

不同变性淀粉对蛋白棒贮藏品质的影响

王一茜, 胡雪微, 温成荣, 祁立波, 尚 珊, 傅宝尚

Effect of Different Modified Starches on Storage Quality of Protein Bars

WANG Yiqian, HU Xuewei, WEN Chengrong, QI Libo, SHANG Shan, and FU Baoshang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060346>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高蛋白营养棒储藏期硬化机理及抗硬化措施的研究进展

Research Progress of Hardening Mechanism and Anti-hardening Measures of High-protein Nutrition Bars during Storage

食品工业科技. 2021, 42(2): 351-357,363 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030289>

不同气调包装对熟制蟹肉蟹黄贮藏品质的影响

Effect of Different Modified Atmosphere Packaging on Storage Quality of Cooked Crab Meat with Crab Roe

食品工业科技. 2021, 42(2): 264-269,278 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020040034>

大豆蛋白基素肉预制菜贮藏品质分析及其货架期预测

Storage Quality Analysis and Shelf Life Prediction of the Prepared Dish of Soybean Protein Artificial Meat

食品工业科技. 2024, 45(14): 300-307 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023080254>

谷朊粉和小麦淀粉添加量对重组面团冻藏品质的影响

Effect of Gluten and Wheat Starch on the Frozen Storage Quality of Reconstituted Dough

食品工业科技. 2022, 43(24): 38-44 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022020107>

杀菌方式对大豆蛋白基小酥肉贮藏品质影响与其货架期预测

Effect of Sterilization Methods on the Storage Quality of Soybean Protein-based Small Crisp Meat and Its Shelf Life Prediction

食品工业科技. 2025, 46(4): 333-341 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024020225>

不同类型变性淀粉对鲮鱼鱼糜凝胶特性的影响

Effects of Different Types of Modified Starch on Gel Properties of Spanish Mackerel Surimi

食品工业科技. 2023, 44(20): 85-92 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022120132>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王一茜, 胡雪微, 温成荣, 等. 不同变性淀粉对蛋白棒贮藏品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 131–137. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060346

WANG Yiqian, HU Xuewei, WEN Chengrong, et al. Effect of Different Modified Starches on Storage Quality of Protein Bars[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 131–137. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060346

· 研究与探讨 ·

不同变性淀粉对蛋白棒贮藏品质的影响

王一茜¹, 胡雪微¹, 温成荣^{1,2,3,4}, 祁立波^{1,2,3,4}, 尚 珊^{1,2,3,4}, 傅宝尚^{1,2,3,4,*}

(1.大连工业大学食品学院, 辽宁大连 116034;

2.海洋食品加工与安全控制全国重点实验室, 辽宁大连 116034;

3.国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁大连 116034;

4.海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 辽宁大连 116034)

摘要:为降低蛋白棒在贮藏期内老化程度, 提高其感官品质, 本研究通过测定蛋白棒的硬度、色度、直链及支链淀粉含量等, 探究了添加四种不同变性淀粉对蛋白棒老化程度的影响。结果表明, 四种变性淀粉都可以显著延缓蛋白棒硬化、褐变现象 ($P<0.05$)。预糊化乙酰化双淀粉己二酸酯 (Pregelatinized Acetylated Distarch Adipate, PADA)、羟丙基二淀粉磷酸酯 (Hydroxypropyl Distarch Phosphate, HDP)、磷酸酯双淀粉 (Distarch Phosphate, DP) 三种变性淀粉会影响直链淀粉与支链淀粉含量比值, 显著提高了慢消化淀粉 (Slowly Digestible Starch, SDS) 含量 ($P<0.05$)。乙酰化双淀粉己二酸酯 (Acetylated Distarch Adipate, ADA) 可显著降低蛋白棒硬度、褐变程度及老化焓值 ($P<0.05$), 改善了蛋白棒的感官品质。因此, ADA 为最适添加到蛋白棒中的变性淀粉。

关键词:变性淀粉, 蛋白棒, 硬化, 贮藏品质

中图分类号: TS236.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)10-0131-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060346



本文网刊:

Effect of Different Modified Starches on Storage Quality of Protein Bars

WANG Yiqian¹, HU Xuewei¹, WEN Chengrong^{1,2,3,4}, QI Libo^{1,2,3,4}, SHANG Shan^{1,2,3,4}, FU Baoshang^{1,2,3,4,*}

(1.School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China;

2.SK of Marine Food Processing & Safety Control, Dalian 116034, China;

3.National Engineering Research Center of Seafood, Dalian 116034, China;

4.Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian 116034, China)

Abstract: In order to mitigate protein bar aging during storage and enhance their sensory attributes, the effects of adding four different modified starches on protein bar aging were investigated in the present study through systematic measurements of hardness, colorimetric parameters, and amylose/amylopectin contents. The findings demonstrated that all four modified starches significantly inhibited protein bar hardening and browning ($P<0.05$). Pregelatinized acetylated distarch adipate (PADA), hydroxypropyl distarch phosphate (HDP), and distarch phosphate (DP) altered the ratio of straight-chain to branched-chain starch content while substantially increasing slowly digestible starch (SDS) levels ($P<0.05$). Acetylated distarch adipate (ADA) notably reduced hardness, browning intensity, and enthalpy of aging ($P<0.05$), thereby enhancing the sensory quality of protein bars. Therefore, ADA is the most suitable modified starch to be added to protein bars.

