

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.10.041

固态生物转化对植物性食品加工副产物 生物活性影响的研究进展

Research advance on the effects of solid-state biotransformation on
the biological activity of plant food processing by-products

陈嘉序¹ 傅亚平² 高瑶¹ 肖愈¹

CHEN Jia-xu¹ FU Ya-ping² GAO Yao¹ XIAO Yu¹

(1. 湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2. 长沙商贸旅游职业技术学院, 湖南 长沙 410116)

(1. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;

2. ChangSha Commerce & Tourism College, Changsha, Hunan 410116, China)

摘要:结合近年来国内外研究报道,详细阐述了固态生物转化对植物性食品加工副产物的产酶效率及应用价值,综述了固态发酵对副产物主要生物活性物质(多酚、黄酮、植物多糖等)及其功能活性的影响,并对其未来发展方向进行了展望。

关键词: 固态发酵; 生物转化; 加工副产物; 酶; 生物活性物质

Abstract: Based on the recent reports from domestic and foreign researches, this study elaborated plant food by-products processed by solid-state biotransformation for the enzyme production efficiency and its potential applications. In addition, this study also reviewed solid-state biotransformation on the influence of major biological compounds (e.g., phenolics, flavonoids, polysaccharides etc.) and bio-activities of plant food by-products, and prospected its direction for future development.

Keywords: solid-state fermentation; biotransformation; processing by-products; enzymes; bioactive compounds

农业生产及食品加工过程中会产生大量的副产物残渣,如果皮、麸皮、豆渣、薯皮、甘蔗渣等。FAO估计,全球每年约有13亿t加工副产物被浪费,其中果蔬类占比

45%,谷物类占比30%^[1]。这些植物性加工副产物有机物含量高,是潜在的营养来源,同时生化需氧量(BOD)超标^[2],及时有效利用不仅可提高其经济利用率,还可减少环境污染。植物性加工副产物可以通过各种方法来提高其价值,其中固态发酵是一种传统而又新颖的加工方式,操作简单、生产成本低、发酵代谢产物得率高、对环境无污染,在中国及东南亚地区具有悠久的历史^[3]。同时,可利用固态发酵技术获取及强化对人体健康有益的一些生物活性成分^[4],如多酚、黄酮、植物多糖、类胡萝卜素等。从系统发育上看,植物中的次生代谢产物的合成在植物的生长阶段起到举足轻重的作用^[5],例如黄酮和酚酸能保护活体植物免受光合作用过程中产生的自由基的侵害;萜类化合物可以吸引传粉者等。此外,一些植物性副产物经发酵强化后,在人体中也能发挥不同的生物学功能,例如能够降低心血管疾病和癌症的发生率^[6],还具有抗菌、抗氧化、抗诱变和抗炎功能,以及抑制或诱导酶及其受体活性基因的表达等^[7]。因此,利用廉价易得的农林副产物作为固态发酵基质来生产酶类或其他生物活性成分成为科研工作者的研究热点。

文章拟综合近年来国内外大量相关研究报道,详细阐述固态生物转化对植物性食品加工副产物产酶效率及潜在的应用价值,同时对固态发酵过程中副产物主要生物活性物质(酚类、黄酮、植物多糖等)及其功能活性的变化进行概述,以期食品工业中植物性食品加工副产物的增值利用提供依据。

1 固态生物转化过程中产酶研究

1.1 谷物加工副产物

谷物食品(禾谷类、薯类、豆菽类)是中国居民日常饮食的重要组成部分,具有丰富的营养价值,同时也是许多

基金项目:湖南省自然科学基金(编号:2020JJ5243);湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(编号:19B269);湖南农业大学大学生创新训练项目(编号:xcx19103);湖南农业大学青年科学基金项目(编号:19QN22)

