

杨爽, 肖瑜. 虫草固态发酵对玉米粉加工性质及消化性的影响 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 122–127. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090057

YANG Shuang, XIAO Yu. Effect of Solid-state Fermentation with *Cordyceps Militaris* on Processing and Digestive Properties of Corn Flour [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 122–127. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090057

· 生物工程 ·

虫草固态发酵对玉米粉加工性质及消化性的影响

杨 爽^{1,*}, 肖 瑜²

(1. 吉林工程技术师范学院食品工程学院分子营养重点实验室, 吉林长春 130052;
2. 吉林农业大学食品科学与工程学院, 吉林长春 130118)

摘要:利用虫草固态发酵法对玉米粉性质进行改良。测定发酵前后玉米粉的理化性质, 利用快速粘度分析仪和质构仪测定发酵前后玉米粉加工性质, 来探究虫草发酵对玉米粉性质的影响。研究结果表明, 发酵 0~2 d 理化成分变化不显著 ($P>0.05$), 2 d 后发生明显变化, 至发酵第 3 d, 总淀粉含量降低了 11.7%, 直链淀粉增加了 29.8%; 经固态发酵后, 水溶指数增加了 87.7%, 吸水指数降低了 28.2%; 固态发酵可改善玉米粉的糊化特性和质构特性, 到发酵的第 3 d, 峰值粘度降低了 47.3%, 回生值下降了 34.9%, 凝胶硬度和咀嚼性分别降低了 45.4% 和 34.8%, 提高了玉米主食制品适口性。虫草固态发酵后的玉米粉具有更高的营养价值, 到发酵的第 3 d, 可溶性蛋白、必需氨基酸, 分别增加了 52.3% 和 26%; 慢消化淀粉及抗性淀粉分别提高至原来的 1.83 和 1.41 倍。通过本研究所得玉米粉的改良方法, 可改善玉米粉的加工性能和淀粉消化性, 为虫草在玉米主食制品品质改良方面提供一定参考。

关键词:虫草, 固态发酵, 玉米粉, 加工性质, 消化性

中图分类号: TS201.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-0306(2021)11-0122-06

DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2020090057](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020090057)

Effect of Solid-state Fermentation with *Cordyceps Militaris* on Processing and Digestive Properties of Corn Flour

YANG Shuang^{1,*}, XIAO Yu²

(1. Key Laboratory of Molecular Nutrition, College of Food Engineering,

Jilin Engineering Normal University, Changchun 130052, China;

2. College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: In this study, the solid-state fermentation with *Cordyceps militaris* was used to modified the properties of corn flour. The physicochemical composition of corn flour and fermented corn flour were investigated. The processing properties of corn flour and fermented corn flour were determined by rapid visco analyser and textural property analyser, respectively. The results showed that there were no significant changes in the physicochemical composition of samples after 0~2 day of fermentation ($P>0.05$), but significant changes occurred after 2 day of fermentation. The results showed that the total starch decreased by 11.7% after 3 day of fermentation, and the amylose increased by 29.8%. The water-solubility index increased by 87.7%, while the water-absorption index decreased by 28.2%. Solid-state fermentation could improve the gelatinization and texture properties of corn flour. The peak viscosity, setback, hardness and chew ability of samples after 3 day of fermentation decreased by 47.3%, 34.9%, 45.4% and 34.8%, respectively. These results indicated the solid-state fermentation could improve the palatability of corn staple food products. The fermented corn flour had higher nutritional value. The soluble protein and essential amino acid increased by 52.3% and 26%, respectively. The slow digestion starch

收稿日期: 2020-09-10

基金项目: 吉林工程技术师范学院博士工程项目 (BSKJ201927); 吉林工程技术师范学院大学生创新创业训练计划项目 (202010204019); 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目 (JJKH20200184KJ)。

作者简介: 杨爽 (1990-), 女, 博士, 讲师, 主要从事粮食深加工与功能性食品方面的研究, E-mail: yangshuang@jlenu.edu.cn。

and resistant starch increased to 1.83 and 1.41 times respectively after 3 day of fermentation. The modified method of corn meal obtained in this study could improve the processing property and starch digestibility of corn flour, and provided reference for *Cordyceps militaris* in the quality improvement of staple food products.

