

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.033

芒果玻璃化转变与状态图研究*

赵金红^{1,2} 朱明慧^{1,2} 温馨^{1,2} 姜云栋^{1,2} 康佳琪^{1,2} 倪元颖^{1,2}

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学国家果蔬加工工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 研究了 25℃ 下芒果的吸附等温线, 实验数据采用 GAB 模型进行非线性拟合, 结果表明芒果的吸附等温线呈“J”型, 其单分子层干基含水率为 0.107 g/g。芒果的状态图由冻结曲线、玻璃化转变温度曲线和最大冻结浓缩状态组成, 其中冻结温度和玻璃化转变温度由差示扫描量热仪(DSC)测量得到。冻结温度和玻璃化转变温度的实验数据, 分别采用 Clausius - Clapeyron 方程和 Gordon - Taylor 方程进行非线性拟合。实验结果显示, 最大冻结浓缩状态时的固形物湿基质量分数为 84%, 在此状态下的玻璃化转变温度为 -52.9℃。状态图的建立能够预测芒果贮藏过程的稳定性, 并且能够提供最适干燥或冷冻加工条件。

关键词: 芒果 玻璃化转变 状态图 差示热量扫描仪

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)04-0226-07

Glass Transition and State Diagram of Mango

Zhao Jinhong^{1,2} Zhu Minghui^{1,2} Wen Xin^{1,2} Jiang Yundong^{1,2} Kang Jiaqi^{1,2} Ni Yuanying^{1,2}

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. National Engineering Research Center for Fruit and Vegetable Processing, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Sorption isotherms of freeze-dried mango (variety Tainong No. 1) were determined at 25℃ and the data were modeled by GAB model. A J-shaped sorption isotherm of mango was presented and the GAB monolayer moisture contents were observed to be 0.107 g/g. The unfreezable and freezable water contained in freeze-dried mango was examined to develop the state diagram. The state diagram of mango was developed using glass transition line (glass transition temperature vs solids content), freezing curve (initial freezing point vs solids content) and maximal-freeze-concentration condition. Freezing points and glass transition temperature were measured by differential scanning calorimetry (DSC) as a function of water content. Freezing points were fitted according to the Clausius - Clapeyron model and the parameter E was determined as 0.071 by using non-linear optimization technique. Glass transition was fitted to Gordon - Taylor model. The constants T_{gs} and k were estimated as 15.7℃ and 4.42, respectively. Glass transition increased with the increase of solids content, which was due to the plasticizing effect of water in mango solids. Freezing points decreased as total solids content increased. The maximal-freeze-concentration condition was calculated to be at a solid content of 84% with characteristic temperature of end point of freezing (T'_m) being -32.8℃ and characteristic glass transition temperature (T'_g) being -52.9℃. These characteristics revealed that the quantities of unfreezable water were 0.16 g/g indicating the amount of reactive water. The state diagram of mango can be used in evaluating the storage stability as a function of temperature and moisture content. Moreover, it can also be used to design drying and freezing processes.

Key words: Mango Glass transition State diagram Differential scanning calorimetry

收稿日期: 2014-06-17 修回日期: 2014-07-25

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD39B00)

作者简介: 赵金红, 博士生, 主要从事低温果蔬加工研究, E-mail: oriental123@126.com

通讯作者: 倪元颖, 教授, 博士生导师, 主要从事果蔬加工、天然产物提取与功能食品开发研究, E-mail: niyuanyang@163.com

引言

新鲜芒果含有大量水分和糖分,采后极易腐烂变质,贮藏期较短。芒果中所含的生物活性物质具有抗氧化的作用^[1],可以预防心血管病和癌症等疾病^[2]。然而,在加工或贮藏过程中,这些生物活性物质可能会出现损失。目前,国内外通常采用干燥或冷冻技术保藏芒果,但是在这2种加工过程中,容易形成无定形态^[3],导致芒果贮藏时的不稳定性。因此,在加工或贮藏过程中,需要保持食品的品质以及营养成分的稳定性,避免物料从玻璃态(稳定)向橡胶态转变。

芒果的状态图可以用来预测食品贮藏时的稳定性,并且能够为芒果的冷冻和干燥加工提供适合的温度和湿度条件^[4-6]。状态图描述了食品不同状态与物料含水率和温度之间的关系。状态图包括冻结曲线、玻璃化转变温度曲线和最大冻结浓缩状态,一般使用差示扫描量热法(DSC)进行实验数据的测量。近期,Rahman将状态图进行了更新^[7-8],增加了较多的微观区域(Micro-regions),并包含了新的术语。

