

空气油炸与微波处理对南瓜籽品质的影响

Effects of air-frying and microwave treatment on the quality of pumpkin seed kernels

张贵会¹ 欧阳辉² 黄榆³ 余雄伟⁴ 李述刚²

ZHANG Gui-hui¹ OUYANG Hui² HUANG Yu³ YU Xiong-wei⁴ LI Shu-gang²

(1. 扎鲁特旗市场检验检测中心, 内蒙古 通辽 029100; 2. 合肥工业大学食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601; 3. 湖北工业大学发酵工程教育部重点实验室, 湖北 武汉 430068;

4. 武汉旭东食品有限公司, 湖北 武汉 430000)

(1. Market Inspection and Testing Center of Zarut Banner, Tongliao, Inner Mongolia 029100, China; 2. School of Food and Bioengineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230601, China; 3. Key Laboratory of Fermentation Engineering, Ministry of Education, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China; 4. Wuhan Xudong Food Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China)

摘要:目的:探讨加工方式对南瓜籽品质的影响。方法:以南瓜籽仁为研究对象,考察空气油炸(160 ℃, 0~7 min)和微波处理(700 W, 0~7 min)对其理化特性的影响。结果:空气油炸和微波处理后,多酚、黄酮、多糖含量以及感官评分均随处理时间的延长呈先增大后减小的趋势,并分别在空气油炸4 min和微波处理5 min时达到最高。结论:最佳处理条件下,微波处理的南瓜籽具有较低的脂质氧化程度,具有更高的消化率,而空气油炸的坚果烘烤风味更强。

关键词:南瓜籽; 空气油炸; 微波; 油脂; 蛋白质; 挥发性物质

Abstract: **Objective:** This study aimed to explore the effect of processing methods on the quality of pumpkin seed kernels. **Methods:** In this study, pumpkin seed kernels were chosen as the research object and the effects of air-frying (160 ℃, 0~7 min) and microwave treatment (700 W, 0~7 min) on the physical and chemical properties of proteins were investigated. **Results:** The experimental results showed that: after air-frying and microwave treatment, polyphenol, flavone, polysaccharide contents, as well as sensory scores all increased at the beginning, then decreased gradually, and reached the peak values when being treated by air-

frying for 4 min and microwave treatment for 5 min, respectively. Under the optimal conditions, the degree of lipid oxidation was lower after microwave treatment, the protein aggregation phenomenon was more obvious, and the structure tended to be disordered and stretched, with a higher degree of lipid oxidation and better digestibility, while air-fried nuts had a stronger roasted flavor. **Conclusion:** The results indicated that proper air-frying and microwave treatment could improve the flavor and digestive properties of pumpkin seed kernels, and then improve the quality of pumpkin seed kernels.

Keywords: pumpkin seed kernels; air-frying; microwave treatment; lipid; protein; volatile substances

南瓜(*Pumpkin Cushaw*)属葫芦科,一年生蔓生草本植物,富含功能性脂质,是一种优质的油料资源,同时含有总酚、植物甾醇、维生素、矿物质等多种生物活性成分^[1],因具有抗炎、抗氧化、降血糖、降血压、缓解前列腺和抗癌等健康保护价值而被广泛关注^[2]。

热加工是常见的坚果品质提升加工方式,不同的热加工处理对坚果脂质和蛋白质有不同程度的影响,会改变坚果的食用品质^[3]。目前,坚果常用的热加工方式主要是烤箱烤制,其传热效率较低、热量损失和能源消耗较高,不利于坚果加工产业的绿色健康发展。与烤箱烤制相比,微波具有高效省时、操作简单和安全无毒害等特点,在坚果加工领域中的应用逐渐扩大^[4]。空气油炸作为一种新型、健康的油炸方式,通过热空气中的油滴包裹原料,使其不断运动促进两相之间均匀接触,逐渐脱水后产生油炸制品特有的形态。空气油炸后物料氧化作用较

基金项目:合肥工业大学人才引进启动项目(编号:13020-03712020014);校企合作重大项目(编号:W2021JSKF0356)

作者简介:张贵会,男,扎鲁特旗市场检验检测中心工程师,硕士。
通信作者:李述刚(1979—),男,合肥工业大学教授,博士生导师,博士。E-mail: lishugang2020@hfut.edu.cn

收稿日期:2022-09-06 **改回日期:**2022-12-01

小,能够减少有害物质的生成、保留物料必需的植物化学物质和营养,深受众多消费者的喜爱^[5-7]。此外,南瓜籽因富含蛋白质与不饱和脂肪酸,在加工过程中极易受到光、氧、热等环境影响而发生品质劣变。目前关于空气油炸和微波对南瓜籽脂质、风味、蛋白质结构和消化特性的研究尚未见报道。研究拟以酸价、过氧化值、脂肪酸组成、蛋白质结构特征、消化特性和挥发性成分等为指标,考察空气油炸和微波处理对南瓜籽仁品质的影响,以期为南瓜籽烘焙加工提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

南瓜籽:新疆产地;

氢氧化钠、盐酸、福林酚、碳酸钠、溴化钾、无水乙醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

8-苯胺-1-萘磺酸(ANS):高级纯,上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 仪器与设备

差示扫描量热仪:DSC1 型,梅特勒—托利多国际有限公司;

扫描电子显微镜:SU-8010 型,日本日立公司;

高速冷冻离心机:Micro-21R 型,美国 Thermo Fisher 公司;

气相质谱联用仪:7890A-5975C 型,美国安捷伦科技有限公司;

傅里叶变换红外光谱:Nicoletis-50 型,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

电泳仪:DYY-8C 型,北京六一生物科技有限公司;

荧光分光光度计:F-4600 型,日本日立公司;

微波炉:MM721NG1-PW 型,佛山美的集团股份有限公司;

空气油炸锅:FL26-VF171 型,山东九阳股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备 选择无病虫害和机械损伤的南瓜籽脱壳取仁后,随机分成 3 组,其中 2 组分别进行微波烘烤和空气油炸处理,1 组为对照组,每份样品 200 g。

