植物基板栗布丁储藏期间消化特性和品质变化

黄双霞[1,2,3]，涂 园[1,2,3]，陈 玲[1,2,3]，李晓玺[*1,2,3]

（1. 华南理工大学 食品科学与工程学院，广东 广州 510640；2. 广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室，广东 广州 510640；3. 淀粉与植物蛋白深加工教育部工程研究中心，广东 广州 510640）

摘要：为改善布丁产品的营养功能及品质特性，以酶解耦合湿热处理后的板栗粉和豌豆蛋白作为主要原料基制备板栗布丁产品（CSPP），探究储藏期间该产品的消化性能、预测血糖生成指数（pGI）、预测血糖负荷（pGL）、回生性能、质构和感官品质的变化。结果表明，该布丁为中 pGL 食品，富含慢消化淀粉（SDS）和抗消化淀粉（RS）；储藏期间，相比于对照布丁 CSP，CSPP 的回生焓值和回生度（RD）均较低，其 RD 降低了 50.84%，表明淀粉分子与蛋白质间的相互作用可有效抑制淀粉回生；同时其硬度和咀嚼性略有增加，弹性和回复性均无明显变化，具有良好的质构特性及感官品质。

关键词：板栗布丁；消化性能；回生度；质构；感官品质

中图分类号：TS 236.9　**文章编号：**1673-1689(2022)11-0073-09　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2022.11.009

Changes of Digestibility and Quality of Plant-Based Chestnut Pudding during Storage

HUANG Shuangxia[1,2,3]，*TU Yuan*[1,2,3]，*CHEN Ling*[1,2,3]，*LI Xiaoxi*[*1,2,3]

(1. School of Food Sciences and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Green Processing and Product Safety for Natural Products, Guangzhou 510640, China; 3. Engineering Research Center for Starch and Plant Protein Processing, Ministry of Education, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to improve the nutritional functions and sensory quality of pudding, chestnut flour after enzymatic hydrolysis coupled with wet heat treatment and pea protein were used as the main materials to prepare chestnut pudding (CSPP). The changes of digestibility, predicted glycaemic index (pGI), predicted glycaemic load (pGL), retrogradation, texture and sensory properties of CSPP were investigated during storage. Results showed that CSPP was rich in slowly digestible starch (SDS) and resistant starch (RS), which was classified as the medium pGL food. During storage, the enthalpy and retrogradation degree (RD) of CSPP were lower than those of the control group CSP with 50.84% reduction of RD, indicating that the interaction between starch and protein molecules could effectively inhibit the retrogradation of starch. Meanwhile, the hardness and chewiness of CSPP increased slightly, while the elasticity and resilience changed insignificantly, showing good texture characteristics and sensory quality.

Keywords: chestnut pudding, digestibility, retrogradation degree, texture, sensory

收稿日期：2022-05-16

基金项目：国家重点研发计划项目（2019YFD1002305）；国家自然科学基金项目（32072172）。

*** 通信作者：**李晓玺（1977—），男，博士，教授，博士生导师，主要从事淀粉功能化修饰与调控方面的研究。E-mail：xxlee@scut.edu.cn

随着国民对膳食平衡需求的增加,以植物性食物为主的膳食结构越来越受到重视。布丁因其细腻嫩滑的口感深受消费者青睐,传统布丁产品如牛奶布丁、巧克力布丁、鸡蛋布丁等,具有高糖量、高热量、高脂的缺点,不适合糖尿病、肥胖患者及体重管理者等特殊人群食用,且营养价值较低。为了满足人们对布丁产品营养和健康的消费需求以及丰富布丁产品的多样性,近年来大米布丁、魔芋布丁、葛粉布丁等受到人们关注[1-3],研究人员将具有调节肠道菌群、降血糖等功效的膳食纤维、抗消化淀粉、菊粉、绿豆杂粮等添加到布丁产品中来提高其功能特性[4-6]。但含淀粉的布丁产品在储藏期间,会因淀粉凝沉回生导致品质下降,继而影响布丁消化特性与感官品质[7]。食品结构变化和淀粉回生特性的变化会引起食品质构的改变[8],如经酶解耦合湿热处理后可获得富含抗消化和慢消化的淀粉[9-11]。此外,基于淀粉与其他食品组分(如蛋白质、亲水胶体及多酚等)的相互作用及不同食品加工过程条件,可形成特定的多尺度结构,改善淀粉制品的消化性能和品质[12-15]。

板栗富含淀粉、蛋白质、脂肪、维生素、无机盐、不饱和脂肪酸和黄酮等,营养价值丰富,甘甜芳香,具有潜在的健康益处[16],开发板栗布丁产品可促进其资源综合利用。豌豆蛋白具有较高的营养价值,其氨基酸比例较为均衡,是一种良好的蛋白质来源[17]。作者利用植物基板栗布丁中的淀粉、蛋白质、亲水胶体等分子间的相互作用,达到延缓淀粉回生、调控其消化等品质的目的。以酶解耦合湿热处理的板栗粉和豌豆蛋白作为主要原料制备富含植物基蛋白的板栗布丁,研究在储藏期间板栗布丁的消化特性及回生特性,探究其质构品质和感官品质的变化规律,为开发营养健康且质构良好的板栗布丁深加工产品提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