Key words: modified starches; protein bars; harden; storage quality

收稿日期: 2024-06-24

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1100503)。

作者简介: 王一茜 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品资源开发与综合利用, E-mail: 850522515@qq.com。

* 通信作者: 傅宝尚 (1989-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 食品资源开发与综合利用, E-mail: fubaoshang@dlpu.edu.cn。

蛋白棒是一类可以补充蛋白质的长条食物^[1],由于其蛋白质含量高(15%~50%)^[2]、热量低、方便携带以及便于储存等特点,从而深受健身人群以及有减肥需求的人群的喜爱。目前市场上大部分的蛋白棒最普遍的问题是贮藏和极易发生硬化现象,从而导致其口感以及风味等感官的劣变。目前研究发现蛋白棒硬化问题主要由贮藏初期(7 d内)的物理(水分迁移^[3]、相分离^[4])和贮藏一个月之后的化学(美拉德反应^[5]、二硫键诱导^[6])原因导致。蛋白棒贮藏初期硬化程度在很大程度上会影响贮藏后期硬化程度,所以本文主要对抑制蛋白棒贮藏初期硬化展开研究。

变性淀粉主要是指天然淀粉经酸处理、预糊化、醚化、酯化、交联或水解氧化等方法从而改变淀粉的固有性质,弥补其溶解性差、口感粗糙等缺点的一种碳水化合物。例如,乙酰化双淀粉己二酸酯是由混合酸酐对淀粉进行交联和酯化反应制备而成的,可以形成稳定的凝胶体系以及减少淀粉老化,常被作为增稠剂以及稳定剂使用^[7];羟丙基二淀粉磷酸酯是醚化反应交联磷酸盐后所得,醚化之后可以提高体系中稳定性以及透明度并且具有很强的抗回生能力^[8];磷酸酯双淀粉是原淀粉经磷酸交联反应而得,从而抑制淀粉颗粒吸水溶胀,增强淀粉分子的热稳定性^[9];预糊化淀粉指将淀粉与水结合后加热,经淀粉溶胀后的胶糊状物质,增加吸水性能^[10]。目前已有研究表明,在体系中加入变性淀粉可以延缓淀粉老化,改善食物品质的问题,景悦等^[9]研究表明在馒头中添加变性淀粉使其硬度降低,徐露等^[10]在木薯粉圆中添加羟丙基二淀粉磷酸酯发现变性淀粉可以显著提高粉圆的弹性及蒸煮品质。Nasir等^[11]研究发现在印度麦饼产品中加入2%的预糊化淀粉,可提高面团的产气能力,从而增强成品膨松度和品质特性。朱凯悦等^[12]研究发现在麻薯面包中添加磷酸酯双淀粉和预糊化乙酰化双淀粉己二酸酯,可以增强面团塑性且不易粘手,提升麻薯面包感官品质。

因此,本文以蛋白棒为研究对象并延续之前的研究,探究添加四种不同变性淀粉以及其最适添加量:预糊化乙酰化双淀粉己二酸酯(Pregelatinized Acetylated Distarch Adipate, PADA)、羟丙基二淀粉磷酸酯(Hydroxypropyl Distarch Phosphate, HDP)、磷酸酯双淀粉(Distarch Phosphate, DP)、乙酰化双淀粉己二酸酯(Acetylated Distarch Adipate, ADA)对蛋白棒初期贮藏(7 d)时的硬度、色度、直链及支链淀粉含量、淀粉结晶度、慢消化淀粉(Slowly Digestible Starch, SDS)含量、老化焓值、微观结构以及感官的影响,确定四种中最适添加到蛋白棒中的变性淀粉,以期改善蛋白棒在贮藏期间发生的老化反应提供一定的理论基础,同时为变性淀粉在烘焙食品产业化中的应用提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

大豆分离蛋白粉 临沂山松生物制品有限公

司;乳清蛋白粉、鱼胶原蛋白肽 河南余穆生物科技有限公司;魔芋粉 合肥谷中食品有限公司;白砂糖

大连山姆会员商店;塔格糖 聚萍科技有限公司;黄油 中粮东海粮油工业有限公司;鸡蛋 大连洪家畜牧有限公司;PADA(取代度 DS: 1.8%)、DP(取代度 DS: 2.5%)、HDP(取代度 DS: 4.3%)、ADA(取代度 DS: 1.6%) 中粮集团有限公司,均为食品级;支链-直链-总淀粉含量试剂盒 苏州格锐思生物科技有限公司;磷酸缓冲液、3,5-二硝基水杨酸 上海麦克林生化科技有限公司; α -淀粉酶(3000 U/mL)、葡萄糖苷酶(100000 U/mL) 上海源叶生物科技有限公司。

