

次氯酸钠对慈姑淀粉理化特性的影响

Effects of sodium hypochlorite on the physicochemical characteristics of arrowhead starch

席婉婷^{1,2} 刘桂汝¹ 李 梦¹ 戢得蓉¹ 段丽丽¹

XI Wanting^{1,2} LIU Guiru¹ LI Meng¹ JI Derong¹ DUAN Lili¹

(1. 四川旅游学院食品学院, 四川 成都 610100; 2. 广州大学化学化工学院, 广东 广州 510000)

(1. College of Food and Technology, Sichuan Tourism College, Chengdu, Sichuan 610100, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering of Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510000, China)

摘要:目的:探究次氯酸钠在氧化慈姑淀粉中的应用。方法:在弱碱性环境下,以次氯酸钠为氧化剂,选取添加量分别为0%,1%,3%,5%,7%,9%(以有效氯占干基慈姑淀粉的质量分数计),与慈姑淀粉氧化反应4 h制成改性淀粉,随后测定其直链淀粉含量、冻融稳定性、溶解度和膨润力、凝沉稳定性、色差、透光率、电镜扫描、X-衍射及消化特性等。结果:随着添加量的增加,淀粉透明度、溶解性、直链淀粉含量增加,直链淀粉含量从55.59%上升到79.02%;在添加量为5%,7%,9%时,透光率达到90%以上;添加量为9%时,透光率高达97.13%。在80℃时,随着添加量的增加,溶解度从4.01%上升到32.59%,而膨润力降低,淀粉结晶度由43.99%降低到25.00%左右,淀粉表面逐渐粗糙,淀粉晶体结构遭到破坏。结论:次氯酸钠能明显改变慈姑淀粉的性质,且添加量不同性质改变有差异。

关键词:慈姑淀粉;次氯酸钠;氧化;理化性质;消化性

Abstract: Objective: The effect of sodium hypochlorite on the physicochemical properties and digestive characteristics of arrowhead starch was studied. Methods: In a weakly alkaline environment, sodium hypochlorite was used as an oxidant, and the added amounts were 0%, 1%, 3%, 5%, 7%, and 9% (based on the mass fraction of available chlorine in dry basis arrowhead starch). Following a 4-hour oxidation reaction with arrowhead starch, the modified starch's amylose content,

swelling power, solubility, coagulation stability, color difference, light transmittance, scanning electron microscopy, X-ray diffraction, and other physical and chemical properties were measured, along with its digestibility. Results: The amylose concentration, solubility and transparency all arose as the additive amount was increased. The amylose content increased from 55.59% to 79.02%. When the addition amount was 5%, 7%, and 9%, the light transmittance reached more than 90%. When the addition amount was 9%, the light transmittance reached 97.13%. At 80℃, with the increase of the addition amount, the solubility increased from 4.01% to 32.59%, while the swelling power decreased, and the crystallinity of starch decreased from 43.99% to about 25.00%. The surface of starch became rough gradually, the crystal structure of starch was destroyed, and the content of amylose increased. Conclusion: Sodium hypochlorite could significantly change the properties of arrowhead starch, and the changes in properties vary with the amount of addition.

Keywords: arrowhead starch; sodium hypochlorite; oxidation; physical and chemical properties; digestibility

慈姑是泽泻科慈菇属的一种水生草本植物,又称慈菇、茨菇等,为中国原产植物,喜阳光,多种植于低洼水田处^[1]。慈姑作为药食同源原料,其蛋白质、膳食纤维等营养物质含量也十分丰富,同时还有钾、镁、铁等微量元素^[2],在保肝^[3]、抗氧化^[4]等医学用途上也有很好的作用。慈姑淀粉近些年来也逐渐被开发利用^[5],但慈姑淀粉的易老化、糊化后透明度差等情况局限了其利用可能性^[6]。

次氯酸钠是工业上常用的制备氧化淀粉的氧化剂,价格低廉,氧化效果好^[7],其反应原理是在次氯酸钠作用下,被氧化淀粉的C₂、C₃位上的仲羟基氧化成酮基,C₂—

基金项目:四川旅游学院科研创新团队滚动专项(编号:22SCTUTG01);大学生创新创业训练项目(编号:202211552234);四川旅游学院校级重点科研项目(编号:19SCTUZZ04)

作者简介:席婉婷,女,广州大学在读硕士研究生。

通信作者:戢得蓉(1989—),女,四川旅游学院副教授,硕士。

E-mail:240765570@qq.com

收稿日期:2023-03-24 **改回日期:**2023-09-16

C₃键容易发生氧化断裂生成醛基,进一步生成羧基。次氯酸钠氧化在水相中进行,氧化后淀粉颗粒结晶结构被破坏^[8]。次氯酸钠改性淀粉研究多是关于马铃薯、玉米淀粉等^[9],氧化后的淀粉可以更好地应用在食品包装、加工、贮藏^[10]和其他非食品工业中。

