

甜菜果胶对小麦淀粉老化的影响

王 心, 闫璟圆, 张 倩, 许 欢, 陈晓明, 徐 磊*

(淮阴工学院生命科学与食品工程学院 江苏淮安 223003)

摘要 采用流变仪、质构仪、傅里叶红外光谱仪、X-射线衍射仪、扫描电子显微镜等多种试验仪器研究甜菜果胶(SBP)添加量对小麦淀粉短期和长期老化特性的影响。结果表明:随着 SBP 添加量的增加,小麦淀粉的峰值黏度、终值黏度和相对崩解值显著提高($P<0.05$),而相对回生值显著降低($P<0.05$)。SBP 可降低淀粉的凝沉速率,静置 48 h 后的清液体积分数从 76.03%降低到 6.01%($P<0.05$)。添加 SBP 后,小麦淀粉凝胶在贮藏过程中的硬度增加量从 356.02 g 降低到 178.19 g($P<0.05$), $1\ 047\ \text{cm}^{-1}/1\ 022\ \text{cm}^{-1}$ 峰高比值从 0.72 降低到 0.61,而相对结晶度从 10.11%降低到 8.06%。此外,扫描电子显微镜结果显示较高添加量的 SBP 可使淀粉凝胶老化后表面粗糙度降低,仍保持蜂窝状结构。本研究表明,SBP 对小麦淀粉的老化具有一定的抑制作用,在淀粉基食品加工时可适量加入 SBP 来降低产品的老化程度。

关键词 小麦淀粉;甜菜果胶;老化特性;抑制

文章编号 1009-7848(2023)07-0169-08 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.07.018

小麦是世界上广泛种植的作物之一,可作为主要原料制作多种面制品,在我国居民日常饮食结构中占有重要地位。小麦淀粉占小麦籽粒干基质量的 65%~75%,是小麦粉的主要成分,通常直链淀粉含量约为 20%~30%^[1]。在食品加工过程中,小麦淀粉可在热和水的作用下发生糊化,然而,在贮藏过程中,糊化后的小麦淀粉不稳定,很容易发生老化,会引起食品力学性质的巨大变化,从而影响其营养价值和感官品质。淀粉老化是一个不可避免的持续过程,在老化过程中,糊化淀粉从无定型状态转变为不同的有序结构,一般可分为短期老化和长期老化^[2]。其中,短期老化主要归因于贮藏开始时直链淀粉的快速重排,而长期老化主要是由较长贮藏过程中支链淀粉的重结晶引起^[3]。

淀粉老化是限制淀粉应用的一个关键因素,因此,近年来越来越多的科学家致力于探究如何有效控制淀粉老化。目前,物理^[4]、酶^[5]等多种手段被用于延迟不同来源淀粉的老化,此外研究证实添加部分亲水胶体具有较好的抑制老化的效果,同时还可以克服天然淀粉的缺陷^[6]。刘成梅等^[7]研

究表明大豆可溶性膳食纤维与大米淀粉颗粒存在竞争水分子的行为,从而限制了凝胶网络结构中淀粉分子链的运动,抑制大米淀粉的短期和长期老化,且分子质量越高抑制效果越明显。Hou 等^[8]研究发现水提阿拉伯木聚糖能够抑制小麦淀粉的膨胀、溶解、直链淀粉渗漏,阻碍直、支链淀粉分子的聚集、重排,其中低分子质量阿拉伯木聚糖对小麦淀粉短期老化抑制效果好,而高分子质量阿拉伯木聚糖对小麦淀粉长期老化具有良好的抑制效果。Zhang 等^[9]研究了高、低分子质量果胶对玉米淀粉老化特性的影响,结果表明添加果胶使玉米淀粉在长期贮藏过程中的结晶度、凝胶硬度降低,且果胶分子质量越低抑制老化效果越明显,推测产生这种结果的原因主要是低分子质量果胶更易渗透到淀粉分子内部,从而增加淀粉链之间的距离,干扰淀粉回生过程中有序结构的形成。谢新华等^[10]详细阐释了细菌纤维素对大米淀粉凝胶糊化、热力学、结晶性和微结构的影响,指出该多糖可有效抑制大米淀粉凝胶的老化。亲水胶体因来源、分子质量、结构等差异,故作用于不同种类淀粉时,影响效果存在显著差异。

甜菜果胶(Sugar beet pectin,SBP)是一种甜菜加工的副产品,由于其较高的蛋白质和阿魏酰基含量,因此较其它果胶具有更高的乳化活性和稳定性,已被用作稳定剂和营养药物载体^[11]。目前,虽有文献报道了 SBP 对淀粉凝胶的影响^[12],但

收稿日期:2022-07-04

基金项目:国家自然科学基金项目(31801581);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX21_1500, SJCX21_1502)