板栗:购于东源县船塘镇鲜绿态农场;普鲁兰酶:购于 Aladdin 公司;豌豆蛋白:购于陕西宝禾生物科技有限公司;卡拉胶、魔芋胶及酸水解玉米淀粉:购于佛山高峰淀粉科技有限公司;*D*-山梨醇和天然香精:购于明富(上海)科技有限公司;总淀粉试剂盒:购于 Megazeme 公司。

1.2 仪器与设备

高速剪切均质机:上海昂尼仪器仪表有限公司;紫外可见分光光度计:上海第三分析仪器厂;质构仪:英国 Stable Micro Systems 公司;差示扫描量热仪:美国 PerkinElmer 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 板栗布丁的制备 板栗布丁配方:板栗粉质量分数 12.15%,豌豆蛋白质量分数 3.85%,单硬脂酸甘油酯和稳定剂(卡拉胶、魔芋胶及酸水解玉米淀粉)各质量分数 2%,*D*-山梨醇质量分数 5%,氯化钠质量分数 0.1%,香精质量分数 0.01%以及无菌水质量分数 75%。

板栗粉前处理(酶解耦合湿热处理)→调浆(加入豌豆蛋白)→混浆水合(25 ℃、1 h)→热剪切处理(93 ℃、25 min、6 000 r/min)→配料 (加入预先配好的 25%辅料浆液,剪切 93 ℃、6 000 r/min,5 min)→罐装→热力杀菌 (85 ℃、30 min)→储藏 (常温 25 ℃)。记为 CSPP, 根据不同的储藏天数记为 CSPP-Xd。

对照布丁未经酶解耦合湿热预处理且未与豌豆蛋白或其他辅料复合,根据不同的储藏天数记为 CSP-Xd。市售布丁粉, 按布丁粉-糖-热水质量比为=1:1:10 倒入模具待凉,冷藏凝固,根据不同的储藏天数记为 CAP-Xd。

1.3.2 储藏期间板栗布丁的消化性能和血糖生成指数的测定 消化性能根据 Englyst 方法测定[18],考察不同储藏时间(0~21 d)RDS、SDS 和 RS 的质量分数。利用 Megazyme 总淀粉检测试剂盒对布丁样品中的总淀粉质量分数进行测定。根据的 GOÑI 等[19]方法测定布丁的预测血糖生成指数(predicted glycemic index,pGI)。

$$pGI=39.71+(0.549\times HI)$$

式中:HI 为水解指数,%。

预测血糖负荷(predicted glycemic load,pGL)是指 100 g 或 1 份食物中实际可利用碳水化合物质量(C,g)与 GI 值的乘积除以 100[20]:

$$pGI=\frac{C\times pGI}{100}$$

1.3.3 储藏期间板栗布丁的回生性能测定 采用差示扫描量热法测定淀粉的回生性能。称取试样 8 mg(淀粉干基),配成水分质量分数 70%,密封,放置过夜平衡水分。以 10 ℃/min 的升温速率从 10 ℃升

温至100 ℃。测定不同储藏时间(0~21 d)板栗淀粉的T_0(起始温度)、T_p(峰值温度)、T_C(终止温度)以及焓值(ΔH)的变化情况。

根据 Baik 等人[21]的方法计算板栗淀粉样品的回生度(RD)。

$$RD=\frac{\Delta H_t-\Delta H_o}{\Delta H_n}$$

式中:RD 为板栗淀粉回生样品的回生度;ΔH_t 为样品回生 0 d 的回生焓,J/g;ΔH_o 为样品回生 t 时间的熔融焓,J/g;ΔH_n 为样品原晶体的熔融焓,J/g。

1.3.4 储藏期间布丁的质构测定 使用 TA-XT Plus 食品质构仪进行 TPA 的测定。测定探头:P/6 柱形探头;测定参数:测前速度 1.0 mm/s,测试速度 1.0 mm/s,起始力 0.01 N,测试后速度 3.0 mm/s,压缩率为 30%。

1.3.5 感官评价 根据 GB/T 10220-2012[22]中的要求选取 10 名具有感官评定经验的专业人员组成感官评定小组,对板栗布丁、对照板栗布丁及市售布丁的各个细分项目(色泽、细腻程度、凝胶状态、风味、可勺性、顺化程度和稳定性)进行评分。根据层次分析法确定各个因素的权重大小,评价标准见表 1。