研究拟选取次氯酸钠为氧化剂,分别添加 0%,1%,3%,5%,7%,9%(以有效氯占干基慈姑淀粉的质量分数计),作用于慈姑淀粉制备氧化慈姑淀粉,探讨次氯酸钠对氧化慈姑淀粉品质的影响,以期为氧化慈姑淀粉的制备提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

慈姑淀粉:弥勒市竹园镇蔗林食品厂;

次氯酸钠、硫酸、氢氧化钠:分析纯,成都市科隆化工有限公司;

胰淀粉酶、葡萄糖淀粉酶、转化酶:博立生物制品有限公司;

砂芯过滤装置:250 mL,海盐新东方强化科技有限公司;

分析天平:FA1004 型,常州衡正电子仪器有限公司;

恒温水浴锅:DZKW-S-8 型,北京市永光明医疗仪器有限公司;

pH 计:Ph818 型,东莞万科仪器有限公司;

紫外分光光度计:UV8100 型,北京莱伯泰科仪器有限公司;

电热鼓风干燥器:101-6A 型,北京中兴伟业仪器有限公司;

真空冷冻干燥机:FD-1A-50 型,北京博医康实验仪器有限公司;

HD 场发射扫描电子显微镜:SIGMA HD 型,德国蔡司公司;

傅立叶变换红外光谱仪:Nicolet is 50 型,美国赛默飞世尔科技公司;

X-射线衍射仪:Rigaku smartlab 9 型,日本株式会社理学公司;

台式高速冷冻离心机:H2050R 型,长沙湘仪离心机有限公司;

色差仪:SC-80C 型,北京康光仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 氧化慈姑淀粉制备 按照 Chong 等^[11]和周凤超等^[12]的方法,修改如下:取 70 g 慈姑淀粉加 140 mL 蒸馏水于 400 mL 烧杯中,用 1 mol/L NaOH 将淀粉糊调节至 pH 为 9.5 的弱碱性条件。在室温环境下,添加量分别为 0%,1%,3%,5%,7%,9%(以有效氯占干基慈姑淀粉的质量分数计)于烧杯中进行氧化处理,氧化反应时间持续

4 h,在氧化反应过程中加入次氯酸钠溶液,用量以有效氯占干基慈姑淀粉质量百分比表示,用 0.5 mol/L 盐酸保持溶液 pH 为 9.5,反应完成后将溶液 pH 调节至中性。氧化后的慈姑淀粉用砂芯抽滤装置抽滤,再用两倍体积的蒸馏水洗涤两次,然后在 45 °C 鼓风干燥箱中烘干至粉末状。

1.2.2 淀粉的羧基含量测定 按 GB/T 20374—2006《变性淀粉 氧化淀粉羧基含量的测定》执行,以总的羧基质量分数计。

1.2.3 直链淀粉含量测定 参考沈跃丽等^[13]的方法,修改如下:利用碘显色光度法,在 620 nm 波长下,测定其吸光度值。

1.2.4 冻融稳定性测定 参考吴珊等^[14]的方法,修改如下:将解冻后的慈姑淀粉在 4 000 r/min 离心 20 min,测定反复冷冻—解冻 4 次的析水率。

1.2.5 溶解度和膨润力测定 参考白婷等^[15]的方法。

1.2.6 凝沉稳定性测定 参考谢亚敏等^[16]的方法,修改如下:将 1%的淀粉糊水浴加热糊化后,摇匀倒入刻度为 100 mL 的具塞量筒中静置,每隔 4 h 记录上清液的体积,直至上清液体积基本无变化。

1.2.7 色差测定 参考杨学岩等^[17]的方法,利用色差仪对 L^* 、 a^* 、 b^* 值进行测定。

1.2.8 透明度的测定 参考范春艳等^[18]的方法,以蒸馏水为空白对照,在 650 nm 波长下测定淀粉透光率。将 1%的慈姑淀粉糊水浴加热 15 min,冷却至室温后在 650 nm 处测透光度。

1.2.9 消化特性测定 参考童姝^[19]的方法。

1.2.10 电镜扫描测定 将次氯酸钠改性后的慈姑淀粉在 40 °C 下鼓风干燥处理 24 h,过 300 目筛后,真空冷冻干燥 24 h,随后均匀分散于双面胶上,再固定在铜台,喷金后用扫描电镜观察。

1.2.11 红外光谱测定 采用 KBr 压片法,取约 2 mg 样品研磨,然后与 150 mg 干燥 KBr 粉末充分混合,再转入模具中,使之分布均匀,抽真空下压成透明薄片。装入压片夹以 KBr 空白压片作参比扫描红外光谱。

