

# 自然发酵对小米淀粉分子结构及凝胶特性的影响

曹龙奎<sup>1,2</sup>, 寇芳<sup>1</sup>, 康丽君<sup>1</sup>, 沈蒙<sup>1</sup>, 宁冬雪<sup>1</sup>, 夏甜天<sup>1</sup>, 王维浩<sup>1,2</sup>

(1.黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江 大庆 163319;

2.国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江 大庆 163319)

**摘要:** 研究自然发酵对小米淀粉凝胶特性及分子结构的影响, 旨在为发酵小米淀粉改性机理的研究提供理论基础, 为实现机械化、产业化生产发酵小米制品提供科学依据。采用内蒙古黄金苗小米自然发酵144 h, 研究发酵对小米淀粉分子结构的影响, 分析小米淀粉凝胶特性的变化, 结果: 自然发酵使小米淀粉的颗粒表面遭到侵蚀, 但发酵未改变淀粉的A型结晶; 发酵后淀粉的基团峰位未发生变化, 但峰强减弱; 发酵后 I 区(支链淀粉)、II 区(直链淀粉)的重均分子量降低, 数均分子量升高, 未发酵小米淀粉的重均分子量为 $2.5 \times 10^4 \sim 5.9 \times 10^5$  g/mol, 发酵后小米淀粉重均分子量为 $2.2 \times 10^4 \sim 5.4 \times 10^5$  g/mol。发酵后小米淀粉的回生值、最终黏度较未发酵小米淀粉降低425、470 mPa·s; 糊化温度、热焓值分别上升1.62 °C、7.05 J/g; 发酵后淀粉凝胶的硬度降低60.735 g, 弹性降低0.707, 且发酵96 h后, 淀粉的凝胶特性基本趋于平稳。自然发酵后小米淀粉的分子结构发生变化, 淀粉的凝胶特性改变, 更适宜生产利用淀粉抗老化特性制得的产品。

**关键词:** 自然发酵; 淀粉; 凝胶特性; 分子结构

## Effect of Natural Fermentation on the Gel Properties and Molecular Structure of Millet Starch

CAO Longkui<sup>1,2</sup>, KOU Fang<sup>1</sup>, KANG Lijun<sup>1</sup>, SHEN Meng<sup>1</sup>, NING Dongxue<sup>1</sup>, XIA Tiantian<sup>1</sup>, WANG Weihao<sup>1,2</sup>

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

2. National Cereals Engineering Technology Research Center, Daqing 163319, China)

**Abstract:** In this study, we investigated the effect of natural fermentation on the gel properties and molecular structure of millet starch, aiming to provide a scientific and theoretical basis for the study of the mechanism of the modification of millet starch after fermentation for mechanized and industrial production of fermented millet products. Changes in the molecular structure and gel properties of millet starch (the 'Huangjinmiao' variety from Inner Mongolia) were examined after 144 h of natural fermentation. The results were showed that the surface of fermented starch granules was eroded, whereas the crystalline structure did not change and remained A-type. The position of X-ray diffraction peaks of starch granules did not change after fermentation, but the peak intensity was reduced. Moreover, the weight-average molecular mass of both region I (amylopectin) and II (amylose) was decreased from  $2.5 \times 10^4 \sim 5.9 \times 10^5$  to  $2.2 \times 10^4 \sim 5.4 \times 10^5$  g/mol and the number-average molecular mass was increased. The setback, peak viscosity of millet starch were decreased by 425 and 470 mPa·s as compared to those before fermentation, gelatinization temperature and enthalpy value were increased by 1.62 °C and 7.05 J/g, and gel hardness and elasticity were decreased by 60.735 g and 0.707, respectively. After fermentation for 96 h, the gel properties of starch tended to be stable. The findings revealed that both the molecular structure and gel properties of millet starch after natural fermentation were changed, being more suitable for the production of starch products with resistance to retrogradation.