表 1 布丁感官评价评分表

Table 1 Sensory evaluation of pudding

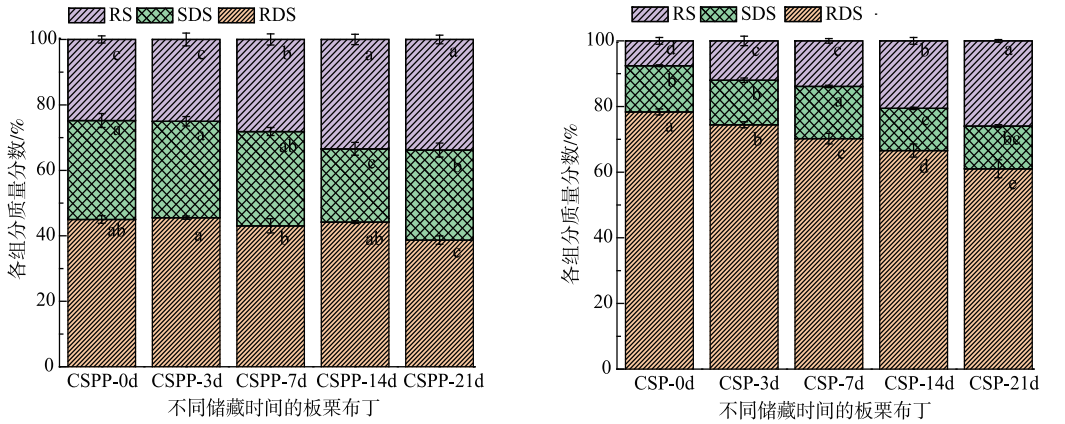
项目(占比)	评分/分	评分细则
色泽(20%)	14~20	色泽均匀,无气泡无裂痕
	8~13	色泽均匀偏暗,有少量气泡裂痕
	0~7	色泽不均且暗,大量气泡裂痕
细腻程度(20%)	14~20	组织结构均匀细腻,无颗粒感
	8~13	组织较为均匀,无颗粒感
	0~7	组织松软,质地粗糙有颗粒感
凝胶状态(20%)	14~20	凝胶成型性适中
	8~13	凝胶过于坚硬或过于稀软
	0~7	凝胶成型性差,流动性较强
风味(10%)	7~10	口感良好,无异味,香味浓郁
	4~7	适口,香味不足或过于浓郁
	0~3	口感较差,无产品香味,
可勺性(10%)	7~10	好,勺起绵软不易破碎
	4~7	一般,坚硬较易破碎
	0~3	差,流动性强,难勺起
顺滑程度(10%)	7~10	口感及触感顺滑软柔软
	4~7	口感及触感较为顺滑
	0~3	过于滑爽或过于粗糙
稳定性(10%)	7~10	倒置不分层,析水程度较轻
	4~7	倒置有分层倾向,明显析水
	0~3	倒置严重分层,析水程度严重

1.3.6 实验数据处理与统计分析 通过SPSS 软件分析实验数据;采用 LSD 法进行显著性分析,$P<0.05$ 时存在显著性差异;Origin 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 储藏期间布丁 RS、SDS 和 RDS 变化

如图 1 所示,相比于 CSP-0d,CSPP-0d 的 SDS 和 RS 质量分数较高,说明酶解耦合湿热处理后可有效降低淀粉消化性能,并且通过淀粉与蛋白质分子间的相互作用,其复合体系可一定程度延缓淀粉酶对淀粉的消化。随着储藏时间的延长,布丁中的板栗淀粉发生回生现象,淀粉分子间重排聚集形成有序的多尺度结构,导致布丁的有序结构增加,RS 质量分数增加,RDS 质量分数呈下降趋势。从 0~21 d,CSPP 的 RDS 质量分数从 44.99%降低至 38.69%,降低了 14.00%;CSP 的 RDS 质量分数从 78.36%降低至61.03%,降低了 22.12%。这说明相比于 CSP,基于酶解耦合湿热处理板栗粉-豌豆蛋白复合制备得到的布丁产品 CSPP 回生程度较低,这与 CSPP 的 RDS 降低幅度低于 CSP 中的 RDS 降低幅度有关。



（a）储藏期间板栗布丁RS、SDS和RDS质量分数的变化　（b）储藏期间对照布丁RS、SDS和RDS质量分数的变化

图中不同字母表示差异显著(P<0.05)

图 1　储藏期间板栗布丁的淀粉消化性能变化

Fig. 1　Changes of starch digestibility of CSPP during storage

2.2　储藏期间布丁 pGI 和 pGL 的变化

根据标准 WS/T 652-2019 中的分类标准,将食物血糖生成指数(GI)分为:低 GI 食物(GI≤55),中 GI 食物(55<GI≤70),高 GI 食物(GI>70)。高 GI 食物消化速度快,快速提高血液中的葡萄糖浓度。而中 GI 和低 GI 食物在胃肠道中停留的时间长,可缓慢释放葡萄糖。表 2 为板栗布丁中淀粉水解参数,CSP 的动力学常数均大于 CSPP,水解率较高,说明 CSPP 抗消化性能相对较强，具有更多的抗消化和慢消化组分。图 2 为不同储藏时间下板栗布丁的 pGI 值变化。随着储藏时间的延长,CSPP 和 CSP 的 pGI 值有所降低，可能是在储藏过程中板栗淀粉分子之间、板栗淀粉分子与豌豆蛋白分子间均会发生相互作用,导致分子重排与聚集,有序程度增加,从而提高了抗酶解性,降低淀粉酶对板栗淀粉的酶解速率,pGI 值下降。

表 2　储藏期间板栗布丁拟合常数和水解指数的变化

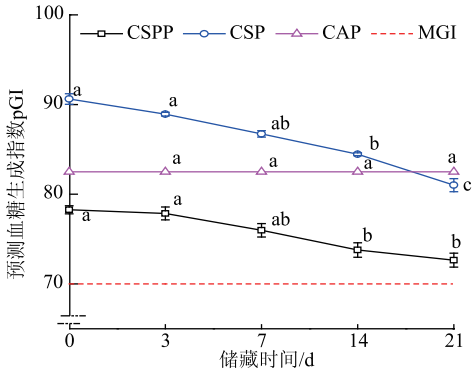
Table 2　Changes in fitting constant and calculated hydrolysis indices of CSPP during storage