作者简介:陈嘉序,女,湖南农业大学在读本科生。

通信作者:肖愈(1989—),男,湖南农业大学讲师,博士。

E-mail: yuxiao_89@163.com

傅亚平(1990—),女,长沙商贸旅游职业技术学院助教,硕士。E-mail: 519801878@qq.com

收稿日期:2020-03-22

植物活性物质的重要来源,包括植物雌激素、酚类化合物、皂苷、植酸和固醇等^[8]。食品工业中谷物加工过程包括清洁、分级、干燥、运输、装载、存储、控制自动化、抽吸和过滤等,在谷物处理的每个阶段都会产生可生物降解的副产物废渣^[9]。研究^[10]表明,谷物类工业废渣主要含有纤维素、淀粉、蛋白质、维生素和矿物质等营养元素。这些废渣经预处理后可作为微生物固态发酵产酶的极佳基质(表 1),不但可以降低酶的生产成本,还能进一步提高酶的转化效率,大大拓宽其工业应用的可能性。

谷物类副产物废渣多含有丰富的纤维素,单菌发酵产高活性纤维素酶时广泛选择的菌种有 *Aspergillus niger*、*Trichoderma* 和 *Aspergillus oryzae*。高大响等^[11]以 *Aspergillus niger* 为菌种发酵豆渣,29℃下发酵 84 h,得到纤维素酶最大活力为 462 U/g。丁重阳等^[12]利用 *Trichoderma reesei* 固态发酵麦糟与玉米芯的混合物,干曲最高酶活可达 430 U/g。而纤维素酶是起协同作用的多酶体系,利用混合菌株的协同作用比纯种菌株能产生更多不同酶切位点的纤维素酶^[13]。涂璇等^[14]研究表明,两种曲霉(UF2 和 UA8)按比例混合发酵,其滤纸酶、微晶纤维素酶和羧甲基纤维素酶 3 种酶活性较单菌发酵(UA8)分别提高了 2.2%~51.1%,20.7%~332.6%和 29.4%~299.6%。通过生物转化得到的纤维素酶已被广泛应用于食品加工、饲料工业等领域,包括发酵产品的制造、黄酮类化合物等功能成分的提取、茶叶深加工、消除抗营养因子等^[15]。

蛋白酶和淀粉酶能将谷物类副产物中的大分子蛋白质和多糖降解为利于吸收利用的小分子肽类、氨基酸和简单糖类物质,被广泛运用于饲料生产、复合酶制剂的制备以及果蔬加工等领域。吴慧清等^[16]利用 *Neurospora sitophila* 为菌种发酵 100 g 蔗渣、600 g 麸皮和 300 g 木薯渣等混合物,发酵后固体曲中糖化酶活力和蛋白酶活力分别为 3 110,297 mg/(g·h)。李思聪^[17]以 *Bacillus subtilis* 为菌种发酵豆渣基质,发酵前未检测到淀粉酶,发酵后淀粉酶活力达 4.18 U/g。因 *Bacillus subtilis* 的次级代谢产物枯草菌素具有明显的抑菌作用,抑制发酵过程中有害微生物干扰,利于固态发酵饲料产品品质的提升^[18]。

漆酶是一种多酚氧化酶,具有独特的催化特性。Ergun 等^[19]从蔗渣、麸皮、稻草和啤酒糟等农业废料中获得了这种酶。同样,以各种粮食作物副产物(麦麸、蔗渣和稻草)作为固体基质,通过不同的微生物(*Pleurotus* sp., *Pleurotus ostreatus*, *Pyrenophora phaeocomes*)生产漆酶的研究较多^[20]。得到的漆酶能与木质素、胺类化合物、芳香化合物等底物发生作用,且诸多反应的唯一产物只有水,因此能直接应用于食品、环保及造纸工业等领域^[21]。