**Key words:** natural fermentation; starch; gel properties; molecular structure

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201714019

中图分类号: TS231

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2017)14-0127-05

引文格式:

曹龙奎, 寇芳, 康丽君, 等. 自然发酵对小米淀粉分子结构及凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(14): 127-131.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201714019. <http://www.spkx.net.cn>

CAO Longkui, KOU Fang, KANG Lijun, et al. Effect of natural fermentation on the gel properties and molecular structure of millet starch[J]. Food Science, 2017, 38(14): 127-131. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201714019. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2016-07-20

基金项目: 黑龙江省重大科技攻关项目(GA15B301); 黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目(YJSCX2017-Y54)

作者简介: 曹龙奎(1965—), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品加工。E-mail: caolongkui2013@163.com

自然发酵谷物是很多国家生产食物最为传统的方法,其发酵过程主要依靠操作者的经验,没有工艺参数作为参考,且参与发酵的微生物丰度较多,可控性差,产品的品质不稳定,难以实现大规模、机械化生产。目前我国对于发酵谷物的研究主要基于对自然发酵米粉<sup>[1-2]</sup>、大米<sup>[3]</sup>、玉米<sup>[4]</sup>、黄米<sup>[5]</sup>等理化性质、凝胶特性及发酵菌株的分离鉴定,也有学者利用乳酸菌强化发酵大米等原料,但关于自然发酵小米的研究鲜有报道。目前学者对发酵小米的研究主要为发酵特定产品的微生物特性、菌种的分离鉴定、发酵产品的研发<sup>[6-8]</sup>及发酵小米制品<sup>[9-19]</sup>等,而尚未有对自然发酵小米淀粉凝胶特性、发酵作用对淀粉分子的改性作用的研究。因此,本实验以大庆广泛销售的黄金苗小米为研究对象,研究自然发酵过程中小米淀粉的分子结构及凝胶特性的变化,旨在为研究发酵对淀粉的改性机理、生产及控制自然发酵小米制品的品质提供良好的理论及数据支持。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

黄金苗小米,产自内蒙古赤峰。

葡聚糖标准品(Dextran T-20000、Dextran T-150、Dextran T-4099、Dextran T-10、Dextran T-5) 美国Sigma公司;氢氧化钠(分析纯) 天津市大茂化学试剂厂。

### 1.2 仪器与设备

S220型pH计、DSC1型差示扫描量热仪 瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司;Tg16B型台式离心机 上海安亭科学仪器厂;Dgg-9053A型电热鼓风干燥箱 上海森信实验仪器有限公司;MJ-10A型磨粉机 上海浦恒信息科技有限公司;扫描电子显微镜 荷兰FEI公司;X-射线粉末衍射仪 德国Bruker公司;Nicolet 6700傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 美国Thermo Fisher公司;1525高效液相色谱仪(配2410示差折光检测器和Empower工作站) 美国Waters公司;国产高压不锈钢坩埚 上海瑾恒仪器有限公司;压样机 美国Perkin-Elmer公司;RVA4500型快速黏度分析仪、RVA专用铝盒 瑞典波通仪器公司;TA.XT Express质构仪 英国Stable Micro Systems公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 自然发酵小米

取小米150 g,按小米与水的比例1:1.2(g/mL)加入蒸馏水,30℃条件下自然发酵144 h。

#### 1.3.2 自然发酵小米淀粉的制备

将发酵后并干磨法过80目筛的小米粉,按料液比

1:3(g/mL)加入0.2 g/100 mL NaOH溶液中,提取3 h,3 000 r/min离心10 min,弃去上清液,除去沉淀区中上层黄褐色的物质,水洗,离心4次,直至淀粉浆呈白色。用1 mol/L HCl调浆至pH 7.0,离心,30℃干燥,过80目筛,即得发酵小米淀粉<sup>[13]</sup>。