玻璃化转变温度的概念已经广泛应用在聚合物、材料学、医药和食品科学领域。玻璃化转变是二级相变,物质不放出潜热,没有相变发生,其宏观上在物料的物理、力学、电学、热以及其他性质上,表现为一种不连续性或变化^[5,7,9]。当食品在玻璃化转变温度以下贮藏时,体系的分子扩散速率较小。相反,当贮藏温度大于玻璃化转变温度时,体系处于橡胶态,一些分子的流动性增大,导致食品中一些不良反应的发生^[10-11]。

由于食品中的成分较复杂,因此与纯溶液相比,关于食品状态图的研究相对较少。据文献报道,完整状态图(包括玻璃化转变温度曲线和冻结曲线)目前只应用在少数几种水果中^[5,9,12-16],关于芒果完整状态图的研究,国内外至今未见报道。

本文通过研究玻璃化转变温度曲线(玻璃化转变温度与固形物质量分数的关系)、冻结曲线(初始冻结温度与固形物质量分数的关系)和最大冻结浓缩状态(最大冻结浓缩状态下的冻结终点温度(T'_m))、玻璃化转变温度(T'_g)和固形物湿基质量分数(X'_s)),建立芒果的状态图,并研究芒果的吸附等温线。

1 材料与amp;方法

1.1 原料与试剂

新鲜芒果:购买于北京金五星批发市场,挑选成熟度一致(完熟期)、无机械损伤的果实备用,品种

为台农一号。

实验所用试剂:氯化锂、醋酸钾、六水氯化镁、碳酸钾、六水硝酸镁、亚硝酸钠、氯化钠、氯化钾、硝酸钾、五氧化二磷,均为分析纯。

1.2 仪器与设备

DSC-60型差示扫描量热仪,日本岛津公司;LGJ-12型冷冻干燥机,北京松源华兴科技发展有限公司;LRH-250F型恒温试验箱,深圳市澳德玛电子科技有限公司;电热鼓风干燥箱,南京腾飞干燥设备有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

新鲜芒果的含水率采用直接干燥法,在110℃下干燥24h至质量恒定。

将样品切割成1cm×1cm×0.5cm的芒果丁,然后将样品在-60℃下完全冻结,再进行冷冻干燥处理。冻干条件为压力10Pa,温度-45℃,持续时间48h。将冻干后的样品打成粉末,在底部装有P₂O₅的干燥器内静置14d,使其达到近似完全干燥的样品。为了获得0.12~0.94不同水分活度的样品,称取冻干后的芒果粉末3~5mg于DSC铝盘内(敞口),接着将其放置在装有不同饱和盐溶液的密闭容器中,然后再置于温度(25±2)℃的恒温箱中平衡24h^[9,17]。25℃时,饱和盐溶液氯化锂、醋酸钾、六水氯化镁、碳酸钾、六水硝酸镁、亚硝酸钠、氯化钠、氯化钾和硝酸钾的平衡相对湿度分别为0.12、0.23、0.33、0.44、0.52、0.61、0.75、0.85和0.94^[15]。样品干基含水率可以根据样品在平衡前后的质量差计算得到。

为了得到水分活度大于0.94的样品,利用注射器将蒸馏水(预先计算好)直接加入到装有芒果粉末的称量瓶中,然后将称量瓶密封放入干燥器中,在4℃下平衡24h^[16,18]。

1.3.2 DSC测量

采用DSC-60型差示扫描量热仪测量芒果玻璃化转变温度。首先通过钢(熔点156.5℃,ΔH_m=28.5kJ/kg)和蒸馏水(熔点0℃,ΔH_m=334kJ/kg)来校正仪器的温度和热量,由于分析样品时用到液氮进行冷却,因此需要使用N₂(300mL/min)通入“dry”入口。样品(3~5mg)使用密封铝盘进行压样,空的铝盘作为参照。

1.3.2.1 含非冻结水样品的玻璃化转变

参照Shi等^[18]的方法稍作修改,采用DSC双扫描程序测量含非冻结水样品的玻璃化转变温度T_g:所有样品以5℃/min的速度从室温(25℃)降至-90℃,保持10min,然后以5℃/min的速度升温至

