

# 奇亚籽面条食用品质及体外消化特性

张伟峰<sup>1</sup>,任香香<sup>1</sup>,孙博雅<sup>1</sup>,张剑<sup>1,2\*</sup>,黄泽华<sup>3</sup>,于嘉仪<sup>1</sup>,安艳霞<sup>1,2</sup>,殷贵鸿<sup>4</sup>,赵阳<sup>1,2,4\*</sup>

(1. 河南农业大学 食品科学技术学院,河南 郑州 450002;2. 农业农村部 大宗粮食加工重点实验室,河南 郑州 450002;3. 河南工业大学 粮油食品工程学院,河南 郑州 450001;4. 河南农业大学 农学院,小麦玉米作物学国家重点实验室,河南粮食作物协同创新中心,河南 郑州 450046)

**摘要:** 奇亚籽富含膳食纤维和不饱和脂肪酸等营养物质,对调节血糖有积极作用。为提高面条的抗消化特性,以奇亚籽和小麦粉为原料制备面条,探究不同奇亚籽添加量对面条的蒸煮品质、质构特性、感官特性、淀粉糊化性质以及体外消化特性的影响。结果表明,适当添加奇亚籽能够改善面条的蒸煮特性和质构特性,增加面条的吸水率,改善面条口感,提高淀粉的热稳定性。随着奇亚籽添加量的增加,面条中淀粉水解率显著降低,抗性淀粉的含量明显提高,血糖生成指数可降低至55以下。但过量添加奇亚籽会导致面条颜色和内部结构变差,硬度过大,食用时颗粒感明显。综合评价奇亚籽面条的品质及消化特性,奇亚籽的适宜添加量为15%,此时奇亚籽面条的感官评分为89.2,抗性淀粉含量为39.05%。

**关键词:** 奇亚籽;鲜湿面;体外消化;血糖;抗性淀粉

## Edible Quality and *in vitro* Digestive Characteristics of Chia Seed Noodles

ZHANG Weifeng<sup>1</sup>, REN Xiangxiang<sup>1</sup>, SUN Boya<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>1,2\*</sup>, HUANG Zehua<sup>3</sup>, YU Jiayi<sup>1</sup>, AN Yanxia<sup>1,2</sup>, YIN Guihong<sup>4</sup>, ZHAO Yang<sup>1,2,4\*</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan, China; 2. Key Laboratory of Staple Grain Processing, Ministry of Agriculture and Village, Zhengzhou 450002, Henan, China; 3. College of Grain, Oil, and Food Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China; 4. College of Agronomy, National Key Laboratory of Wheat and Maize Crop Science, Collaborative Innovation Center for Henan Grain Crops, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, Henan, China)

**Abstract:** Chia seeds are rich in nutrients such as dietary fiber and unsaturated fatty acids, which play an active role in regulating blood glucose levels. To enhance the digestive resistance of noodles, chia seeds and wheat flour were used as raw materials to make noodles. The effects of different chia seed addition levels on the cooking quality, texture, sensory properties, starch pasting characteristics, and *in vitro* digestive properties of the noodles were investigated. The results showed that adding an appropriate amount of chia seeds improved the cooking quality and texture of the noodles, increased water absorption, enhanced taste, and improved the thermal stability of starch. As the chia seed content increased, the starch hydrolysis rate in the noodles significantly decreased, and the resistant starch content significantly increased, reducing the glycemic index to below 55. However, excessive chia seed addition led to poorer color and internal structure, excessive hardness, and a noticeable grainy texture. Based on a comprehensive evaluation of the quality and digestive properties of the chia seed noodles, the optimal chia seed addition was 15%, with a sensory score of 89.2 and a resistant starch content of 39.05%.

**Key words:** chia seeds; fresh wet noodles; *in vitro* digestion; blood glucose; resistant starch

基金项目:河南省重大科技专项(201300110800、221100110700);河南省科技攻关计划项目(232102111069、202102110133);河南省现代农业产业技术体系建设项目(HARS-22-01-G2);河南省农业良种联合攻关项目(2022010102);河南省博士后科研资助项目(HN2022128);河南农业大学特殊创新基金(KJXC2019C04);河南农业大学校内拔尖人才项目(30501304);河南工业大学国家小麦玉米深加工工程技术研究中心开放项目(NL2022011);河南省高等学校重点科研项目(25A550010)

作者简介:张伟峰(1999—),男(汉),硕士研究生,研究方向:粮油精深加工。

\*通信作者:张剑(1973—),男(汉),硕士研究生,研究方向:粮油精深加工;赵阳(1989—),女(汉),博士,研究方向:粮油精深加工。

引文格式:

张伟峰,任香香,孙博雅,等. 奇亚籽面条食用品质及体外消化特性[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(5): 22-29.

ZHANG Weifeng, REN Xiangxiang, SUN Boya, et al. Edible Quality and *in vitro* Digestive Characteristics of Chia Seed Noodles[J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 22-29.

面条是我国的传统主食之一,但小麦面条一般为高血糖生成指数(glycemic index, GI)食品,不适合肥胖症及糖尿病患者食用<sup>[1]</sup>。淀粉由3个不同功能的营养片段组成,根据体外消化速率和人体可利用性,可分为快速消化淀粉(rapidly digestible starch, RSD)、慢消化淀粉(slowly digestible starch, SDS)和抗性淀粉(resistant starch, RS)<sup>[2]</sup>。低GI、高RS含量的食物对预防及缓解糖尿病等慢性代谢疾病有一定的益处<sup>[3]</sup>。利用杂粮取代小麦粉制作面条,在增加其营养成分丰富度的同时,能够有效提高其抗消化性,降低其血糖生成指数。奇亚籽中含有30%~40%的膳食纤维,富含不饱和脂肪酸,具有预防II型糖尿病、降低血脂、改善心脑血管疾病、抗癌等作用<sup>[4-5]</sup>,其种皮中含有大量的亲水胶体(水溶性膳食纤维,即奇亚籽胶),具有增稠、稳定作用<sup>[6]</sup>。目前,奇亚籽作为配料,在面包、饼干等食品中已有应用,可改善产品质地,提供膳食纤维、多不饱和脂肪酸以及高品质蛋白<sup>[7]</sup>。