1.2.12 X-射线衍射测定 参考戴得蓉等^[20]的方法,使用 X 射线衍射仪测定改性前后慈姑淀粉的 X 射线衍射图。

1.2.13 数据统计分析 将每个样品做 3 次平行试验,试验数据采用 Origin、SPSS 和 Excel 进行处理。

2 结果与分析

2.1 羧基含量

羧基含量大小与淀粉被氧化程度有关,次氯酸钠添加量对慈姑淀粉羧基含量的影响见图 1。次氯酸钠添加量为 0%的即改性前慈姑淀粉羧基含量最低,只有 4.93%。

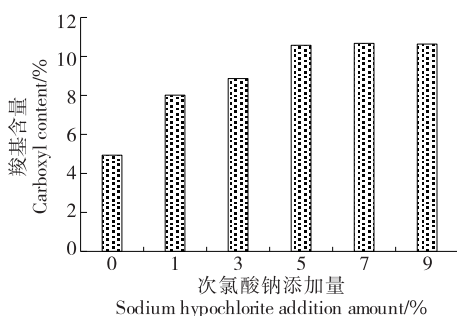


图1 添加不同量次氯酸改性后慈姑淀粉的羧基含量

Figure 1 Carboxyl content of arrowhead starch modified with hypochlorous acid

随着次氯酸钠添加量的增加,羧基含量提高,在添加量为5%时达到了10.57%,随后羧基含量变化不明显。其可能原因是,随着次氯酸钠用量的增加,反应体系中碱性增大,淀粉颗粒容易膨胀糊化^[21],导致氧化淀粉的效率不再上升。

2.2 直链淀粉含量

次氯酸添加对慈姑淀粉直链淀粉含量的影响见图2,次氯酸钠添加量为0%的慈姑淀粉的直链淀粉含量为55%左右,随着次氯酸钠添加量的增加,改性后的慈姑淀粉中直链淀粉含量增加,呈持续上升的趋势,添加量为0%时,直链淀粉含量仅为55.59%,而添加量为9%时,直链淀粉含量上升到最高,达到了79.02%。这可能是由于在非结晶区域结构中,淀粉中直链淀粉被释放出来。夏媛媛等^[8]的研究也表明氧化反应影响了淀粉非结晶结构,使该区域的直链淀粉分离出来。次氯酸钠改性后直链淀粉含量高的慈姑淀粉能更好地运用于包装材料、降解材料等多种工业中^[22]。

2.3 淀粉冻融稳定性

如图3所示,随着次氯酸钠添加量的增加,慈姑淀粉的析水率增大。同时,随着冻融次数的增加,析水率也不断变大。第一次冻融时,析水率从1.58%上升到了60.39%。次氯酸钠添加量为9%时,析水率最大。析水率上升,即次氯酸钠改性后的慈姑淀粉冻融稳定性变差,

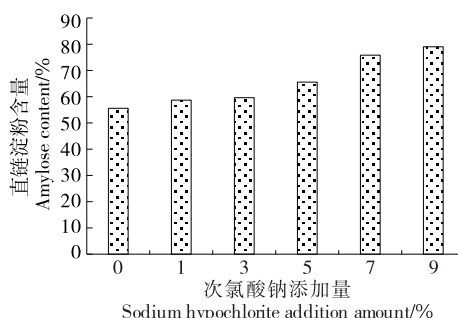


图2 添加不同量次氯酸改性后慈姑淀粉的直链淀粉含量

Figure 2 Amylose content of arrowhead starch modified with hypochlorous acid

且随着添加量的增加,冻融稳定性会更加降低。该现象表明改性后的慈姑淀粉不适用于做冷冻食品,析水率上升可能是由淀粉结构发生了改变,直链淀粉浸出后老化所导致^[23]。

2.4 溶解度和膨润力

由图4可知,随着糊化温度的升高和次氯酸钠添加量的增加,慈姑淀粉的溶解度愈发变大。在糊化温度为50℃时,低剂量次氯酸钠添加量对淀粉并未有太大影响,添加量增大到9%时,才引起溶解度明显变化,溶解度为17.95%;当温度在80、90℃时,都呈现随着添加量的增加而增加,在90℃时,其溶解度大致相同。而膨润度与之

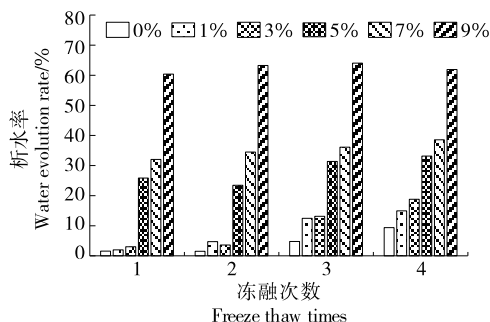


图3 添加不同量次氯酸钠改性后慈姑淀粉的冻融稳定性

Figure 3 Freeze thaw stability of arrowhead starch with different sodium hypochlorite addition