Key words: *Cordyceps militaris*; solid-state fermentation; corn flour; processing properties; digestibity

玉米是我国第三大粮食作物,也是我国重要的农产品,2019年我国玉米总产量已达2.608亿吨^[1]。相关统计表明,全球1/3人口以玉米为主食^[2]。而我国玉米的消费形式,大部分以饲料用粮和工业原料为主。玉米主食的加工也仍然停留在粗浅阶段,大部分传统的玉米主食产品无法满足人们对营养、卫生和安全的需要,导致经济效益水平偏低^[3]。玉米风味独特,但食用品质差,具有加工性能低的缺点,如玉米主食产品普遍存在产品硬度大、易老化、口感粗糙^[4]等问题。玉米主食产品中的原料玉米粉淀粉含量约70%,淀粉的消化性与人体的许多疾病密切相关。淀粉的消化性受多种因素影响,包括淀粉的来源、直链/支链淀粉比例、支链淀粉的精细结构等,而玉米淀粉大部分是由支链淀粉组成,易被人体消化吸收^[5]。这些都在一定程度上制约了玉米主食工业化的发展。

近年来,关于谷物性质改良研究越来越多^[6-7],微生物发酵技术是其中的一种安全性和适用性较好的改良技术。蛹虫草(*Cordyceps militaris* (L) Link),又名为北虫草、北冬虫夏草,是食品研究中被广泛应用的食药用真菌,人们在功能活性成分制备、产品研发等方面做了大量的工作^[8-9]。近几年,越来越多研究者利用虫草发酵改善农产品功能特性与营养特性,包括以鹰嘴豆^[10]、红豆^[11]和燕麦^[12]等为底物利用蛹虫草固态发酵,提高底物活性成分含量及功能活性研究。当前研究中,关于蛹虫草固态发酵对玉米粉加工特性和消化性的影响研究还未见报道。因此,本研究利用蛹虫草固态发酵,旨在改良玉米粉的性质,从而为蛹虫草固态发酵技术改良谷物性质的处理方法提供参考,同时为玉米主食制品的开发奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

蛹虫草菌株 由吉林农业大学小麦和玉米国家工程实验室提供;总淀粉试剂盒、直链淀粉/支链淀粉试剂盒 K-TSTA 爱尔兰 Megazyme;D-葡萄糖检测试剂盒 K-GLUC 爱尔兰 Megazyme;猪胰 α-淀粉酶(A3176) 8×USP/mg,美国 Sigma-Aldrich 公司;淀粉葡萄糖苷酶(A7095) 260 U/mL,美国 Sigma-Aldrich 公司。

全自动氨基酸分析仪 日本日立公司;快速粘度测定仪 澳大利亚 Perten 公司;物性仪 英国 Stable Micro Systems 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 固态发酵 参考前期实验室蛹虫草固态发酵玉米粉的发酵条件优化试验结果,利用蛹虫草固态发酵玉米粉,具体步骤如下:将活化后的蛹虫草斜面菌种切成1 cm×1 cm菌块接种到液体种子培养基中,

24 °C, 160 r/min 摆床震荡培养3 d, 将液体种子破碎后接种到灭菌后玉米粉中, 接种量为10%(干重), 置于24 °C下培养5 d后灭活终止反应, 在不同发酵时间取3瓶样品, 于60 °C下烘干至恒重, 灭菌后玉米粉作为对照。将烘干后的发酵产物过80目备用。

1.2.2 理化成分的测定

1.2.2.1 总淀粉和直链淀粉含量的测定 采用总淀粉试剂盒和直链淀粉/支链淀粉试剂盒测定发酵前后总淀粉和直链淀粉含量。

1.2.2.2 粗脂肪含量的测定 参考 GB/T 5009.6-2003 食品中脂肪的测定^[13]。

1.2.2.3 可溶性蛋白含量的测定 采用福林-酚方法^[14]。称取1.5 g 样品加入6 mL水, 45 °C 提取2 h, 超声30 min, 4000×g 离心10 min, 取上清13000×g 离心10 min, 取上清过0.22 μm滤膜, 取0.2 mL滤液加定容至1 mL, 空白1 mL水, 500 nm酶标仪OD值。标准曲线的绘制采用牛血清蛋白稀释液, 根据牛血清蛋白稀释液浓度和OD值绘制标准曲线。得到的标准曲线的线性回归方程为: $y=0.47945x+0.00177, R^2=0.9951$ 。

1.2.2.4 氨基酸的测定 Li 等^[15]方法。准确称取发酵过程中粉末0.1 g, 加10 mL 6 mol/L的HCl, 再加100 μL的β-巯基乙醇, 置于液氮中冷冻, 冷冻后利用氮气进行封管约80 S以上, 再将水解管放在110 °C烘箱中水解22 h。水解结束后取3 mL样品进行浓缩, 取2 mL pH 2.2的三氯乙酸加入浓缩后样品中, 在4 °C条件下保持2 h, 过0.22 nm有机膜, 利用全自动氨基酸分析仪测定17种常见氨基酸含量, 氨基酸含量为g/100 g。