许多植物性亲水胶体,如海藻酸钠、卡拉胶、魔芋胶和瓜尔胶等,可用作面条品质改良剂,同时提高淀粉抗消化性<sup>[8]</sup>。张磊等<sup>[6]</sup>研究表明,亲水胶体能够降低面条切割时的断条率,改善煮后面条食用品质,增强面条弹性、软硬度及适口性。张剑等<sup>[9]</sup>研究表明,亲水胶体可以降低鲜湿面条的蒸煮损失,改善表面状态,增加咀嚼性。Chillo等<sup>[10]</sup>研究发现添加10%β-葡聚糖能使意大利面的GI值从64降低到29。Jang等<sup>[11]</sup>研究表明,添加瓜尔豆胶和海藻酸能够降低小麦和全麦面条的GI值。孙慧娟<sup>[12]</sup>研究表明,脱脂亚麻籽粉加入面条中,可以显著抑制餐后血糖的升高。

本试验利用奇亚籽取代部分小麦粉制备面条,以达到降低GI、提高RS含量的目的,同时探究奇亚籽添加量对面条蒸煮品质、感官特性、质构特性、淀粉糊化特性及微观结构的影响,以探讨奇亚籽面条食用品质与体外消化特性间的关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

中筋小麦粉(水分含量12.1%、蛋白质含量12.4%、灰分含量0.52%):中粮(郑州)粮油工业有限公司;奇亚籽(水分含量4.78%、蛋白质含量21.1%、膳食纤维含量35.9%、灰分含量4.5%、粗脂肪含量34.3%):涑水县金谷粮油食品有限公司;胃蛋白酶(250 U/mg)、α-淀粉酶

(37 000 U/mL)、淀粉葡萄糖苷酶(700 000 U/mL)、胰蛋白酶(250 U/mg):北京索莱宝科技有限公司;Gopod葡萄糖试剂盒:爱尔兰Megazyme公司;无水乙醇(分析纯):天津市富宇精细化工有限公司;磷酸盐、NaOH(均为分析纯):上海沪试实验室器材股份有限公司。

### 1.2 仪器与设备

针式和面机(JHMZ 200):北京东孚久恒仪器技术有限公司;电动家用面条机(DMT-6):龙口市复兴机械有限公司;恒温恒湿培养箱(HWS-P300C):合肥达斯卡特生物科技有限公司;高速台式离心机(TG16-WS):湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;电热鼓风干燥箱(101-2AB)、高速粉碎机(FW80):天津市泰斯特仪器有限公司;恒温水浴锅(DZKW-C):上海数立仪器仪表有限公司;质构仪(TA-XTplus):英国Stable Micro Systems公司;紫外可见分光光度计(UV-2000):尤尼柯(上海)仪器有限公司;X-射线衍射仪(NICOLET Is10):丹东通达科技有限公司;台式扫描电子显微镜(Phenom):复纳科学仪器(上海)有限公司;快速黏度分析仪(RAV-4500):瑞典波通公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 奇亚籽面条的制备

工艺流程:面粉、奇亚籽粉、水→和面→熟化→压延→切条<sup>[13]</sup>。

选取饱满无霉变的奇亚籽,设置电热鼓风干燥箱温度60℃,烘干2h,用高速粉碎机粉碎,过0.85mm筛,制得奇亚籽粉,待用<sup>[14]</sup>。每100g粉料中,奇亚籽的添加量分别为0%、5%、10%、15%、20%、25%,其余为小麦粉,加水量为38mL。将混合粉及水放入针式和面机中,设置和面时间为8min,将和好的面絮放入自封袋中于30℃下醒发30min后压延7次,使其面片厚度为0.8mm,并切成3.7mm宽的面条。

#### 1.3.2 奇亚籽面条蒸煮品质的测定

取40根面条,在500mL沸水中煮制,从2min开始,每隔20s取出1根面条,玻璃板挤压并检查有无硬芯,硬芯消失时即为面条的最佳蒸煮时间。根据公式(1)计算面条断条率,重复测试3次,取平均值。

$$D = N/40 \times 100 \quad (1)$$

式中: $D$ 为断条率,%; $N$ 为断条数。

称取25g面条在500mL沸水中煮至最佳蒸煮时间,沥水5s,称量面条质量 $m$ ,根据公式(2)计算面条吸水率。

$$X = \frac{m - 25}{25} \times 100 \quad (2)$$

式中: $X$ 为吸水率,%; $m$ 为煮后样品质量,g。

### 1.3.3 奇亚籽面条质构特性的测定

参考张伟峰等<sup>[15]</sup>的方法并稍加改进,使用质构仪进行质地剖面分析(texture profile analysis, TPA)及拉伸测试。将每组试验样品煮至最佳蒸煮时间,迅速捞出沥水5 s,之后在冷水中浸泡30 s,捞出吸干表面水分。TPA测试:切成长度为3 cm的面条段,平行放置3根于测试台中部;选择P50圆柱形探头,模式为压缩,测前速率1.0 mm/s、测中速率2.0 mm/s、测后速率2.0 mm/s、压缩程度70%、停留时间5 s、触发力5 g。拉伸测试:将1根面条的两端分别缠绕在质构仪两端的探头上;测前速度2 mm/s、测中速度2 mm/s、测后速度10 mm/s、拉伸距离100 mm。每组样品做5次重复试验,并在5 min内测试完毕。记录奇亚籽面条的硬度、弹性、黏聚性、胶着性、咀嚼性、回复性、拉伸力及拉伸距离。

### 1.3.4 奇亚籽面条的感官评价

参照LS/T 3202—1993《面条用小麦粉》的面条品质评分标准并进行适当修改,选择12名有经验的人员对奇亚籽面条进行感官评价,评价标准见表1。将面条煮至最佳蒸煮时间后在冷水中浸泡30 s,捞出后立即提供给评价员品尝。

表1 奇亚籽面条的感官评分标准

Table 1 Sensory scoring standards of chia seed noodles

项目	评分标准	得分
色泽(15)	面条颜色呈棕色,颜色均匀	13~15
	面条颜色一般	8~<13
	颜色发暗、发灰、亮度差	1~<8
外观状态(10)	表面结构绵密、均匀	8~10
	表面结构均匀但有破损	5~<8
	表面粗糙、变形严重	1~<5
气味(10)	适宜的奇亚籽清香味	8~10
	气味过重或较轻	5~<8
	气味刺鼻	1~<5
软硬度(15)	咬断力用力适中	13~15
	稍偏硬或偏软	8~<13
	太硬或太软	1~<8
黏弹性(15)	不粘牙、有嚼劲、富有弹性	13~15
	微粘牙,弹性略低	8~<13
	不爽口,粘牙,无嚼劲	1~<8
爽滑性(15)	口感爽滑	13~15
	较爽滑	8~<13
	爽滑性差	1~<8
颗粒感(10)	均一无颗粒感	8~10
	略有颗粒感	5~<8
	有明显颗粒感、咯牙	1~<5
食味(10)	具有奇亚籽的特有风味	8~10
	奇亚籽风味较淡,基本无异味 有异味	5~<8 1~<5