XHF-DY 高速分散器 宁波新芝生物科技有限公司;HM780 海氏厨师机 青岛汉尚电器有限公司;SCC-WE101 万能蒸烤箱 德国 Rational 公司;TA.XT.plus 质构仪 英国 SMS 公司;UltraScan Pro 测色仪 美国 Hunter Lab 公司;Infinite M200 酶标定量测定仪 奥地利 Tecan Austria GmbH 公司;10KVA X 射线衍射仪 日本岛津株式会社;DSC250 差式扫描量热仪 上海 TA 仪器有限责任公司;JSM-7800F 热场发射扫描电镜 日本电子株式会社;Thermo Fisher 冷冻离心机 上海卡耐兹实验仪器设备有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 蛋白棒制备 参考薛宇赞等^[13]制备蛋白棒方法。将混合粉料(110 g 大豆分离蛋白粉、15 g 乳清蛋白粉、30 g 鱼胶原蛋白肽、7.5 g 魔芋粉以及变性淀粉)放入厨师机中混合均匀后,将高速分散器打发 3 min 的液体物料(90 g 鸡蛋清、12 g 鸡蛋黄、12 g 黄油、24 g 白砂糖、3 g 塔格糖)倒入厨师机中搅拌直至物料充分延展,形成面团。将面团置于面垫上揉合均匀后分割成 30 g 面团,搓团、整形,平铺放置在模具中,将其放入烤箱 130 ℃ 焙烤 30 min;升温至 150 ℃ 焙烤 5 min。根据前期实验优化出了四种添加到蛋白棒中的变性淀粉添加量:ADA 为 4%,DP 为 4%,HDP 为 4%,PADA 为 8%,变性淀粉的添加量为占混合粉料百分比(m:m)^[14],以未添加变性淀粉的面团作为空白对照组。蛋白棒贮藏条件为常温(25 ℃)条件下贮藏 0、3、7 d。

1.2.2 硬度测定 使用质构仪测定蛋白棒硬度。测试采用 TPA 模式,探头为 P/50,实验参数为:测试前速度为 2.0 mm/s、测试中速度为 1.0 mm/s、测试后速度为 5.0 mm/s,测试距离为 30.0 mm,触发力为 10 g,压缩率 30%,每组蛋白棒平行测定 3 次。

1.2.3 色度测定 采用 UltraScan Pro 测色仪测定蛋白棒的色度。读出 L^* 、 a^* 、 b^* (L^* 表示亮度; a^* 表示红绿程度; b^* 表示黄蓝程度),每组样品重复测试 3 次。

1.2.4 直链淀粉/支链淀粉含量测定 采用分光光度法,使用试剂盒 G0548F,通过检测冻干蛋白棒粉

末样品的葡萄糖含量得到直链淀粉及支链淀粉的含量。

1.2.5 结晶度测定 参考杨勇^[15]的方法,通过 X 射线衍射仪测定贮存不同时间(0、3、7 d)的蛋白棒淀粉结晶度。测试条件为:管压 36 kV,管流 20 mA,扫描速度 2°/min,扫描区域 5°~35°,扫描方式为连续。

1.2.6 慢消化淀粉(Slowly Digestible Starch, SDS)含量测定 将贮存不同时间(0、7 d)的蛋白棒冷冻干燥,碾碎备用。称取 100 mg 样品,加入 15 mL 磷酸缓冲液(pH6.9),匀浆,加入 2 mL 1%的 α -淀粉酶,和 1 mL 葡萄糖苷酶,37 °C 下水解 20 min 后灭活,用 3,5-二硝基水杨酸测葡萄糖含量,水解 12 h 后测葡萄糖含量。

$$SDS(\%) = \frac{G - D}{F} \times 100$$

式中, G 为 20 min 内淀粉产生的葡萄糖含量,mg; D 为 0 min 内淀粉中葡萄糖含量,mg; F 为淀粉理论上水解成葡萄糖的含量,mg。

1.2.7 老化焓值测定 老化焓值的测定参考 Arp 等^[16]方法,采用差示扫描量热仪(Differential Scanning Calorimeter, DSC)进行分析。取蛋白棒中心部位称取 10~15 mg 于 DSC 专用铝制耐高压坩锅中,以空坩埚为对照组,升温范围为 10~100 °C,升温速率为 10 °C/min。

1.2.8 微观结构观察 参照臧梁等^[17]的方法,略有改动。使用电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察并记录蛋白棒的微观结构。将蛋白棒样品冷冻干燥后取中间部位置于 SEM 下观察(电压 10 kV)。

1.2.9 感官评价 挑选食品专业的 12 名(男性 6 位,

女性 6 位)研究生,年龄在 23~30 岁之间,并对其进行蛋白棒知识培训以阐述蛋白棒各指标定义,以色泽、风味、口感、组织状态和黏度为评定指标,对蛋白棒进行感官评定。感官评价标准见表 1。

1.3 数据处理

所有实验均采用三次平行,实验结果以平均值±标准偏差表示;使用 Microsoft Excel 2010 统计数据;采用 SPSS 22.0 中单因素 ANOVA 分析检验对数据进行显著性分析, $P<0.05$ 表示数据具有显著性,采用 Origin 2021 进行数据绘图。