第一作者:王心,女,硕士生

通信作者:徐磊 E-mail: dapangxulei@163.com

未见SBP对淀粉老化特性影响的研究报道。本研究通过流变仪、质构仪、傅里叶红外光谱仪、X-射线衍射仪、扫描电子显微镜等多种检测手段,探究SBP添加量对小麦淀粉短期和长期老化特性的影响,旨在为拓展亲水胶体在淀粉基食品中的应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 主要材料 小麦淀粉,山东渠风食品科技有限公司;甜菜果胶(SBP),德国Herbstreith&Fox KG公司。

1.1.2 主要仪器及设备 DHR-1流变仪,美国TA仪器公司;FD-2C冷冻干燥机,北京博医康实验仪器有限公司;SU8010型场发射扫描电镜,日本日立株式会社;Nicolet iS5傅里叶红外光谱仪,美国Thermo公司;CT3-25k质构仪,美国Brookfield公司;SmartLab 9kw X-射线衍射仪,日本理学株式会社。

1.2 试验方法

1.2.1 糊化性质测定 参照Zhang等^[13]的方法,采用流变仪的Starch Pasting Cell附件进行小麦淀粉糊化性质的测定。准确称取3.0 g小麦淀粉,放入专用铝盒中,加入25 mL SBP溶液(质量分数分别为0%,0.25%,0.50%,0.75%,1.00%),搅拌均匀后立即测定,记录所有样品的黏度曲线。程序控制如下:50℃平衡1 min,随后以12℃/min的加热速率从50℃升高至95℃,然后在95℃下保持2.5 min,然后再以12℃/min的降温速率冷却至50℃,最后在50℃下保持2 min。控制搅拌浆的速度在前10 s为960 r/min,而其余时间恒定为160 r/min。为了更加直观的描述淀粉糊化过程中性质的变化,参照Palabiyik等^[14]的方法引入相对崩解值和相对回生值,其中,相对崩解值按式(1)计算,相对回生值按式(2)计算。

$$\text{相对崩解值} = \frac{\text{崩解值}}{\text{峰值黏度}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{相对回生值} = \frac{\text{回生值}}{\text{终值黏度}} \times 100\% \quad (2)$$

1.2.2 凝沉特性测定 取小麦淀粉0.1 g,加入10 mL质量分数分别为0%,0.25%,0.50%,0.75%,1.00%的SBP溶液,振荡混匀,然后于95℃水浴中加热20 min,冷却至室温后立即转移至10 mL

量筒中,分别于4℃环境冷藏0,3,6,12,24,36,48 h,记录上清液体积。

1.2.3 短期老化测定 采用流变仪的Starch Pasting Cell附件进行小麦淀粉短期老化测定,按照1.2.1节方法制备淀粉糊,将样品冷却至20℃并保持5 min,使温度和应力达到平衡,然后进行动态时间扫描,记录储能模量(G')和损耗角正切($\tan\delta$)在老化过程中的变化。测试温度为20℃,时间为5 h,频率为1 Hz,扫描应变为1%。

1.2.4 凝胶强度测定 参照Zhang等^[9]的方法并稍作修改。取1.2.1节中糊化的样品,趁热转移至塑料圆筒内(直径28 mm,高度25 mm),冷却至室温后放置于4℃冰箱,分别冷藏1,21 d后进行凝胶强度测定。测试条件如下:压缩模式,选用TA-AACC36探头,试验前、试验中和试验后的速度均为1.0 mm/s,压缩形变为30%,触发力为5 g。

1.2.5 傅里叶红外光谱测定 取1.2.4节中制备的老化21 d的淀粉凝胶样品,冷冻干燥后粉碎过100目筛。将所得样品与KBr按照质量比1:50混合,充分研磨,压片后于傅里叶红外光谱仪中扫描。扫描波数范围为4 000~400 cm^{-1} ,分辨率为4 cm^{-1} ,扫描次数为32次,测试时以KBr作为空白来扣除背景。

1.2.6 X-射线衍射测定 利用X-射线衍射技术对老化21 d的淀粉凝胶样品的长程有序结构进行定性和定量分析^[15]。采用铜靶Cu $K\alpha$,管压为40 kV,管流为150 mA,扫描范围为5°~50°(2θ),扫描速度为5°/min。采用MDI Jade 6.0进行结果分析,相对结晶度为结晶面积与总衍射图面积的比率。

1.2.7 微观结构观察 按照1.2.4节所述制备回生1,21 d的淀粉凝胶样品,真空冷冻干燥48 h,然后采用剪刀进行裁剪,选取中心截面处样品。利用双面导电胶带将样品固定于样品台上,真空喷金后置于扫描电子显微镜中放大200倍观察,加速电压为5 kV。