### 1.3.5 奇亚籽面条的体外消化测试及动力学方程拟合

参考Englyst等<sup>[16]</sup>的方法并进行改进,取淀粉干基质量为1 g的不同样品置于离心管中,用研杵将其研碎,加入5 mL蒸馏水,沸水浴加热至最佳蒸煮时间,在5 000 r/min下离心5 min,加入5 mL胃蛋白酶溶液( $\geq 2$  500 U/mL),在37 °C下恒温水浴振荡30 min(200 r/min),然后加入5 mL 0.01 mol/L NaOH溶液和15 mL 0.1 mol/L磷酸盐缓冲液(pH6.8),加入5 mL  $\alpha$ -淀粉酶溶液(2 500 U/mL)、0.1 mL淀粉葡萄糖苷酶溶液(3 000 U/mL)和1.0 mL胰蛋白酶溶液(1 mg/mL),随后样品在37 °C下恒温水浴振荡3 h。分别在0、20、60、120、150、180 min下取出0.1 mL消化液,加入0.3 mL无水乙醇使酶活,在10 000 r/min下离心10 min后用Gopod葡萄糖试剂盒测定葡萄糖含量。按照公式(3)计算水解度,绘制面条淀粉水解率变化曲线。

$$S = G_t \times 0.9 / T_s \times 100 \quad (3)$$

式中: $S$ 为淀粉水解率,%; $G_t$ 为 $t$ 时间下溶液中还原糖含量,mg; $T_s$ 为样品中淀粉干基质量,mg。

结合样品的淀粉水解率曲线,根据公式(4)~公式(6)计算样品中的快速消化淀粉(rapidly digestible starch, RDS)、慢速消化淀粉(slowly digestible starch, SDS)及抗性淀粉(resistant starch, RS)的含量。

$$D = (G_{20} - F_c) \times 0.9 \times 100 / T_s \times 100 \quad (4)$$

$$S = (G_{120} - G_{20}) \times 0.9 \times 100 / T_s \times 100 \quad (5)$$

$$R = 100 - D - S \quad (6)$$

式中: $D$ 为RDS含量,%; $S$ 为SDS含量,%; $R$ 为RS含量,%; $F_c$ 为消化前样品中的葡萄糖含量,mg; $G_{20}$ 为20 min时消化液中葡萄糖含量,mg; $G_{120}$ 为120 min时消化液中葡萄糖含量,mg; $T_s$ 为样品中淀粉干基质量,mg。

根据Mutungi等<sup>[17]</sup>的方法对样品的水解率曲线进行动力学方程拟合,记录180 min时的还原糖含量( $C_\infty$ , mg)、水解速率常数( $k$ )等参数,拟合曲线如公式(7)所示。以标准白面包为参比,计算180 min时的淀粉水解率和预估血糖生成指数(expected glycemic index, eGI)。eGI按公式(8)计算。

$$C_t = C_\infty \times (1 - e^{-kt}) \quad (7)$$

$$I = 0.862 \times S / S_{wb} \times 100 + 8.198 \quad (8)$$

式中: $C_t$ 为 $t$ 时间下溶液中葡萄糖含量,mg; $t$ 为水解时间,min; $I$ 为eGI; $S$ 为测试样品水解曲线下面积; $S_{wb}$ 为白面包水解曲线下面积。

### 1.3.6 奇亚籽面条中淀粉糊化特性的测定

将奇亚籽面条冻干后粉碎,利用快速黏度分析仪(rapid visco analyzer, RVA)测定其糊化特性<sup>[18]</sup>。根据美国谷物化学家协会(American Association of Cereal Chemists, AACC)方法,取修正后奇亚籽面条冻干粉3.00 g、标准水质量25 g进行测试,测定峰值黏度、低

谷黏值、衰减值、最终黏度、回升值、起始糊化温度。

### 1.3.7 奇亚籽面条的淀粉结晶度测试

根据赵阳等<sup>[19]</sup>的方法对煮后奇亚籽面条冻干粉进行 X-射线衍射扫描。测试条件:靶型为 Cu-K $\alpha$  射线,管电压 30 kV,管电流 10 mA。扫描条件:连续扫描,2 $\theta$  为 4°~35°,扫描速度 5°/min。记录样品的 X-射线衍射图谱,利用 MID Jade 6.0 软件计算样品结晶度。

### 1.3.8 奇亚籽面条的微观结构观测

将奇亚籽面条冻干后,利用扫描电子显微镜观察其表面和截面<sup>[20]</sup>。将样品用镊子修整成 2 mm $\times$ 2 mm 的测试段,用导电胶固定于工作台上,经离子溅射喷 Au 处理后进行观测和拍摄,获取样品表面 $\times$ 500 倍、截面 $\times$ 2 000 倍的图像。

### 1.4 统计分析方法

采用 SPSS 16.0 统计分析软件对数据进行方差分析(analysis of variance, ANOVA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 奇亚籽添加量对面条蒸煮特性的影响

奇亚籽添加量对面条蒸煮特性的影响如表 2 所示。

表 2 奇亚籽面条的蒸煮特性

Table 2 Cooking properties of chia seed noodles

奇亚籽添加量/%	最佳蒸煮时间/min	断条率/%	吸水率/%
0(对照)	5	5.00	130.08 $\pm$ 3.57 <sup>d</sup>
5	5	2.50	131.03 $\pm$ 4.12 <sup>d</sup>
10	5	2.50	132.21 $\pm$ 1.01 <sup>d</sup>
15	5	0	138.07 $\pm$ 2.59 <sup>bc</sup>
20	5	0	141.27 $\pm$ 3.78 <sup>b</sup>
25	5	0	163.31 $\pm$ 0.55 <sup>a</sup>