1.2.3 水溶指数(water-solubility index, WSI)和吸水指数(water-absorption index, WAI)测定 参考 Siroha 等^[16]的方法, 取发酵前后的样品, 粉碎过80目筛, 2.5 g, 置于已知重量离心管中, 加入30 mL蒸馏水, 搅拌30 min, 4000×g 离心10 min, 将上清液倒入铝盒, 烘干至恒重称重, 同时称量离心沉淀的重量。WSI 和 WAI 计算如下:

$$WSI(\%) = \frac{\text{上清液重量}}{\text{样品干重}} \times 100;$$

$$WAI(\%) = \frac{\text{沉淀重量}}{\text{样品干重}} \times 100$$

1.2.4 糊化特性的测定 利用快速粘度测定仪(Rapid Visco Analyser, RVA)进行测定: 称4.0 g 样品置于盛有25 mL蒸馏水的铝盒中, 装入RVA上, 按下塔帽进行测试。在160 r/min下搅拌混合, 样品在50 °C下保持1 min; 然后再以12 °C/min的速度

升温至95℃;保持95℃条件下2.5 min,以12℃/min的速度降至50℃;在50℃保持1.4 min,得到样品的糊化曲线。记录样品的峰值粘度、谷值粘度、衰减值、回生值、峰值时间。

1.2.5 质构特性的测定 参考于长筹^[17]的方法。将糊化后的样品,4℃下贮藏24 h制备凝胶,取样利用物性仪测定凝胶的质构特性。具体参数为:测试前速度:2.00 mm/s;测试中速度:2.00 mm/s;测试后速度:1.00 mm/s;形变量:20%;两次下压间隔时间:5 s;负载力:5 g。探头类型:P_{2.5}。

1.2.6 体外消化性的测定 淀粉体外消化率参考Englyst等^[18]方法测定:800 mg样品置于15 mL乙酸钠缓冲溶液(0.1 mol/L, pH 5.2)。37℃下平衡10 min,加5 mL混合酶溶液(淀粉酶和淀粉葡萄糖苷酶),于37℃恒温水浴摇床酶解。在20、120 min分别取出0.5 mL,并与4 mL无水乙醇混合灭酶,4500×g离心10 min。使用K-GLUC试剂盒测上清中葡萄糖含量。快消化淀粉(RDS),慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)的含量根据以下公式计算:

$$RDS(\%) = \frac{0.9(G_{20} - G_0)}{W} \times 100;$$

$$SDS(\%) = \frac{0.9(G_{120} - G_{20})}{W} \times 100;$$

$$RS(\%) = TS - RDS - SDS$$

式中,G₀:上清液中样品的游离葡萄糖含量,G₂₀:20 min时释放的葡萄糖含量,G₁₂₀:120 min时释放的葡萄糖含量,W是样品的重量,TS是总淀粉含量。

1.3 统计学分析

每个试验至少做三次平行试验,结果表示为平均值±标准差。试验数据采用SPSS 22.0软件进行方差分析与相关性分析,用OriginPro 8.5软件做分析图表。

2 结果与分析

2.1 发酵对玉米粉理化成分组成的影响

发酵对玉米粉理化组成的影响结果如表1所示,固态发酵对玉米粉理化成分产生明显影响,其中发酵初期(0~2 d),发生略微变化,而随着发酵时间的延长,即发酵的第3 d,理化成分出现显著变化($P<0.05$)。其中,总淀粉含量随发酵时间延长呈显著

下降的趋势($P<0.05$),说明蛹虫草固态发酵对玉米淀粉具有较好的水解力。到第3 d,总淀粉降低了11.7%。与此同时,直链淀粉含量明显增加,到第3 d增加了29.8%。刘红艳等^[19]研究表明,食用菌在发酵过程中能够产生 α -淀粉酶、纤维素酶和 β -葡萄糖苷酶,将大分子物质分解成小分子物质。蛹虫草发酵过程中产生的 α -淀粉酶水解淀粉,主要发生在支链淀粉的长链部分,使其分解为直链淀粉或者葡萄糖等小分子,使得支链淀粉含量降低,直链淀粉含量增加。这和猴头菌固态发酵玉米粉结果中直链淀粉含量增加,支链淀粉含量降低结果一致^[20]。玉米中的蛋白质主要是水溶性较差的醇溶蛋白,而可溶性蛋白含量较少,不易被生物体所利用。由表1所示,发酵0~2 d,可溶性蛋白增加缓慢,3 d后可溶性蛋白含量明显增加。虽然在发酵0~2 d,可溶性蛋白含量变化不显著($P>0.05$),但由表2可看出固态发酵显著增加了必需氨基酸和总氨基酸含量($P<0.05$),即发酵初期即可改善玉米蛋白氨基酸的组成,到发酵的第3 d,必需氨基酸和总氨基酸含量分别增加了26%和28.7%,其中苏氨酸、缬氨酸和蛋氨酸分别增加了39.1%、42.8%和81.8%。Angulobejarano等^[21]利用米曲霉固态发酵鹰嘴豆粉,对其蛋白中氨基酸组成进行测定,结果发现固态发酵可提高含硫氨基酸(蛋氨酸、半胱氨酸)、苏氨酸和缬氨酸等必需氨基酸含量。根据相关报道^[22],蛹虫草酶系发达,能够分泌大量的淀粉酶、纤维酶、蛋白酶、肽酶等,可以将淀粉和蛋白质水解成低聚糖、葡萄糖、多肽、肽和氨基酸等。表2结果表明玉米蛋白被分解成了氨基酸、多肽和一些有一定空间结构但分子质量较小的蛋白质,增加了蛋白质的溶解性,使得可溶性蛋白含量增加。