(1) 微波处理南瓜籽:采用微波炉 700 W 处理 0.1, 3.5, 7, 9 min,真空包装袋密封并于 -20 ℃ 保存。

(2) 空气油炸南瓜籽:采用空气油炸锅 160 ℃ 处理 0, 3.4, 5, 6, 7 min,真空包装袋密封并于 -20 ℃ 保存。

1.3.2 基本成分测定

(1) 蛋白质含量:参照 GB 5009.5—2016。

(2) 脂肪含量:参照 GB 5009.6—2016。

(3) 水分含量:参照 GB 5009.3—2016。

(4) 多糖含量:采用苯酚—硫酸法。

(5) 总酚含量:采用福林酚法。

(6) 黄酮含量:参照 SZDB/Z 349—2019。

1.3.3 微观形貌测定 通过扫描电子显微镜,分别测定未处理、微波处理 5 min 和空气油炸 4 min 后南瓜籽的表面及横截面形貌。

1.3.4 油脂脂肪酸组成测定 参照 Wang 等^[8]的方法。采用 Agilent7890A-5975C 气相质谱联用仪进行测定,使用 NIST 2017 质谱库,匹配度 $\geq 85\%$ 鉴定脂肪酸组分,并以峰面积归一化法进行脂肪酸定量。

1.3.5 酸价和过氧化值测定

(1) 酸价:参照 GB 5009.229—2016。

(2) 过氧化值:参照 GB 5009.227—2016。

1.3.6 油脂挥发性物质测定 根据 Wang 等^[9]的方法。色谱柱升温程序:柱温箱初始温度 40 ℃, 5 ℃/min 升温至 200 ℃,保持 2 min, 5 ℃/min 升温至 230 ℃。质谱检测器条件:电子电离(EI)模式下,电子能量 70 eV,四极杆温度 150 ℃,离子源温度 230 ℃,质量扫描范围 40~450。使用 NIST 2017 质谱库,匹配度 $\geq 85\%$ 鉴定挥发性化合物。

1.3.7 DPPH 自由基清除能力测定 用无水乙醇配制不同质量浓度(10~80 mg/mL)的南瓜籽油溶液,取 200 μ L 油样与 3 mL 0.1 mmol/L 的 DPPH 乙醇溶液混合,暗处反应 30 min, 6 000 r/min 离心 5 min,取上清液,测定 517 nm 处吸光度,并按式(1)计算 DPPH 自由基清除率。

$$R_1 = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R_1 ——DPPH 自由基清除率, %;

A ——上清液吸光值;

A_0 ——去离子水吸光值。

1.3.8 ABTS 自由基清除能力测定 将 7.0 mmol/L ABTS 溶液和 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液等体积混匀,暗处反应 16 h,用去离子水稀释上述混合液稀释到 734 nm 处测量的吸光度为 0.70 $\pm$ 0.05。用无水乙醇配制不同质量浓度(10~80 mg/mL)的南瓜籽油溶液,取 200 μ L 油样与 3 mL 稀释后的 ABTS⁺ 溶液混匀,暗处反应 30 min,测定 734 nm 处吸光度,以去离子水作为对照,按式(2)计算 ABTS 自由基清除率。

$$R_2 = \frac{A_1 - A}{A_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

R_2 ——ABTS 自由基清除率, %;

A ——上清液吸光值;

A_1 ——去离子水吸光值。

1.3.9 蛋白质提取 参照王伟清等^[10]的方法。

1.3.10 蛋白质理化特性测定

(1) 分子量: 配制 1 mg/mL 的样品溶液, 分离胶为 12%, 浓缩胶为 4%^[11], 电压为 130 V, 电泳时间为 50 min, 用考马斯亮蓝 R-250 染色, 并用 10% 乙酸和 5% 乙醇脱色。

(2) 巯基含量: 采用 DNTB 比色法^[11]。

1.3.11 蛋白质结构特性测定

(1) 傅里叶红外光谱: 根据 Lin 等^[12]的方法。

(2) 内源性荧光光谱: 根据 Wu 等^[13]的方法。激发波长 283 nm, 发射波长 300~400 nm。

1.3.12 蛋白质消化特性测定

(1) 消化率: 采用 OPA 法^[14]。

(2) 消化产物: 根据 Li 等^[15]的方法。

1.4 数据处理

数据以均值±标准差表示, 通过方差分析(AVOVA)和邓肯多重比较, 确定不同加工方式是否存在差异, 采用 SPSS 17.0 分析软件分析数据, 采用 Origin 8.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 南瓜籽种仁理化成分分析

由表 1 可知, 热处理后南瓜籽水分含量随加热时间的延长逐渐降低, 含油率逐渐上升, 其中空气油炸对南瓜籽水分含量及油脂含量影响更迅速, 可能是由于空气炸锅内形成循环热流能够传递更多热量, 并迅速带走南瓜籽中的水分。同时, 水分蒸发伴随油脂渗入, 水分快速蒸发时, 油脂会随之渗入水分蒸发后的空隙中, 从而提高脂肪含量。多糖、多酚和黄酮含量随处理时间的延长呈先增大后降低趋势, 并分别在 4、5 min 时达到最大值。这可能是因为随着加热时间的延长, 水分振动越剧烈, 对细胞

组织和结构造成破坏, 油脂从细胞间溢出同时伴随大量细胞内容物的渗出导致其含量增大^[16]; 此外, 高温条件下发生的生化反应如美拉德反应促进了生物活性物质的生成, 同时影响了物质的存在状态(由结合态转为游离态), 提高了多糖、多酚和黄酮含量, 但长时间加热, 活性物质将发生热降解使得含量下降^[17]。综上, 微波处理 5 min 和空气油炸 4 min 可以提高南瓜籽营养成分的释放并促进多糖、多酚和黄酮含量的上升, 且空气油炸加热效率明显优于微波处理。

2.2 南瓜籽种仁微观结构变化

由图 1 可知, 未处理南瓜籽细胞结构较为整齐, 分布致密, 而空气油炸和微波处理后, 南瓜籽细胞结构被破坏, 出现较大孔隙, 表面组织由有序的四边形变为无序的不规则形状, 对比横截面图可知, 南瓜籽内部细胞致密结构被破坏, 细胞壁出现皱缩甚至破裂。这可能是由于高温处理后, 南瓜籽水分损失较快, 蒸发时快速流动导致细胞出现多孔, 同时其多孔结构受到毛细管收缩应力的作用而产生皱缩现象。这进一步验证了热处理引起南瓜籽细胞结构破坏可能是导致水分、含油量等理化指标变化的重要原因。