样品	储藏期/d	淀粉水解率平衡值/$C\infty$	一级反应动力学常数/k	水解指数/HI
白面包	–	97.83±1.73^{a}	0.11±0.02^{a}	1.00^{a}
CSPP	0	75.47±2.51^{b}	0.04±0.01^{c}	0.70^{b}
	3	74.13±3.62^{b}	0.04±0.01^{c}	0.69^{b}
	7	71.72±3.73^{b}	0.04±0.01^{c}	0.66^{bc}
	14	65.62±4.40^{c}	0.05±0.01^{b}	0.62^{c}
	21	65.40±3.61^{c}	0.04±0.01^{c}	0.60^{c}
CSP	0	91.04±2.66^{a}	0.10±0.02^{a}	0.93^{a}
	3	88.79±1.53^{b}	0.09±0.01^{b}	0.90^{b}
	7	85.09±1.98^{b}	0.09±0.01^{b}	0.86^{c}
	14	81.28±1.79^{c}	0.09±0.01^{b}	0.82^{d}
	21	75.04±1.41^{d}	0.08±0.01^{c}	0.75e

注:同列上标的字母不同表示组间显著差异(P<0.05)。

此外,CSPP 的 pGI 下降程度比 CSP 小,说明其内部有序结构的变化程度相对于未处理组较轻,与其在储藏过程中消化性能的变化趋势一致。CSA 市售布丁为非淀粉类布丁食品,pGI 无明显变化。

血糖负荷指数(GL)是在血糖生成指数(GI)的基础上结合食物实际摄入量综合评价食物消化性能的指标,可真实反映食物在人体摄入过程中的血糖应答效应。根据 WS/T 652-2019[20]分类,食物 GL

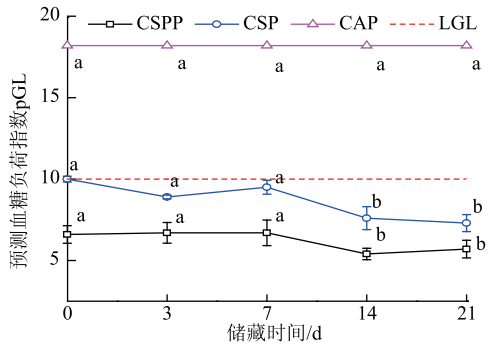


图中不同字母表示差异显著（P<0.05）;MGI 表示中 GI 食品标准分界线。

图 2　储藏期间板栗布丁 pGI 的变化

Fig. 2　Changes in pGI of CSPP during storage

值可分为:低 GL 食物(GL<10),中 GL 食物(10≤GL≤20）和高 GL 食物（GL>20)。储藏期间CSPP、CSP 和 CAP 的 pGL 值变化见图 3。在储藏期间，CSPP 的 pGL 值从 6.6 降低至 6.1，远低于10,故 CSPP 被划分为低 GL 食物,适合糖尿病人及体重管理者食用。随着储藏时间的延长,由于淀粉回生引起的有序结构增加,抗消化组分增加,使得 21 d 后的 pGL 值下降。CSP 的 pGL 值在 7.43~10.0,属于中血糖负荷指数食物，说明产品配料中的亲水胶体、单硬脂酸甘油酯可以在一定程度上抑制淀粉回生。CAP 中的主要成分为白砂糖,pGL 值为 18.2，属于中血糖负荷指数食物。在储藏 21 d 后,CSPP 的 pGL 值降低了 13.64%,而 CSP 的 pGL 值降低了 27%,说明对照组的回生老化程度较大。



图中不同字母表示差异显著（P<0.05）;LGL 表示低 GL 食品标准分界线。

图 3　储藏期间板栗布丁 pGL 的变化

Fig. 3　Changes in pGL of CSPP during storage

在储藏期间,淀粉类食品由于回生过程中分子重排形成更多的有序结构，使其消化性能、pGI 和 pGL 值降低,会引起质构及感官品质的变化,因此需进一步考察储藏期间板栗布丁的回生、质构及感官品质的变化。

2.3　储藏期间布丁热力学参数和回生度

表 3 和表 4 分别为板栗布丁(CSPP)和对照板栗布丁(CSP)在储藏期间的热力学参数和回生度。CSPP 和 CSP 的回生焓值和回生度随着储藏时间的延长逐渐增大,说明在储藏过程中,由于板栗淀粉分子发生重排和聚集,形成了新的有序结构。同时,同等储藏时间下 CSPP 的回生焓值和回生度均小于 CSP,CSPP-21d 的 ΔH 为 5.99 J/g,CSP-21d 的 ΔH 为 15.69 J/g,CSPP 和 CSP 的回生度分别为 32.97% 和 67.07%,CSPP 的 RD 比 CSP 降低了 50.84%,说明储藏期间 CSPP 的回生程度低于 CSP，豌豆蛋白可通过与板栗淀粉的分子间氢键等相互作用,在一定程度上降低了淀粉分子之间的重排,进而降低了焓值和回生度,表明了豌豆蛋白的添加可以有效控制板栗布丁在长期回生过程中的回生性能。