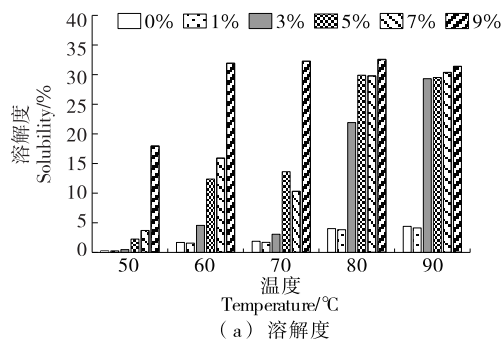


图4 添加不同量次氯酸钠改性后慈姑淀粉的溶解度和膨润度

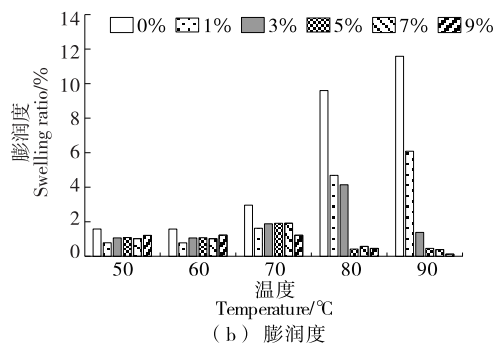


Figure 4 Solubility and swelling degree of arrowhead starch with different sodium hypochlorite addition

相反,与次氯酸钠添加量呈相反趋势,随着添加量增加,膨润度降低,在 70 ℃ 时,随着次氯酸钠添加量的增加,膨润度从 2.96% 下降到了 1.22%。造成不同变化的原因可能是随着次氯酸钠添加量和温度的增加,氧化过程中淀粉颗粒逐渐瓦解,淀粉团崩解,非结晶区域浸出,游离出直链淀粉^[20]。

2.5 凝沉稳定性

由图 5 可得,次氯酸钠添加量在 0%,1%,3% 时,随着时间的延长和添加量的增加,上清液增加,凝沉性越好,随着时间的延长,添加量 0% 的上清液增加后稳定在 67.5%,添加量 1% 的稳定在 84.83%,添加量 3% 的稳定在 95%,而在添加量为 5%,7%,9% 时,初始时刻上清液为 100%,凝沉性达到最佳。这与氧化后慈姑淀粉的透明度反映情况一致,说明次氯酸钠改性后的淀粉有很好的抗老化性^[24]。这可能是由于次氯酸钠氧化作用于慈姑淀粉分子葡萄糖单元的羟基,转化为羰基和羧基,因此凝沉稳定性变好。

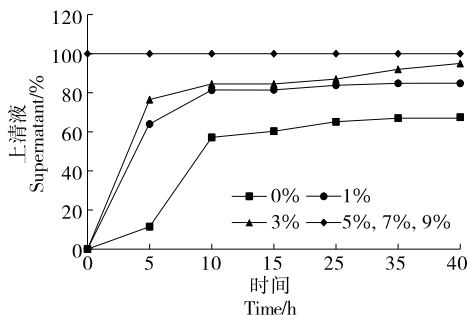


图 5 添加不同量次氯酸钠改性后慈姑淀粉的凝沉稳定性

Figure 5 Coagulation stability of arrowhead starch with different amounts of sodium hypochlorite

2.6 色差

如表 1 所示,添加不同量次氯酸钠改性慈姑淀粉对 L^* 、 a^* 、 b^* 值并未有太大影响,随着次氯酸钠添加量的增加, a^* 、 b^* 值为下降趋势, a^* 值从 2.87 下降到 2.43, b^* 值从 11.52 下降到 9.51;相反, L^* 值呈缓慢上升,添加量为 0% 时 L^* 值为 70.95,添加量为 9% 时 L^* 值最大,为 71.97,随着添加量的增加, L^* 值愈发增加,但整体上数值变化不大。这可能是由于次氯酸钠改性改变了慈姑淀粉的结构,使其表现出来的色差发生变化。

2.7 透明度

由图 6 可知,慈姑淀粉的透明度随着次氯酸钠添加量的增加而增加。添加量为 0%,1%,3% 时,透明度处于缓慢增加;添加量为 0% 时,透光率仅为 9.94%,添加量达到 5%,7%,9% 时,透光率陡然上升,透明度高达 90% 以上,其中添加量为 9% 时,透光率最高,达到了 97.13%。

表 1 添加不同量次氯酸钠改性后慈姑淀粉的色差[†]

Table 1 Color difference of arrowhead starch with different amount of sodium hypochlorite

添加量/%	L^*	a^*	b^*
0	70.95±0.29 ^c	2.87±0.08 ^a	11.52±0.23 ^a
1	71.26±0.06 ^{bc}	2.76±0.07 ^{ab}	11.30±0.20 ^a
3	71.39±0.28 ^{bc}	2.68±0.15 ^{ab}	11.02±0.12 ^{ab}
5	71.45±0.07 ^{abc}	2.58±0.19 ^{ab}	10.74±0.30 ^b
7	71.54±0.30 ^{ab}	2.55±0.09 ^{ab}	9.84±0.18 ^c
9	71.97±0.19 ^a	2.43±0.15 ^b	9.51±0.16 ^c