2.3 对南瓜籽脂质的影响

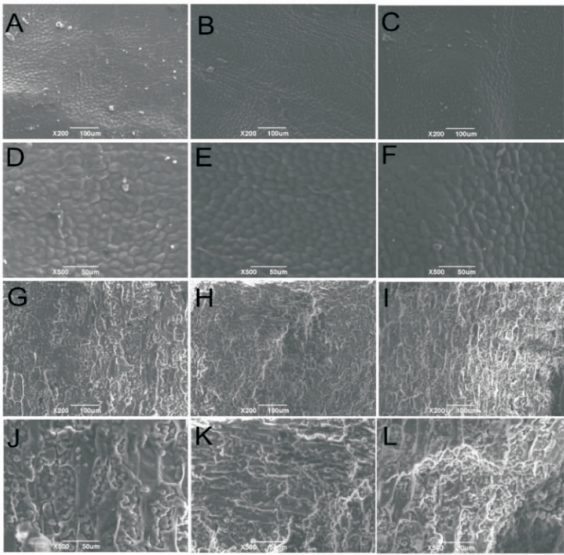
2.3.1 油脂脂肪酸组成 由表 2 可知, 热处理对南瓜籽脂肪酸组成影响不显著; 空气油炸处理后, 辛酸和癸酸已无法检测到, 可能是由于空气油炸时的局部高温使油脂逐渐降解; 微波处理后南瓜籽油的油酸、亚油酸含量分别下降了 0.26%, 0.52%, 而空气油炸后含量分别上升了 0.79%, 0.23%, 可能是因为南瓜籽中部分水分蒸发后, 形成了允许油炸油渗透到空隙中的孔隙, 油炸油和南瓜籽

表 1 微波处理与空气油炸对南瓜籽基本理化成分的影响[†]

Table 1 Effect of air-frying and microwave treatment on basic components of pumpkin seed kernels

处理 方式	处理时间/ min	水分含量/ %	含油率/%	多糖含量/ (10 ⁻² g · g ⁻¹ · DW)	多酚含量/ (10 ⁻² g · g ⁻¹ · DW)	黄酮含量/ (10 ⁻² g · g ⁻¹ · DW)
微波 处理	0	7.99±0.24 ^f	46.50±0.31 ^a	0.13±0.01 ^a	0.31±0.01 ^a	0.40±0.02 ^a
	1	6.79±0.14 ^e	47.56±0.34 ^b	0.16±0.01 ^b	0.34±0.03 ^a	0.44±0.03 ^{ab}
	3	4.78±0.14 ^d	48.48±0.36 ^c	0.20±0.02 ^c	0.65±0.03 ^c	0.75±0.01 ^e
	5	3.51±0.07 ^c	49.62±0.24 ^d	0.23±0.01 ^c	0.94±0.02 ^d	0.68±0.02 ^d
	7	2.57±0.10 ^b	49.96±0.41 ^d	0.21±0.01 ^c	0.41±0.02 ^b	0.60±0.03 ^c
	9	0.82±0.05 ^a	50.42±0.24 ^e	0.16±0.02 ^{ab}	0.29±0.03 ^a	0.48±0.02 ^b
空气 油炸	0	7.99±0.24 ^e	46.50±0.31 ^a	0.13±0.01 ^a	0.31±0.01 ^a	0.40±0.02 ^a
	3	3.20±0.09 ^d	50.27±0.21 ^b	0.23±0.01 ^b	0.59±0.02 ^d	0.69±0.04 ^c
	4	3.12±0.06 ^d	51.08±0.36 ^c	0.27±0.02 ^c	0.79±0.01 ^e	0.77±0.05 ^d
	5	2.51±0.11 ^c	52.83±0.21 ^d	0.24±0.01 ^{bc}	0.49±0.03 ^c	0.65±0.04 ^c
	6	2.25±0.13 ^b	52.97±0.32 ^d	0.21±0.01 ^b	0.41±0.03 ^b	0.56±0.05 ^b
	7	1.41±0.07 ^a	53.56±0.19 ^e	0.21±0.01 ^b	0.29±0.02 ^a	0.41±0.03 ^a

[†] 同行小写字母不同表示差异显著(P<0.05)。



从左至右依次为对照组、空气油炸、微波处理;从上至下依次为表面 200×、表面 500×、截面 200×、截面 500×

图 1 空气油炸和微波处理对南瓜籽微观结构的影响
Figure 1 Effects of air-frying and microwave treatment on microstructure of pumpkin seed kernels

油相互交换,与 Valdés 等^[18]的结果一致。微波处理对油脂脂肪酸组成的影响不大,未处理和微波处理后的南瓜籽油的脂肪酸组成均满足国标要求,其不饱和脂肪酸含量始终维持在 80%左右。综上,空气油炸和微波处理不仅能够有效促进南瓜籽中脂质的释放,并对南瓜籽油不饱和脂肪酸含量影响较小,不会降低油脂品质。

2.3.2 油脂酸价和过氧化值 由图 2(a)可知,空气油炸和微波处理会导致酸价轻微增大,从 0.54 mg/g 分别增至 0.76,0.68 mg/g,可能是由于油脂含有的极性脂肪酸分子热处理后产生热效应,从而导致磷脂和三酰基甘油被分解为自由基和游离脂肪酸^[19]。由图 2(b)可知,空气油炸和微波处理后过氧化值增大,从 2.07 meq/kg 分别增至