60℃。再重复以上步骤,从60℃以5℃/min的速度降至-90℃,然后再以5℃/min的速度升温至60℃。采用双扫描程序的目的是为了减少样品在第1次扫描中释放的焓值,通过第2次扫描后,能够比较清楚地观察到玻璃化转变的台阶^[18-20]。

1.3.2.2 含冻结水样品的玻璃化转变

含有冻结水的样品,其在发生玻璃化转变和生成冰晶的过程较复杂。首先需要采用DSC扫描程序初步了解芒果的热流曲线,并找到 T_g 和冻结终点温度(T'_m)的位置。初步扫描程序为:样品从室温以5℃/min的速度降至-90℃,保持10 min,然后再以5℃/min的速度从-90℃升至40℃^[5]。

然后再进一步采用在($T'_m - 1$)℃退火30 min的处理方法测量玻璃化转变温度,目的是为了达到最大冻结浓缩状态以及避免反玻璃化现象的出现,同时也为了使玻璃化转变的台阶增大,提高测量的准确性。退火程序为:样品从室温以5℃/min的速度降至-90℃,再以5℃/min的速度升至 $T'_m - 1$,保持30 min;然后以5℃/min的速度从 $T'_m - 1$ 降至-90℃,再以5℃/min的速度升至40℃。这与文献^[5]、^[9]、^[21]采用的测量程序相似。

冻结温度(T_f)定义为冰晶熔融吸热峰的峰值温度,而冻结终点或者冰晶熔融初始温度(T'_m)由冰晶熔融吸热曲线的基线与吸热曲线左边的交点得到^[9]。

1.3.3 水分活度与热转变的拟合

水分活度和干基含水率的关系可以用Guggenheim - Anderson-de Boer (GAB)模型表达,即

$$M_w = \frac{X_m C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \quad (1)$$

式中 M_w ——物料的平衡干基含水率, g/g

a_w ——物料的水分活度

X_m ——单分子层吸附饱和干基含水率, g/g

C, K ——热力学比例常数(方程参数)

食品的玻璃化转变温度可以用Gordon - Taylor方程模拟^[15, 19],即

$$T_{gm} = \frac{X_s T_{gs} + k X_w T_{gw}}{X_s + k X_w} \quad (2)$$

式中 X_s ——固形物湿基质量分数, %

X_w ——湿基含水率, g/g

T_{gm} ——混合物的玻璃化转变温度, °C

T_{gs} ——固体的玻璃化转变温度, °C

T_{gw} ——水的玻璃化转变温度, °C, 取-135℃^[15]

k ——Gordon - Taylor 参数

食品的冻结温度随含水率的变化可以采用Clausius - Clapeyron方程模拟^[16, 20],即

$$\Delta = T_w - T_F = -\frac{\beta}{\lambda_w} \ln \frac{1 - X_s}{1 - X_s + E X_s} \quad (3)$$

其中

$$E = \lambda_w / \lambda_s$$

式中 Δ ——冻结温度降低值, °C

T_F ——样品的冻结温度, °C

T_w ——水的冻结温度, °C

β ——水的冻结常数, 取1860 kg·K/(kg·mol)

λ_w ——水的分子质量

λ_s ——固体的分子质量

E ——水与固体的分子质量比

1.3.4 数据处理

所有指标重复3次测定,数据为测定的平均值。采用Origin 8.6对实验数据进行作图和非线性回归分析。

2 结果与讨论

2.1 芒果吸附等温线

实验测得新鲜芒果的湿基含水率为(0.86 ± 0.01)g/g。图1为芒果粉末在25℃的吸附等温线,吸附实验数据采用GAB模型进行非线性拟合,拟合后得到的模型参数和相关系数见表1。从 R^2 可知,实验数据拟合程度较好。根据水分活度的概念,食品在单分子层含水率或水分活度最稳定^[7]。因此,在一定的温度下保藏食品时,可用 X_m 作为安全水分活度的衡量标准。表1中还列出了其他水果的 X_m 、模型参数和相关系数^[15-16, 19]。