1.3 数据统计与分析

所有数据均采用SPSS 20.0软件进行ANOVA差异显著性分析($P < 0.05$ 表示有显著性差异),并利用OriginPro 2021软件绘图。

2 结果与分析

2.1 糊化性质

由表 1 可知,随着 SBP 添加量的提高,小麦淀粉的峰值黏度和终值黏度均显著升高($P<0.05$),1.00%添加量时分别提高了 0.51 和 0.23 倍。SBP 是一种低分子质量的高乙酰化果胶,因而其黏度远低于其它来源果胶^[6]。添加 SBP 后,淀粉峰值黏度和终值黏度提高,此可归因于一方面 SBP 可促进淀粉颗粒的膨胀,另一方面 SBP 与膨胀的淀粉颗粒及渗漏出的直链淀粉相互作用,促进了更加紧密的三维网络结构的形成^[9]。相对崩解值可以描述淀粉颗粒在受到剪切和热处理时的稳定性^[14]。当添加 SBP 后,淀粉的相对崩解值逐渐增加,这主要是因为 SBP 导致淀粉糊黏度升高,因而在搅拌

时施加在膨胀淀粉颗粒上的剪切力更大,可引起淀粉颗粒更大程度的膨胀和破裂。相对回生值可用于表征淀粉受热膨胀过程中渗漏的淀粉分子在冷却过程中重新聚集的能力^[17]。与小麦淀粉相比,添加 SBP 后,淀粉糊的相对回生值呈逐渐下降的趋势,这可能是因为 SBP 通过分子间缠绕和氢键等作用力与淀粉分子发生相互作用,从而干扰了淀粉分子的聚集和重排。此结果表明 SBP 对小麦淀粉的短期回生具有一定的抑制作用。这一发现与 Zhou 等^[18]报道的黑木耳多糖可以增强芸豆淀粉的黏弹性,而减缓了淀粉在冷藏过程中的回生的结果一致。添加 SBP 后,小麦淀粉的糊化温度虽略有降低,但并不显著($P>0.05$)。

表 1 SBP 对小麦淀粉糊化性质的影响

Table 1 Effect of added SBP on pasting properties of wheat starch

SBP 添加量/%	峰值黏度/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	终值黏度/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	相对崩解值/%	相对回生值/%	糊化温度/ $^{\circ}\text{C}$
0	$1\ 573.61 \pm 10.28^e$	$1\ 849.45 \pm 9.22^e$	51.33 ± 0.37^e	58.59 ± 0.29^a	62.60 ± 0.33^a
0.25	$1\ 673.90 \pm 9.15^d$	$1\ 892.61 \pm 15.27^d$	50.44 ± 0.59^e	56.17 ± 0.14^b	62.54 ± 0.23^a
0.50	$1\ 833.41 \pm 21.47^c$	$1\ 929.53 \pm 9.03^c$	52.05 ± 0.19^b	54.44 ± 0.10^c	62.44 ± 0.37^a
0.75	$2\ 191.56 \pm 12.13^b$	$2\ 142.34 \pm 19.36^b$	54.94 ± 0.30^a	53.90 ± 0.21^d	62.39 ± 0.29^a
1.00	$2\ 373.42 \pm 34.09^a$	$2\ 281.48 \pm 28.10^a$	54.92 ± 0.21^a	53.10 ± 0.18^e	62.11 ± 0.25^a

注:同一列中不同的小写字母表示数据之间具有显著差异($P<0.05$)。

2.2 凝沉特性

稀淀粉糊在低温静置时,由于淀粉分子的重结晶作用,会出现凝沉现象,表现为上方清液、下方沉淀的明显两层^[19]。添加不同含量 SBP 后,小麦淀粉凝沉特性的变化如图 1 所示。未添加 SBP 的小麦淀粉静置后迅速发生凝沉现象,淀粉糊的清液体积分数在 3 h 就上升到了较高水平,高达 57.00%,并在之后仍缓慢增加,12 h 后达到了 76.03%,而后基本保持不变。随着 SBP 添加量的逐渐增加,小麦淀粉的凝沉速度逐渐降低,添加 1.00%SBP 的小麦淀粉糊在静置 48 h 后,清液体积分数仅为 6.01%。以上结果表明小麦淀粉糊在 SBP 存在下具有更好的贮存稳定性,更不易发生凝沉现象,SBP 对小麦淀粉的老化有抑制作用。

2.3 短期老化特性

淀粉糊在冷却过程中直链淀粉可以迅速发生聚集、重排,形成具有一定强度的凝胶三维网络结构,因此可以通过淀粉糊动态黏弹性的变化来表

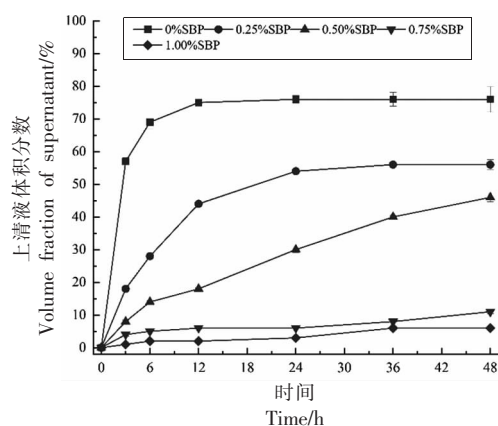


图 1 SBP 对小麦淀粉凝沉特性的影响

Fig.1 Effect of added SBP on sedimentation rate of wheat starch

征淀粉的短期老化特性^[7]。不同 SBP 添加量的小麦淀粉在 20 $^{\circ}\text{C}$ 老化 5 h 内 G' 和 $\tan\delta$ 随时间的变化曲线如图 2 所示。 G' 值可以反映凝胶弹性的大小,如图 2a 所示,未添加 SBP 的小麦淀粉的 G' 在老