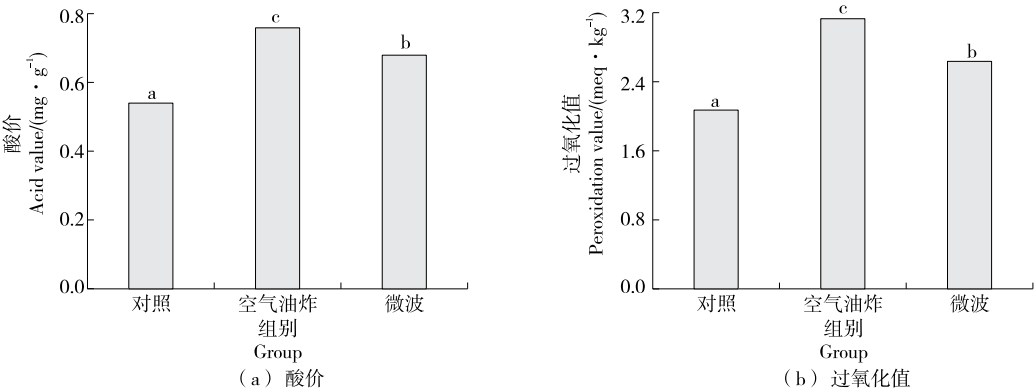
表 2 空气油炸和微波处理对南瓜籽油脂肪酸组成的影响

Table 2 Effects of air-frying and microwave treatment on fatty acid composition of pumpkin seed oil

脂肪酸	对照组	空气油炸 4 min	微波处理 5 min
正辛酸	0.28±0.02	—	1.08±0.04
癸酸	0.16±0.01	—	0.98±0.11
棕榈酸	17.91±0.21	17.38±0.16	17.14±0.13
油酸	39.67±0.24	40.46±0.13	39.41±0.18
亚油酸	40.90±0.33	41.13±0.16	40.38±0.21
花生酸	0.82±0.08	0.80±0.05	0.79±0.06
山嵛酸	0.24±0.01	0.22±0.01	0.22±0.01
饱和脂肪酸	19.23±0.26	18.41±0.14	20.21±0.19
不饱和脂肪酸	80.77±0.26	81.59±0.22	79.79±0.28

3.13,2.64 meq/kg,可能是因为高温能加速自由基的生成,导致过氧化值增大,但仍低于商业食用植物油的一般推荐值(<20 meq/kg)^[20]。综上,微波处理和空气油炸不会破坏南瓜籽油的新鲜度。热处理后南瓜籽脂质均发生不同程度的氧化,其中空气油炸南瓜籽氧化程度相较于微波处理更高,可能是由于空气油炸温度更高以及多酚等抗氧化物质含量的下降程度更高,导致其脂质氧化程度较高。

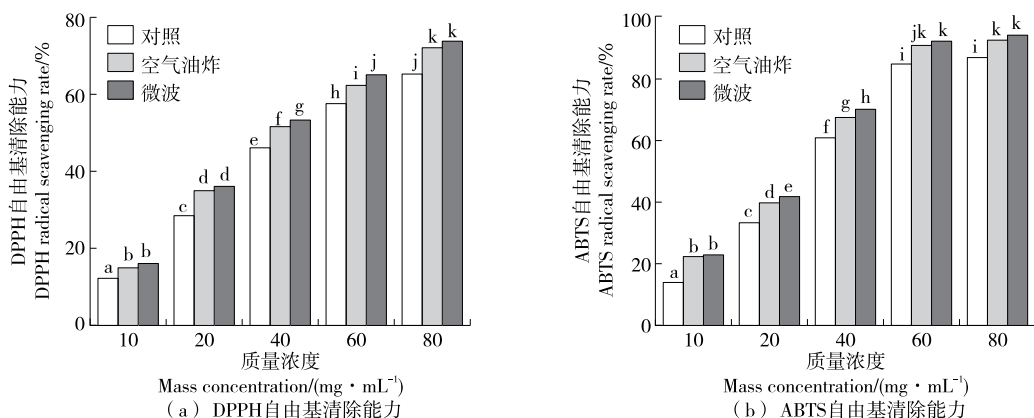
2.3.3 抗氧化能力 由图 3 可知,3 种南瓜籽油脂的 DPPH 自由基、ABTS 自由基清除率均随样品浓度的增大而提高,且相同质量浓度下,DPPH 自由基、ABTS 自由基清除率表现为空气油炸与微波处理的大于对照组,并存在一定差异,其中微波处理后油脂的自由基清除率在 10~80 mg/mL 范围内最大,当样品质量浓度为 80 mg/mL 时,DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除率分别为 64.88%,92.96%,表现出最强的抗氧化能力,这在一



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 空气油炸和微波处理对南瓜籽油酸价、过氧化值的影响

Figure 2 Effects of air-frying and microwave treatment on acid value and peroxidation value of pumpkin seed oil



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 空气油炸和微波处理对南瓜籽油抗氧化能力的影响

Figure 3 Effects of air-frying and microwave treatment on antioxidant capacity of pumpkin seed oil

一定程度上可以解释微波处理南瓜籽仁酸价和过氧化值较低的原因。抗氧化能力差异可能是由于热处理后,具有抗氧化性的酚类等物质随油溢出^[21]及内源性酶活性变化^[22]所致。综上,油炸在一定程度上可以提高食物的抗氧化性,与 Kita 等^[23-24]的结论一致。

2.4 油脂挥发性物质

由表 3 可知,空气油炸和微波处理后南瓜籽油脂挥发性物质种类增多,均检出 14 种主要挥发性成分,包括烷烃类、烯烃类、酮类、芳香烃类、醛类、醇类、杂环类 7 类化合物,新鉴定出苯甲醛、3-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、

3-乙基-2,5-甲基吡嗪和 2-戊基呋喃 5 种成分,且其含量均呈上升趋势。吡嗪类具有焙烤坚果的典型香气,主要为美拉德反应产物^[25]。2-戊基呋喃具有豆香、清香及蔬菜芳香^[26]。戊醛、己醛、壬醛含量呈增加趋势,主要来自于脂质氧化,呈现脂肪、烘烤坚果味。醇类物质的降解可能是氧化转化成了醛类物质^[27]。乙酸几乎存在于所有的植物种子中,具有醋酸味^[28]。微波处理和空气油炸后南瓜籽中挥发性物质变化表明热处理过程中南瓜籽发生了脂质氧化与美拉德反应,进而改变了南瓜籽风味。此外,由于空气油炸的氧化程度更深、加热温度更高,导致生成更多的脂质氧化产物和美拉德反应产物,如 3-甲基-吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2-戊基呋喃等杂环类化合物含量占比 13.42%,显著高于微波处理的(9.34%),形成较强的坚果烘烤味。赖惠敏等^[29]发现不同加热方式对火麻仁中醛类和杂环类化合物种类和含量的上升有显著促进作用。综上,相较于未处理的南瓜籽,热加工处理显著改善了南瓜籽的风味特,且空气油炸对南瓜籽风味的改善效果高于微波处理。