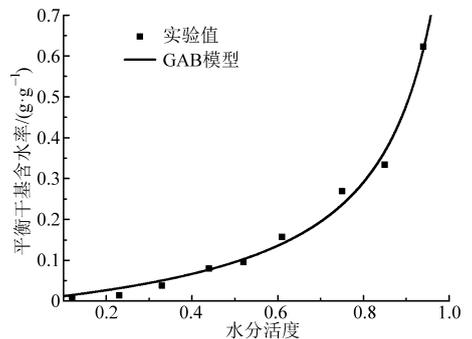


图1 芒果的吸附等温线

Fig.1 Sorption isotherm of mango

表1 吸附实验数据的模型拟合

Tab.1 Model fitting for sorption experimental data

模型(GAB)	冻干	冻干	冻干	冻干
参数	苹果 ^[15]	菠萝 ^[19]	猕猴桃 ^[16]	芒果
X_m	0.112	7.190	0.459	0.107
C	2.093	0.012	0.265	1.169
K	0.985	0.815	0.827	0.904
R^2	0.994	0.991	0.987	0.987

由于芒果含糖较高,还含有少量的聚合物,因此芒果的吸附等温线呈“J”型,这与Telis等和Wang

等的实验结果相似^[16,19]。平衡干基含水率随着水分活度(a_w)增大而增大,在 a_w 较低时,芒果吸附的干基含水率较小;但当 a_w 大于0.52时,吸附的干基含水率明显增大。

2.2 含有非冻结水样品的玻璃化转变

图2是芒果(湿基含水率0.074 g/g)发生玻璃化转变附近区域的部分DSC热流图,玻璃化转变温度的初始点 T_{gi} 和终点 T_{ge} 分别由沿曲线边做切线和基线获得。当芒果含水率较低时(湿基含水率小于0.140 g/g),从样品的热流图可以看出,仅发生玻璃化转变,并没有熔融峰出现,此时的玻璃化转变被认为是含有非冻结水样品的玻璃化转变,如图2所示。一般可用是否出现熔融峰来判断样品是含有非冻结水还是冻结水。这与文献[6]、[9]、[18]、[21]的热流曲线图结果相似。

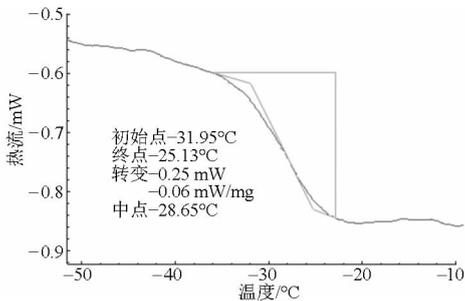


图2 芒果含有非冻结水的DSC热流图的玻璃化转变温度测量

Fig. 2 Glass transition temperatures determination on DSC thermogram of mango containing unfrozen water

食品的玻璃化转变温度主要与含水率、食品中溶质的成分和分子量相关^[22]。表2中列出了芒果湿基含水率从0.010 g/g到0.140 g/g(a_w 从0.12到0.61)的玻璃化转变温度,分别为初始点(T_{gi})、中点(T_{gm})和终点(T_{ge}),本研究采用 T_{gm} 为芒果的玻璃化转变温度。从表2中可以看出,含水率对芒果玻璃化转变温度的影响,随着湿基含水率从0.010 g/g增大到0.140 g/g,芒果的 T_{gm} 从18.9°C降低至-38.6°C。芒果玻璃化转变温度随着含水率增大而

表2 含有非冻结水芒果的玻璃化转变温度

Tab. 2 Glass transition temperature of mango with unfreezable water

湿基含水率/ ($g \cdot g^{-1}$)	固形物湿基 质量分数/%	$T_{gi}/^{\circ}C$	$T_{gm}/^{\circ}C$	$T_{ge}/^{\circ}C$
0.010	99.0	15.8	18.9	22.0
0.014	98.6	-5.1	1.3	7.1
0.036	96.4	-11.3	-8.3	-5.3
0.074	92.6	-32.0	-28.7	-25.1
0.086	91.4	-35.4	-33.0	-30.6
0.140	86.0	-41.8	-38.6	-35.4

降低,这是由于水分对基质无定形组分的塑化作用^[6]。水是常用的塑化剂,水的 T_g 在-139~-135°C范围内,并且对于大多数物料,含水率越高, T_g 越低^[23]。台农一号芒果中主要的糖是蔗糖、葡萄糖和果糖,分别为5.81、1.62和4.68 g/(100 g)^[24]。芒果的玻璃化转变温度和热流曲线与所报道的蔗糖、葡萄糖和果糖溶液的相似^[21,23,25-26]。并且,这与Syamaladevi等研究覆盆子和Guizani等研究枣的实验结果相似^[9,21]。