化前期迅速上升,表明直链淀粉快速发生聚集,促进了凝胶网状结构的形成,之后增长缓慢,5 h后 G' 值增加了 696.27 Pa。Zhang 等^[20]也报道了小麦淀粉 G' 值的类似变化趋势。添加 SBP 后,小麦淀粉的 G' 值增长速率降低,添加 1.00%SBP 的小麦淀粉 5 h 后 G' 值仅增加了 383.97 Pa。 $\tan\delta$ 是反映样品黏弹性行为的重要指标,具有低 $\tan\delta$ 的凝胶表现出弹性行为,而具有高 $\tan\delta$ 的凝胶则表现出黏性行为。如图 2b 所示,随着时间的延长,所有样

品的 $\tan\delta$ 值均降低,表明所有淀粉糊都发生了短期老化,变得更具弹性。与 G' 变化的添加量依赖现象相对应, $\tan\delta$ 值的降低也与 SBP 添加量有关。随着 SBP 添加量的增加,各个时间点的 $\tan\delta$ 值显著升高,表明 SBP 抑制了直链淀粉的聚集,老化过程中形成网络结构较弱。 G' 和 $\tan\delta$ 的变化趋势表明加入 SBP 使小麦淀粉糊具有更好的稳定性,适当添加 SBP 可以明显改善小麦淀粉的短期老化行为。

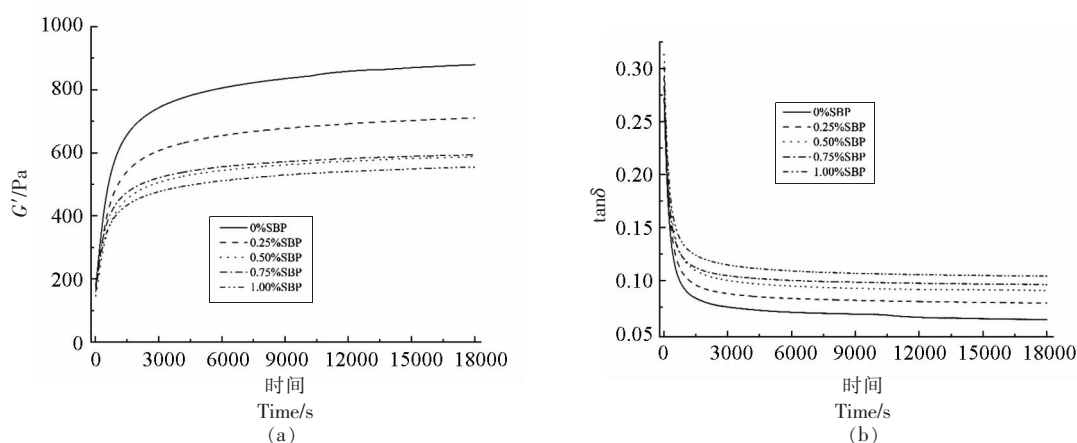
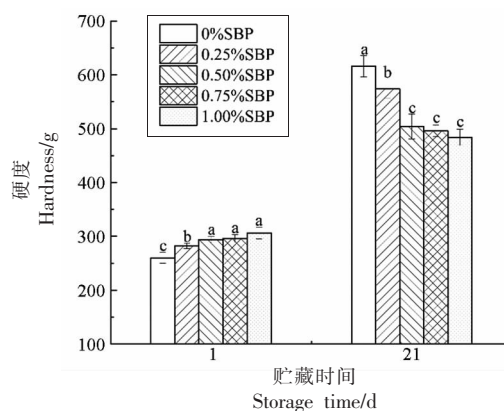


图 2 添加 SBP 后小麦淀粉在老化过程中 G' (a) 和 $\tan\delta$ (b) 随时间的变化

Fig.2 Effect of added SBP on the variation of storage modulus (a) and $\tan\delta$ (b) with time during wheat starch short-term retrogradation

2.4 凝胶强度

淀粉基食品硬度的增加是淀粉老化最显著的结果,因此其可作为衡量淀粉老化的指标^[21]。添加和未添加 SBP 的小麦淀粉凝胶,在 4 °C 下贮藏 1 d 和 21 d 后的硬度如图 3 所示。SBP 的加入显著增加了小麦淀粉的凝胶强度(1 d) ($P < 0.05$),这与糊化性质试验结果一致,表明淀粉糊黏度的增强有助于凝胶网络结构的形成。随着贮藏时间的延长,添加和未添加 SBP 的小麦淀粉凝胶硬度均显著增加 ($P < 0.05$),表明淀粉发生了老化。添加 SBP 后小麦淀粉凝胶的硬度值显著降低 ($P < 0.05$),表现出更为柔软的质地。贮藏 21 d 后,未添加 SBP 的小麦淀粉凝胶硬度增加了 356.02 g,而 1.00% SBP 添加量的小麦淀粉凝胶 21 d 后硬度仅增加了 178.19 g。SBP 的添加阻碍了老化过程中淀粉分子间的聚集、重排,从而降低了淀粉凝胶的强度,延缓了小麦淀粉的长期老化。茶叶提取物^[22]、蛋白水