2.5 对南瓜籽蛋白质的影响

2.5.1 蛋白质理化特性 由图 4(a)可知,各样品中共观察到 4 组条带,其分子量分别为 10~15, 35, 55, 250 kDa, 空气油炸和微波处理后,10~15 kDa 的条带轻微变浅,说明空气油炸和微波处理使这种蛋白组分结构发生了轻微聚集。Rebello 等^[30]研究表明,高温挤压会导致部分蛋白质之间通过二硫键聚集成大分子蛋白。由此推测空气油炸和微波处理后的南瓜籽中蛋白质也发生了相似的聚集物,使得南瓜籽蛋白质 10~15 kDa 亚基颜色变浅。

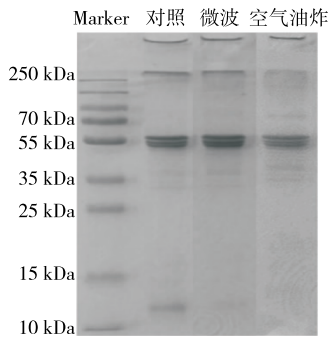
由图 4(b)可知,空气油炸和微波处理后,巯基含量增大,分别达 16.61, 17.67 $\mu\text{mol/g}$ 。这是因为空气油炸和微波处理产生的高温使蛋白质发生热变性,结构展开,隐藏在内部的巯基暴露。但空气油炸过程中更高的温度会诱

表 3 空气油炸和微波处理对南瓜籽油挥发性成分的影响[†]

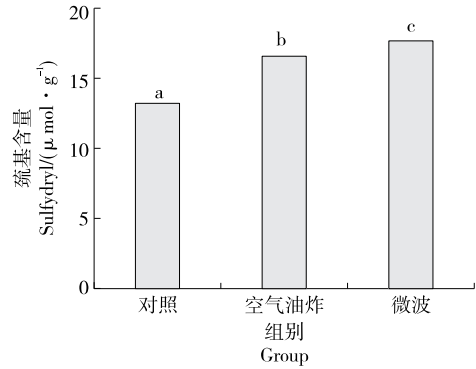
Table 3 Effects of air-frying and microwave treatment on volatile compounds of pumpkin seed oil %

挥发性化合物	对照组	空气油炸	微波处理
己烷	1.94±0.25 ^b	0.95±0.09 ^a	0.79±0.06 ^a
1-丁烯	1.51±0.38 ^a	2.48±0.12 ^b	1.41±0.14 ^a
乙酸	3.08±0.48 ^b	1.67±0.19 ^a	1.66±0.11 ^a
2-丁酮	2.34±0.16 ^a	2.13±0.39 ^a	3.06±0.21 ^b
1-己醇	5.23±0.21 ^b	2.36±0.24 ^a	2.87±0.09 ^a
环丁醇	3.27±0.27 ^b	5.09±0.24 ^c	1.97±0.19 ^a
戊醛	2.76±0.17 ^a	4.64±0.37 ^c	3.51±0.27 ^b
己醛	4.32±0.38 ^a	6.64±0.41 ^b	6.46±0.24 ^b
2-甲基丁醛	2.43±0.27 ^a	4.09±0.39 ^c	3.41±0.16 ^b
苯甲醛	—	2.59±0.29 ^b	1.51±0.12 ^a
对二甲苯	1.68±0.19 ^a	3.45±0.31 ^b	5.31±0.19 ^c
3-甲基-吡嗪	—	4.12±0.49 ^b	2.09±0.13 ^a
2,5-二甲基吡嗪	—	5.61±0.51 ^b	1.80±0.09 ^a
3-乙基-2,5-甲基吡嗪	—	—	5.45±0.49
2-戊基呋喃	—	3.69±0.21	—

[†] 同行小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。



(a) 蛋白质分子量分布



(b) 巯基含量

图 4 空气油炸和微波处理对南瓜籽蛋白质分子量分布、巯基含量的影响

Figure 4 Effects of air-frying and microwave treatment on molecular weight distribution and sulfhydryl content of pumpkin seed protein

导蛋白质氧化,分子氧与游离巯基形成的硫醇自由基能够诱导氧化继续进行,导致巯基含量降低^[31]。此外,蛋白质氧化过程中会发生巯基/二硫键的交换反应,多肽分子间或分子内二硫键的形成也会导致巯基的降低使其巯基含量低于微波处理后的^[26]。综上,加热导致的二硫键的形成是造成南瓜籽蛋白聚集的重要因素。

2.5.2 蛋白质结构特性 由表 4 可知,对照组的 β -折叠含量最高(61.14%),其次是无规则卷曲(20.15%)、 β -转角(12.95%)及 α -螺旋(5.77%)。空气油炸和微波处理后, α -螺旋、 β -折叠含量降低,无规则卷曲含量升高,表明热处理后,蛋白质有序的结构变为无序、舒展的结构,因为热处理可以通过增加蛋白质分子的动能,引起极性基团的振动,从而进一步影响二级结构的变化^[27]。综上,热加工处理后部分蛋白质大分子链发生一定程度的降解,从而导致南瓜籽蛋白质二级结构发生无序化转变。此外,由于在较长时间的微波处理过程中,微波辐射(微波非热效应)和介电加热(快速加热效应)会影响基团的振动强度、键能和分布,造成南瓜籽中极性分子相互摩擦并迅速产生热能,导致分子构象产生较大的变化^[32]。

表 4 空气油炸和微波处理对南瓜籽蛋白质二级结构含量的影响[†]

Table 4 Effects of air-frying and microwave treatment on the secondary structure content of pumpkin seed proteins

二级结构	对照组	空气油炸	微波处理
α -螺旋	5.77±0.25 ^b	4.13±0.16 ^a	3.86±0.21 ^a
β -折叠	61.14±0.47 ^b	59.44±0.29 ^a	59.09±0.33 ^a
β -转角	12.95±0.16 ^b	13.17±0.22 ^b	12.21±0.31 ^a
无规则卷曲	20.15±0.23 ^a	23.26±0.41 ^b	24.85±0.37 ^c