由于在一些文献中所采用的玻璃化转变温度为中点(T_{gm}),但在另外一些文献中使用的是初始点(T_{gi})。此外,退火温度和时间也不一致。因此,比较以前文献中报道的玻璃化转变温度值是比较困难的。出现玻璃化转变的温度范围较大,因此采用初始点、中点和终点对玻璃化转变温度进行报道更合理。

2.3 含有冻结水样品的玻璃化转变与冻结点

含有冻结水(湿基含水率0.38 g/g)的芒果初始冻结温度 T_f (-13.0°C)和冻结终点温度 T'_m (-34.9°C),是由DSC热流曲线测量得到的,各点在热流图上的具体位置如图3所示(最后升温阶段)。图4是图3中玻璃化转变发生时的局部放大图,分为初始点(T_{gi})、中点(T_{gm})和终点(T_{ge}),本研究采用 T_{gm} 作为芒果的玻璃化转变温度。由表3可见,随着固形物湿基质量分数从20%增加至78%, T_f 由-1.3°C下降至-21.0°C。当湿基含水率大于0.71 g/g时,玻璃化转变现象消失, T_{gi} 、 T_{gm} 和 T_{ge} 未检测到,只有熔融峰出现。如图5所示,图5为新鲜芒果的典型DSC热流图,新鲜芒果湿基含水率为0.86 g/g(大于0.71 g/g),其玻璃化转变温度 T_{gi} 、 T_{gm} 和 T_{ge} 未检测到,与上述实验结果一致。

从表3可以看出, T'_m 随固形物质量分数增加而降低,当固形物湿基质量分数大于48%时, T'_m 的变化较小,接近于常数。固形物湿基质量分数在62%~78%之间时,最大冻结浓缩状态的 T'_m 平均

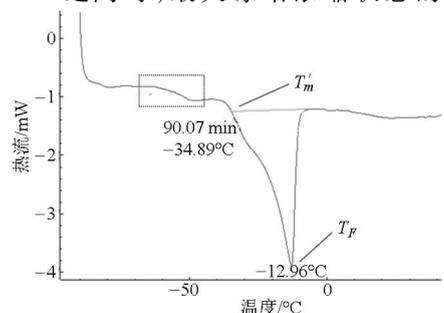


图3 芒果含有冻结水的典型DSC热流图

Fig. 3 Typical DSC thermogram of mango containing freezable water

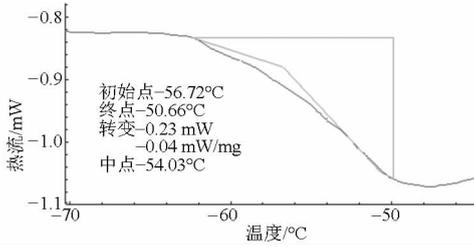


图4 芒果含有冻结水的DSC热流图的玻璃化转变温度测量

Fig. 4 Glass transition temperatures determination on DSC thermogram of mango containing freezable water

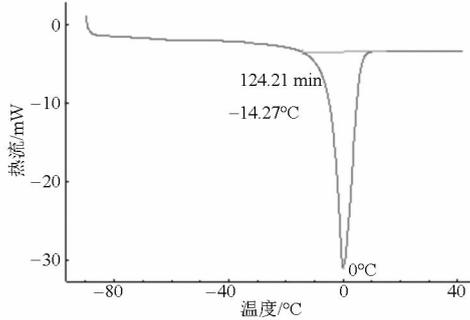


图5 新鲜芒果的典型DSC热流图

Fig. 5 Typical DSC thermogram of fresh mango

表3 含有冻结水芒果的玻璃化转变温度与冻结点

Tab. 3 Glass transition temperature and freezing point of mango with freezable water

固形物湿基 质量分数/%	$T_{gt}/^{\circ}\text{C}$	$T_{gm}/^{\circ}\text{C}$	$T_{ge}/^{\circ}\text{C}$	$T'_m/^{\circ}\text{C}$	$T_F/^{\circ}\text{C}$
78	-64.6	-62.7	-60.8	-32.9	-21.0
75	-63.3	-60.5	-58.0	-30.7	-21.0
62	-56.7	-54.0	-50.7	-34.9	-13.0
48	-44.3	-43.5	-42.8	-39.1	-7.5
40	-37.3	-36.1	-35.0	-30.7	-5.2
29	-35.1	-33.3	-31.4	-25.4	-3.1
20				-17.5	-1.3