注:同一指标不同的小写字母表示数据之间具有显著差异 ($P < 0.05$)。

图 3 SBP 对小麦淀粉凝胶强度的影响

Fig.3 Effect of added SBP on gel strength of wheat starch

解物^[23]等其它物质也被报道可以降低淀粉凝胶在贮藏期间的硬度。

2.5 傅里叶红外光谱

利用傅里叶红外光谱 (FTIR) 对老化 21 d 后的小麦淀粉样品的分子结构进行测定, 结果如图 4a 所示, 在 $4\ 000\sim 400\ \text{cm}^{-1}$ 各个淀粉样品红外吸收基团类型基本相同。 $3\ 700\sim 3\ 100\ \text{cm}^{-1}$ 处的强而宽的吸收峰与 $-\text{OH}$ 伸缩振动和分子间氢键相关, 随着 SBP 添加量的增加, 吸收峰逐渐变宽、变强且向低波长处移动, 这一结果表明添加的 SBP 与淀粉分子之间具有较强的分子间氢键作用。Liu 等^[24]在报道多糖对淀粉 FTIR 的影响时也得到类似结论。 $2\ 929\ \text{cm}^{-1}$ 处的尖锐吸收峰为 C-H 伸缩振动导致的。 $1\ 743\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰是甲酯化的羧基的伸缩振动造成的, 是果胶的特征吸收峰, 随着 SBP 添加量的增大, 小麦淀粉样品此处峰强度明显增强。 $1\ 650\ \text{cm}^{-1}$ 处的尖锐吸收峰是由游离羧基的伸缩振动引起的。

对 FTIR $1\ 100\sim 900\ \text{cm}^{-1}$ 谱段进行去卷积处

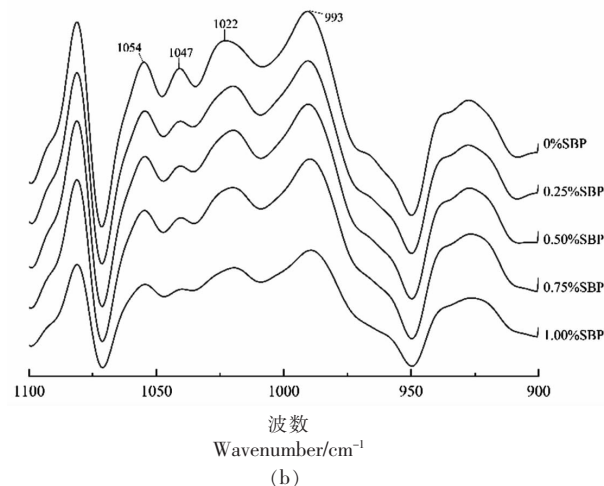
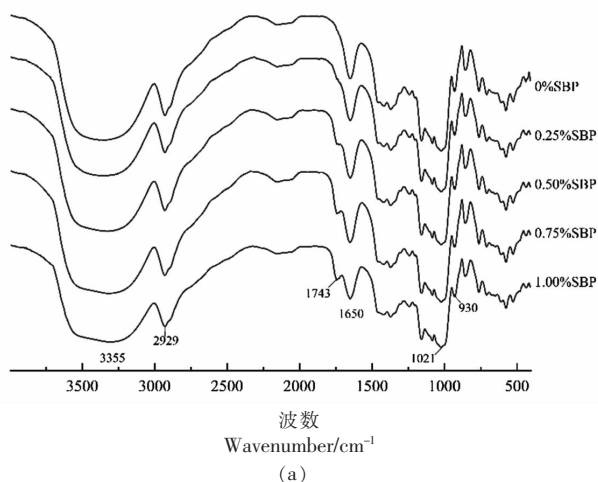


图 4 SBP 对老化小麦淀粉的傅里叶红外光谱 (a) 和去卷积光谱 (b) 的影响 (老化 21 d)

Fig.4 Effect of added SBP on FTIR (a) and deconvolution (b) spectra of wheat starch retrograded for 21 days

2.6 X-射线衍射

添加 SBP 对老化小麦淀粉 (21 d) 的 X-射线衍射图谱的影响如图 5 所示。天然小麦淀粉呈现典型的 A-型晶体衍射峰, 依次在 2θ 角 $15^\circ, 17^\circ, 18^\circ, 23^\circ$ 处出现衍射峰^[26]。糊化后, 小麦淀粉晶体结构被破坏, 老化 21 d 后仅在 2θ 角为 17° 和 20° 处出现较宽的衍射峰。虽然添加 SBP 未影响小麦淀粉的结晶结构, 但随着 SBP 添加量的增加, 相对结