2.2 发酵对玉米粉水溶指数(WSI)和吸水指数(WAI)的影响

水溶指数和吸水指数是玉米粉加工过程中重要的应用性质,WSI和WAI分别反映了粉体的降解和糊化程度,其中WAI越大,产品会产生黏牙感,会对产品品质造成一定影响^[23],因此对发酵前后玉米粉的WSI和WAI进行测定。如图1所示,固态发酵显著提高WSI($P<0.05$),在发酵第5 d,WSI增加了274.4%;与此同时,WAI随发酵时间的延长呈下降的趋势,到第5 d,降低40.4%,这和黑曲霉固态发酵高粱粉,WAI呈增加的结果不同^[24]。这可能是由于所

表1 发酵对玉米粉理化成分组成影响

Table 1 Effect of fermentation time on physicochemical composition of corn flour

时间(d)	总淀粉(%)	直链淀粉(%)	可溶性蛋白(mg/g)	粗脂肪(%)
0	62.507±0.501 ^a	21.729±0.381 ^d	7.167±0.532 ^c	4.420±0.035 ^b
1	60.627±1.209 ^a	21.325±0.411 ^d	8.718±0.381 ^c	4.457±0.070 ^b
2	62.632±0.961 ^a	22.745±0.373 ^d	8.36±0.466 ^c	4.720±0.075 ^a
3	55.153±0.836 ^c	28.198±0.411 ^c	10.913±0.386 ^b	4.680±0.187 ^a
4	57.172±0.524 ^b	31.298±0.283 ^b	12.537±0.349 ^b	4.017±0.023 ^c
5	52.354±0.215 ^d	40.058±0.349 ^a	15.263±0.412 ^a	3.843±0.057 ^d

注:同一列数据中不同字母之间的差异有统计学意义($P<0.05$),表2~表3同。

表 2 发酵对玉米粉氨基酸组成影响
Table 2 Effect of fermentation time on amino acids of corn flour