值是 -32.8°C 。芒果的 T'_m 在糖的 T'_m 范围内,即葡萄糖和果糖 T'_m 分别为 -30°C 和 -48°C [17,21]。用 DSC 测量含有冻结水样品的玻璃化转变温度时,实际上是很难达到准确的最大冻结浓缩状态,因此,可通过状态图(图6)由 T'_m 确定最大冻结浓缩状态,并得到特征玻璃化转变温度(T'_g)。

2.4 状态图

低含水率的食物和冷冻食物的稳定性与贮藏期,可以使用状态图来预测 [22]。状态图定义了生物物料的物理状态和转变状态的参数。如图6所示,芒果的状态图由玻璃化转变温度曲线、冻结曲线和最大冻结浓缩状态组成。冻结曲线 AP (冻结温度与固形物质量分数曲线)是由 Clausius - Clapeyron 方程模拟,采用 Origin 软件非线性拟合得到参数 $E = 0.071$,因此芒果中总固形物的分子量为 253.52。

根据文献报道,苹果、枣、大蒜和覆盆子的 E 值分别为 0.238、0.129、0.080 和 0.064 [5,6,12]。

图6中的 P 点(是由冻结曲线延长到 P 点),是冻结终点温度 T'_m 对应的点,相当于温度 -32.8°C ,再根据式(3)可计算得到固形物湿基质量分数 X'_s 值为 84%。此时, X'_s 值对应的含水率为非冻结水的含水率,即 0.16 g/g。在 P 点处,即使芒果处于冻结过程,也不会有冰晶生成;这主要是由于在 P 点处,样品已处于最大冻结浓缩状态。

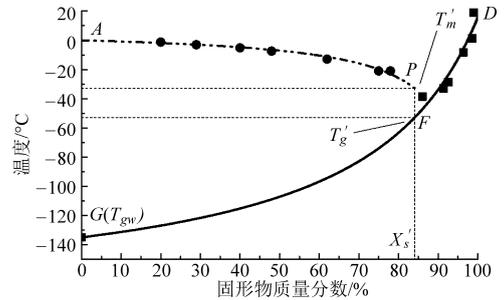


图6 芒果的状态图(冻结曲线、玻璃化转变温度曲线和最大冻结浓缩状态的玻璃化转变温度)

Fig. 6 State diagram of mango (freezing curve, glass transition line, and glass transition of maximal-freeze-concentration condition)

含水率对玻璃化转变温度的影响可以用 Gordon - Taylor 方程描述,经非线性拟合得到 GT 方程参数 T_{gs} 和 k 分别为 15.7°C 和 4.42。 k 值与其他文献报道的水果相似,菠萝为 0.21 [19]、枣为 3.2 [5]、猕猴桃为 5.72 [16] 以及覆盆子为 4.73 [9]。然而,芒果的 T_{gs} 值低于上述水果的值,这可能是由于不同水果含有的化学成分不同。实验测得干燥芒果粉的玻璃化转变温度 T_{gm} 为 19.8°C ,大于 GT 方程拟合得到的玻璃化转变温度 15.7°C 。

为了确定芒果最大冻结浓缩状态的玻璃化转变温度(T'_g),在固形物湿基质量分数 $X'_s = 84\%$ 的情况下,从 P 点做垂线,与玻璃化转变温度曲线(DG)相交,交点 F 即为 T'_g 点(-52.9°C)。根据文献报道,菠萝、苹果、李子、猕猴桃、枣和覆盆子的 T'_g 值分别为 -51.6 、 -55.1 、 -57.5 、 -57.2 、 -46.4 和 -48°C [5,9,12,16,19,27],芒果的 T'_g 值与上述水果相似。当外界温度低于食物的玻璃化转变温度时,则可以认为食品处于玻璃态,此时贮藏条件较稳定。

一些文献认为 T'_g 为特征玻璃化转变温度,而另外一些则认为 T''_g 为特征玻璃化转变温度, T''_g 值为冻结曲线(AP)延长线与玻璃化转变温度曲线(DG)的交点 [5-7,16,21-22]。下一步应该重点研究上述 2 个特征玻璃化转变温度,在含冻结水样品的加工与贮藏稳定性方面所具有的真正物理意义。