#### 1.3.3 自然发酵对小米淀粉分子结构的影响

##### 1.3.3.1 发酵对小米淀粉颗粒结构的影响

用导电胶将分散均匀的小米淀粉样品固定,利用离子溅射镀膜仪喷金,用扫描电子显微镜进行观察并拍摄有代表性的照片。

##### 1.3.3.2 发酵对小米淀粉结晶度的影响

X-射线衍射仪分析条件:特征射线CuK $\alpha$ ,功率1 600 W,管流40 mV,管压4.0 $\times$ 10<sup>4</sup> V,扫描速率为每分钟4°,扫描范围2 $\theta$ 为3~60°,步长0.02°,狭缝宽度DS、SS、RS分别为1.0、1.0、0.1 mm<sup>[20]</sup>。

##### 1.3.3.3 发酵对小米淀粉基团的影响

取小米淀粉0.5~2 mg,再加入100~200 mg经过磨细干燥的KBr粉末,混合研磨均匀后,放入FTIR光束中进行全波段的扫描,扫描范围为4 000~400 cm<sup>-1</sup>,分辨率为4 cm<sup>-1</sup>,最后得到小米淀粉的红外光谱图<sup>[21-22]</sup>。

##### 1.3.3.4 发酵对小米淀粉分子质量的影响

称取样品适量于容量瓶中,用流动相溶解,定容。凝胶渗透色谱(gel permeation chromatography, GPC)条件:色谱柱:Ultra hydro gel™ Linear(300 mm $\times$ 7.8 mm,两柱串联,流动相为0.1 mol/L硝酸钠溶液,流速0.8 mL/min,柱温30℃,进样量20  $\mu$ L(有时可调整至30  $\mu$ L)。

#### 1.3.4 自然发酵对小米淀粉凝胶特性的影响

##### 1.3.4.1 发酵对小米淀粉老化特性的测定

称样品3.500 g(干质量)于样品盒中,加水25 mL,35℃保温3 min,以6℃/min的速率加热到95℃,保温5 min,以6℃/min的速率降温到50℃,用仪器配套的软件分析得到曲线<sup>[23]</sup>。

##### 1.3.4.2 发酵对小米淀粉糊化特性的测定

准确称样品3.0 mg于坩埚中,加入7  $\mu$ L蒸馏水,用压片器反复压3~4次至坩埚边缘密封完好。室温下均衡12 h,在N<sub>2</sub>流量为150 mL/min、压力0.1 MPa、升温速率5℃/min<sup>[23]</sup>的条件下测定不同样品的糊化特性曲线。

##### 1.3.4.3 发酵对小米淀粉质构特性的测定

配制14%的小米淀粉糊于样品筒中,采用TA.XT plus物性仪测试淀粉凝胶的质构特性,其参数如下:运行模式为Texture Profile Analysis(TPA);测前速率1.00 mm/s;测试速率1.00 mm/s;测后速率1.00 mm/s;形变量为30.00%;探头为10 mm圆柱型(P/0.5R)<sup>[24]</sup>。

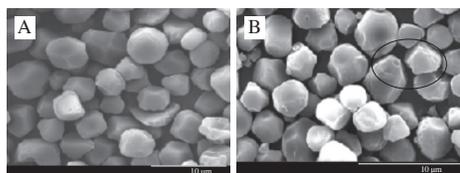
1.4 数据统计分析

采用Excel、SPSS软件对数据统计分析，用Origin软件进行绘图处理。

2 结果与分析

2.1 自然发酵对小米淀粉分子结构的影响

2.1.1 自然发酵对小米淀粉颗粒特性的影响



A.小米淀粉; B.自然发酵。

图1 发酵小米淀粉的颗粒形态

Fig.1 Effect of fermentation on the morphology of millet starch granules

小米淀粉颗粒大部分呈多角形，少数为球形。由图1可知，未发酵的小米淀粉颗粒表面较为光滑，无孔洞。自然发酵小米淀粉表面有明显的侵蚀迹象和孔洞，说明发酵可使淀粉表面被侵蚀。这是由于发酵过程中微生物产酸产酶，使淀粉颗粒无定形区遭到破坏<sup>[26-27]</sup>，淀粉的颗粒特性发生改变，其不再保持完整的颗粒表面。