[†] 同列小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

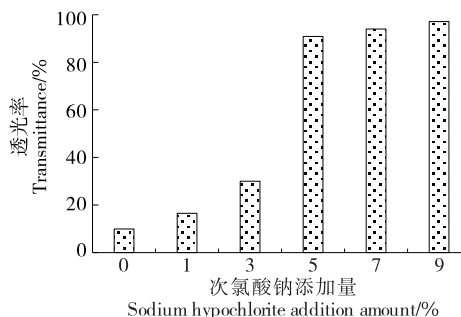


图 6 添加不同量次氯酸钠改性后慈姑淀粉的透明度

Figure 6 Transparency of arrowhead starch with different amounts of sodium hypochlorite

该结果与改性后的慈姑淀粉凝沉性结果一致,可能是由于淀粉中羧基含量增加,导致透明度增加^[22]。

2.8 消化特性

快消化性淀粉(RDS)比慢消化性淀粉(SDS)被消化酶降解速度快得多,抗性淀粉(RS)是进入人体大肠后才被消化吸收的淀粉,SDS 和 RS 在食用后不易使血糖快速升高,能有效控制血糖水平,因此,含 SDS 和 RS 多的食品更好地降低了消化性^[13]。如图 7 所示,随着次氯酸钠添加量的增加,RDS 含量逐渐降低,SDS 含量整体上呈先增加后减少的趋势,添加量为 3% 时含量达到最高,达到了

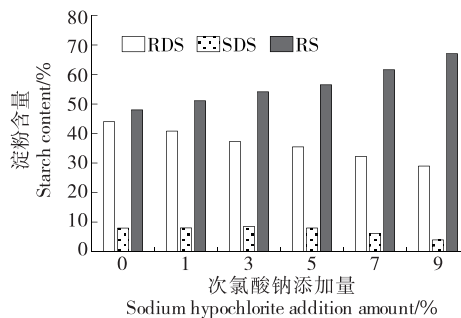


图 7 添加不同量次氯酸钠改性后慈姑淀粉的消化性

Figure 7 Digestibility of arrowhead starch with different sodium hypochlorite addition

8.53%,而RS含量则持续上升。结果表明,次氯酸钠氧化降低了慈姑淀粉的消化性,整体上,随着添加量的增加而快消化性淀粉减少,说明添加次氯酸钠对改性慈姑淀粉的消化性是有作用的,能很好地改善消化效果。慢消化淀粉含量增加可能与慈姑淀粉中羰基含量^[25]和直链淀粉含量等有关,慈姑淀粉中抗性淀粉含量与直链淀粉含量成正比。

2.9 电镜扫描

由图8可知,随着次氯酸钠添加量的增加,淀粉颗粒的光滑度减少,慢慢变得粗糙,表面逐渐有坑洼出现,淀粉颗粒大小并未明显改变,但淀粉间距变大,部分淀粉开始皱缩,小颗粒淀粉附着在大颗粒淀粉上。添加量为0~3%时,淀粉分子还未明显皱缩和附着,表面仍有一定的光滑度,添加量9%的淀粉颗粒最为粗糙,小颗粒淀粉皱缩和附着也十分明显。这可能是由于次氯酸钠氧化淀粉,改变了慈姑淀粉表面结构,直链淀粉析出量增加^[20]。

2.10 红外光谱

如图9所示,慈姑淀粉和氧化改性后的淀粉在 3300 cm^{-1} 处存在宽峰,为 -OH 的伸缩振动形成, $1155, 1073, 992\text{ cm}^{-1}$ 处为伯醇/仲醇羟基相连的 C-O 伸缩振动和吡喃糖环的 C-O 伸缩振动峰。氧化后的慈姑淀粉与非氧化的淀粉相比,位于 1636 cm^{-1} 左右的吸收峰强度增加且吸收峰变得更尖,表明羰基振动峰的增强,氧化淀粉羰基含量随着次氯酸钠用量逐渐增加。用

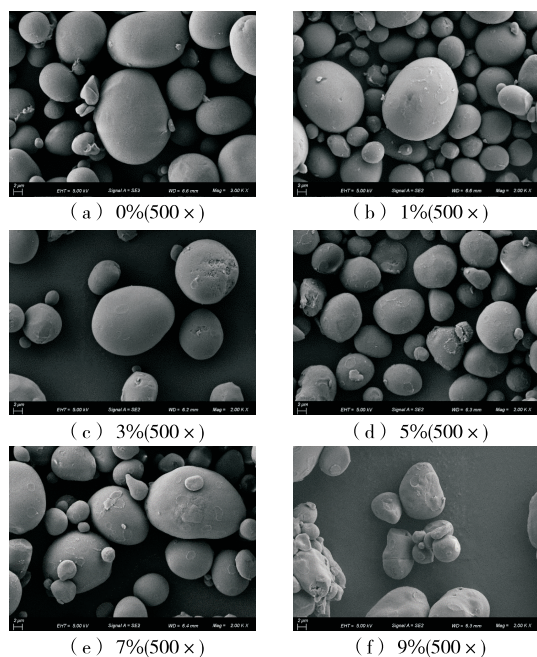


图8 添加不同量次氯酸钠改性后慈姑淀粉的电镜扫描

Figure 8 Scanning electron microscope of arrowhead starch with different amounts of sodium hypochlorite