此外,由于玻璃化转变温度在预测芒果稳定性

时存在一定的局限^[7],因此,下一步需要将玻璃化转变概念和水分活度概念联合,共同预测芒果的稳定性,这样更加准确。同时,需要更新芒果的状态图,将 BET-单分子层含水率曲线添加到状态图中,并增加宏观-微观区域(Macro-micro region)的划分。根据食品所在的区域,有针对性的预测食品的状态与稳定性。

3 结论

(1)芒果粉末在 25℃ 的吸附等温线符合 GAB 模型,并且吸附等温线呈“J”形,平衡干基含水率随着水分活度 a_w 增大而增大。其中,单分子层干基含水率(X_m)为 0.107 g/g。

(2)随着固形物湿基质量分数从 78% 减小至 20%,冰点温度由 -21.0℃ 上升至 -1.3℃。当固形

物湿基质量分数从 99% 降低至 86% 时,玻璃化转变温度由 18.9℃ 下降至 -38.6℃。

(3)从芒果状态图上,可以得到最大冻结浓缩状态下的冻结终点温度(T'_m)和玻璃化转变温度(T'_g),分别为 -32.8℃ 和 -52.9℃。最大冻结浓缩状态时的固形物湿基质量分数(X'_s)为 84%,对应芒果的非冻结水的湿基含水率($1 - X'_s$)为 0.16 g/g。

(4)芒果的状态图既可以用来预测芒果冻藏过程中的稳定性,也可以预测芒果干燥条件下的稳定性,并且能提供最优的加工条件。当芒果含有非冻结水时,芒果的稳定性可以直接由状态图中的玻璃化转变温度曲线来判断;然而,当芒果含有冻结水时,芒果的稳定性由特征温度(T'_m 、 T'_g 或其他特征值)来预测。

参 考 文 献

- Pott I, Marx M, Neidhart S, et al. Quantitative determination of β -carotene stereoisomers in fresh, dried, and solar-dried mangoes (*Mangifera indica* L.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(16): 4527 - 4531.
- Berardini N, Fezer R, Conrad J, et al. Screening of mango (*Mangifera indica* L.) cultivars of their contents of flavol O- and xanthone C-glycosides, anthocyanins and pectin [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(5): 1563 - 1570.
- Roos Y H. Characterization of food polymers using state diagrams [J]. Journal of Food Engineering, 1995, 24(3): 339 - 360.
- Slade L, Levine H. Water and glass transition-dependence of the glass transition on composition and chemical structure: special implications for flour functionality in cookie baking [J]. Journal of Food Engineering, 1995, 24(4): 431 - 509.
- Rahman M S. State diagram of date flesh using differential scanning calorimetry (DSC) [J]. International Journal of Food Properties, 2004, 7(3): 407 - 428.
- Rahman M S, Sablani S S, Al-Habsi N, et al. State diagram of freeze-dried garlic powder by differential scanning calorimetry and cooling curve methods [J]. Journal of Food Science, 2005, 70(2): 135 - 141.
- Rahman M S. Food stability beyond water activity and glass transition: macro-micro region concept in the state diagram [J]. International Journal of Food Properties, 2009, 12(4): 726 - 740.
- Rahman M S. Food stability determination by macro-micro region concept in the state diagram and by defining a critical temperature [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99(4): 402 - 416.
- Syamaladevi R M, Sablani S S, Tang J M, et al. State diagram and water adsorption isotherm of raspberry (*Rubus idaeus*) [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(3): 460 - 467.
- 张素文. 玻璃态下冻结、冻藏及其后续解冻对西兰花品质的影响研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2007.
Zhang Suwen. The study of the influence of freezing, storage and thaw on the quality of glassy broccoli [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007. (in Chinese)
- 赵黎明. DSC 和脉冲 NMR 研究食品的玻璃化合玻璃化转变温度 [J]. 食品科技, 2001(1): 14 - 16.
- 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(2-3): 89 - 95.
- Kasapis S, Rahman M S, Guizani N, et al. State diagram of temperature vs date solids obtained from the mature fruit [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(9): 3779 - 3784.
- Sa M M, Sereno A M. Glass transitions and state diagrams for typical natural fruits and vegetables [J]. Thermochemica Acta, 1994, 246(2): 285 - 297.
- Sa M M, Figueiredo A M, Sereno A M. Glass transitions and state diagrams for fresh and processed apple [J]. Thermochemica Acta, 1999, 329(1): 31 - 38.
- Wang H Y, Zhang S Z, Chen G M. Glass transition and state diagram for fresh and freeze-dried Chinese gooseberry [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(2): 307 - 312.
- Roos Y H, Karel M. Plasticizing effect of water on thermal behavior and crystallization of amorphous food models [J]. Journal of Food Science, 1991, 56(1): 38 - 43.
- Shi Q L, Wang X H, Zhao Y, et al. Glass transition and state diagram for freeze-dried *Agaricus bisporus* [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(4): 667 - 674.