2.1.2 自然发酵对小米淀粉结晶度的影响

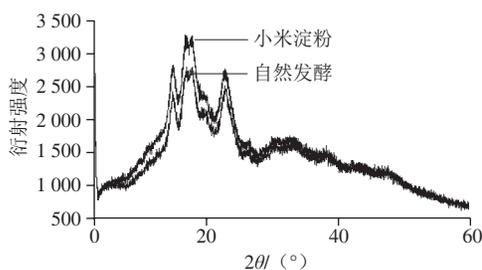


图2 小米淀粉X-衍射图谱

Fig.2 X-ray diffraction patterns of millet starch

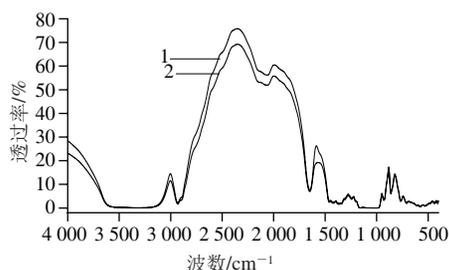
表1 小米淀粉X-衍射2θ角和峰宽

Table 1 X-ray diffraction angle 2θ and peak width of of millet starch			
峰序号	小米淀粉	自然发酵小米淀粉	
衍射角 2θ (°)	1	15.056 ± 0.009	15.060 ± 0.003
	2	17.842 ± 0.001	17.185 ± 0.001
	3	18.008 ± 0.003	18.081 ± 0.024
	4	23.025 ± 0.001	23.024 ± 0.002
晶面 距离/nm	1	5.838 ± 0.001	5.845 ± 0.002
	2	5.143 ± 0.006	5.138 ± 0.005
	3	4.954 ± 0.004	4.935 ± 0.001
	4	3.864 ± 0.001	3.867 ± 0.001
结晶度/%	39.05	37.49	

淀粉是高度有序的高分子化合物之一，其分为结晶区和无定形区，在X-衍射图谱中，结晶区的图谱具有明

显的衍射尖峰，该区域是晶粒线度大、晶形完整有序，而无定形区（即非晶区）是一些短程有序、长程无序的区域，其图谱有明显的弥散衍射特征<sup>[27]</sup>。由表1可知，发酵后小米淀粉的衍射角未发生变化，其在15°、17°、18°及23°处有明显的衍射尖峰，且晶面距离差异不大，但峰强度明显减弱，说明自然发酵后小米淀粉型依然为A型结晶，发酵未使小米淀粉的晶型发生改变。自然发酵小米淀粉的结晶度较未发酵小米淀粉下降1.56%。

2.1.3 自然发酵对小米淀粉基团的影响



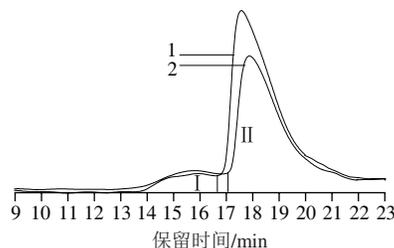
1.未发酵小米淀粉; 2.自然发酵小米淀粉。

图3 小米淀粉的FTIR图谱

Fig.3 FTIR spectra of millet starch

中红外光谱分为官能团区和指纹区，其频率范围为4 000~1 300 cm<sup>-1</sup>及1 300~400 cm<sup>-1</sup><sup>[22]</sup>。利用FTIR研究发酵前后小米淀粉分子链上基团结构及化学键的变化，分析发酵对小米淀粉分子结构的影响，结果如图3所示。小米淀粉在2 931、2 062 cm<sup>-1</sup>处有特征吸收峰，其对应着C—H的伸缩振动峰，1 648 cm<sup>-1</sup>处为C=O振动吸收峰，指纹区在1 242、929、861、765 cm<sup>-1</sup>处出现吸收峰，分别对应C—O、C—C伸缩振动峰和C—H面外弯曲振动吸收峰。自然发酵后，小米淀粉官能团区及指纹区的特征吸收峰位未发生变化，但峰强减弱。