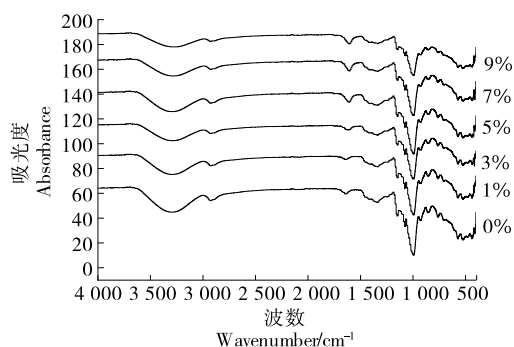


图9 添加不同量次氯酸钠改性后慈姑淀粉的红外图

Figure 9 Infrared diagram of arrowhead starch with different amounts of sodium hypochlorite

1047 cm^{-1} 与 1022 cm^{-1} 的吸光度比值反映淀粉的有序化程度和结晶度^[26],氧化后的慈姑淀粉吸光度比值减小,约从1.284降低到1.201左右,在次氯酸钠添加量为9%时的慈姑淀粉中吸光度比值达到1.128,表明氧化后有序度降低,无定形区增加,淀粉的结晶度有所降低,与X-衍射结果相一致。

2.11 X-衍射

如图10所示,慈姑淀粉在 $15.05^\circ, 17.05^\circ, 17.76^\circ, 22.89^\circ$ 处有明显的吸收峰,属于典型的A型结构,添加不同量次氯酸钠改性的慈姑淀粉晶形未发生变化,峰型、位置大体相似。氧化改性后的淀粉结晶度呈下降趋势,由43.99%降低到25%左右,次氯酸钠可对淀粉的晶体结构造成破坏,次氯酸钠的浓度对结晶结构的改变程度也有所差别。

3 结论

次氯酸钠与慈姑淀粉发生的氧化反应,致使慈姑淀粉的微粒结构发生了改变,增加了无定形,淀粉结晶度下降。随着次氯酸钠添加量的增加,慈姑淀粉的析水率、直链淀粉含量、溶解度、透明度等上升。其中,透明度变化十分显著,表明慈姑淀粉的抗老化性能得到了极大的改善。析水率的增加说明慈姑淀粉的冻融稳定性变差,改

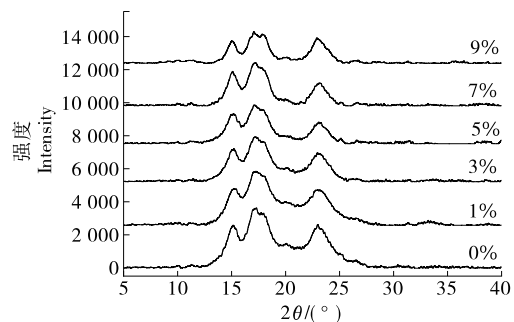


图10 添加不同量次氯酸钠改性后慈姑淀粉的XRD图

Figure 10 Infrared diagram of arrowhead starch with different amount of sodium hypochlorite

性后的淀粉不适用于做冷冻食品。改性后的淀粉减少了其快消化淀粉含量,增加了抗性淀粉含量。采用不同添加量的次氯酸改性慈姑淀粉,改变了淀粉原有性质,一定程度上扩展了慈姑淀粉的使用范围,补充了慈姑淀粉在改性方面的空白,可以将其淀粉用于食品、工业或其他领域上。若采用其他的改性方法或其他氧化剂,慈姑淀粉的理化性质又会有不同的变化,这需要更多试验研究。