表 2 SBP 对老化小麦淀粉的红外特征峰峰高比值的影响 (老化 21 d)

SBP 添加量/%	0	0.25	0.50	0.75	1.00
峰高比值 ($1\ 047\ \text{cm}^{-1}/1\ 022\ \text{cm}^{-1}$)	0.72	0.64	0.64	0.64	0.61

理, 结果如图 4b 所示。其中, $1\ 047\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸光度与淀粉的结晶区有关, 而 $1\ 022\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸光度与淀粉的无定型区有关^[25]。因此, $1\ 047\ \text{cm}^{-1}/1\ 022\ \text{cm}^{-1}$ 峰高比值可用于评价淀粉样品的结晶结构和短程有序性。从表 2 可知, 添加 SBP 后, 回生 21 d 后的小麦淀粉样品 $1\ 047\ \text{cm}^{-1}/1\ 022\ \text{cm}^{-1}$ 峰高比值均有所下降, 且随着 SBP 添加量的增加降低更为明显。这一结果表明, 添加 SBP 后小麦淀粉老化过程中淀粉分子重排受到影响, 有序结构减少, SBP 可以控制小麦淀粉的长期回生。

晶度从 10.11% 降低到 8.06%。与未添加 SBP 的小麦淀粉相比, 相对结晶度显著降低 ($P < 0.05$), 表明含有 SBP 的小麦淀粉样品具有较少的有序双螺旋结构。这可能是由于一方面 SBP 增加了淀粉分子的空间距离, 另一方面 SBP 可与淀粉分子形成氢键, 阻碍了淀粉分子间氢键的形成, 从而最终干扰了老化过程中淀粉有序结构的形成^[9]。此结果与 FTIR 中所测得的 $1\ 047\ \text{cm}^{-1}/1\ 022\ \text{cm}^{-1}$ 峰高比值

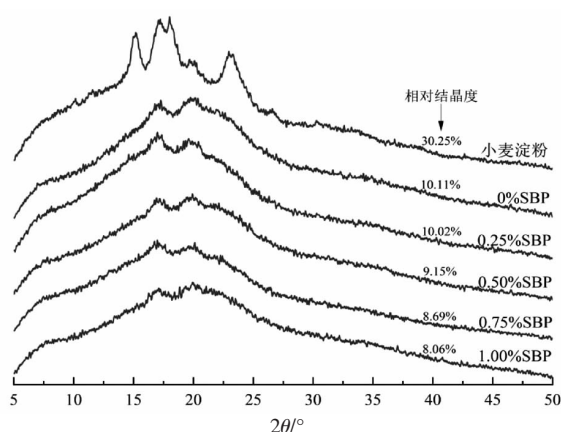


图5 SBP对老化小麦淀粉X-射线衍射图谱的影响(老化21 d)

Fig.5 Effect of added SBP on X-ray diffraction profile of wheat starch retrograded for 21 days

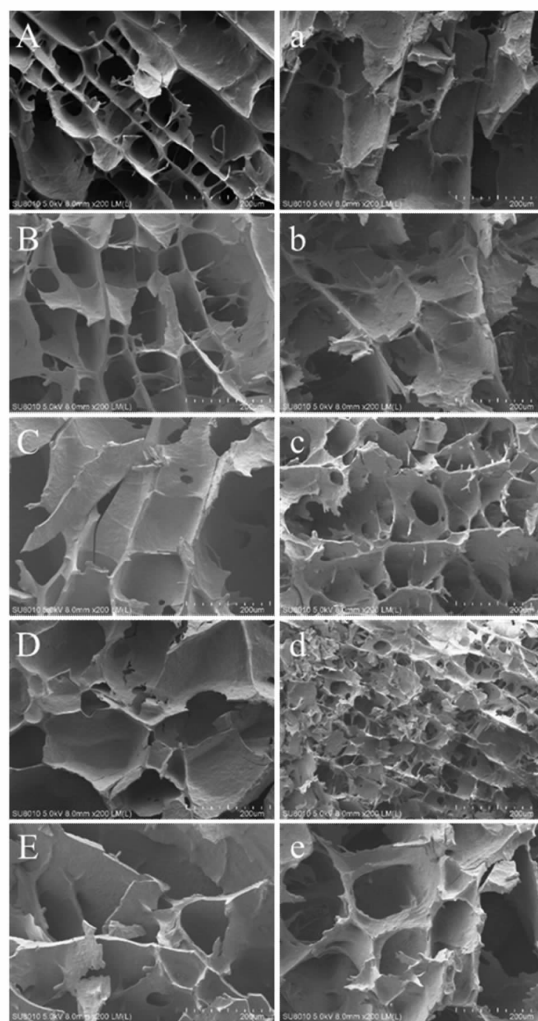
的变化趋势一致,进一步表明SBP对小麦淀粉的老化具有抑制作用,且呈添加量依赖关系。