时间(d)	0	1	2	3	4	5
Asp天冬氨酸	0.254±0.002 ^e	0.341±0.002 ^d	0.357±0.002 ^c	0.37±0.001 ^b	0.39±0.002 ^a	0.38±0.002 ^{ab}
Thr苏氨酸*	0.151±0.001 ^c	0.188±0.002 ^{bc}	0.196±0.001 ^b	0.21±0.002 ^{ab}	0.22±0.001 ^a	0.22±0.001 ^a
Ser丝氨酸	0.195±0.002 ^c	0.250±0.001 ^{bc}	0.254±0.00 ^{bc}	0.27±0.002 ^{ab}	0.28±0.002 ^a	0.26±0.002 ^b
Glu谷氨酸	0.899±0.002 ^d	1.142±0.002 ^{ab}	1.158±0.003 ^{bc}	1.22±0.003 ^b	1.24±0.004 ^b	1.14±0.002 ^c
Gly甘氨酸	0.142±0.001 ^d	0.161±0.001 ^c	0.173±0.001 ^{bc}	0.18±0.002 ^b	0.19±0.001 ^a	0.18±0.001 ^b
Ala丙氨酸	0.283±0.001 ^c	0.372±0.002 ^{bc}	0.380±0.001 ^b	0.41±0.002 ^a	0.41±0.002 ^a	0.39±0.001 ^{ab}
Val缬氨酸*	0.021±0.002 ^c	0.026±0.001 ^b	0.026±0.002 ^b	0.03±0.001 ^a	0.03±0.002 ^a	0.03±0.002 ^a
Cys半胱氨酸	0.210±0.001 ^c	0.253±0.001 ^{bc}	0.262±0.001 ^b	0.28±0.001 ^{ab}	0.29±0.002 ^a	0.28±0.001 ^{ab}
Met蛋氨酸*	0.044±0.001 ^d	0.031±0.001 ^e	0.061±0.001 ^c	0.08±0.001 ^a	0.07±0.001 ^b	0.07±0.001 ^b
Ile异亮氨酸*	0.164±0.001 ^b	0.188±0.001 ^{ab}	0.192±0.001 ^a	0.2±0.002 ^a	0.21±0.001 ^a	0.21±0.001 ^a
Leu亮氨酸	0.589±0.002 ^c	0.685±0.004 ^{bc}	0.690±0.003 ^b	0.73±0.002 ^a	0.74±0.003 ^a	0.68±0.002 ^{bc}
Tyr酪氨酸	0.092±0.002 ^a	0.101±0.001 ^a	0.097±0.002 ^a	0.1±0.001 ^a	0.12±0.002 ^a	0.12±0.001 ^a
Phe苯丙氨酸*	0.245±0.002 ^b	0.281±0.002 ^{ab}	0.289±0.002 ^a	0.3±0.002 ^a	0.31±0.001 ^a	0.28±0.002 ^{ab}
Lys赖氨酸*	0.151±0.001 ^c	0.156±0.001 ^c	0.172±0.001 ^b	0.18±0.002 ^{ab}	0.2±0.002 ^a	0.2±0.002 ^a
His组氨酸	0.148±0.001 ^c	0.157±0.001 ^b	0.162±0.002 ^{ab}	0.17±0.002 ^a	0.17±0.002 ^a	0.16±0.002 ^{ab}
Arg精氨酸	0.198±0.002 ^c	0.211±0.001 ^{bc}	0.227±0.002 ^b	0.23±0.002 ^b	0.25±0.001 ^a	0.24±0.002 ^{ab}
Pro脯氨酸	0.486±0.002 ^c	0.521±0.002 ^b	0.527±0.002 ^b	0.55±0.002 ^a	0.54±0.002 ^{ab}	0.49±0.002 ^{bc}
必须氨基酸	1.365±0.002 ^d	1.554±0.012 ^c	1.625±0.009 ^b	1.72±0.01 ^a	1.78±0.009 ^a	1.68±0.008 ^{ab}
总氨基酸	4.273±0.023 ^d	5.064±0.026 ^c	5.223±0.027 ^b	5.5±0.025 ^{ab}	5.66±0.021 ^a	5.31±0.023 ^b

注: *为必需氨基酸。

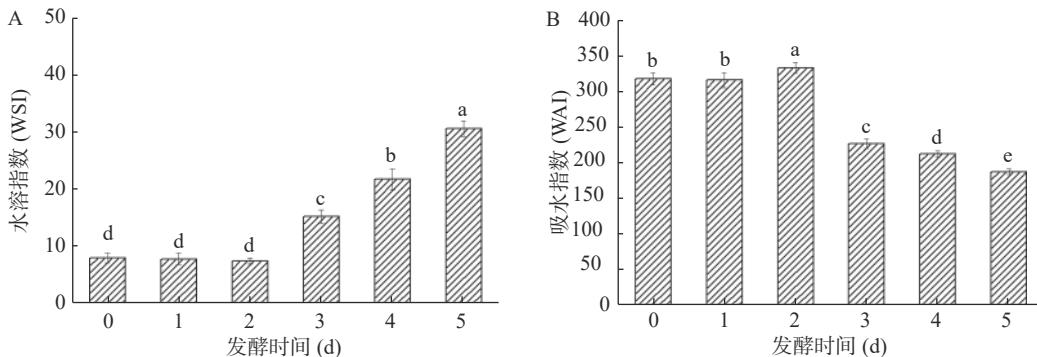


图 1 发酵对玉米粉水溶指数和吸水指数的影响

Fig.1 Effect of fermentation time on WSI and WAI of corn flour

注: 图中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$); 图 2~图 3 同。

选择的微生物菌种不同, 具有不同的生长特性和产生不同的发酵产物。虽然在固态发酵过程中, 利用微生物酶解作用来改良谷物粉的品质特性, 但不同于其他微生物, 蟠虫草固态发酵酶解玉米粉的同时, 其产生的菌丝体覆盖在了玉米粉表面, 可能导致其不利于淀粉与水发生水合作用。此外, 有研究^[25]认为在淀粉体系中, 添加蔗糖等可溶性成分可与体系中自由水发生相互作用, 抑制淀粉的吸水作用。蟠虫草发酵过程中产生的可溶性成分, 如多糖、可溶性蛋白等, 与淀粉竞争吸水, 不利于淀粉与水相互作用, 使得 WAI 降低。

2.3 发酵对玉米粉糊化特性影响

发酵对玉米粉糊化性质影响结果如表 3 所示。由表 3 可看出, 随着发酵的进行, 淀粉被不断水解, 整体上, 发酵后玉米粉糊化峰值粘度、谷值粘度、衰减值和回生值随之降低, 到发酵第 3 d, 其分别降低了