注:同列不同小写字母表示各组间差异显著, $P<0.05$ 。

由表 2 可知,所有样品的最佳蒸煮时间均为 5 min,添加奇亚籽对面条的最佳蒸煮时间并无影响。随着奇亚籽添加量的增加,面条的断条率降低,添加量为 15% 时,断条率下降到 0%,这可能是由于奇亚籽胶强化了面条的结构<sup>[21]</sup>。添加奇亚籽粉后,面条的吸水率明显上升,这可能是奇亚籽中的奇亚籽胶、蛋白质等成分大量吸水所致<sup>[22]</sup>。这与张剑等<sup>[9]</sup>的研究结果一致。

### 2.2 奇亚籽添加量对面条质构特性的影响

奇亚籽添加量对面条质构特性的影响如表 3 所示。

表 3 奇亚籽面条的质构特性

Table 3 Texture properties of chia seed noodles

奇亚籽添加量/%	硬度/g	弹性	黏聚性	胶着性	咀嚼性	回复性	拉伸距离/mm	拉伸力/N
0(对照)	3 356.61 $\pm$ 2.31 <sup>f</sup>	0.92 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	0.80 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	315.68 $\pm$ 5.73 <sup>e</sup>	281.60 $\pm$ 7.33 <sup>f</sup>	0.63 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	36.60 $\pm$ 10.42 <sup>a</sup>	0.139 $\pm$ 0.006 <sup>e</sup>
5	3 641.52 $\pm$ 3.89 <sup>e</sup>	0.93 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	0.78 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	346.24 $\pm$ 11.12 <sup>e</sup>	317.81 $\pm$ 5.29 <sup>e</sup>	0.61 $\pm$ 0.01 <sup>ab</sup>	25.69 $\pm$ 5.97 <sup>abc</sup>	0.148 $\pm$ 0.005 <sup>e</sup>
10	4 775.09 $\pm$ 4.10 <sup>d</sup>	0.85 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	0.72 $\pm$ 0.00 <sup>b</sup>	396.28 $\pm$ 3.32 <sup>d</sup>	387.01 $\pm$ 4.84 <sup>d</sup>	0.58 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	18.77 $\pm$ 3.42 <sup>cd</sup>	0.161 $\pm$ 0.013 <sup>bc</sup>
15	5 336.33 $\pm$ 5.22 <sup>c</sup>	0.84 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	0.71 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	439.01 $\pm$ 5.82 <sup>c</sup>	422.45 $\pm$ 3.84 <sup>c</sup>	0.54 $\pm$ 0.00 <sup>b</sup>	20.74 $\pm$ 3.22 <sup>bcd</sup>	0.204 $\pm$ 0.017 <sup>b</sup>
20	6 372.31 $\pm$ 3.44 <sup>b</sup>	0.87 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	0.70 $\pm$ 0.00 <sup>b</sup>	493.02 $\pm$ 4.12 <sup>b</sup>	443.75 $\pm$ 14.36 <sup>b</sup>	0.50 $\pm$ 0.00 <sup>bc</sup>	21.12 $\pm$ 4.67 <sup>abc</sup>	0.271 $\pm$ 0.005 <sup>a</sup>
25	6 947.52 $\pm$ 4.91 <sup>a</sup>	0.87 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	0.70 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	505.22 $\pm$ 6.18 <sup>a</sup>	468.56 $\pm$ 9.85 <sup>a</sup>	0.48 $\pm$ 0.00 <sup>c</sup>	17.48 $\pm$ 3.09 <sup>d</sup>	0.229 $\pm$ 0.003 <sup>b</sup>

注:同列不同小写字母表示各组间差异显著, $P<0.05$ 。

由表 3 可知,随着奇亚籽粉添加量的增加,奇亚籽面条的硬度、胶着性和咀嚼性呈上升趋势;黏聚性、回复性呈下降趋势;弹性在添加量超过 15% 后趋于稳定。奇亚籽面条的黏聚性与硬度呈负相关,咀嚼性、胶着性与硬度呈正相关。这与于思文等<sup>[14]</sup>的研究结果一致。这可能是由于奇亚籽中的膳食纤维、脂类和蛋白质可能与面筋蛋白和淀粉发生相互作用,改变了面筋蛋白质、淀粉与水的结合状态,从而影响面条的质构特性<sup>[23]</sup>。与对照相比,奇亚籽使拉伸距离缩短,拉伸力升高,这表明奇亚籽的添加使面条强度增加,延展性下降。奇亚籽添加适量时,其中的水溶性膳食纤维、蛋白质等有助于面筋网络的形成,但添加过量时,奇亚籽面条中能形成面筋网络的蛋白质比例减少,从而使面条硬度过大,导致面条容易断裂<sup>[24]</sup>。

### 2.3 奇亚籽添加量对面条感官评分的影响

奇亚籽添加量对面条感官评分的影响如表 4 所示。

由表 4 可知,随着奇亚籽添加量的增加,面条的感官评分先升高后降低。其中色泽和表观状态评分整体呈下降趋势,这是由于奇亚籽本身的颜色导致面条呈褐色,奇亚籽胶的强吸水性导致和面过程中物料难以混合均匀,同时不溶性膳食纤维弱面筋蛋白而降低面条结构的均一性,导致面条表面凹凸不平。随着奇亚籽添加量的增加,面条的软硬度由适宜变为过硬,未糊化淀粉颗粒数量逐渐增加,这与质构测试结果一致。适量添加奇亚籽(5%~15%)可以提高面条黏弹性和爽滑性,从而改善口感,但添加 25% 奇亚籽的面条食用时颗粒感明显。面条的食味、气味也整体呈现先上升后下降的趋势,表明少量奇亚籽的加入可以给面条提

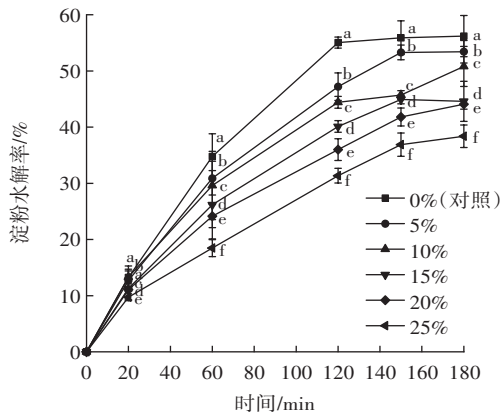
表4 奇亚籽面条的感官评分  
Table 4 Sensory scores of chia seed noodles