2.7 微观结构

采用扫描电子显微镜(SEM)对老化不同时间的淀粉凝胶样品微观结构进行观察,结果如图6所示。由图6A~6E可以看出,小麦淀粉凝胶呈蜂窝状结构,随着SBP添加量的增加,凝胶表面孔洞增大,孔壁增厚。老化21 d后,淀粉凝胶的三维网络结构变弱,凝胶表面呈现粗糙的毛绒状结构。其中,0%和0.25%SBP添加量的淀粉凝胶样品蜂窝状结构基本消失,呈现碎片状。然而,当SBP添加量大于0.25%时,小麦淀粉凝胶中仍然可以观察到明显的蜂窝状结构,较老化1 d的样品,表面孔洞变小,粗糙度略有升高,仍呈现出相对紧密和有序的结构。这与Luo等^[27]研究的凉粉草多糖对小麦淀粉凝胶微观结构的影响结果相似。上述现象可归因于淀粉凝胶老化过程中位于连续相中的淀粉分子会发生聚集而引起相分离,而SBP可以抑制淀粉再生过程中的相分离行为,从而使凝胶保持相对致密的微观结构^[28]。SEM结果再一次证明了SBP可以延缓小麦淀粉的长期老化。

3 结论

本研究表明,SBP对小麦淀粉的短期和长期老化均有明显的抑制作用,且随添加量的增加抑制老化的效果增强。添加SBP后,小麦淀粉的峰值



注:A和a为0%SBP;B和b为0.25%SBP;C和c为0.50%SBP;D和d为0.75%SBP;E和e为1.00%SBP;A~E为老化1 d;a~e为老化21 d。

图6 SBP对老化小麦淀粉微观结构的影响(200×)

Fig.6 Effect of added SBP on microstructure of retrograded wheat starch (200×)

黏度、终值黏度和相对崩解值显著提高($P<0.05$),而相对回生值显著降低($P<0.05$)。随着SBP添加量的提高,小麦淀粉的凝沉稳定性逐渐提高,短期老化得到明显抑制。SBP可以抑制小麦淀粉凝胶贮藏过程中硬度的增加,降低淀粉老化过程中有序结构的形成。此外,高SBP添加量可以使老化后的淀粉凝胶仍保持蜂窝状结构和较低的表面粗糙度。从应用的角度看,SBP对淀粉的老化作用值得进一步探究,以便开发口感好、保质期更长的淀粉基产品。

参 考 文 献

- [1] MATIGNON A, TECANTE A. Starch retrogradation: From starch components to cereal products[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 68: 43–52.
- [2] GONG B, CHENG L L, GILBERT R G, et al. Distribution of short to medium amylose chains are major controllers of *in vitro* digestion of retrograded rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 634–643.
- [3] MILES M J, MORRIS V J, ORFORD P D, et al. The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch [J]. Carbohydrate Research, 1985, 135(2): 271–281.
- [4] COLUSSI R, KRINGEL D, KAUR L, et al. Dual modification of potato starch: Effects of heat–moisture and high pressure treatments on starch structure and functionalities[J]. Food Chemistry, 2020, 318: 126475.
- [5] CHENG W, SUN Y J, XIA X Z, et al. Effects of β -amylase treatment conditions on the gelatinization and retrogradation characteristics of wheat starch[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107286.
- [6] QIU S, YADAV M P, CHEN H, et al. Effects of corn fiber gum (CFG) on the pasting and thermal behaviors of maize starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 115: 246–252.
- [7] 刘成梅, 王日思, 罗舜菁, 等. 两种分子质量大豆可溶性膳食纤维对大米淀粉老化性质的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(10): 110–116.
LIU C M, WANG R S, LUO S J, et al. Effect of soybean soluble dietary fibers of different molecular weight on retrogradation properties of rice starch[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(10): 110–116.
- [8] HOU C D, ZHAO X H, TIAN M Q, et al. Impact of water extractable arabinoxylan with different molecular weight on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch[J]. Food Chemistry, 2020, 318: 126477.
- [9] ZHANG B, BAI B, PAN Y, et al. Effects of pectin with different molecular weight on gelatinization behavior, textural properties, retrogradation and *in vitro* digestibility of corn starch[J]. Food Chemistry, 2018, 264: 58–63.
- [10] 谢新华, 朱鸿帅, 徐超, 等. 细菌纤维素对大米淀粉凝胶老化影响[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(1): 40–43.
XIE X H, ZHU H S, XU C, et al. Effect of bacterial cellulose on gel ageing of rice starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(1): 40–43.
- [11] KARNIK D, JUNG J, HAWKING S, et al. Sugar beet pectin fractionated using isopropanol differs in galacturonic acid, protein, ferulic acid and surface hydrophobicity [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 179–185.
- [12] 肖志刚, 张权峰, 陈革, 等. 甜菜果胶对淀粉凝胶调控形成机制的研究[J]. 食品科技, 2019, 44(10): 283–288.
XIAO Z G, ZHANG Q F, CHEN G, et al. Study on the regulation mechanism of sugar beet pectin on starch gel[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(10): 283–288.
- [13] ZHANG H C, HE F L, WANG T, et al. Thermal, pasting, and rheological properties of potato starch dual-treated with CaCl_2 and dry heat [J]. LWT, 2021, 146: 111467
- [14] PALABIYIK İ, TOKER O S, KARAMAN S, et al. A modeling approach in the interpretation of starch pasting properties [J]. Journal of Cereal Science, 2017, 74: 272–278.
- [15] CHEN L, MA R R, ZHANG Z P, et al. Impact of frying conditions on hierarchical structures and oil absorption of normal maize starch[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97: 105231.
- [16] MESBAHI G, JAMALIAN J, FARAHNAKY A. A comparative study on functional properties of beet and citrus pectins in food systems[J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(4): 731–738.
- [17] XIAO Y H, LIU S C, SHEN M Y, et al. Effect of different *Mesona chinensis* polysaccharides on pasting, gelation, structural properties and *in vitro* digestibility of tapioca starch –*Mesona chinensis* polysaccharides gels [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105327.
- [18] ZHOU R, WANG Y J, WANG Z X, et al. Effects of *Auricularia auricula-judae* polysaccharide on pasting, gelatinization, rheology, structural properties and *in vitro* digestibility of kidney bean starch