2.1.4 自然发酵小米淀粉分子质量的影响



1.自然发酵小米淀粉; 2.未发酵小米淀粉。

图4 小米淀粉GPC谱图

Fig.4 GPC chromatogram of millet starch

淀粉是由分子质量不同的高分子化合物组成的同系混合物，其凝胶特性、老化特性、糊化特性等不仅与平均分子质量有密切的关联，还受分子质量分布的影响<sup>[28]</sup>，表2为不同处理小米淀粉分子质量。小米淀粉分子质量分布

可分为两个区,分别为I区(主要为支链淀粉)和II区(主要为直链淀粉及少部分短支链淀粉),自然发酵的小米淀粉I区、II区的重均分子质量( $M_w$ )小于未发酵小米淀粉,数均分子质量( $M_n$ )大于未发酵小米淀粉,未发酵小米淀粉 $M_w$ 为 $2.5 \times 10^4 \sim 5.9 \times 10^5$  g/mol,自然发酵小米淀粉 $M_w$ 为 $2.2 \times 10^4 \sim 5.4 \times 10^5$  g/mol。由于自然发酵微生物菌群丰度较大,发酵过程产酸、酶使小米支链淀粉发生水解,生成分子链较短的支链淀粉,故I区、II区 $M_w$ 较未发酵的小米淀粉降低而 $M_n$ 相对增加,且回生值降低,说明发酵后直链淀粉的比例降低,短期抗老化性能提高。淀粉的分子质量分布是表征聚合物分子链长短的重要参数,常用 $M_w/M_n$ (多分散指数)表示。 $M_w/M_n$ 越接近于1,说明样品的组分越单一,越大则说明样品的组分越复杂,分子分布越宽<sup>[29]</sup>。对于多分散、宽分布的聚合物其 $M_w/M_n$ 在1.5~30.0之间,自然发酵后小米淀粉的分子质量分布变窄,说明发酵后I区、II区大的长支链淀粉、部分直链淀粉发生水解,生成较短链的支链淀粉及小分子物质。

表2 小米淀粉分子质量及其分布

Table 2 Molecular weight distribution of fermented millet starch

类型	区	$M_w$ / (g/mol)	$M_n$ / (g/mol)	$M_w/M_n$
小米淀粉	I	594 863	230 464	2.58
	II	25 325	7 622	3.32
自然发酵	I	540 716	292 482	1.85
	II	21 723	9 472	2.30

## 2.2 自然发酵对小米淀粉凝胶特性的影响

### 2.2.1 自然发酵对小米淀粉老化特性的影响

表3 自然发酵小米淀粉老化特征参数

Table 3 Retrogradation characteristics of fermented millet starch aging

特征参数	发酵时间/h						
	0	24	48	72	96	120	144
糊化温度/°C	76.46±0.02	76.00±0.04	75.30±0.13	75.85±0.05	77.55±0.08	76.14±0.10	75.21±0.11
峰值黏度/(mPa·s)	6642.00±11.99	6961.00±10.48	6804.00±9.78	6631.00±11.50	6513.00±10.45	6101.00±12.01	6098.00±9.81
谷值黏度/(mPa·s)	1874.00±8.65	2467.00±8.98	2404.00±9.89	2418.00±9.74	2230.00±10.15	1848.00±9.69	1829.00±8.94
衰减值/(mPa·s)	4768.00±10.01	4494.00±10.68	4400.00±13.02	4213.00±11.64	4283.00±12.46	4253.00±10.45	4269.00±14.25
最终黏度/(mPa·s)	4738.00±11.36	4488.00±13.14	4559.00±12.47	4718.00±10.94	4251.00±12.08	4301.00±14.10	4268.00±13.01
回生值/(mPa·s)	2864.00±10.05	2021.00±9.62	2155.00±9.47	2300.00±8.42	2421.00±9.45	2453.00±7.82	2439.00±10.15