47.3%、43.7%、85.4% 和 34.9%。在 0~2 d, 糊化黏度参数的上升, 可能是由于在发酵初期虽然总淀粉含量变化不显著($P>0.05$), 但微生物的酶解破坏了淀粉颗粒, 有研究认为丝状真菌发酵可破坏淀粉颗粒表面, 使其表面出现孔洞^[26], 从而有利于糊化过程中水分的扩散, 有利于吸水膨胀, 从而使黏度增加。发酵第 5 d, 峰值粘度和谷值粘度又出现上升的现象, 但仍低于未发酵样品。这表明固态发酵后玉米粉的糊化黏性参数, 仍是主要受淀粉浓度和结构决定的, 但与此同时, 微生物发酵过程中发生的一系列复杂反应, 菌丝体产生的多糖、可溶性蛋白等成分, 也对黏度参数产生一定影响, 使得发酵后玉米粉黏度增加。

2.4 发酵对玉米粉凝胶质构特性影响

由图 2 中可知, 在发酵的 0~2 d, 玉米粉凝胶的硬度、弹性、黏合度和咀嚼性略微下降; 而随着发酵时间增加, 淀粉被不断水解, 玉米粉凝胶的硬度和咀

表3 发酵对玉米粉糊化特性影响
Table 3 Effect of fermentation time on pasting properties of corn flour

时间(d)	峰值粘度	谷值粘度	衰减值	回生值	峰值时间
0	2646±30.27 ^c	2411±28.01 ^c	233±3.60 ^b	2752±31.01 ^c	6.40±0.06 ^b
1	3620±25.03 ^a	3275±25.11 ^a	348±2.50 ^a	3220±21.71 ^b	7.00±0.08 ^a
2	3427±18.55 ^b	3194±18.01 ^b	239±3.01 ^b	3805±16.67 ^a	7.00±0.01 ^a
3	1395±12.1 ^e	1357±12.09 ^f	34±1.71 ^e	1790±14.87 ^d	6.60±0.01 ^b
4	1395±20.78 ^e	1627±18.11 ^e	61±2.10 ^c	1790±20.10 ^d	7.00±0.06 ^a
5	1601±38.13 ^d	1785±37.78 ^d	45±1.5 ^d	1875±36.7 ^d	6.40±0.17 ^b

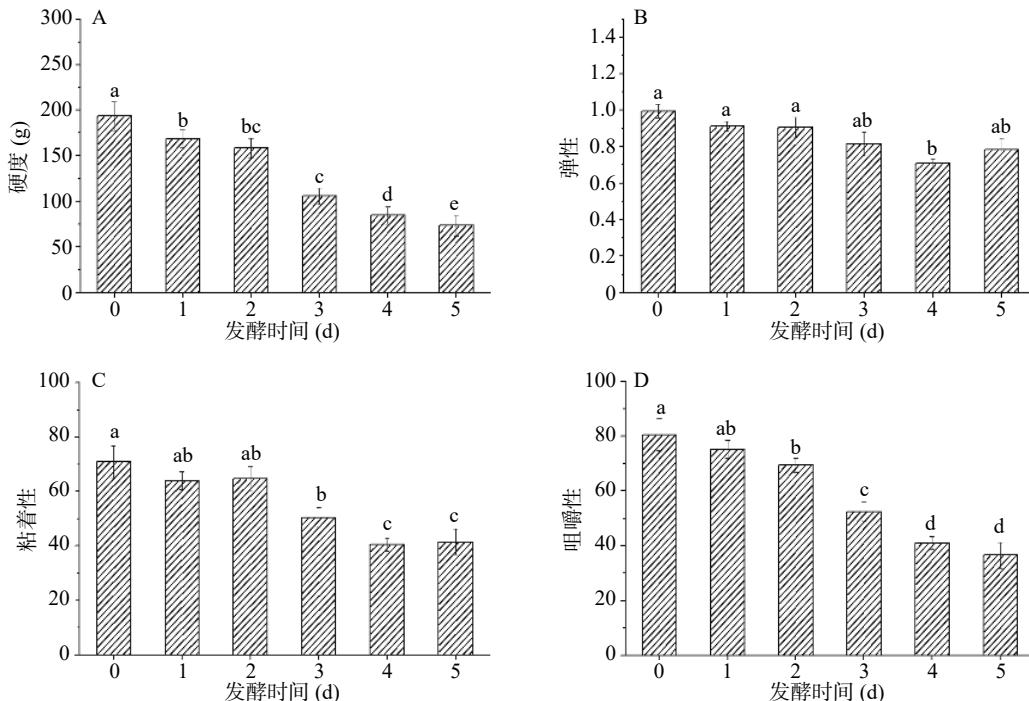


图2 发酵对玉米粉凝胶质构特性影响
Fig.2 Effect of fermentation time on textural properties of corn flour gel