[†] 同行小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

由图 5 可知,所有样品均在 335 nm 处出现最大吸收波长。空气油炸和微波处理后,荧光强度均发生不同程度下降,分别下降至 712.6,403.7。其中,空气油炸样品下降程度最低,可能是因为加热处理后,色氨酸等疏水基团与其他侧链氨基酸结合,蛋白质分子聚集、交联,空间结构变化导致发光基团周围极性环境变化,氨基酸残基被掩埋,同时热处理后蛋白质柔性增加,发色团暴露于溶剂中,导致荧光猝灭从而引起荧光强度降低^[33],与 Zheng 等^[34]的结论类似。同时,空气油炸过程中过度的高温可能使色氨酸残基暴露过多,从而引起荧光强度增大,使其荧光强度高于微波处理后的。

2.5.3 蛋白质消化特性

(1) 消化率:由图 6 可知,南瓜籽蛋白质经胃蛋白酶和胰蛋白酶消化后,消化率表现出相似趋势,胃蛋白酶消化阶段在 120 min 时趋于平缓,胰蛋白酶消化阶段在 60 min 时趋于平缓,可能是由于蛋白质的消化率与蛋白

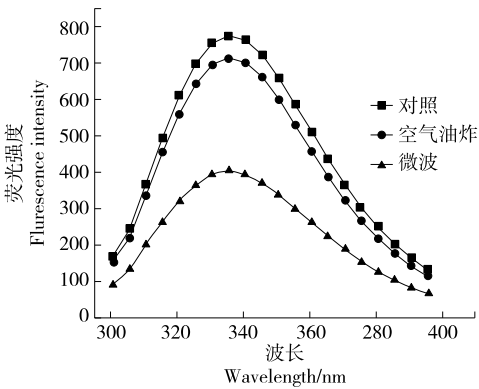


图 5 空气油炸和微波处理对南瓜籽蛋白质荧光光谱的影响

Figure 5 Effects of air-frying and microwave treatment on fluorescence spectra of pumpkin seed protein

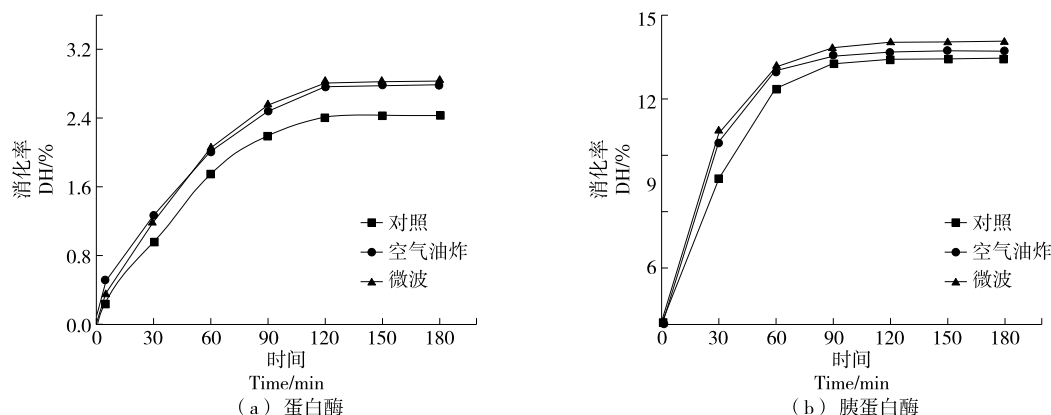


图 6 空气油炸和微波处理对南瓜籽蛋白质胃蛋白酶、胰蛋白酶消化的影响

Figure 6 Effects of microwave treatment on pepsin digestion and trypsin enzymatic digestion of pumpkin seed protein

质溶解度成正比。Zhu 等^[35]研究表明,60~80 °C 热加工处理 1~5 min,可提高蛋清蛋白的消化率;Wang 等^[36]发现热加工处理能够提高谷蛋白的消化率。与对照组相比,空气油炸和微波处理均提高了蛋白质的消化率,且微波处理的最高,可能归因于蛋白质在热处理过程中结构发生改变^[37],且热处理温度过高会使酶失活。据报道^[20],蛋白质有序结构的减少和无序结构的增加表明更多可展开结构和更高结构柔性的形成,可能有助于提高蛋白质的消化率。因此,空气油炸和微波处理对南瓜籽消化率具有显著提升作用。

(2) 消化产物:由图 7 可知,GDEQQWEEEQEEER 是对照组蛋白质消化产物中序列最长、得分最高(94.9)的多肽,质荷比为 1 039.42。空气油炸和微波处理后,消化

产物中丰度最高的多肽发生改变,且其序列号均为 IVQVDEDFEVLLPEKDEEER,质荷比分别为 101.01, 100.71,氨基酸组成数由 16 增加至 20。韦恩图显示空气油炸和微波处理后,对照组蛋白质消化产物共鉴定出 80 种独有肽段,空气油炸和微波处理分别为 120,115 种,表明空气油炸和微波处理改变了蛋白质消化产物的种类,并提高了蛋白质消化率。

3 结论

研究表明,空气油炸和微波处理对南瓜籽基本理化特性影响显著($P < 0.05$),适当的空气油炸和微波处理可以显著提高南瓜籽油氧化稳定性并改善其风味及消化特性。当空气油炸 4 min 和微波处理 5 min 时,多糖、多酚