2 结果与分析

2.1 不同变性淀粉对蛋白棒贮藏期硬度影响

空白组与实验组蛋白棒在 0~7 d 贮藏期间的硬度变化如图 1 所示。随着贮藏时间的延长,蛋白棒硬度均发生不同程度的升高,说明蛋白棒在贮藏期内发生了硬化。蛋白棒硬度相比空白组而言均有所下降,说明添加变性淀粉可以使蛋白棒的硬度显著下降,其中添加 ADA 组比添加其他淀粉组的硬度在贮藏第 3、7 d 时显著低于空白组($P<0.05$)。Zhang 等^[18]在研究发现了 ADA 比其他淀粉延缓直链淀粉链的聚集再生效果更明显,从而减缓体系回生硬化。同时 ADA 的强保水能力以及与支链淀粉之间形成的氢键,限制了直链淀粉与支链淀粉的重组而最大程度的减少蛋白棒硬化的程度^[19]。

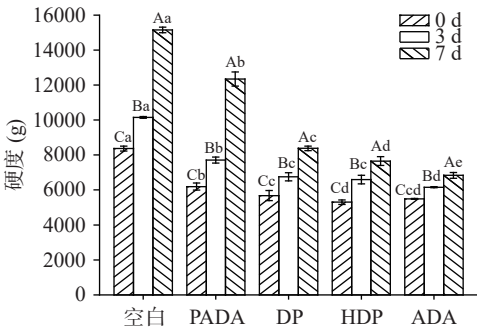


图 1 不同变性淀粉对蛋白棒贮藏期硬度的影响
Fig.1 Effect of different modified starch on hardness of protein bar during storage

注:不同大写字母表示贮藏不同天数样品具有差异性显著,不同小写字母表示添加不同淀粉样品具有显著性差异($P<0.05$),图 2、图 5、图 7 同。

2.2 不同变性淀粉对蛋白棒贮藏期色度的影响

从图 2 可看出,添加 ADA 的蛋白棒 L^* 显著($P<0.05$)高于其他组;经过 3、7 d 贮藏后 L^* 均显著下降($P<0.05$),蛋白棒失去光泽,ADA 及 HDP 在贮藏 3~7 d 时 L^* 相对稳定。在贮藏 0 d 和 3 d 时,添加 DP、HDP、ADA 的蛋白棒 a^* 显著低于空白组($P<0.05$),贮藏 7 d 时添加 ADA 的蛋白棒 a^* 显著低于空白组($P<0.05$),褐变程度下降;在贮藏 0 d 时添加四种不同变性淀粉蛋白棒 b^* 显著高于空白组($P<0.05$),在贮藏至 3、7 d 时添加 DP、HDP、ADA 的 b^* 显著高于空白组($P<0.05$), b^* 代表黄度值,升高

表 1 蛋白棒的感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for protein bar

指标	评分标准	评分
色泽 (20分)	表面光亮,颜色均匀,无明显变深现象	16~20
	外观颜色较好,有轻微变深现象,亮度一般	11~15
	表面颜色较差,有明显变深现象,色泽偏暗	1~10
风味 (20分)	味道较好,无脂肪酸败味,无豆腥味	16~20
	有些许脂肪酸败味和轻微豆腥味	11~15
	味道较差,有脂肪酸败味和豆腥味	1~10
口感 (20分)	口感软硬适中,味道甜而不噎噪	16~20
	口感偏软或偏硬,味道偏腻,噎噪	11~15
	口感不适,噎噪	1~10
组织状态 (20分)	形状规则完整,不易破碎或掉渣,无严重变形、开裂或断裂现象	16~20
	形状较为规则完整,轻微破碎,出现轻微变形、开裂或断裂现象	11~15
	形状不规则完整,易破碎或掉渣,出现严重变形、开裂或断裂现象	1~10
黏度 (20分)	咀嚼时不费力,不易粘牙	16~20
	咀嚼时稍微费力,轻微粘牙	11~15
	咀嚼时费力,易粘牙	1~10

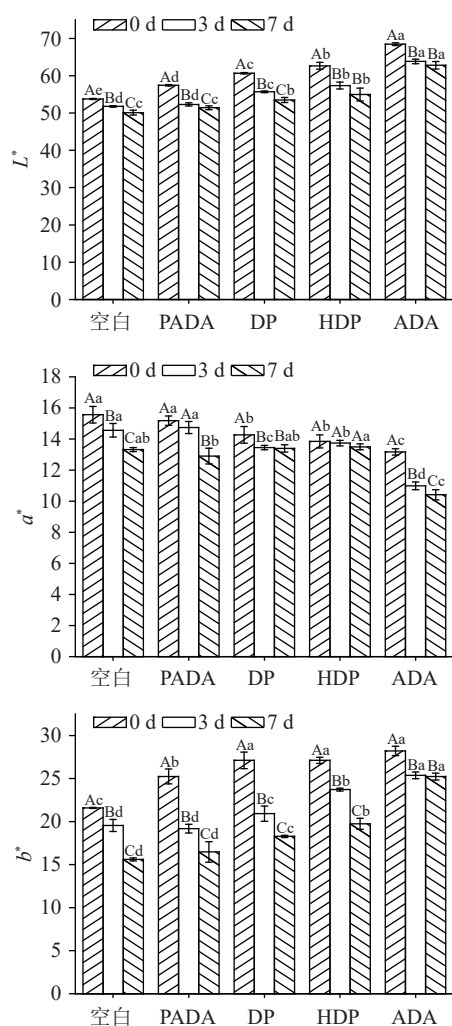


图2 不同变性淀粉对蛋白棒贮藏期色度的影响

Fig.2 Effect of different modified starch on color of protein bar during storage

表示整体色度呈现亮黄色,蛋白棒具有优良的色泽。Rożnowski 等^[20]研究经过不同变性淀粉与马铃薯淀粉样混合后的 D65 光源测定结果显示:随着磷酸根取代基团和酯化反应的参与,体系的 L^* 超过 92.50, 较优的 b^* 保持了食品感官的可接受性,和引入变性淀粉后改善了蛋白棒色泽的结果相符。

