamic properties of sucuk (Turkish dry-fermented sausage)[J]. Food and Bioprocess Processing, 2011, 89(4): 449-456.
- YANG Zhao, ZHU Enlong, ZHU Zongsheng. Moisture sorption isotherms and net isosteric heats of sorption of green soybean[J]. International Journal of Food Engineering, 2012, 8(3): 1-16.
- BERNSTEIN A, NOREÑA C P Z. Study of thermodynamic, structural, and quality properties of Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) during drying[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(1): 148-160.
- 王云阳, 张丽, 王绍金, 等. 澳洲坚果果仁粉水分解吸-吸附等温线的测定与分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 288-292.
- DEMARCHI S M, QUINTERO RUIZ N A, MICHELIS A, et al. Sorption characteristics of rosehip, apple and tomato pulp formulations as determined by gravimetric and hygroscopic methods[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 52(1): 21-26.
- PENG Guilan, CHEN Xiaoguang, WU Wenfu, et al. Modeling of water sorption isotherm for corn starch[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(2): 562-567.
- 赵金红. 渗透脱水-冻结与玻璃化贮藏对芒果品质的影响及动力学模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- PITTIA P, SACCHETTI G. Antiplasticization effect of water in amorphous foods. A review[J]. Food Chemistry, 2008, 106(4): 1417-1427.
- 石启龙, 赵亚, 林雯雯, 等. 添加剂提高燕麦片贮藏稳定性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 278-285.
- FABRA M J, TALENS P, MORAGA G, et al. Sorption isotherm and state diagram of grapefruit as a tool to improve product processing and stability[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(1): 52-58.