1.2 果蔬类加工副产物

近年来,果蔬生产和加工业成为中国农村经济的支柱产业,然而庞大的生产量也带来了大量果蔬加工副产物的产生。据统计^[22],中国果蔬加工业每年生产约 1 亿 t 的副产物残渣,且有逐年上涨的趋势。果蔬加工副产物包括果皮、汁囊残留物、薄膜、果核和种子,这些副产物含有丰富的可溶性糖、纤维素、半纤维素、果胶和精油等,但蛋白质含量偏低,不适宜作动物饲料,且燃烧处理会产生大量温室气体,加重温室效应^[23]。研究^[24]表明,果蔬加工副产物因其富含半纤维素和果胶,吸水率高,是固态生物转化产酶的极佳发酵基质,大多用于果胶酶、木聚糖酶、半乳糖醛酸酶和葡萄糖苷酶的生产(表 1)。

果胶酶可大致分为聚半乳糖醛酸酶、果胶裂解酶和果胶酯酶,是水果加工中最重要的酶。据报道^[27],现已发现有 40 多种微生物能产果胶酶,包括 *Aspergillus*、*Penicillium*、*Kluyveromyces* 及一些兼性厌氧细菌等。果胶酶是诱导性酶类,一般认为其产酶条件为底物中含有诱导物(果胶或半乳糖醛酸残基),因而可选用富含果胶的诱导物(苹果皮、桔柑皮等)。田林茂等^[28]以 *Aspergillus niger* HG-1 为菌种发酵苹果渣获取果胶酶,30℃下培养 48 h,果胶酶酶活力可达 22 248 U/g,高于以麸皮为主要原料时的酶活力。邓毛程等^[29]采用菠萝皮粉作碳源和诱导物发酵生产果胶酶,当菠萝皮粉用量达到某一值时其产酶量最大,超出该范围时产酶量呈下降趋势,可能归因于菠萝皮中存在抑制产酶成分的累积。植物性副产物发酵生产得到的果胶酶在食品工业中的应用主要是果汁制造和果汁酿造,因其能提高出汁率,降低成本的同时,降解果胶质,使产品更易贮藏^[38]。

木聚糖是半纤维素的主要成分,是植物性饲料中存在的抗营养因子,使饲料消化利用率大大降低。利用固态发酵技术生产木聚糖酶具有成本低、效益高的优势。Seyis 等^[40]分别使用苹果渣、橙渣、橙皮、柠檬渣、柠檬皮、梨皮和香蕉皮作为 *Trichoderma harzianum* 1073 D3 的发酵基质生产木聚糖酶,其中以苹果渣为基质产木聚糖酶酶活力最高。Mamma 等^[41]发现 *Aspergillus niger* BTL 产生的半乳糖醛酸酶、果胶酸裂解酶、木聚糖酶、 β -木糖苷酶和蔗糖酶的产量最高,而 *Neurospora crassa* DSM 1129 产生的内切葡聚糖酶产量最高。木聚糖酶反作用于甘蔗渣、玉米芯等天然半纤维素,分解得到木糖和低聚木糖,可作为葡萄糖替代物供糖尿病人食用;此外,还可作为增稠剂、脂肪替代物等加以应用^[15]。

2 固态生物转化对植物性食品加工副产物生物活性物质的影响

植物性食品加工副产物经固态生物转化产生的各类生物活性物质见表 2。

2.1 对酚类化合物的影响

酚类化合物由于其出色的体外抗氧化性能在食品和

临床领域备受关注,其理想化学结构使得沿芳环的羟基更易于提供氢或电子,以实现自由基清除活性。据报

表 1 植物性食品加工副产物固态生物转化过程中的产酶
Table 1 Enzymes produced on plant food by-products during solid state bioprocessing