2.3 不同变性淀粉对蛋白棒贮藏期直链淀粉与支链淀粉含量的影响

直链淀粉长链与低支链淀粉单位链的协同作用有利于保持淀粉颗粒完整,提高淀粉凝胶体系的稳定性^[21]。如图 3 所示,添加了 HDP、DP 及 PADA 三种型号的变性淀粉后的蛋白棒体系淀粉分布都受到了破坏,其中添加 HDP、DP 的蛋白棒中直链淀粉含量显著($P < 0.05$)升高,添加 PADA 的蛋白棒中直链淀粉含量显著下降($P < 0.05$),添加 ADA 的蛋白棒中直链及支链淀粉分布未发生显著变化。Zhang 等^[22]针对支链淀粉精细结构对糖脆饼干的品质影响研究表明:高直链淀粉含量的淀粉长链较长,分子尺寸小,协同支链淀粉短链的数量增加,形成双螺旋结构储存水分子,增加面团的保水能力,从而提升面团

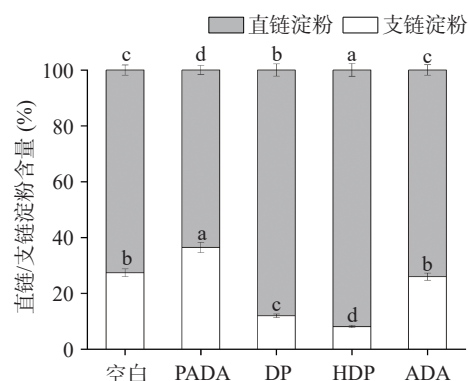


图3 不同变性淀粉对蛋白棒贮藏期直链与支链淀粉含量的影响

Fig.3 Effect of different modified starches on the content of straight-chain and branched-chain amylose in protein bars during storage

注:不同小写字母表示添加不同淀粉样品具有显著性差异($P < 0.05$)。

的粘弹性,保护面团体系结构稳定性。因此,ADA 的引入,由于其乙酰化与交联酯化的作用,保护了直链淀粉与支链淀粉的协同作用,提高了蛋白棒体系的稳定致密结构。

2.4 不同变性淀粉对蛋白棒贮藏期结晶度的影响

贮藏 0、3、7 d 的不同变性淀粉的蛋白棒 X 射线衍射图谱如图 4 所示,在贮藏 0 d 的蛋白棒新鲜样

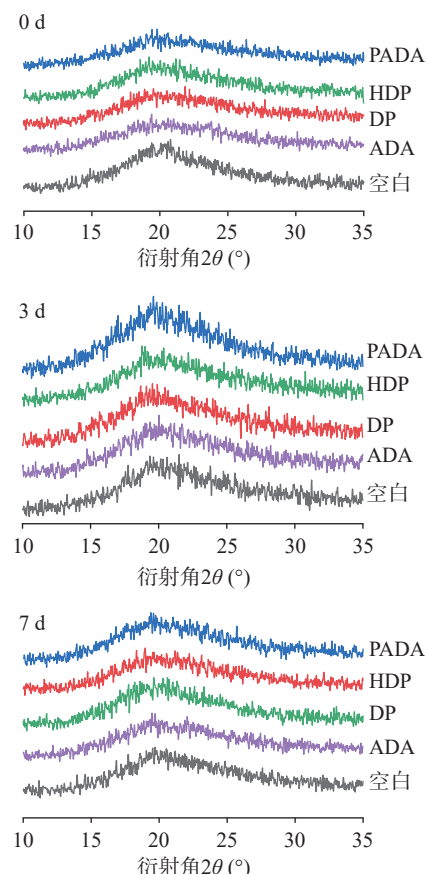


图4 不同变性淀粉对蛋白棒贮藏期结晶度的影响

Fig.4 Effect of different modified starch on crystallinity of protein bar during storage

品中,实验组蛋白棒与空白组相比 20°特征峰消失(20°特征峰为直链淀粉-脂质复合物的 V 型衍射峰^[23]),图谱趋向平缓,这是因为变性淀粉的添加破坏了淀粉结晶区,淀粉由有序结构趋向无序,淀粉老化程度降低,可能是因为水和多糖羟基间的作用,或多糖羟基与淀粉羟基间作用,从而防止淀粉回生,延缓了蛋白棒组分老化重结晶程度^[24]。而经过 3 d 及 7 d 贮藏后所有组在 20°V 型衍射峰强度均增大,说明淀粉在贮藏期内发生老化,但添加 ADA 组的 20°V 型衍射峰弧度较平缓,结晶度相对较小,说明相比于其它三组变性淀粉,ADA 延缓蛋白棒体系老化能力更强。