嚼性显著下降($P<0.05$),到发酵的第3 d,凝胶硬度和咀嚼性分别降低了45.4%和34.8%。玉米粉主食制品在贮藏过程中,常存在老化、咀嚼性差等问题,这也是限制玉米主食制品发展的主要原因之一,由图2的结果可看出,发酵降低凝胶的硬度和咀嚼性,表明发酵可抑制玉米淀粉老化,提高产品适口性。玉米粉凝胶硬度的降低可能与总淀粉含量下降(表1)有关,固态发酵玉米粉中淀粉水解是凝胶硬度降低的主要原因。发酵到第5 d时,淀粉进一步被降解,凝胶硬度下降过多,凝胶呈软塌状态,失去玉米粉凝胶结构,不利于凝胶制品结构的稳定性。以上结果表明,利用蛹虫草固态发酵对玉米粉淀粉进行适度的水解,可降低凝胶硬度,抑制玉米制品的老化,但过度水解淀粉,会丧失玉米淀粉的凝胶结构,有不利的影响。

2.5 发酵对淀粉消化性影响

淀粉消化性是影响淀粉类食品营养功能发挥的重要因素,因此对发酵前后淀粉消化性进行测定。从图3可以看出,固态发酵可以改变玉米淀粉中RDS、SDS和RS的含量,显著影响其消化特性。在发酵0~2 d,固态发酵可使玉米淀粉中RDS含量下

降,而SDS含量增加;在发酵的3~5 d,固态发酵使SDS和RS均显著增加($P<0.05$),在发酵的第3 d,SDS和RS分别提高至原来的1.83和1.41倍。有研究认为^[27],淀粉的消化性与淀粉颗粒大小、直链淀粉含量以及支链淀粉分支结构等有关。图3结果表明,SDS和RS随直链淀粉含量的增加而增加。Miao等^[28]分析认为 α -淀粉酶水解玉米淀粉后,可生成具有分支结构的低聚糖,这些低聚物不易被人体消化,使得RS增加。这与本研究结果中RS含量增加相似。RS不能被消化,有利于肠道健康。这表明利用蛹虫草固态发酵玉米粉,可提高SDS和RS含量。随着发酵的进行,淀粉继续被水解,在发酵4~5 d,随着可溶性蛋白、SDS和RS含量进一步增加,可进一步改善玉米粉营养性质。但当发酵至第5 d时,总淀粉含量降低程度较大,使得凝胶硬度下降过多,凝胶呈软塌状态,不利于玉米主食制品结构的稳定性。因此,需要控制微生物对淀粉的水解,使其达到即可抗老化,提高食用品质,又能保有玉米淀粉凝胶结构性质。综合考虑下,控制发酵至第3 d,对玉米粉品质性质具有最适的改良效果。