产酶种类	植物性副产物	微生物	最大酶活力/ (U · g ⁻¹)	酶的应用	来源
α -L-鼠李糖苷酶	柚皮	<i>Aspergillus aculeatus</i>	2.53	鼠李糖的制备、抗生素的制备	[25]
α -L-阿拉伯呋喃糖苷酶	柚皮	<i>Aspergillus aculeatus</i>	0.44	食品的增香	[25]
β -呋喃糖苷酶	柚皮	<i>Aspergillus aculeatus</i>	1 459.54	低聚果糖和低聚果糖的生产	[25]
阿魏酸酯酶	麸皮	<i>Neurospora sitophila</i>	10.77	造纸工业木质素的脱除	[26]
单宁酶	茶梗	<i>Aspergillus niger</i>	13.40	没食子酸和没食子酸丙酯的制备、改善茶汤品质、提升 EGCG 品质	[27]
蛋白酶	豆粕	<i>Bacillus subtilis</i>	7.82	干酪生产、肉类嫩滑、改善面筋性能、植物蛋白改性	[27]
蛋白酶	向日葵粕	<i>Bacillus subtilis</i>	3.22		[28]
蛋白酶	麸皮	<i>Bacillus subtilis</i>	3.79		[28]
淀粉酶	豆粕	<i>Bacillus subtilis</i>	4.48	蔬菜和果汁加工、糖浆制造、制备饲用复合酶、纺织退浆、自动洗衣机的	[28]
淀粉酶	向日葵粕	<i>Bacillus subtilis</i>	20.48	洗涤剂添加	[28]
淀粉酶	麸皮	<i>Bacillus subtilis</i>	2.94		[28]
果胶酶	苹果渣	<i>Aspergillus niger</i> C-6	739.24	作为天然食品防腐剂、改善果蔬感官品质、诱导食物抗病、复合酶制剂的制备、木材防腐、橘子脱囊衣、木材脱胶、单细胞食品制备	[15]
果胶酶	豆粕	<i>Bacillus subtilis</i>	64.27		[28]
果胶酶	向日葵粕	<i>Bacillus subtilis</i>	126.30		[28]
果胶酶	麸皮	<i>Bacillus subtilis</i>	21.26		[28]
木聚糖酶	醋糟和干豆渣	<i>Neurospora sitophila</i>	412.34		[29]
木聚糖酶	玉米皮和麸皮	<i>Trichoderma koningii</i> and <i>Candida tropicalis</i>	1 376.90	小麦面粉改良、生产低聚木糖、果蔬加工、酒类生产、消除饲料中非淀粉多糖的抗营养作用、改进酮体品质、降低动物结肠炎发生率	[15]
木聚糖酶	苹果渣	<i>Aspergillus niger</i> C-6	313.90		[26]
木聚糖酶	麸皮	<i>Neurospora sitophila</i>	6.84		[31]
木聚糖酶	葡萄皮	<i>Aspergillus niger</i> -113 N	47.05		[31]
木聚糖酶	葡萄皮	<i>Aspergillus fumigatus</i> -3	8.00		[31]
葡萄糖苷酶	葡萄皮	<i>Aspergillus niger</i> -113 N	29.47	纤维素的水解与利用、功能性低聚糖的合成	[31]
酸性磷酸酯酶	柚皮	<i>Aspergillus aculeatus</i>	31.54	病理诊断及药物检测	[25]
羧甲基纤维素酶	木薯渣	<i>Aspergillus niger</i>	8.86	发酵产品制造、植物性副产物处理	[32]
纤溶酶	米糠	<i>Bacillus subtilis</i>	3 885.09±22.83	溶血栓药物及保健食品的制备	[33]
纤溶酶	米糠	<i>Bacillus subtilis</i> XZI-125	3 317.46±259.91		[34]
纤维素酶	玉米秸秆	<i>Aspergillus oryzae</i>	522.36		[35]
纤维素酶	苹果渣	<i>Aspergillus niger</i> C-6	149.31	发酵产品的制造、农副产品的加工、黄酮类化合物等功能成分的提取、	[15]
纤维素酶	豆粕	<i>Bacillus subtilis</i>	0.96	茶叶深加工、补充动物内源酶、消除	[28]
纤维素酶	向日葵粕	<i>Bacillus subtilis</i>	1.98	抗营养因子、改善动物微生态环境	[28]
纤维素酶	麸皮	<i>Neurospora sitophila</i>	3.96		[26]
纤维素酶	麸皮	<i>Bacillus subtilis</i>	0.02		[28]
柚苷酶	柚皮	<i>Aspergillus aculeatus</i>	0.45		[25]
柚苷酶	西柚皮	<i>Aspergillus foetidus</i>	2.58	柑橘类果汁的脱苦、食品的增香、鼠李糖的制备、普鲁宁的制备、抗生素	[36]
柚苷酶	米糠、麦麸、甘蔗渣、橘皮、柚皮苷等	<i>Aspergillus niger</i> MTCC1344	58.10	的制备、类固醇的转化	[36]