2.4　储藏期间板栗布丁质构变化

在 25 ℃下对布丁进行储藏，在储藏期间不同布丁的质构特性见表 5、表 6 和表 7。由表 5 可知，新鲜制备的板栗布丁（CSPP-0d）的硬度为 131.91 g,咀嚼性为 43.79。由表 6 可知,新鲜制备的对照板栗布丁（CSP-0d）的硬度为 181.72 g，咀嚼性为 60.93;CSPP、CSP 的咀嚼性和回复性略低于 CAP,这是因为 CAP 的凝胶性质和回复性主要由卡拉胶和黄原胶等胶体决定，而 CSP 和 CSPP 的凝胶特性和回复性除了胶体的影响外,还与板栗淀粉分子形成的凝胶网络相关;同时板栗淀粉与豌豆蛋白之间形成的复合凝胶网络也影响 CSPP 的凝胶性质。板栗淀粉分子之间及其与蛋白质形成的凝胶强度弱于高浓度的卡拉胶所形成的凝胶体系,因此由板栗全粉为主要原料制备的布丁的咀嚼性和回复性低于富含亲水胶体的市售布丁。

在储藏期间中,CSPP、CSP 的弹性和回复性均无明显变化，咀嚼性略有增加,CAP 的硬度和咀嚼性变化不大，回复性降低但仍高于 CSPP、CSP。CSPP、CSP 和 CAP 的硬度随着储藏时间的延长而增加,CSPP-21d 与 CSPP-0d 相比其硬度提高了 27.07%;CSP-21d 与 CSP-0d 相比硬度提高了 62.98%。这是由于在储藏过程中板栗淀粉发生回

表 3 储藏期间板栗布丁热力学参数和回生度

Table 3 Thermodynamic parameters and retrogradation degree of CSPP during storage

样品	起始温度 T_o/℃	峰值温度 T_p/℃	终止温度 T_c/℃	焓值 ΔH/(J/g)	回生度 RD/%
板栗布丁粉	59.09±0.27^{a}	62.51±0.17^{a}	70.57±0.33^{a}	9.16±0.35^{a}	–
	81.08±0.86^{a}	86.69±0.02^{a}	97.04±0.28^{a}	1.76±0.06^{a}	
CSPP-0d	57.79±0.06^{c}	61.28±0.04^{c}	66.22±0.34^{c}	2.39±0.14^{e}	0
CSPP-3d	57.37±0.21^{d}	61.08±0.25^{b}	66.92±0.30^{bc}	2.91±0.19^{d}	4.76
CSPP-7d	57.20±0.19^{d}	60.90±0.18^{bc}	67.80±0.78^{b}	3.43±0.07^{c}	9.52
CSPP-14d	58.45±0.23^{b}	62.32±0.24^{a}	69.30±0.44^{a}	3.79±0.16^{c}	12.82
CSPP-21d	57.95±0.65^{c}	61.33±0.99^{b}	67.09±0.62^{bc}	5.99±0.26^{b}	32.97

注:同列上标的字母不同表示组间显著差异(P<0.05)。

表 4 储藏期间对照板栗布丁热力学参数和回生度

Table 4 Thermodynamic parameters and retrogradation degree of the control group CSP during storage

样品	起始温度 T_o/℃	峰值温度 T_p/℃	终止温度 T_c/℃	焓值 ΔH/(J/g)	回生度 RD/%
对照板栗布丁粉	58.05±0.51^{a}	62.29±0.02^{a}	70.36±0.03^{a}	12.81±0.37^{bc}	–
	78.68±0.31^{a}	83.81±0.07^{a}	90.52±0.89^{a}	2.95±0.11^{bc}	
CSP-0d	56.95±0.11^{b}	60.39±0.20^{cd}	64.91±0.13^{c}	5.12±0.10^{e}	0
CSP-3d	56.83±0.28^{b}	60.94±0.61^{c}	67.19±0.54^{bc}	8.35±0.07^{d}	20.50
CSP-7d	56.02±0.43^{c}	60.88±0.54^{c}	68.71±0.92^{b}	10.60±0.21^{c}	34.77
CSP-14d	56.12±0.08^{c}	61.28±0.32^{b}	70.07±0.86^{a}	13.81±0.26^{b}	55.14
CSP-21d	56.13±0.57^{d}	61.38±0.82^{d}	70.50±1.74^{b}	15.69±0.20^{a}	67.07

注:同列上标的字母不同表示组间显著差异(P<0.05)。

表 5 不同储藏时间内板栗布丁 CSPP 质构特性

Table 5 Textural properties of CSPP at different storage times

储藏时间/d	硬度/g	弹性	咀嚼性	回复性
0	131.91±12.50^{c}	0.92±0.01^{a}	43.79±6.18^{b}	0.05±0.01^{a}
3	140.22±12.22^{c}	0.94±0.05^{a}	51.85±5.60^{a}	0.06±0.01^{a}
7	150.63±8.28^{b}	0.92±0.01^{a}	48.66±2.60^{ab}	0.06±0.01^{a}
14	158.97±6.28^{b}	0.95±0.05^{a}	52.65±5.52^{a}	0.06±0.01^{a}
21	166.82±5.03^{a}	0.95±0.03^{a}	56.25±3.27^{a}	0.05±0.01^{a}

注:同列上标的字母不同表示组间显著差异(P<0.05)。

表 6 不同储藏时间内对照板栗布丁 CSP 质构特性

Table 6 Textural properties of the control group CSP at different storage times

储藏时间/d	硬度/g	弹性	咀嚼性	回复性
0	181.72±12.38^{c}	0.82±0.10^{a}	60.93±6.49^{b}	0.08±0.01^{a}
3	203.50±14.79^{c}	0.74±0.13^{a}	62.16±7.38^{b}	0.12±0.03^{a}
7	256.67±7.93^{b}	0.79±0.08^{a}	78.11±6.00^{ab}	0.12±0.04^{a}
14	279.05±12.13^{ab}	0.94±0.02^{a}	95.34±8.93^{a}	0.05±0.00^{a}
21	296.16±10.53^{a}	0.95±0.03^{a}	93.59±5.87^{a}	0.05±0.01^{a}