2.5 不同变性淀粉对蛋白棒贮藏期 SDS 含量的影响

测定淀粉体系中的 SDS 含量的变化可以用来表征淀粉制品的老化程度,即随 SDS 浓度增大、蛋白棒的老化程度增加^[25]。从图 5 可看出,在蛋白棒新鲜样品中,空白组 SDS 含量最多,实验组蛋白棒的 SDS 含量均显著下降($P<0.05$),而贮藏 7 d 后空白组以及添加 PADA、DP、HDP 的蛋白棒的 SDS 含量显著提高($P<0.05$)而添加 ADA 的蛋白棒 SDS 含量呈不显著变化($P>0.05$)。这说明随着贮藏时间的延长,蛋白棒中 SDS 含量呈现逐渐增加的趋势。而添加不同变性淀粉之后,蛋白棒体系内 SDS 含量随着引入变性淀粉呈现下降的趋势,说明添加变性淀粉对蛋白棒贮藏过程中的老化有一定的抑制作用^[26]。ADA 减少蛋白棒老化能力最强。

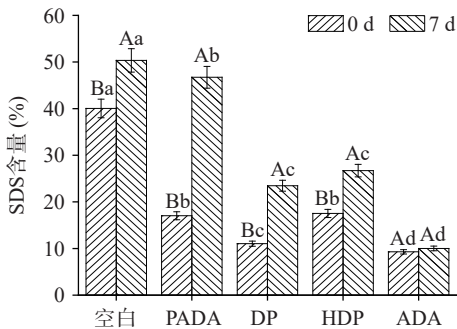


图 5 不同变性淀粉对蛋白棒贮藏期慢消化淀粉含量的影响
Fig.5 Effect of different modified starch on SDS content of protein bars during storage

2.6 不同变性淀粉对蛋白棒老化焓值影响

从表 2 可看出不同变性淀粉对蛋白棒老化焓值影响。DSC 热力学分析能通过测定淀粉体系在加热糊化、冷却回生过程中的老化焓值从而判定淀粉体系支链淀粉重结晶程度,焓值越大,表明淀粉老化程度越高^[27]。从表 2 可看出,蛋白棒新鲜样品随变性淀粉的引入无显著变化趋势($P>0.05$),但随贮藏至 7 d,蛋白棒的老化焓值均显著增大,其中添加 ADA 的蛋白棒老化焓值最低($P<0.05$),老化率最低。Li 等^[28]对比将天然淀粉与变性淀粉引入到面包后发现,经过贮藏后,糊化淀粉从无序化转向有序结构,支

表 2 不同变性淀粉对蛋白棒贮藏期老化焓值的影响
Table 2 Effect of different modified starches on the enthalpy of aging of protein bars during storage

淀粉类型	老化时间(d)	$\Delta H(J/g)$
空白	0	0.16 ± 0.01^{Cb}
	7	0.66 ± 0.04^{Ba}
PADA	0	0.25 ± 0.02^{Ab}
	7	0.76 ± 0.01^{Aa}
HDP	0	0.16 ± 0.01^{Cb}
	7	0.53 ± 0.04^{Ca}
DP	0	0.20 ± 0.01^{Bb}
	7	0.57 ± 0.01^{Ca}
ADA	0	0.15 ± 0.01^{Cb}
	7	0.33 ± 0.01^{Da}

注: ΔH 表示蛋白棒的老化焓值。不同小写字母表示贮藏不同天数样品具有显著性差异,不同大写字母表示添加不同淀粉样品具有显著性差异($P<0.05$)。

链淀粉重排后发生重结晶,老化过程伴随新晶体的形成,老化程度增大。但变性淀粉的引入增加了淀粉体系的含水量,保水能力增强,淀粉稀释后分子链间碰撞率下降,从而降低产品老化焓值,延缓淀粉老化程度。

2.7 不同变性淀粉对蛋白棒微观结构影响

用扫描电子显微镜观察在不同变性淀粉及贮藏期下的蛋白棒体系内的颗粒微观结构,结果如图 6 所示。随贮藏期延长,所有蛋白棒样品颗粒表面由光滑转为粗糙,淀粉颗粒被蛋白颗粒包埋,发生凹陷断裂,出现不规则网状片层截断面。另外,从图中可看出:随变性淀粉引入,蛋白棒体系微观结构的孔洞更均一细小,网络结构变得更紧密。这与王宏伟等^[29]对预糊化淀粉引入糯米粉后的微观结构表征结果是相符的,经过预糊化及改性处理后的淀粉,增加了体系内水分含量,自由水分子渗入淀粉颗粒后使淀粉分子破裂分离,体系孔隙变得更多更小,而随着贮藏期延长,淀粉颗粒重新聚合重结晶使得网状结构变厚,表明更粗糙,化学改性复合预糊化物理处理后的淀粉提升了体系自由水含量,使得体系疏松多孔,相对抑制了淀粉重新聚结老化的现象,微观结构更细腻清晰^[30]。

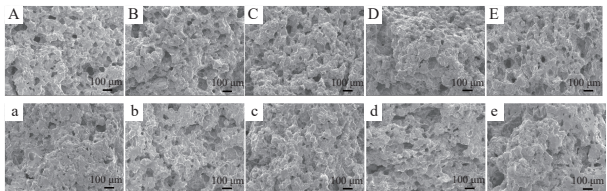


图 6 不同变性淀粉对蛋白棒贮藏期微观结构的影响(100×)
Fig.6 Effect of different modified starch on microstructure of protein bars during storage (100×)