奇亚籽添加量/%	色泽	表观状态	气味	软硬度	黏弹性	爽滑性	食味	颗粒感	总分
0(对照)	13.8±0.6 <sup>a</sup>	9.1±0.1 <sup>a</sup>	8.5±0.3 <sup>bcd</sup>	12.5±0.4 <sup>e</sup>	12.8±0.6 <sup>ab</sup>	13.2±1.0 <sup>a</sup>	8.5±0.4 <sup>bcd</sup>	10.0±0.0 <sup>a</sup>	88.4±0.1 <sup>b</sup>
5	13.6±0.5 <sup>ab</sup>	9.1±0.3 <sup>a</sup>	9.3±0.2 <sup>a</sup>	13.5±0.4 <sup>bc</sup>	13.9±0.4 <sup>a</sup>	13.1±0.3 <sup>a</sup>	9.1±0.3 <sup>a</sup>	8.9±0.4 <sup>c</sup>	90.7±1.6 <sup>a</sup>
10	13.5±0.4 <sup>b</sup>	9.0±0.3 <sup>a</sup>	9.0±0.4 <sup>ab</sup>	14.1±0.3 <sup>a</sup>	13.7±0.4 <sup>a</sup>	13.7±0.5 <sup>a</sup>	9.2±0.3 <sup>a</sup>	9.1±0.2 <sup>bc</sup>	91.3±1.0 <sup>a</sup>
15	13.4±0.4 <sup>b</sup>	8.9±0.3 <sup>a</sup>	8.9±0.4 <sup>abc</sup>	13.5±0.4 <sup>bc</sup>	13.7±0.9 <sup>a</sup>	13.0±0.8 <sup>a</sup>	9.1±0.1 <sup>a</sup>	8.6±0.1 <sup>d</sup>	89.2±0.8 <sup>b</sup>
20	13.3±0.6 <sup>b</sup>	8.9±0.1 <sup>a</sup>	8.6±0.4 <sup>bcd</sup>	12.7±0.4 <sup>de</sup>	13.7±0.4 <sup>a</sup>	12.9±0.1 <sup>a</sup>	8.3±0.2 <sup>cd</sup>	7.9±0.1 <sup>ef</sup>	86.4±0.6 <sup>c</sup>
25	12.3±0.5 <sup>c</sup>	8.1±0.7 <sup>b</sup>	8.1±0.2 <sup>d</sup>	11.7±0.3 <sup>f</sup>	11.8±1.3 <sup>b</sup>	9.5±1.7 <sup>b</sup>	8.2±0.3 <sup>d</sup>	7.5±0.5 <sup>f</sup>	77.2±0.9 <sup>d</sup>

注:同列不同小写字母表示各组间差异显著,  $P < 0.05$ 。

供独特的清香味,这是因为奇亚籽的添加引入了苯乙醛、2-十一烯醛、异辛醇、庚醇、2-十一酮等风味物质<sup>[13]</sup>。综合以上指标,当奇亚籽添加量在5%~20%之间面条口感均在可接受范围内,其中奇亚籽添加量为10%的样品综合感官评分最高。

2.4 奇亚籽添加量对面条中淀粉体外消化特性的影响  
奇亚籽添加量对面条中淀粉体外消化特性的影响如图1所示。



同一时间不同样品小写字母不同表示存在显著性差异,  $P < 0.05$ 。

图1 奇亚籽面条的体外消化曲线

Fig.1 *In vitro* digestion curve of chia seed noodles

为消除奇亚籽的替代作用对淀粉营养片段和消化动力学参数测试结果的影响,经计算后准确称量,所有样品中淀粉含量均为1g。由图1可知,所有样品的淀粉水解率随时间变化的趋势大体一致,在前20min,淀粉快速水解,在20~120min,淀粉水解率的增长速率较前20min有所下降,120min后曲线趋于平缓,说明在120min时淀粉基本水解完全。随着奇亚籽添加量的增加,淀粉水解率呈下降趋势,表明奇亚籽对淀粉的体外消化有明显的抑制作用。

添加奇亚籽粉后面条中的淀粉营养片段及消化动力学参数如表5所示。

由表5可知,随着奇亚籽添加量的增加,面条中的RDS含量和SDS含量整体逐渐下降,而RS含量逐渐升高。RS在结肠中可以被肠道菌群发酵利用,产生对

表5 奇亚籽面条中的RDS、SDS、RS含量及消化动力学参数  
Table 5 Content of RDS, SDS, and RS and *in vitro* digestion kinetic parameters of chia seed noodles

奇亚籽添加量/%	RDS含量/%	SDS含量/%	RS含量/%	还原糖含量/mg	eGI
0(对照)	20.11±1.77 <sup>a</sup>	63.50±1.20 <sup>a</sup>	16.39±1.50 <sup>f</sup>	76.29	82.68
5	19.32±3.03 <sup>ab</sup>	54.34±3.51 <sup>b</sup>	28.20±3.03 <sup>ef</sup>	71.28	77.25
10	20.20±3.03 <sup>a</sup>	47.24±1.74 <sup>cde</sup>	32.35±1.32 <sup>d</sup>	65.67	71.17
15	17.11±2.05 <sup>abc</sup>	43.84±1.30 <sup>d</sup>	39.05±3.35 <sup>c</sup>	55.68	60.34
20	16.87±0.34 <sup>bc</sup>	43.48±7.47 <sup>e</sup>	39.65±7.67 <sup>bc</sup>	54.83	59.42
25	14.37±0.90 <sup>c</sup>	32.86±1.28 <sup>f</sup>	52.77±2.16 <sup>a</sup>	49.95	54.13

注:同列不同小写字母表示各组间差异显著,  $P < 0.05$ 。

人体有益的短链脂肪酸,从而预防结肠癌<sup>[16]</sup>。因此向面条中添加奇亚籽具有潜在的降低血糖、血脂及维持肠道健康的潜在作用。随着奇亚籽添加量的增加,面条的还原糖含量和eGI呈下降趋势。当奇亚籽添加量为25%时,eGI低至54.13,达到了低GI食品的标准。孙慧娟<sup>[12]</sup>也得到相似的研究结果,亚麻籽挂面的eGI降低至53.2,但其亚麻籽添加量高达50%。与亚麻籽相比,奇亚籽的膳食纤维含量更高,更有利于达到降低血糖的目的。