注:同列上标的字母不同表示组间显著差异(P<0.05)。

表 7　不同储藏时间内市售布丁 CAP 质构特性

Table 7　Textural properties of commercial pudding CAP at different storage times

储藏时间/d	硬度/g	弹性	咀嚼性	回复性
0	221.89±27.79^{a}	0.83±0.14^{b}	137.15±29.26^{a}	0.28±0.07^{ab}
3	228.79±34.10^{a}	0.73±0.16^{c}	102.63±33.43^{a}	0.20±0.08^{ab}
7	243.91±29.45^{a}	0.62±0.15^{d}	85.17±19.80^{a}	0.16±0.11^{b}
14	252.62±27.38^{a}	0.95±0.03^{a}	137.26±15.32^{a}	0.30±0.11^{a}
21	258.98±32.25^{a}	0.76±0.10^{c}	103.87±10.61^{a}	0.16±0.07^{b}

注:同列上标的字母不同表示组间显著差异(P<0.05)。

生,形成相对更加有序的结构,进而增加了布丁食品的硬度。CSP 硬度的增加程度明显高于 CSPP,反映了 CSPP 在储藏过程中的回生程度低于 CSP。说明了原料板栗粉经过酶解耦合湿热处理以及与豌豆蛋白复配后,可以获得具有较低消化性能的淀粉类布丁食品;通过添加豌豆蛋白后可与布丁中的亲水胶体协调抑制布丁在储藏过程中的回生性能。CSPP 整体硬度低于 CSP,可能是由于豌豆蛋白与板栗淀粉之间形成了半穿或互穿凝胶网络结构,影响了复合体系中板栗淀粉与豌豆蛋白分子链各自及彼此之间的进一步重排聚集,从而降低了板栗淀粉凝胶的硬度。

2.5　储藏期间板栗布丁感官品质评价

采用人工感官评价的方式对储藏期间板栗布丁的品质变化进行评价。不同储藏时间下感官评价的整体评分如图 4(a)所示,未储藏的和储藏 21 d 后的板栗布丁(CSPP)、对照板栗布丁(CSP)和市售布丁(CAP)的各项目评分如图 4(b)~4(h)所示。CSPP 整体评分最高,随着储藏时间的延长其整体评分略有下降。这可能是由于板栗布丁中的板栗淀粉在储藏期间因回生导致 CSPP 的硬度升高,最终引起其整体评分的变化。布丁食品的稳定性、凝胶特性、可勺性和顺滑程度在储藏期间的变化无显著差异,这与质构测定中弹性和回复性在储藏过程中变化不明显一致。

CSPP 在储藏期间色泽评分优于 CSP,从图 5 中也能看出 CSPP 在外观上为乳白色,比 CSP 更容易被消费者接受。在细腻程度和顺滑程度上 CSPP 整体皆高于 CSP,这是由于豌豆蛋白在布丁制备过程中经过热剪切均质处理,形成微型颗粒或与板栗淀粉分子发生复合[23]。由于微粒化蛋白的颗粒小于人体口腔粘膜对其感知程度的阈值,故消费者在食用时能够感知 CSPP 具备顺滑的质构[24]。研究人员[25-26]通过向脱脂奶粉或乳清蛋白浓缩物中添加物理改性淀粉来制作酸奶。摩擦学结果表明,淀粉的加入降低了摩擦系数值;感官结果证实,淀粉的加入使得含有脱脂奶粉和乳清蛋白浓缩物样品更柔滑。CSPP 和 CSP 的可勺性、凝胶状态和产品稳定性均优于 CAP,这是由于布丁硬度的增大提高了消费者勺起所需要的力,这与植物布丁的硬度和回复性低于市售布丁的实验结果一致。在布丁储藏期间,CSPP 和 CSP 的整体感官评分皆优于 CAP,其中 CSPP 的总分高于 CSP。该结果表明植物基布丁的整体感官可接受程度高于市售和对照布丁。

布丁储藏过程中感官品质的下降是由板栗淀粉分子链的重排、回生、再结晶等形成有序结构所引起的。通过添加豌豆蛋白在布丁制备过程中形成板栗淀粉-豌豆蛋白复合体系,一方面可使得布丁整体质构的均匀和细腻程度有所提高,另一方面还可以通过形成淀粉蛋白复合体抑制淀粉分子在储藏期间的重排和回生,从而延缓板栗布丁的硬度等质构及稳定性劣变。质构结果表明,在储藏期内板栗布丁的质构略有降低,同一储藏时间下的感官评定结果可知,储藏期间板栗布丁质构的变化对其品质的影响整体在消费者可接受范围内。因此,利用酶解耦合湿热处理的板栗全粉和豌豆蛋白作为原料制备的板栗布丁富含蛋白质,具有较低的消化和回生性能以及低血糖负荷指数,同时具有良好的质构特性和感官品质。