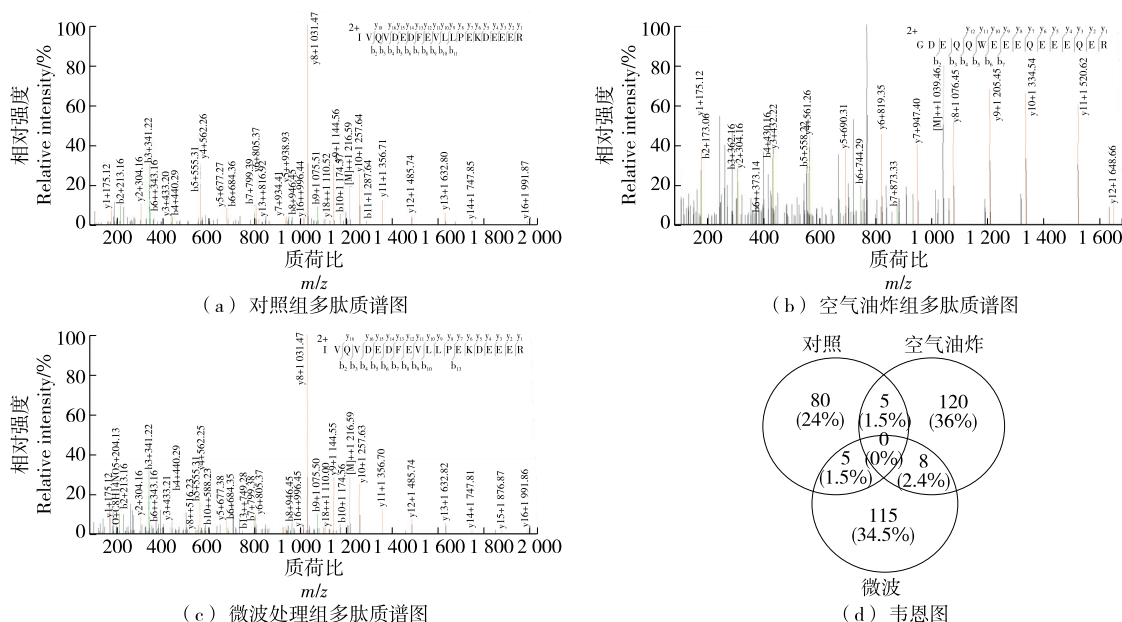


图 7 空气油炸和微波处理对南瓜籽蛋白质消化产物的影响

Figure 7 Effects of microwave treatment on the digestion products of pumpkin seed proteins

和黄酮含量达到最大;脂质仅发生轻微氧化,其不饱和脂肪酸含量变化较小,保持在 80%左右,同时生成了具有烘烤坚果味的吡嗪、呋喃类物质,抗氧化能力有所增强;蛋白质结构发生改变,消化率明显提升,消化产物种类发生改变,分别产生 120,115 种独有肽段。后续可以借助风味组学和肽组学技术,针对加工处理对南瓜籽仁风味和营养的分子机制展开深入研究。

参考文献

- [1] WANG L B, LIU F C, WANG A X X, et al. Purification, characterization and bioactivity determination of a novel polysaccharide from pumpkin (*Cucurbita moschata*) seeds [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 66: 357-364.
- [2] PATEL S, RAUF A. Edible seeds from cucurbitaceae family as potential functional foods: Immense promises, few concerns [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2017, 91: 330-337.
- [3] 雷昌贵, 孟宇竹, 蔡花真. 西瓜籽油微波辅助提取工艺的优化[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(2): 43-47.
LEI C G, MENG Y Z, CAI H Z. Optimization of microwave-assisted extraction technique for watermelon seed oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(2): 43-47.
- [4] 陈升荣, 罗家星, 张彬, 等. 微波预处理压榨茶叶籽油及其氧化稳定性[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(1): 36-39.
CHEN S R, LUO J X, ZHANG B, et al. Extraction of tea seed oil by squeeze with microwave pretreatment and its oxidative stability[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(1): 36-39.
- [5] 卫强, 张国升, 程经旺, 等. 油炸前后核桃中蛋白质和黄酮含量的研究[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(1): 8-9.
WEI Q, ZHANG G S, CHENG J W, et al. Study on walnut proteins and flavonoids content before and after fried[J]. Food Research and Development, 2011, 32(1): 8-9.
- [6] SHAKER M A. Comparison between traditional deep-fat frying and air-frying for production of healthy fried potato strips [J]. International Food Research Journal, 2015, 22(4): 1 557-1 563.
- [7] HEREDIA A, CASTELLÓ M L, ARGÜELLES A, et al. Evolution of mechanical and optical properties of French fries obtained by hot air-frying[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 57(2): 755-760.
- [8] WANG Q L, JIN G F, JIN Y G, et al. Discriminating eggs from different poultry species by fatty acids and volatiles profiling: Comparison of SPME-GC/MS, electronic nose, and principal component analysis method[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2014, 116: 1 044-1 053.
- [9] WANG X Y, HUANG Y, ZHOU B, et al. Improvement of quality and flavor of salted egg yolks by ultrasonic assisted cooking[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 75: 105579.
- [10] 王炜清, 李秀婷, 周彬, 等. 贮藏条件对扁桃仁分离蛋白理化特性及消化特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 102-108, 146.
- [11] LI Z H, ZHOU B, LI X T, et al. Effect of alkaline electrolyzed water on physicochemical and structural properties of apricot protein isolate[J]. Food Science and Biotechnology, 2019, 28(1): 15-23.
- [12] LIN Y P, AN F P, HE H, et al. Structural and rheological characterization of pectin from passion fruit (*Passiflora edulis* F. flavicarpa) peel extracted by high-speed shearing [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 114: 106555.
- [13] WU D, TANG L, DUAN R, et al. Interaction mechanisms and structure-affinity relationships between hyperoside and soybean β -conglycinin and glycinin[J]. Food Chemistry, 2021, 347: 129052.
- [14] NIELSEN P M, PETERSEN D, DAMBMANN C. Improved method for determining food protein degree of hydrolysis [J]. Journal of Food Science, 2001, 66: 642-646.
- [15] LI S G, LI Z H, LI X T, et al. Effect of AAPH oxidation on digestion characteristics of seed watermelon (*Citrullus lanatus* var) kernels protein isolates [J]. Food Science and Human Wellness, 2020, 9(4): 402-410.
- [16] NIU Y X, ANNA R, WAN C Y, et al. Effect of microwave treatment on the efficacy of expeller pressing of brassica napus rapeseed and brassica juncea mustard seeds [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(12): 3 078-3 084.
- [17] 周浩宇, 俞明君, 聂远洋, 等. 热加工方式对香菇营养特性和抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 106-114.
ZHOU H Y, YU M J, NIE Y Y, et al. Effects of heat processing methods on nutritional properties and antioxidant activity of lentinus edodes[J]. Food Science, 2021, 42(15): 106-114.
- [18] VALDÉS A, BELTRÁN A, KARABAGIAS I, et al. Monitoring the oxidative stability and volatiles in blanched, roasted and fried almonds under normal and accelerated storage conditions by DSC, thermogravimetric analysis and ATR-FTIR[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2015, 116: 1 199-1 213.
- [19] KARRAR E, SHETH S, WEI W, et al. Effect of microwave heating on lipid composition, oxidative stability, color value, chemical properties, and antioxidant activity of gurum (*Citru Lluslanatus* var. *Colocynthoide*) seed oil [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2020, 23: 101504.
- [20] 李亚茹, 钟海雁, 龙奇志. 高温条件下外源多酚对油茶籽油氧化稳定性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(1): 61-64, 71.
LI Y R, ZHONG H Y, LONG Q Z. Effect of exogenous polyphenols on the oxidant stability of oil-tea camellia oil during heating[J]. Food & Machinery, 2020, 36(1): 61-64, 71.
- [21] YANG J J, ZHOU F, XIONG L N, et al. Comparison of phenolic