奇亚籽增加面条的抗消化性可能是以下几方面的综合作用:1)奇亚籽胶、不溶性膳食纤维、蛋白质、脂类等成分将淀粉包裹缠绕,形成物理屏障<sup>[12,25]</sup>;2)奇亚籽胶的强吸水性阻碍了淀粉分子糊化过程中的开链,减少了淀粉与淀粉酶的接触位点<sup>[10]</sup>;3)奇亚籽中的成分使煮后面条中淀粉结构发生了改变,而有序的结晶结构对淀粉酶的抗性较强<sup>[19]</sup>。为探究以上机制,对奇亚籽面条进行RVA测试、X-射线衍射扫描和微观结构观测。

2.5 奇亚籽添加量对面条中淀粉糊化特性的影响

奇亚籽添加量对面条中淀粉糊化特性的影响如表6所示。

表 6 奇亚籽面条中淀粉的糊化特性  
Table 6 Pasting properties of the starch in chia seed noodles

奇亚籽添加量/%	峰值黏度/cp	低谷黏度/ep	衰减值/cp	最终黏度/ep	回升值/cp	起始糊化温度/°C
0(对照)	1 298±3 <sup>a</sup>	922±0 <sup>a</sup>	376±3 <sup>a</sup>	1 788±22 <sup>a</sup>	866±23 <sup>a</sup>	95.3±1.3 <sup>a</sup>
5	1 209±9 <sup>b</sup>	844±7 <sup>b</sup>	365±2 <sup>a</sup>	1 638±7 <sup>b</sup>	794±14 <sup>b</sup>	90.2±0.2 <sup>b</sup>
10	1 026±3 <sup>c</sup>	772±7 <sup>c</sup>	254±11 <sup>b</sup>	1 553±1 <sup>c</sup>	781±6 <sup>b</sup>	91.2±0.3 <sup>b</sup>
15	640±12 <sup>c</sup>	537±1 <sup>c</sup>	103±11 <sup>c</sup>	1 191±3 <sup>c</sup>	654±4 <sup>c</sup>	95.1±1.4 <sup>a</sup>
20	870±6 <sup>d</sup>	728±6 <sup>d</sup>	142±13 <sup>c</sup>	1 370±4 <sup>d</sup>	642±3 <sup>c</sup>	93.1±0.7 <sup>a</sup>
25	845±6 <sup>d</sup>	775±1 <sup>c</sup>	70±5 <sup>d</sup>	1 571±10 <sup>c</sup>	796±8 <sup>b</sup>	95.3±1.2 <sup>a</sup>

注:同列不同小写字母表示各组间差异显著,  $P < 0.05$ 。

由表 6 可知,随着奇亚籽添加量的增加,奇亚籽面条中淀粉的峰值黏度、低谷黏度和最终黏度先降低后升高,这是因为奇亚籽添加量较低时,样品中的淀粉被替代,表现出黏度下降;奇亚籽添加量较高时,奇亚籽胶表现出增稠作用使样品黏度上升;衰减整体呈明显下降趋势,说明奇亚籽的加入增强了面条中淀粉的热稳定性,这是由于奇亚籽中的水溶性膳食纤维使氢键相互作用更加稳定,有利于糊化后的淀粉在热和剪切力的作用下维持一定的稠度<sup>[26]</sup>。淀粉的回升值先降低后升高,这可能是因为奇亚籽胶在达到一定量时,有利于形成凝胶<sup>[25]</sup>。不同添加量奇亚籽面条中淀粉的起始糊化温度整体先降低后升高,这可能是奇亚籽胶与淀粉之间相互作用的综合表现,奇亚籽胶存在量较少时,促进淀粉吸水溶胀,而过多时与淀粉竞争吸水导致糊化难度增加<sup>[18]</sup>。

### 2.6 奇亚籽添加量对面条结晶特性的影响

奇亚籽添加量对面条结晶特性的影响如图 2、表 7 所示。

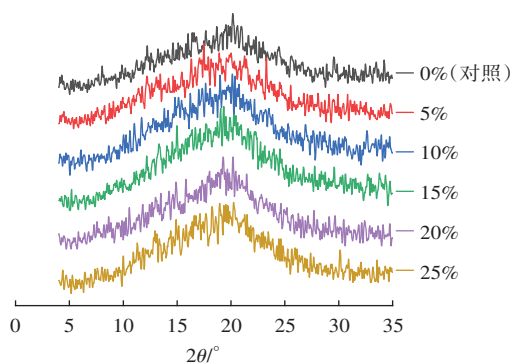


图 2 奇亚籽面条的 X-射线衍射曲线

Fig.2 X-ray diffraction patterns of chia seed noodles

由图 2 可知,煮后面条的 X-射线衍射曲线已不再具有 A 型结晶的特征,而是呈现重结晶的特征,表明淀粉糊化较充分,并在降温和贮藏过程中发生了分子重排。煮后面条的 X-射线衍射曲线也不具有直链淀粉-脂肪酸复合物 V 型结晶的特征,这可能是因为小麦中的直链淀粉含量有限,同时受到奇亚籽胶亲脂活性

表 7 不同奇亚籽添加量相对结晶度

Table 7 Relative crystallinity of different addition amounts of chia seeds

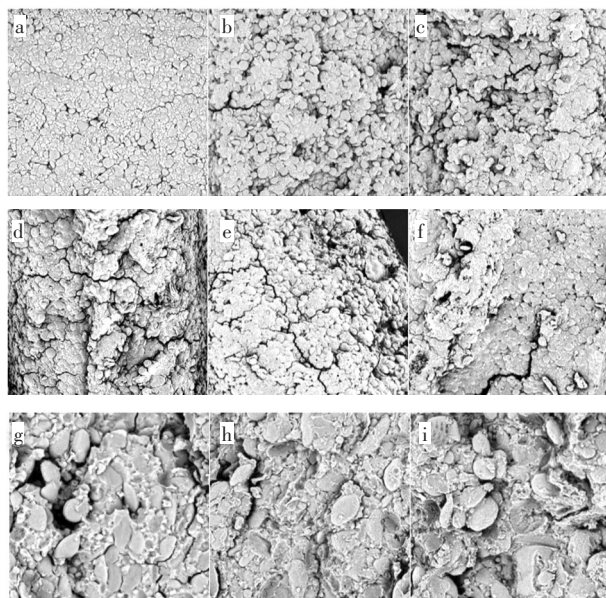
奇亚籽添加量/%	相对结晶度/%
0(对照)	51.91±0.27 <sup>c</sup>
5	51.21±0.10 <sup>c</sup>
10	56.21±0.13 <sup>a</sup>
15	56.32±0.05 <sup>a</sup>
20	54.82±0.10 <sup>b</sup>
25	51.05±0.85 <sup>c</sup>