3　结　语

以酶解耦合湿热处理后的板栗全粉和豌豆蛋白作为主要原料制备的板栗布丁是富含植物蛋白的低血糖负荷指数食品,具有良好的质构及感官特性。在储藏期间呈现较低的回生特性,其感官品质变化程度远低于天然板栗全粉制备形成的对照板

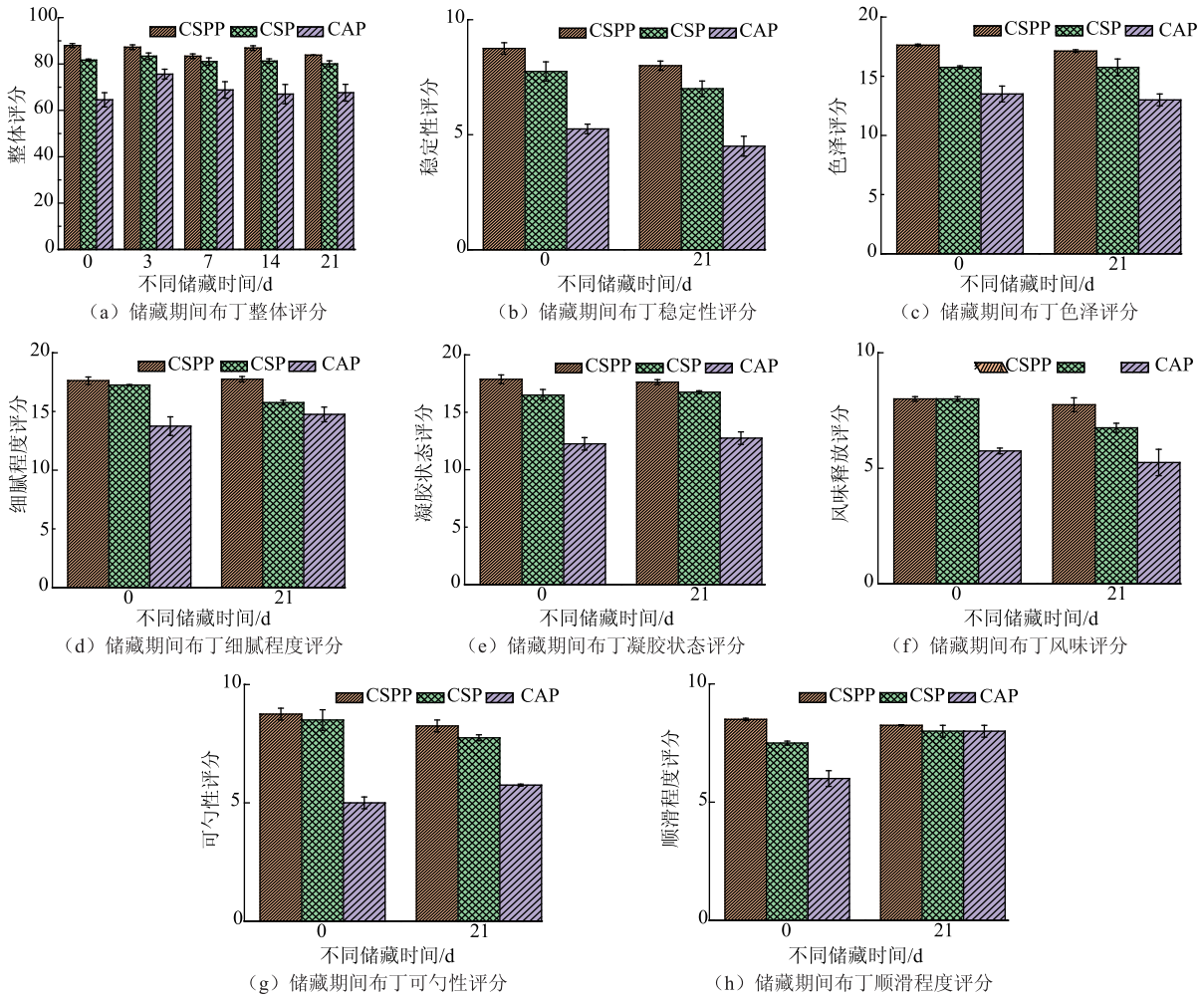


图 4　不同种类布丁储藏期间的感官评分

Fig. 4　Sensory ratings of different types of pudding during storage

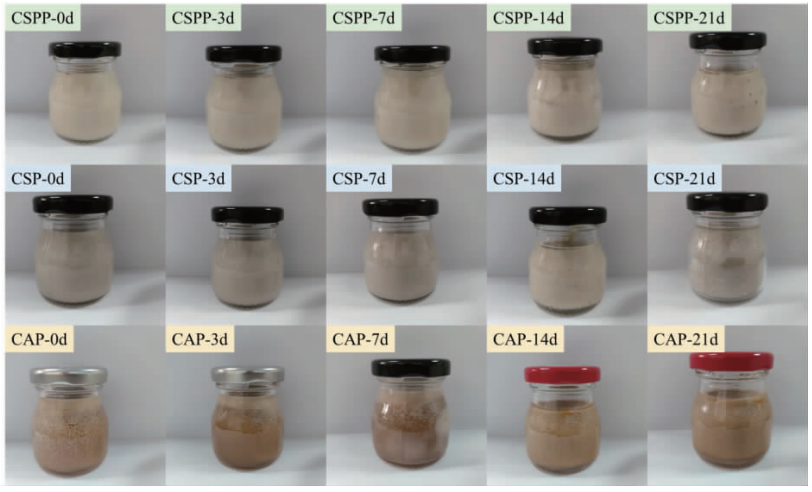


图 5　布丁产品储藏图

Fig. 5　Pictures of pudding products during storage

栗布丁,与市售板栗布丁的感官品质相比呈现出良好的感官品质。因此,基于板栗淀粉与豌豆蛋白组分间相互作用,调节并优化相应加工处理条件,可获得富含植物基蛋白的低血糖负荷生成指数的板栗布丁,同时可有效提升其质构和感官品质。