注: A: 空白; B: PADA; C: HDP; D: DP; E: ADA(贮藏 0 d); a: 空白; b: PADA; c: HDP; d: DP; e: ADA(贮藏 7 d)。

2.8 不同变性淀粉对蛋白棒感官影响

空白组蛋白棒与实验组蛋白棒的感官变化如

图 7 所示。从图中可看出随着贮藏时间的延长蛋白棒感官评分均发生不同程度的降低,空白组蛋白棒感官劣变趋势最明显,是因为蛋白棒贮藏期由于蛋白结构的变化及硬化使得蛋白棒感官品质随之下降,但图中可以看出添加 ADA、HDP、DP 及 PADA 减缓了蛋白棒的感官品质劣变。其中,添加 ADA 组在贮藏 7 d 后蛋白棒感官评分最高。说明添加 ADA 有效延缓了蛋白棒的硬化从而改良蛋白棒的感官品质。Cao 等^[31]在将 ADA 引入蒸制米发糕中发现,添加 ADA 淀粉提高了体系的持水能力从而增强了产品抗老化性能,显著改善了产品的感官品质。

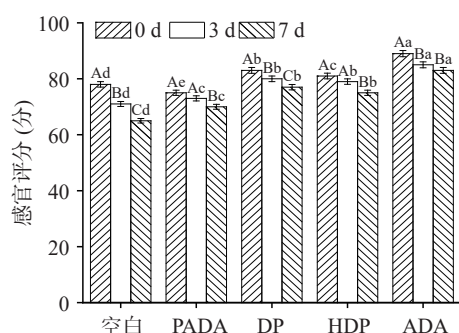


图 7 不同变性淀粉对蛋白棒贮藏期感官的影响

Fig.7 Effect of different modified starch on the sensory of protein bars during storage

3 结论

本研究探讨了在蛋白棒中添加四种不同变性淀粉对蛋白棒在贮藏 0~7 d 内老化程度的影响,研究表明变性淀粉(PADA、HDP、DP、ADA)的添加可以使蛋白棒体系更加稳定以及延缓蛋白棒老化。其中 PADA、HDP、DP 三种变性淀粉会影响直链淀粉与支链淀粉含量比值,显著提高了 SDS 含量($P < 0.05$)。ADA 可明显降低蛋白棒硬度、褐变程度及老化焓值($P < 0.05$),改善了蛋白棒的感官品质。因此 ADA 为最适添加到蛋白棒中的变性淀粉。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 聂海军. 酵母蛋白营养成分分析及其在蛋白棒中的应用研究[J]. 农产品加工, 2022, 9(18): 10-12. [NIE H J. Analysis of nutritional components of yeast protein and its application in protein bars[J]. Farm Products Processing, 2022, 9(18): 10-12.]
- [2] BANACH J, CLARK S, LAMSAL B. Texture and other changes during storage in model high-protein nutrition bars formulated with modified milk protein concentrates[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 56(1): 77-86.
- [3] HOGAN S A, CHAURIN V, O'KENNEDY B T, et al. Influence of dairy proteins on textural changes in high-protein bars[J]. International Dairy Journal, 2012, 26(1): 58-65.
- [4] LI Y, SZLACHETKA K, CHEN P, et al. Ingredient characterization and hardening of high-protein food bars: An NMR state dia-

gram approach[J]. Cereal chemistry, 2008, 85(6): 780-786.

- [5] ZHOU P, LIU X, LABUZA T P. Effects of moisture-induced whey protein aggregation on protein conformation, the state of water molecules, and the microstructure and texture of high-protein-containing matrix[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(12): 4534-4540.

- [6] RAO Q, ROCCA-SMITH J R, LABUZA T P. Storage stability of hen egg white powders in three protein/water dough model systems[J]. Food Chemistry, 2013, 138(2-3): 1087-1094.

- [7] 熊小兰, 杨俊丽, 梁庆民, 等. 乙酰化二淀粉磷酸酯的湿法制备及在食品中的应用研究[J]. 精细与专用化学品, 2022, 30(1): 31-34. [XIAONG X L, YANG J L, LUAN Q M, et al. Wet preparation of acetylated starch and its application in food[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2022, 30(1): 31-34.]

- [8] HESSO N, LOISEL C, CHEVALLIER S, et al. Erratum to: Impact of pregelatinized starches on the texture and staling of conventional and degassed pound cake[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(10): 2931-2931.

- [9] 景悦, 王文星, 杨留枝, 等. 抗性淀粉和聚葡萄糖对馒头品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(7): 76-81. [JING Y, WANG W X, YANG L Z, et al. Effect of resistant starch and polydextrose on the quality of steamed bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(7): 76-81.]

- [10] 徐露, 蔡淑玉, 陈乐宜, 等. 不同改良剂对木薯粉圆品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(10): 81-89. [XU L, CAI S Y, CHEN L Y, et al. Effect of different modifiers on the quality of tapioca pearl[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(10): 81-89.]