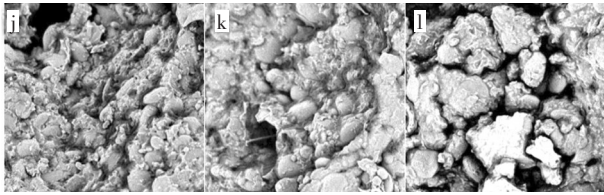
注:同列不同小写字母表示各组间差异显著,  $P < 0.05$ 。

的干扰<sup>[19-20]</sup>。由表 7 可知,随着奇亚籽添加量的增加,相对结晶度整体呈先升高后降低趋势。这可能是由于脂肪酸与淀粉发生相互作用,在奇亚籽添加量较低时表现为淀粉有序度增加,而有序的淀粉重结晶具有良好的抗消化性;当奇亚籽添加量较高时,过量的水溶性膳食纤维干扰脂肪酸与淀粉的结合,同时阻碍淀粉的重结晶<sup>[19, 26]</sup>。

### 2.7 奇亚籽添加量对面条微观结构的影响

奇亚籽添加量对面条微观结构的影响如图 3 所示。





a~f 分别为奇亚籽添加量为 0%、5%、10%、15%、20%、25% 的面条表面;g~l 分别为奇亚籽添加量 0%、5%、10%、15%、20%、25% 的面条截面。表面倍数为×500;截面倍数为×2 000。

图3 不同奇亚籽添加量挂面的扫描电子显微镜图像

Fig.3 Scanning electron microscope images of noodles with different addition amounts of chia seeds

由图3可知,添加奇亚籽后,面条中的淀粉颗粒被连续的蛋白-亚麻籽胶复合物包裹,裸露的淀粉颗粒减少。适宜含量和强度的蛋白-亲水胶体复合物对于建立面制品结构稳态化及提升其品质具有重要意义<sup>[27-28]</sup>。由图3a~图3f可知,随着奇亚籽添加量的增加,面条表面平整度降低,裂纹增多。添加量超过10%时,面条表面开始变得凹凸不平;添加量为20%时,能够观察到面条表面致密度明显不均一;添加量为25%时,面条表面出现较大的块状凸起和较粗的裂纹,并观察到奇亚籽碎片。由图3g~图3l可知,淀粉颗粒被包裹并形成聚团。随着奇亚籽添加量的增加,淀粉聚团体积逐渐增大,面条内部结构均一度面和筋蛋白网络连续度降低。当奇亚籽添加量为25%时,基本观察不到裸露的淀粉颗粒,这有利于形成物理屏障以减少淀粉酶的接触位点,但此时淀粉聚团体积过大,导致面条内部结构松散、孔隙较多,不利于面条口感。

### 3 结论与展望

本试验结果表明,适当添加奇亚籽能够改善面条的蒸煮特性和质构特性,增加面条的吸水率,改善面条风味,提高淀粉的热稳定性。奇亚籽添加量为10%时面条感官评分最高。添加奇亚籽能够显著降低面条中淀粉水解率,提高RS含量。奇亚籽添加量为15%以下时,主要是通过增加重结晶淀粉的有序度来提高其抗消化性;奇亚籽添加量为20%~25%时,主要是由于淀粉颗粒的被包裹程度和糊化难度增加,与淀粉酶的接触受阻。奇亚籽添加量为25%时,eGI可降至55以下,达到低GI食品的标准。但过量添加奇亚籽会导致面条颜色和表面状态变差,硬度过大,食用时颗粒感明显。综合评价奇亚籽面条的食用品质及消化特性,奇亚籽的适宜添加量为15%,此时奇亚籽面条的感官评分为89.2,抗性淀粉含量为39.05%,eGI为60.34。

为改善面条的口感和理化性质,可以改进奇亚籽的加工方式,如改变奇亚籽研磨工艺使奇亚籽粉粒径更小、对奇亚籽进行预处理<sup>[29]</sup>或者对奇亚籽胶等成分

进行提取纯化<sup>[12]</sup>后用于制备面条等,如添加脱脂亚麻籽胶制作面条后其GI值得到一定改善。此外,奇亚籽面条的营养特性需进一步探明,可通过动物实验、人体实验等深入研究其血糖反应及抗性淀粉的益生作用。

### 参考文献:

- [1] LIU F Y, GUO X N, XING J J, et al. Effect of thermal treatments on *in vitro* starch digestibility of sorghum dried noodles[J]. Food & Function, 2020, 11(4): 3420-3431.
- [2] 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): S33-S50.
- [3] 刘树萍, 陆家慧, 张佳美, 等. 奇亚籽胶提取工艺优化及其理化性质[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(22): 53-60.  
LIU Shuping, LU Jiahui, ZHANG Jiamei, et al. Extraction process optimization and physicochemical properties of *Chia* mucilage[J]. Food Research and Development, 2023, 44(22): 53-60.
- [4] 庞美蓉, 杜昱蒙, 郭庆彬, 等. 面包血糖生成指数调控方法的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(21): 220-224.  
PANG Meirong, DU Yumeng, GUO Qingbin, et al. Research progress on regulation method of glycemic index of bread[J]. Food Research and Development, 2023, 44(21): 220-224.
- [5] 韩冉, 余倩倩, 孔宇, 等. 改性奇亚籽粕可溶性膳食纤维对韧性饼干品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(9): 131-137.  
HAN Ran, YU Qianqian, KONG Yu, et al. Quality of tough biscuits as affected by addition of soluble dietary fiber from ultrasonic modified defatted *Chia* seed meal[J]. Food Research and Development, 2021, 42(9): 131-137.
- [6] 张磊, 王虎三. 增稠剂对湿面条品质的影响研究[J]. 粮食加工, 2016, 41(1): 37-38, 68.  
ZHANG Lei, WANG Husan. Study on the influence of the thickening agent on the quality of wet noodle[J]. Grain Processing, 2016, 41(1): 37-38, 68.
- [7] SALVIN J L. Position of the American dietetic association: Health implications of dietary fiber[J]. Journal of the American Dietetic Association, 2008, 108(10): 1716-1731.
- [8] 江波, 杨瑞金. 食品化学 2 版[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2018.  
JIANG Bo, YANG Ruijin. Food chemistry 2nd ed[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2018.
- [9] 张剑, 李梦琴, 范亚萍, 等. 增稠剂对鲜湿面条改良效果的研究[J]. 食品工业科技, 2007, 28(6): 185-186, 120.  
ZHANG Jian, LI Mengqin, FAN Yaping, et al. Study on the effect of thickening agents on noodle quality improvement[J]. Science and Technology of Food Industry, 2007, 28(6): 185-186, 120.
- [10] CHILLO S, RANAWANA D V, PRATT M, et al. Glycemic response and glycemic index of semolina spaghetti enriched with barley  $\beta$ -glucan[J]. Nutrition, 2011, 27(6): 653-658.
- [11] JANG H L, BAE I Y, LEE H G. *In vitro* starch digestibility of noodles with various cereal flours and hydrocolloids[J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 63(1): 122-128.
- [12] 孙慧娟. 脱脂亚麻籽粉在面制品中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.  
SUN Huijuan. Study on the application of defatted flaxseed meal in flour products[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [13] ZHAO Y, HUANG Z H, ZHOU H M, et al. Role of bran particles in the formation of dark spots on fresh wet noodle sheets: What are the dark spots? [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,