参考文献

- [1] 王素雅, 曹崇江, 杨晓蓉, 等. 慈姑淀粉的性质研究[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(10): 40-43.
WANG S Y, CAO C J, YANG X R, et al. Study on properties of arrowhead starch[J]. Food and Fermentation Industry, 2008, 34(10): 40-43.
- [2] 陈晓明, 伏春燕, 金征宇. 慈姑淀粉的理化性质[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(7): 57-61.
CHEN X M, FU C Y, JIN Z Y. Properties of starch from sagittaria latifolia[J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2010, 25(7): 57-61.
- [3] 柯秀慧, 董瑞娟, 葛东宇, 等. 慈姑多糖对非酒精性脂肪肝病肝损伤的保护作用[J]. 中华中医药杂志, 2019, 34(10): 4 796-4 799.
KE X H, DONG R J, GE D Y, et al. Protective effect of *Sagittaria sagittifolia* polysaccharide on liver injury of non-alcohol fatty liver disease[J]. Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine, 2019, 34(10): 4 796-4 799.
- [4] ZHANG J X, WEN C T, CHEN M, et al. Antioxidant activities of *Sagittaria sagittifolia* L. polysaccharides with subcritical water extraction[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 134: 172-179.
- [5] 罗婷婷, 戢得蓉, 罗妍琛, 等. 慈姑淀粉添加量对鲜面条品质的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(1): 217-223.
LUO T T, JI D R, LUO Y C, et al. Effect of arrowhead starch on the quality of fresh noodles [J]. Food & Machinery, 2022, 38(1): 217-223.
- [6] 秦维. 不同制备方法对慈姑抗性淀粉结构及相关功能的影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2020: 17.
QIN W. Influence on the structure and related functional characteristics of arrowhead (*Sagittaria sagittifolia* L.) resistant starch prepared by different methods [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020: 17.
- [7] FAN Y F, PICCHIONI F. Modification of starch: A review on the application of "green" solvents and controlled functionalization[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 241(C): 116350.
- [8] 夏媛媛, 杨桂花, 林兆云, 等. 淀粉氧化技术的研究进展及其应用[J]. 中华纸业, 2018, 39(16): 12-18.
XIA Y Y, YANG G H, LIN Z Y, et al. Progress on starch oxidation technology and its application in paper industry[J]. Zhonghua Paper, 2018, 39(16): 12-18.
- [9] 张高鹏, 吴立根, 屈凌波, 等. 马铃薯氧化淀粉制备及在食品中的应用进展[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(8): 8-11.
ZHANG G P, WU L G, QU L B, et al. Preparation and application of oxidized potato starch in food industry[J]. Grain and Oil, 2015, 28(8): 8-11.
- [10] NATHAN L V, SHANISE L M E H, ALVARO R G D, et al. Molecular structure, functionality and applications of oxidized starches: A review[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1 546-1 559.
- [11] CHONG W T, UTHUMPORN U, KARIM A A, et al. The influence of ultrasound on the degree of oxidation of hypochlorite-oxidized corn starch[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 50(2): 439-443.
- [12] 周凤超, 李禹儒, 赵俊梅, 等. 氧化和湿热处理对马铃薯淀粉功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(15): 31-36.
ZHOU F C, LI Y R, ZHAO J M, et al. Effects of oxidation and heat moisture treatments on functional properties of potato starch [J]. Food Industry Science and Technology, 2018, 39(15): 31-36.
- [13] 沈跃丽, 王睿, 高艳, 等. 不同脱脂方法对大米直链淀粉含量测定结果的影响[J]. 现代面粉工业, 2021, 35(4): 25-27.
SHEN Y L, WANG R, GAO Y, et al. The effects of different methods on the determination results of rice amylose content[J]. Modern Flour Industry, 2021, 35(4): 25-27.
- [14] 吴珊, 申瑾, 包军鹏, 等. 粳米多孔淀粉的多重改性工艺优化及其性质分析[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(3): 53-56, 61.
WU S, SHEN J, BAO J P, et al. Optimization of multiple modification process and property analysis of japonica rice porous starch[J]. Grain and Oil, 2022, 35(3): 53-56, 61.
- [15] 白婷, 靳玉龙, 朱明霞, 等. 超声波处理对青稞淀粉理化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(9): 60-66.
BAI T, JIN Y L, ZHU M X, et al. Effect of ultrasonic treatment on physicochemical properties of highland barley starch[J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2021, 36(9): 60-66.
- [16] 谢亚敏, 许飞, 陈洁, 等. 多酚与淀粉相互作用对板栗淀粉特性的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(5): 30-38.
XIE Y M, XU F, CHEN J, et al. Study on the interaction between polyphenols and starch and its effect on chestnut starch properties [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(5): 30-38.
- [17] 杨学岩, 周维. 色差的测量和评定方法及应用[J]. 现代涂料与涂装, 2014, 17(9): 1-4, 29.
YANG X Y, ZHOU W. Application, evaluation method and measurement of color difference[J]. Modern Coatings and Coating, 2014, 17(9): 1-4, 29.
- [18] 范春艳, 佟毅, 李航, 等. 羟丙基化对高直链玉米淀粉理化性质的影响[J]. 当代化工, 2020, 49(8): 1 694-1 698.
FAN C Y, TONG Y, LI H, et al. Hydroxypropylation on physicochemical properties of high-amylose corn starch [J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49(8): 1 694-1 698.