注:同一特征参数,上标小写字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

由表3可知,发酵24 h小米淀粉的回生值最低为2 021 mPa·s,之后上升,96 h后趋于平稳,回生值在96 h后差异不显著。发酵过程中小米淀粉的回生值随发酵时间升高,但显著低于未发酵小米淀粉,其原因为随发酵进行,微生物代谢产酸产酶使支链淀粉发生水解生成短支链淀粉及少部分直链淀粉,淀粉发生分子重排,更

易缔合,故发酵过程中淀粉的回生值逐渐升高,同时淀粉酶也使得部分直链淀粉水解为小分子物质,导致发酵终止时淀粉的回生值显著低于未发酵小米淀粉。最终黏度表明糊化过程中浸出的淀粉分子(主要是直链淀粉分子),其大小与产品的品质有关。发酵72 h最终黏度达到最高,之后降低,96 h后趋于稳定。发酵结束时,自然发酵小米淀粉的回生值、最终黏度较未发酵小米淀粉分别降低425、470 mPa·s,回生值的降低说明自然发酵后小米淀粉短期抗老化的能力有所增加,适于加工馒头、面包等抗老化的食品。

### 2.2.2 自然发酵小米淀粉的糊化特性

表4 不同发酵处理小米淀粉糊化特征参数

Table 4 Gelatinisation characteristics of fermented millet starch

发酵时间/h	发酵类型	糊化温度/°C	峰值温度/°C	终止温度/°C	热焓值/(J/g)
0	小米淀粉	65.12 <sup>a</sup> ±0.05	71.61 <sup>a</sup> ±0.02	76.90 <sup>a</sup> ±0.09	7.54 <sup>a</sup> ±0.04
24	自然发酵	64.95 <sup>b</sup> ±0.01	71.56 <sup>b</sup> ±0.04	77.52 <sup>b</sup> ±0.05	12.93 <sup>b</sup> ±0.10
48	自然发酵	64.82 <sup>b</sup> ±0.20	70.91 <sup>b</sup> ±0.12	77.03 <sup>b</sup> ±0.06	11.10 <sup>c</sup> ±0.19
72	自然发酵	65.05 <sup>ab</sup> ±0.05	72.14 <sup>b</sup> ±0.02	78.63 <sup>c</sup> ±0.07	12.99 <sup>b</sup> ±0.07
96	自然发酵	66.70 <sup>c</sup> ±0.18	72.89 <sup>b</sup> ±0.08	81.06 <sup>d</sup> ±0.12	14.53 <sup>d</sup> ±0.03
120	自然发酵	66.75 <sup>c</sup> ±0.02	72.91 <sup>b</sup> ±0.01	81.59 <sup>d</sup> ±0.03	14.54 <sup>d</sup> ±0.41
144	自然发酵	66.74 <sup>c</sup> ±0.03	72.86 <sup>b</sup> ±0.06	82.01 <sup>e</sup> ±0.11	14.60 <sup>d</sup> ±0.11

由表4可知,自然发酵48 h小米淀粉的糊化温度、峰值温度、终止温度均达到最低值之后上升,但糊化温度及峰值温度在96 h基本趋于稳定,而终止温度随发酵时间的延长逐渐升高。自然发酵后小米淀粉的热焓值较小米原淀粉升高,且发酵48 h小米淀粉的热焓值最低,之后升高,96 h后基本保持不变。发酵结束时小米淀粉的糊化温度、热焓值分别上升1.62 °C、7.05 J/g。热焓值的增大可能是由于其发酵作用使较长支链淀粉水解为大量的中间级及较短的支链淀粉,使结晶区的比例相对增大的缘故。