- 2023, 103(11): 5560-5568.
- [14] 于思文, 王玉超, 李丹, 等. 奇亚籽面条的质构和挥发性风味研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(1): 40-44.  
YU Siwen, WANG Yuchao, LI Dan, et al. Study on texture and volatile flavor of chia seed noodles[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(1): 40-44.
- [15] 张伟峰, 黄泽华, 王玉坤, 等. 复合菌发酵对非油炸方便面品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(5): 210-216.  
ZHANG Weifeng, HANG Zehua, WANG Yukun, et al. Effect of compound bacteria fermentation on the quality of non-fried instant noodles[J]. Food Science, 2024, 45(5): 210-216.
- [16] ENGLYST H N, HUDSON G J. The classification and measurement of dietary carbohydrates[J]. Food Chemistry, 1996, 57(1): 15-21.
- [17] MUTUNGI C, ONYANGO C, ROST F, et al. Structural and physicochemical properties and *in vitro* digestibility of recrystallized linear  $\alpha$ -D-(1 $\rightarrow$ 4) glucans derived from mild-acid-modified cassava starch[J]. Food Research International, 2010, 43(4): 1144-1154.
- [18] 赵阳, 王雨生, 陈海华, 等. 海藻酸钠对小麦淀粉性质及馒头品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(1): 44-50.  
ZHAO Yang, WANG Yusheng, CHEN Haihua, et al. Effect of sodium alginate on the properties of wheat starch and qualities of steamed bread[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(1): 44-50.
- [19] 赵阳, 陈海华, 王雨生, 等. 海藻酸钠-高直链玉米淀粉-共轭亚油酸三元体系的消化性质[J]. 现代食品科技, 2016, 32(1): 100-105, 110.  
ZHAO Yang, CHEN Haihua, WANG Yusheng, et al. Digestion properties of sodium alginate-high amylose corn starch-conjugated linoleic acid ternary complex[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(1): 100-105, 110.
- [20] 徐薇, 李慧雪, 刘霄莹, 等. 海藻酸盐纳米载体递送亲脂性活性物质及其应用研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(17): 242-252.  
XU Wei, LI Huixue, LIU Xiaoying, et al. Research progress on the delivery of lipophilic active substances by alginate nanocarriers and its application[J]. Food Science, 2024, 45(17): 242-252.
- [21] ZHAO Y, HUANG Z H, ZHOU H M, et al. Preventing the browning of fresh wet noodle sheets by aqueous ozone mixing: Browning and physicochemical properties[J]. Journal of Cereal Science, 2022, 104: 103428.
- [22] 张兆丽, 石旺滨, 王洋, 等. 果蔬面条成分对面条质构特性和RVA特性的影响[J]. 食品工业, 2023, 44(4): 72-77.  
ZHANG Zhaoli, SHI Wangbin, WANG Yang, et al. The effect of fruit and vegetable noodles ingredients on texture characteristics and RVA characteristics of noodle[J]. The Food Industry, 2023, 44(4): 72-77.
- [23] 段译霖. 亚麻籽粉添加对面团特性及挂面品质影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.  
DUAN Yiting. Effect of flaxseed flour addition on dough characteristics and quality of dried noodles[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022.
- [24] RAHMAN M S, AL-FARSI S A. Instrumental texture profile analysis (TPA) of date flesh as a function of moisture content[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66(4): 505-511.
- [25] LI M, DHITAL S, WEI Y M. Multilevel structure of wheat starch and its relationship to noodle eating qualities[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2017, 16(5): 1042-1055.
- [25] ZHAO Y, CHEN H H, WANG Y S, et al. Effect of sodium alginate and its guluronic acid/mannuronic acid ratio on the physicochemical properties of high-amylose cornstarch[J]. Starch - Stärke, 2016, 68(11/12): 1215-1223.
- [26] LI M, DHITAL S, WEI Y M. Multilevel structure of wheat starch and its relationship to noodle eating qualities[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2017, 16(5): 1042-1055.
- [27] 方亚鹏, 赵一果, 孙翠霞, 等. 食品胶体研究进展与未来趋势: 组分互作、未来食品结构设计及胶体营养学视角[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 1-20.  
FANG Yapeng, ZHAO Yiguo, SUN Cuixia, et al. Recent progress and future trends of food colloids: Component interactions, future food structure design and colloidal nutrition[J]. Food Science, 2022, 43(15): 1-20.
- [28] HUANG Z H, ZHAO Y, ZHU K X, et al. Effect of barley  $\beta$ -glucan on water redistribution and thermal properties of dough[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(7): 2329-2337.
- [29] 李少辉, 张柳, 生庆海, 等. 湿热处理对杂豆粉营养品质及面团物化特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 198-207.  
LI Shaohui, ZHANG Liu, SHENG Qinghai, et al. Effects of heat-moisture treatment on nutritional quality of bean flour and physicochemical properties of dough[J]. Food Science, 2024, 45(14): 198-207.