- 19 Telis V R N, Sobral P J A. Glass transitions and state diagram for freeze-dried pineapple[J]. LWT-Food Science and Technology, 2001, 34(4): 199 - 205.
 - 20 石启龙, 林雯雯, 赵亚, 等. 冻干扇贝肉的玻璃化转变温度及状态图[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 225 - 230.
Shi Qilong, Lin Wenwen, Zhao Ya, et al. Glass transition temperature and state diagram of freeze-dried scallop muscle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 225 - 230. (in Chinese)
 - 21 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.
 - 22 Rahman M S. State diagram of foods: its potential use in food processing and product stability[J]. Trends in Food Science and Technology, 2006, 17(3): 129 - 141.
 - 23 Roos Y H. Water activity and physical state effects on amorphous food stability[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 1993, 16(6): 433 - 447.
 - 24 Liu F X, Fu S F, Chen F, et al. Physico-chemical and antioxidant properties of four mango (*Mangifera indica* L.) cultivars in China[J]. Food Chemistry, 2013, 138(1): 396 - 405.
 - 25 Ablett S, Izzard M J, Lillford P J, et al. Calorimetric study of the glass-transition occurring in fructose solutions[J]. Carbohydrate Research, 1993, 246(1): 13 - 22.
 - 26 Simperler A, Kornherr A, Chopra R, et al. Glass transition temperature of glucose, sucrose and trehalose: an experimental and in silicon study[J]. Journal of Physical Chemistry, 2006, 110(39): 19678 - 19684.
 - 27 Telis V R N, Sobral P J D, Telis-Romero J. Sorption isotherm, glass transitions and state diagram for freeze-dried plum skin and pulp[J]. Food Science and Technology International, 2006, 12(3): 181 - 187.
-

(上接第 193 页)

- 16 Nimit Nipattummakul, Islam I Ahmed, Ashwani K Gupta, et al. Hydrogen and syngas yield from residual branches of oil palm tree using steam gasification[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(6): 3835 - 3843.
- 17 Skoulou V, Swiderski A, Yang W, et al. Process characteristics and products of olive kernel high temperature steam gasification (htsg)[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(8): 2444 - 2451.
- 18 Prakash Parthasathy, Sheeba Narayanan K. Hydrogen production from steam gasification of biomass: influence of process parameters on hydrogen yield—a review[J]. Renewable Energy, 2014, 66: 570 - 579.
- 19 闫桂焕, 孙荣峰, 许敏, 等. 生物质固定床两步法气化技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 101 - 104.
Yan Guihuan, Sun Rongfeng, Xu Min, et al. Two-step gasification technology of biomass in fixed bed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 101 - 104. (in Chinese)
- 20 Ahmed I, Gupta A K. Syngas yield during pyrolysis and steam gasification of paper[J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1813 - 1821.
- 21 Onkar Singh. Applied thermodynamics[M]. 3rd ed. New Delhi: New Age International Publishers, 2009.
- 22 Ahmed I I, Gupta A K. Sugarcane bagasse gasification: global reaction mechanism of syngas evolution[J]. Applied Energy, 2012, 91(1): 75 - 81.
- 23 李琳娜, 应浩, 涂军令, 等. 木屑高温水蒸气气化制备富氢燃气的特性研究[J]. 林产化学与工业, 2011, 31(5): 18 - 24.
Li Linna, Ying Hao, Tu Junling, et al. High-temperature steam gasification of sawdust for production of hydrogen-rich gas[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2011, 31(5): 18 - 24. (in Chinese)
- 24 García-bacaicoa P, Mastral J F, Ceamanos J, et al. Gasification of biomass/high density polyethylene mixtures in a downdraft gasifier[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(13): 5485 - 5491.