参考文献:

[1] PRACHAM S,THAIUDOM S. The effect of protein content in jasmine rice flour on textural and rheological properties of jasmine rice pudding[J]. **International Food Research Journal**,2016,23(4):1379-1388.
[2] THAIUDOM S,PRACHAM S. The influence of rice protein content and mixed stabilizers on textural and rheological properties of jasmine rice pudding[J]. **Food Hydrocolloids**,2018,76:204-215.
[3] ZHANG J J,YU S J,ZENG J C,et al. Effect of sugar on rheological characteristic of tapioca starch-milk-sugar pudding[J]. **Modern Food Science and Technology**,2009,25(3):241-248.
[4] 蒋坤,陈宇萍,张也. 聚葡萄糖对布丁凝胶特性及保藏特性的影响[J]. 现代食品,2021,24:99-105.
[5] KRISTANTI D,HERMINIATI A. Characteristics of physical,chemical,and organoleptic properties of inulin-enriched pudding as a complementary food[J]. **Earth and Environmental Science**,2019,251(1):012032.
[6] ZHENG J,WU J,DAI Y,et al. Influence of bamboo shoot dietary fiber on the rheological and textural properties of milk pudding [J]. **LWT–Food Science and Technology**,2017,84:364-369.
[7] SATTAR D,ALI T M,HASNAIN A. Effect of nongerminated and germinated legumes on antioxidant,functional,and sensory characteristics of rice puddings[J]. **Cereal Chemistry**,2017,94(3):417-423.
[8] 徐进,徐学明,金征宇,等. 极限糊精对小麦淀粉回生的影响[J]. 食品与生物技术学报,2014, 33(11): 1136-1141.
[9] 王宏伟,丁江涛,张艳艳,等. 湿热处理对薏米淀粉聚集态结构及糊化特性的影响[J]. 食品科学,2020, 41(17): 111-117.
[10] 谢涛,亢灵涛,唐正辉,等. 酶 - 湿热处理对锥栗淀粉理化特性的影响[J]. 农业机械学报,2015, 46(2): 222-227.
[11] 曹旭,辛明航,刘婷婷,等. 湿热处理对油莎豆淀粉理化性质、结构及体外消化特性的影响[J]. 中国粮油学报,2022, 37(10): 1-12.
[12] ZHOU S,HONG Y,GU Z,et al. Effect of heat-moisture treatment on the *in vitro* digestibility and physicochemical properties of starch-hydrocolloid complexes[J]. **Food Hydrocolloids**,2020,104:105736.
[13] CHEN X,LUO J,FU L,et al. Structural,physicochemical,and digestibility properties of starch-soybean peptide complex subjected to heat moisture treatment[J]. **Food Chemistry**,2019,297:124957.
[14] CHI C,LI X,ZHANG Y,et al. Understanding the mechanism of starch digestion mitigation by rice protein and its enzymatic hydrolysates[J]. **Food Hydrocolloids**,2018,84:473-480.
[15] 张洁,张根义. 燕麦全麦粉中淀粉消化性的研究[J]. 食品与生物技术学报,2018, 37(2): 171-178.
[16] 李妍馥,梅小龙,骆安琪,等. 板栗及其加工副产物的活性物质研究进展[J]. 食品安全质量检测学报,2021, 12(24): 9490-9498.
[17] 徐忠,王友健,陈晓明,等. 豌豆蛋白及豌豆抗氧化肽研究进展[J]. 食品工业,2020, 41(6): 258-262.
[18] ENGLYST H N,KINGMAN S M,CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. **European Journal of Clinical Nutrition**,1992,46:33-50.
[19] GOÑI I,GARCIA A A,CALXTO C F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index[J]. **Nutrition Research**,1997,17(3):427-437.
[20] 国家卫生健康委员会,食物血糖生成指数测定方法:WS/T 652—2019[S]. 中国卫生法制,2019, 27(5): 30.
[21] BAIK M Y,KIM K J,CHEON K C,et al. Recrystallization kinetics and glass transition of rice starch gel system[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**,1997,45(11):4242-4248.
[22] 中国国家标准化管理委员会,感官分析 方法学 总论:GB/T 10220—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
[23] 孙婵婵,张民,田朝杰,等. 超微粉碎 - 微粒化组合技术对乳清蛋白结构和加工特性的影响[J]. 现代食品科技,2015, 31(12): 263-268.
[24] 刘雨阳,微粒化谷物蛋白在食品体系中的应用研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
[25] MORELL P,CHEN J,FISZMAN S. The role of starch and saliva in tribology studies and the sensory perception of protein-added yogurts[J]. **Food & Function**,2017,8(2):545-553.
[26] CUI B,LU Y M,TAN C P,et al. Effect of cross-linked acetylated starch content on the structure and stability of set yoghurt[J]. **Food Hydrocolloids**,2014,35:576-582.