- compounds, tocopherols, phytosterols and antioxidant potential in Zhejiang pecan [*Carya cathayensis*] at different stir-frying steps[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(1): 541-548.
- [22] LIU Y T, LI Y W, KE Y, et al. Processing of four different cooking methods of *Oudemansiella radicata*: Effects on in vitro bioaccessibility of nutrients and antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2021, 337: 128007.
- [23] KITA A, BAKOWSKA-BARCZAK A, HAMOUZ K, et al. The effect of frying on anthocyanin stability and antioxidant activity of crisps from red-and purple-fleshed potatoes (*Solanum tuberosum* L.)[J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2013, 32(2): 169-175.
- [24] TIAN J, CHEN J, LU F, et al. Domestic cooking methods affect the phytochemical composition and antioxidant activity of purple-fleshed potatoes[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 1 264-1 270.
- [25] 赖惠敏, 王世连, 阮征, 等. 热加工方式对火麻仁风味与品质的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(2): 200-212.
- LAI H M, WANG S L, RUAN Z, et al. Effects of thermal processing on the flavor and quality of hemp seed[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(2): 200-212.
- [26] 静玮, 苏子鹏, 林丽静. 澳洲坚果焙烤过程中挥发性成分的特征分析[J]. 热带作物学报, 2016, 37(6): 1 224-1 231.
- JING W, SU Z P, LIN L J. Volatile profiling of macadamia nuts during roasting[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(6): 1 224-1 231.
- [27] 郑兵福, 徐睿烜, 蒋立文. 油炸对臭豆腐中挥发性风味物质的影响[J]. 中国酿造, 2019, 38(3): 14-17.
- ZHENG B F, XU R X, JIANG L W. Effect of frying treatment on volatile flavor substances in stinky tofu[J]. China Brewing, 2019, 38(3): 14-17.
- [28] SIEGMUND B, MURKOVIC M. Changes in chemical composition of pumpkin seeds during the roasting process for production of pumpkin seed oil (Part 1: non-volatile compounds) [J]. Food Chemistry, 2004, 84(3): 367-374.
- [29] SUN X H, OHANENYE C I, AHMED T, et al. Microwave treatment increased protein digestibility of pigeon pea (*Cajanus cajan*) flour: Elucidation of underlying mechanisms [J]. Food Chemistry, 2020, 329: 127196.
- [30] REBELLO C A, SCHAICH K M. Extrusion chemistry of wheat flour proteins: II Sulfhydryl disulfide content and protein structural changes[J]. Cereal Chemistry, 1999, 76(5): 756-763.
- [31] DAVIES M J. The oxidative environment and protein damage[J]. Biochimica et Biophysica Acta (Proteins and Proteomics), 2005, 1 703(2): 93-109.
- [32] LI Y, HU A, WANG X, et al. Physicochemical and in vitro digestion of millet starch: Effect of moisture content in microwave[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 134: 308-315.
- [33] WANG X B, CHI Y J. Microwave-assisted phosphorylation of soybean protein isolates and their physicochemical properties[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2012, 30(2): 99-107.
- [34] ZHENG Y M, LI Z Y, ZHANG C, et al. Effects of microwave-vacuum pre-treatment with different power levels on the structural and emulsifying properties of lotus seed protein isolates[J]. Food Chemistry, 2020, 311: 125932.
- [35] ZHU Y, VANGA S K, WANG J, et al. Effects of ultrasonic and microwave processing on avidin assay and secondary structures of egg white protein [J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11: 1 974-1 984.
- [36] WANG X, GUO L P, SU Y J, et al. Microwave technology as a new strategy to induce structural transition and foaming properties improvement of egg white powder[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105530.
- [37] PYSZ M, POLASZCZYK S, LESZCZYNSKA T, et al. Effect of microwave field on trypsin inhibitors activity and protein quality of broad bean seeds (*Vicia faba* var. *major*) [J]. Acta Scientiarum Polonorum-Technologia Alimentaria, 2012, 11(2): 193-198.
- (上接第 168 页)
- [24] 施宝华. 食育: 亟待制定的国策(下)[J]. 食品工业科技, 2015, 36(2): 17-20.
- SHI B H. Food education: A national policy that needs to be developed (below)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(2): 17-20.
- [25] 陈旭微. 美国幼儿饮食营养教育的实施背景与形式及对我国的启示[J]. 学前教育研究, 2016(3): 15-28.
- CHEN X W. The background and form of implementation of diet and nutrition education for young children in the united states and the implications for China [J]. Studies in Early Childhood Education, 2016(3): 15-28.
- [26] WEBER CULLEN K, BARANOWSKI T, RITTENBERRY L, et al. Socioenvironmental influences on children's fruit, juice and vegetable consumption as reported by parents: Reliability and validity of measures[J]. Public Health Nutr, 2000, 3(3): 345-356.
- [27] STANEK K, ABBOTT D, CRAMER S. Diet quality and the eating environment of preschool children[J]. J Am Diet Assoc, 1990, 90(11): 1 582-1 584.
- [28] 王芳. 促进儿童健康成长推动社会可持续发展《中国儿童发展纲要(2021—2030 年)》之“儿童与健康”解读[J]. 中国妇幼卫生杂志, 2021, 12(6): 1-4.
- WANG F. Promoting healthy growth of children and sustainable development of society: interpretation of "children and health" in the "china's child development programme (2021—2030)" [J]. Chinese Journal of Women and Children Health, 2021, 12(6): 1-4.