(下转第 37 页)

- [15] ANDRACA-ADAME J A. Sponge cake microstructure, starch retrogradation and quality changes during frozen storage [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2016, 51 (8): 1 744-1 753.
- [16] 张仲柏. 马铃薯蛋糕制备及其老化特性研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018: 16-17.
ZHANG Z B. Study on potato cake preparation and aging characteristics[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018: 16-17.
- [17] CODIN G G, ISTRATE A M, GONTARIU I, et al. Rheological properties of wheat-flaxseed composite flours assessed by mixolab and their relation to quality features[J]. Foods, 2019, 8(8): 2-8.
- [18] 陈凤莲, 孙贵尧, 安然, 等. 不同品种和粒度对米粉糊化特性及米蛋糕品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(21): 75-82.
CHEN F L, SUN G Y, AN R, et al. Effects of different varieties and particle size on gelatinization characteristics of rice flour and quality of rice cake[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(21): 75-82.
- [19] DAS A B, BHATTACHARYA S. Characterization of the batter and gluten-free cake from extruded red rice flour[J]. LWT, 2019, 102: 197-204.
- [20] 桂艳艳. 南瓜粉对面粉及其蛋糕品质的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019: 19-21.
GUI Y Y. Effect of pumpkin flour on flour and its cake quality[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019: 19-21.
- [21] 胡欣宇, 明建, 王妹, 等. 超微板栗粉对海绵蛋糕品质的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(7): 220-226.
HU X Y, MING J, WANG S, et al. Effect of ultra-micro chestnut powder on the quality of sponge cake[J]. Food & Machinery, 2022, 38(7): 220-226.
- [22] ALEMAN R S, MORRIS A, PRINYAWIWATKUL W, et al. Physicochemical properties of frontiere rice flour and its application in a gluten-free cupcake[J]. Cereal Chemistry, 2021, 99 (2): 303-315.
- [23] 郝月慧. 三种糖醇影响无糖海绵蛋糕品质的比较研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 20-31.
HAO Y H. A comparative study on the effects of three sugar alcohols on the quality of sugar-free sponge cake [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 20-31.
- [24] ZIXUAN Y, DAN X, HONGLING Z, et al. New insight into the contribution of wheat starch and gluten to frozen dough bread quality[J]. Food Bioscience, 2022, 48: 101-107.
- [25] ŞİMŞEK S T. Vacuum-combined baking to enhance quality properties of gluten-free cake: Multi-response optimization study [J]. LWT, 2019, 116: 108-112.
- [26] 王雪. 亲水胶体对 Par-baking 戚风蛋糕品质的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 29-37.
WANG X. Study on the effect of hydrocolloidal on the quality of Par-baking chiffon cake[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 29-37.
- [27] JI Y, ZHU K, ZHOU H, et al. Study of the retrogradation behaviour of rice cake using rapid visco analyser, Fourier transform infrared spectroscopy and X-ray analysis [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 45(5): 871-876.
- [28] FERNG L H, LIOU C M, YEH R, et al. Physicochemical property and glycemic response of chiffon cakes with different rice flours [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 53: 172-179.
- (上接第 28 页)
- [19] 童妹. 糯米淀粉—脂质复合物的制备、结构表征及消化特性研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2020: 26.
TONG S. Preparation, structural characterization and digestive characteristics of indica rice starch lipid complex[D]. Hangzhou: Zhejiang Industrial and Commercial University, 2020: 26.
- [20] 戢得蓉, 雷敏, 谢建明, 等. 过氧化氢/硫酸铜氧化慈姑淀粉的制备及性质研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(13): 209-216.
JI D R, LEI M, XIE J M, et al. Preparation and properties analysis of arrowhead starch oxidized by H₂O₂/CuSO₄ [J]. Food and Fermentation Industry, 2020, 46(13): 209-216.
- [21] 黄立新, 赵壁秋. 次氯酸钠氧化小麦淀粉反应及其性质的研究[J]. 现代食品科技, 2010, 26(8): 805-808.
HUANG L X, ZHAO B Q. Preparation of oxidized wheat starch by sodium hypochlorite and its properties[J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 26(8): 805-808.
- [22] 赵西坡, 卞武勋, 刘进超, 等. 高直链淀粉材料改性及应用研究进展[J]. 包装工程, 2022, 43(1): 1-9.
ZHAO X P, BIAN W X, LIU J C, et al. Research progress in modification and application of high-amylose starch materials[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(1): 1-9.
- [23] 林华山, 黄伟, 罗志刚. 无水有机醇介质中盐酸对蜡质玉米淀粉性质的影响[J]. 现代食品科技, 2013, 29(5): 945-947, 944.
LIN H S, HUANG W, LUO Z G. Properties of waxy corn starch treated in different anhydrous alcohols with hydrochloric acid[J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(5): 945-947, 944.
- [24] 古碧, 查春月, 刘婷, 等. 食用氧化淀粉的制备及理化性能的研究[J]. 食品工业, 2012, 33(12): 85-89.
GU B, CHA C Y, LIU T, et al. Preparation and physicochemical properties of the edible oxidized cassava starch[J]. Food Industry, 2012, 33(12): 85-89.
- [25] HOOVER R, ZHOU Y. In vitro and in vivo hydrolysis of legume starches by α -amylase and resistant starch formation in legumes: A review[J]. Carbohydrate Polymers, 2003, 54(4): 401-417.
- [26] CHEN Y, HUANG S, TANG Z, et al. Structural changes of cassava starch granules hydrolyzed by a mixture of α -amylase and glucoamylase[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 85(1): 272-275.