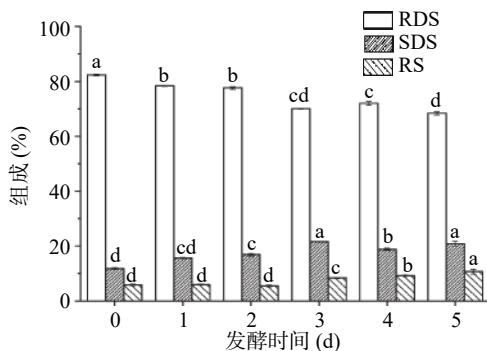


图 3 发酵对玉米粉淀粉消化率影响

Fig.3 Effect of fermentation time on digestive properties of corn flour

3 结论

蝙蝠草可显著降解玉米淀粉, 提高直链淀粉含量, 慢消化淀粉和抗性淀粉也随之增加, 发酵玉米粉具有更高的抗消化性; 经固态发酵后, 玉米粉的水溶指数增加而吸水指数降低; 固态发酵可显著降低玉米粉糊化的回生值和凝胶硬度($P<0.05$), 发酵玉米粉具有较好的抗老化性。综合考虑下, 发酵至第 3 d 的玉米粉, 具有最佳的改良效果。本研究结果为蝙蝠草在玉米主食制品品质改良方面提供一定参考。后续对蝙蝠草降解玉米淀粉, 对淀粉结晶区和非结晶区结构的影响进行分析, 进一步从淀粉分子结构角度解释对淀粉的水解机制。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 国民经济和社会发展统计公报 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [2] Chaudhary D P, Kumar S, Langyan S. Maize: Nutrition dynamics and novel uses[M]. Springer India, 2014: 119-132.
- [3] 张庆霞. 玉米粉改性的研究现状与展望 [J]. 食品研究与开发, 2019, 40(10): 206-211.
- [4] Matia-Merino L, Prieto M, Roman L, et al. The impact of basil seed gum on native and pregelatinized corn flour and starch gel properties[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89(5): 122-130.
- [5] Edwards C H, Cochetel N, Setterfield L, et al. A single-enzyme system for starch digestibility screening and its relevance to understanding and predicting the glycaemic index of food products[J]. Food & Function, 2019, 10: 4751-4760.
- [6] Mathieu M, Ramirez C A, Nore S, et al. The effects of yeast metabolites on the rheological behaviour of the dough matrix in fermented wheat flour dough[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 82: 183-189.
- [7] 秦洋. 乳酸菌发酵改良玉米粉加工性能机理研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [8] Bi S, Huang W J, Chen S, et al. *Cordyceps militaris* polysaccharide converts immunosuppressive macrophages into M1-like phenotype and activates T lymphocytes by inhibiting the PD-L1/PD-1 axis between TAMs and T lymphocytes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 150: 261-280.
- [9] Hu T, Liang Y, Zhao G, et al. Selenium biofortification and antioxidant activity in *Cordyceps militaris* supplied with selenite, selenomethionine[J]. Biological Trace Element Research, 2019, 187(2): 553-561.
- [10] Xiao Y, Xing G L, Rui X X, et al. Effect of solid-state fermentation with *Cordyceps militaris* SN-18 on physicochemical and functional properties of chickpea (*Cicer arietinum* L.) flour[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(2): 1317-1324.
- [11] Xiao Y, Zhang B, Chen Y L, et al. Solid-state bioprocessing with *Cordyceps militaris* enhanced antioxidant activity and DNA damage protection of red beans (*Phaseolus angularis*) [J]. Cereal Chemistry, 2016, 94(2): 177-184.
- [12] Xiao Y, Rui X X, Xing G L, et al. Solid state fermentation with *Cordyceps militaris* SN-18 enhanced antioxidant capacity and DNA damage protective effect of oats (*Avena sativa* L.) [J]. Journal of Functional Foods, 2015, 16: 58-73.
- [13] GB 5009.6-2016 食品安全国家标准食品中脂肪的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [14] 陈毓荃, 马静芳, 文建雷. 生物化学实验方法和技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [15] Li Y, Zhong F, Ji W, et al. Functional properties of Maillard reaction products of rice protein hydrolysates with mono-, oligo- and polysaccharides[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30(1): 53-60.
- [16] Siroha A K, Sandhu K S, Kaur M, et al. Physicochemical, rheological, morphological and *in vitro* digestibility properties of pearl millet starch modified at varying levels of acetylation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 131: 1077-1083.
- [17] 于长筹. 酸改性淀粉流变学特性研究及其在凝胶型糖果中的应用 [D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
- [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(Suppl 2): 33-50.
- [19] 刘红艳, 翟飞红, 韩建荣. 双孢蘑菇固态发酵对玉米营养成分的影响 [J]. 山西农业科学, 2017, 45(6): 918-922.
- [20] 雷彤彤, 黄笑非, 屈彤彤, 等. 玉米猴头菌菌粮营养评价及加工特性研究 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 113-118.
- [21] Angulo-Bejarano P I, Verdugomontoya N M, Cuevas-Rodriguez E O, et al. Tempeh flour from chickpea (*Cicer arietinum* L.) nutritional and physicochemical properties[J]. Food Chemistry, 2008, 106(1): 106-112.
- [22] Sun S J, Deng C H, Zhang L Y, et al. Molecular analysis and biochemical characteristics of degenerated strains of *Cordyceps militaris*[J]. Archives of Microbiology, 2017, 199: 939-944.
- [23] 石磊. 颗粒度及糊化度对玉米面团理化性质的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [24] 王旭东, 刘景圣, 蔡丹, 等. 黑曲霉发酵对高粱粉理化和加工特性的影响 [J]. 食品工业, 2017(9): 158-162.
- [25] Ritika P, Singh G B, Yogesh K. Effect of Acacia gum, NaCl, and sucrose on physical properties of lotus stem starch[J]. International Journal of Food Science, 2014, 11: 564-569.
- [26] Yang S, Liu J S, Zheng M Z, et al. Effect of fermentation on water mobility and distribution in fermented cornmeal using LF-NMR and its correlation with substrate[J]. Journal of Food Science & Technology, 2019, 56(2): 1027-1036.
- [27] 祖岩岩. 不同消化性能木薯淀粉在不同生长期结构与性质的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [28] Miao M, Xiong S S, Ye F, et al. Development of maize starch with a slow digestion property using maltogenic α -amylase[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 103: 164-169.