- [11] NASIR M, AHMAD S, USMAN M, et al. Influence of pregelatinized starch on rheology of composite flour, *in vitro* enzyme digestibility and textural properties of millet-based Chapatti[J]. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2021, 2: 100108.

- [12] 朱凯悦, 江彩艳, 温成荣, 等. 不同变性淀粉对麻糬面包品质的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(3): 209-215. [ZHU K Y, JIANG C Y, WEN C R, et al. Effects of different modified starches on the quality of mochi bread[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(3): 209-215.]

- [13] 薛宇赞, 胡雪微, 温成荣, 等. 亲水胶体对蛋白棒贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(21): 163-169. [XUE Y Y, HU X W, WEN C R, et al. Effect of hydrophilic colloid on storage quality of protein bar[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(21): 163-169.]

- [14] 王一菡, 胡雪微, 温成荣, 等. 不同变性淀粉对蛋白棒品质改良的研究[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-9[2025-02-28]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.039621>. [WANG Y Q, HU X W, WEN C R, et al. Study on the improvement of protein bar quality by different modified starch[J/OL]. Food and Fermentation Industry, 1-9[2025-02-28]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.039621>.]

- [15] 杨勇. 冻结方式对面团中淀粉理化性质及体外消化特性的影响研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2022. [YANG Y. Effect of freezing method on physicochemical properties and *in vitro* digestive characteristics of starch in dough[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2022.]

- [16] ARP C G, CORREA M J, FERRERO C. Kinetic study of staling in breads with high-amylose resistant starch[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 106: 105879.

- [17] 臧棠, 傅宝尚, 姜鹏飞, 等. 海藻酸丙二醇酯对全麦冷冻面团

- 冻藏稳定性和烘焙特性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(21): 83–91. [ZANG L, FU B S, JIANG P F, et al. Effect of propylene glycol alginate on frozen storage stability and baking characteristics of whole wheat frozen dough[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(21): 83–91.]
- [18] ZHANG D X, LIN Z T, LEI W, et al. Synergistic effects of acetylated distarch adipate and sesbania gum on gelatinization and retrogradation of wheat starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 156: 171–179.
- [19] 王睿纯, 李义, 林松毅, 等. 不同类型变性淀粉对鲑鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 85–92. [WANG R C, LI Y, LIN S Y, et al. Effects of different types of modified starch on gel properties of spanish mackerel surimi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 85–92.]
- [20] ROŻNOWSKI J, JUSZCZAK L, SZWAJA B, et al. Effect of esterification conditions on the physicochemical properties of phosphorylated potato starch[J]. *Polymers*, 2021, 13(15): 2548.
- [21] ZHANG J Y, KONG H U, BAN X F, et al. Rice noodle quality is structurally driven by the synergistic effect between amylose chain length and amylopectin unit-chain ratio[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 295: 119834.
- [22] ZHANG Z W, FAN X Y, YANG X Y, et al. Effects of amylose and amylopectin fine structure on sugar-snap cookie dough rheology and cookie quality[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 241: 116371.
- [23] 刘英因, 尚珊, 姜鹏飞, 等. 复配酶制剂与海藻酸丙二醇酯对藜麦面包品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(23): 95–105. [LIU Y N, SHANG S, JIANG P F, et al. Effect of compound enzyme preparation and propylene glycol alginate on the quality of quinoa bread[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(23): 95–105.]
- [24] MA Y X, CHEN Z D, WANG Z P, et al. Molecular interactions between apigenin and starch with different amylose/amylopectin ratios revealed by X-ray diffraction, FT-IR and solid-state NMR[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 310: 120737.
- [25] 付蕾, 田纪春, 汪浩. 抗性淀粉理化特性研究[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(5): 58–62. [FU L, TIAN J C, WANG H. Study on physicochemical properties of resistant starch[J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2009, 24(5): 58–62.]
- [26] 高云龙, 孙建国, 谢云卓, 等. 高粱抗性淀粉理化特性研究[J]. 现代食品, 2021(17): 56–59. [GAO Y L, SUN J G, XIE Y Z, et al. Study on physicochemical properties of sorghum resistant starch[J]. Modern Food, 2021(17): 56–59.]
- [27] MARINOPOULOU A, PETRIDIS D, RAPHAELIDES S N. Assessment of textural changes in sliced pan bread on aging using sensory and instrumental methods[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(7): e13982.
- [28] LI C, GIDLEY M J. Starch structure and exchangeable protons contribute to reduced aging of high-amylose wheat bread[J]. *Food Chemistry*, 2022, 385: 132673.
- [29] 王宏伟, 王新天, 肖乃勇, 等. 预糊化淀粉对糯米粉糊化、流变性能及微观结构的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(4): 57–62. [WANG H W, WANG X T, XIAO N Y, et al. Effects of pre-gelatinized starch on pasting, rheological properties and microstructure of glutinous rice[J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2019, 34(4): 57–62.]
- [30] AN D, LI H T, LI D S, et al. The relation between wheat starch properties and noodle springiness: From the view of microstructure quantitative analysis of gluten-based network[J]. *Food Chemistry*, 2022, 393: 133396.
- [31] CAO X H, HUANG Q Q, CONG Y H, et al. Enhancement of the selected physico-chemical properties of steamed rice cake by the application of acetylated distarch adipate[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16(5): 3526–3536.