- [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 191: 1105–1113.
- [19] 梁建兰, 刘秀凤, 赵萌, 等. 板栗贮藏前后淀粉性质的比较[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(1): 51–54.
LIANG J L, LIU X F, ZHAO M, et al. Starch property comparison of chestnut in pre-and post-storage[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(1): 51–54.
- [20] ZHANG M, SUN C, WANG X R, et al. Effect of rice protein hydrolysates on the short-term and long-term retrogradation of wheat starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 155: 1169–1175.
- [21] FU Z, CHEN J, LUO S J, et al. Effect of food additives on starch retrogradation: A review [J]. Starch - Stärke, 2015, 67(1/2): 69–78.
- [22] 王存堂, 高增明, 姜辰昊, 等. 茶叶乙醇提取物对蜡质玉米淀粉回生性质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(6): 53–60.
WANG C T, GAO Z M, JIANG C H, et al. Effect of ethanol extract of tea on the retrogradation of waxy corn starch[J]. Food Science, 2021, 42(6): 53–60.
- [23] XIAO J H, ZHONG Q X. Suppression of retrogradation of gelatinized rice starch by anti-listerial grass carp protein hydrolysate[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 72: 338–345.
- [24] LIU W M, ZHANG Y T, XU Z, et al. Cross-linked corn bran arabinoxylan improves the pasting, rheological, gelling properties of corn starch and reduces its *in vitro* digestibility[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 126: 107440.
- [25] SOEST J J, TOURNOIS H, WIT D D, et al. Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy [J]. Carbohydrate Research, 1995, 279: 201–214.
- [26] LI M, WANG J, WANG F F, et al. Insights into the multi-scale structure of wheat starch following acylation: Physicochemical properties and digestion characteristics [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107347.
- [27] LUO Y, XIAO Y H, SHEN M Y, et al. Effect of *Mesona chinensis* polysaccharide on the retrogradation properties of maize and waxy maize starches during storage[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105538.
- [28] WANG M T, SHEN Q, HU L L, et al. Physicochemical properties, structure and *in vitro* digestibility on complex of starch with lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) leaf flavonoids[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 191–199.

Effect of Sugar Beet Pectin on the Retrogradation of Wheat Starch

Wang Xin, Yan Jingyuan, Zhang Qian, Xu Huan, Chen Xiaoming, Xu Lei*

(School of Life Science and Food Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, Jiangsu)

Abstract The effects of sugar beet pectin (SBP) on the short-term and long-term retrogradation of wheat starch were investigated by rheological analysis, texture analysis, Fourier transform infrared spectroscopy, X-ray diffraction and scanning electron microscopy, respectively. The results showed that with increasing of SBP concentrations, the peak viscosity, final viscosity and relative breakdown viscosity of wheat starch significantly increased ($P<0.05$), while relative setback viscosity remarkably decreased ($P<0.05$). SBP reduced the sedimentation rate, and the volume fraction of supernatant after 48 hours of standing decreased from 76.03% to 6.01%. After adding SBP, the increment of starch gel hardness during storage significantly decreased from 356.02 to 178.19 g ($P<0.05$), the ratio of $1\ 047\ \text{cm}^{-1}/1\ 022\ \text{cm}^{-1}$ decreased from 0.72 to 0.61, and the relative crystallinity decreased from 10.11% to 8.06%. Moreover, scanning electron microscopy results showed that the higher addition of SBP could reduce the surface roughness of starch gel and maintain honeycomb structure after retrogradation. These results demonstrate that the addition of SBP plays a crucial role in interfering with retrogradation of wheat starch. Adding appropriate amount of SBP can reduce the retrogradation degree of starch based food during processing.

Keywords wheat starch; sugar beet pectin; retrogradation properties; inhibition