### 2.2.3 自然发酵小米淀粉的质构特性

如图5所示,自然发酵小米淀粉的凝胶硬度在72 h达到最低,之后稍有增加。发酵后小米淀粉的弹性随发酵时间的延长逐渐降低,96 h后趋于稳定。发酵后淀粉凝胶的硬度降低60.735 g,弹性降低0.707。结合发酵后淀粉分子质量及支链淀粉与直链淀粉的比例可知,发酵后淀粉硬度减小是由于发酵使支链淀粉发生断链与脱支,生成更短的支链淀粉,增加了与水的结合能力所致。熊柳等<sup>[30]</sup>研究发酵对淀粉的影响发现,发酵后淀粉凝胶较为柔软,有柔韧的感觉,但弹性减小,这与本实验的研究结果一致。与未发酵的小米淀粉相比,自然发酵进行至96 h时,小米淀粉的质构特性趋于稳定,适合生产柔软的淀粉制品。

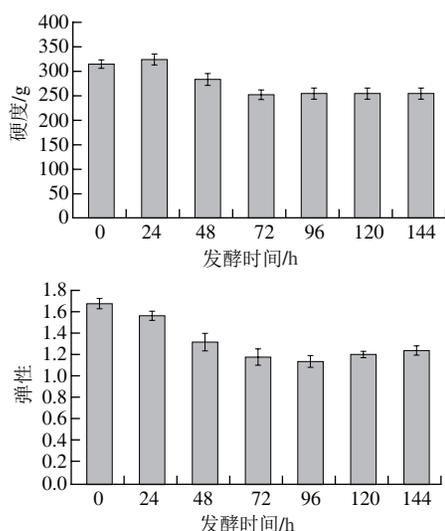


图5 自然发酵小米淀粉的质构特性

Fig. 5 Effects of natural fermentation on texture characteristics of millet starch

### 3 结论

自然发酵使小米淀粉的颗粒遭到一定程度的破坏,但晶型未发生改变,依然为A型结晶。发酵后淀粉的基团峰位未发生变化,但峰强减弱。I区、II区 $M_w$ 减少, $M_n$ 增加,说明发酵后长支链淀粉及直链淀粉的比例减少而短支链淀粉的比例相对增加,故发酵后小米淀粉凝胶的回生值降低。自然发酵后小米淀粉的最终黏度、糊化温度及热焓值升高,而回生值、凝胶硬度及弹性减小,给人以柔软的感觉。该课题为研究自然发酵小米的机理提供了科学依据,为大规模机械化、产业化生产发酵小米提供依据。

### 参考文献:

- 李芸. 发酵米粉生产过程中的菌相变化及发酵对米粉品质的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- 周显青, 张玉荣, 李亚军. 植物乳杆菌发酵对大米淀粉理化性质的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2011(3): 25-27. DOI:10.3969/j.issn.1003-6202.2011.03.008.
- 鲁战会. 生物发酵米粉的淀粉改性及凝胶机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002.
- 袁美兰, 鲁战会, 程永强, 等. 自然发酵对米粉RVA黏度性质及米粉拉伸性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(1): 6-9.
- 李丽. 自然发酵对黄米理化性质的影响研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2010.
- OUATTARA C A T. Isolation and identification of lactic acid and non-acid lactic bacteria from "dèguè" of Western Africa traditional fermented millet-based food[J]. African Journal of Microbiology Research, 2015, 9(36): 2001-2005. DOI:10.5897/AJMR2015.7548.
- OJOKOH A O, FAYEMI O E, OCLEO F C K, et al. Effect of fermentation on proximate composition, physicochemical and microbial characteristics of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) and Acha (*Digitaria exilis* (Kippist) Stapf) flour blends[J]. Academic Journals, 2015, 7(1): 1-8. DOI:10.5897/JABSD2014.0236.
- KOUAKOU B, ALEXIS K K S, ADJÉHI D, et al. Biochemical changes occurring during germination and fermentation of millet and effect of technological processes on starch hydrolysis by the crude enzymatic extract of millet[J]. Journal of Applied Sciences, 2008, 4(11): 1502-1510.
- 薛月圆, 李鹏, 林勤保. 小米的化学成分及物理性质的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(3): 199-203.
- SERRAINO M R, THOMPSON L U, SOVOIE L, et al. Effect of phytic acid on the *in vitro* rate of digestibility of rapeseed protein and amino acids[J]. Journal of Food Science, 1985, 50(6): 1689-1692. DOI:10.1111/j.1365-2621.1985.tb10566.x.
- YOON J H, THOMPSON L U, JENKINS D J. The effect of phytic acid on *in vitro* rate of starch digestibility and blood glucose response[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1983, 38(6): 835-842.
- ILANGO S, ANTONY U. Assessment of the microbiological quality of koozh, a fermented millet beverage[J]. African Journal of Microbiology Research, 2014, 8(15): 308-312. DOI:10.5897/AJMR2013.6482.
- LEI V, FRIIS H, MICHAELSEN K F. Spontaneously fermented millet product as a natural probiotic treatment for diarrhoea in young children: an intervention study in Northern Ghana[J]. International Journal of Food Microbiology, 2006, 110(3): 246-253. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2006.04.022.
- ZAKARI U M, HASSAN A, ABBO E S. Physico-chemical and sensory properties of "Agigi" from pearl millet (*Pennisetum glaucum*) and bambara groundnut (*Vigna subterranean*) flour blends[J]. African Journal of Food Science, 2010, 4(10): 662-667.
- PHOTHISSET S, CHAROENREIN S. Morphology and physicochemical changes in rice flour during rice paper production[J]. Food Research International, 2007, 40(2): 266-272. DOI:10.1016/j.foodres.2006.06.002.
- 张秀媛, 何扩, 石后, 等. 响应面法优化小米红曲制备工艺及其抗肿瘤活性研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(3): 19-22; 34.
- ISSOUFOU A. 发酵小米多肽的抗氧化与抗菌活性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- FAROQQ U. 小米膳食纤维作为主要碳源对益生菌生长和发酵过程中短链脂肪酸产量的影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.
- 李喜仙, 刘玺. 小米液态发酵生产红曲色素技术研究[J]. 食品科学, 2003, 24(1): 83-86. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2003.01.020.
- 黄峻榕. X-射线衍射在测定淀粉颗粒结构中的应用[J]. 陕西科技大学学报, 2003, 21(4): 90-93.
- 李玥, 钟芳, 麻建国, 等. 大米淀粉糊化过程的光谱分析[J]. 高分子学报, 2008(7): 720-725. DOI:10.3321/j.issn:1000-3304.2008.07.016.
- 冷雪, 曹龙奎. 利用差示扫描量热仪研究小米淀粉及小米粉的糊化特性[J]. 食品科学, 2015, 36(19): 60-66. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201519011.
- 陶华莹. 发酵大米理化特性变化与米粉品质形成机理[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013.
- MASCHERONI E, CHALIER P, GONTARD N, et al. Designing of a wheat gluten/mommorillonite based system as carvacrol carrier: rheological and structural properties[J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(4): 406-413. DOI:10.1016/j.foodhyd.2009.11.007.
- 杨斌, 张喜文, 张国权, 等. 山西不同品种谷子淀粉的理化特性研究[J]. 现代食品科技, 2013, 29(12): 2901-2908.
- 梁勇, 杨连生, 高大维. 非晶颗粒态木薯淀粉化学反应活性研究[J]. 郑州工程学院学报, 2004, 25(1): 9-13. DOI:10.3969/j.issn.1673-2383.2004.01.003.
- 蒲华寅. 等离子体作用对淀粉结构及性质影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- 许永亮, 程科, 赵思明, 等. 大米淀粉的分子量分布及其与粘性的相关性研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(3): 566-572. DOI:10.3321/j.issn:0578-1752.2007.03.019.
- 张攀峰, 陈玲, 李晓玺, 等. 不同直链/支链比的玉米淀粉分子质量及其构象[J]. 食品科学, 2010, 31(19): 157-160.
- 熊柳, 夏明涛, 薛丽华. 自然发酵对豌豆淀粉理化性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(5): 22-26.