表 2 植物性食品加工副产物经固态生物转化产生的各类生物活性物质

Table 2 Various bioactive compounds produced from different microorganisms by fermentation with diverse plant food processing byproducts

类别	名称	底物	发酵微生物	来源
	没食子酸、鞣花酸	蓝莓果渣	<i>Lentinus edodes</i>	[42]
	阿魏酸	麸皮	<i>Neurospora sitophila</i>	[43]
	阿魏酸	米糠	<i>Rhizopus oryzae</i>	[44]
	阿魏酸、香草酸	麸皮	<i>Aspergillus niger</i>	[45]
酚类化合物	咖啡酸、阿魏酸、芥子酸	碎燕麦片	<i>Lactobacillus johnsonii</i> L A1, <i>Lactobacillus reuteri</i> SD2112, <i>Lactobacillus acidophilus</i> LA-5	[46]
	香草酸	菠萝渣	<i>Aspergillus niger</i> I-1472 and <i>Pycnoporus cinnabarinus</i> MUCL 39533	[47]
	阿魏酸、对香豆酸、芥子酸、丁香酸	米糠	<i>Aspergillus oryzae</i> and <i>Rhizopus oryzae</i>	[48]
	花色苷	蓝莓果渣	<i>Mushroom</i>	[49]
	槲皮素、山奈酚	番石榴叶	<i>Monascus purpureus</i> Went., <i>Bacillus</i> BS2	[50]
	花青素	火龙果皮	<i>Lactobacillus plantarum</i>	[51]
	大豆苷元、染料木素	豆粕	<i>Bacillus subtilis</i>	[52]
黄酮	大豆苷元、黄豆黄素、染料木素	黄浆水	<i>Cordyceps militaris</i>	[53]
	大豆苷元、染料木素	豆粕	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	[54]
	橙皮素、柚皮苷	柑橘渣	<i>Paecilomyces variotii</i>	[55]
	橙皮素	酸橙皮	<i>Aspergillus saitoi</i>	[56]
	芦丁	豆粕	<i>Bacillus subtilis</i>	[57]
	芦丁	无花果渣	<i>Fungi</i>	[58]
	苹果原渣多糖	苹果渣	<i>Saccharomyce</i>	
	苹果酒渣多糖	苹果渣	<i>Saccharomyce</i>	[59]
	苹果醋渣多糖	苹果渣	<i>Saccharomyce</i>	
植物多糖	米糠多糖	米糠	<i>Basidiomycota</i>	[60]
	麸皮多糖	麸皮	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Bacillus subtilis</i>	[61]
	玉米芯多糖	玉米芯、豆粕粉、麸皮	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Bacillus subtilis</i>	[62]
	低聚木糖	麸皮	<i>Trichoderma</i> sp.	[63]
	玉米芯多糖	玉米芯	<i>Neurospora crassa</i> 7340	[64]
	β -胡萝卜素	麸糠和脱脂米糠	<i>Neurospora crassa</i>	[65]
植物色素	虾青素	小麦废渣	<i>Yamadazyma guilliermondii</i> , <i>Yarrowia lipolytica</i>	[66]
	虾青素	橄榄渣	<i>Xanthophylomyces dendrorhous</i> , <i>Sporidiobolus salmonicolor</i>	[67]
	番茄红素	番茄渣	<i>Aspergillus niger</i>	[68]
混合物	单细胞蛋白	香蕉皮、橙皮、芒果渣和菠萝渣	<i>Candida tropicalis</i>	[49]
真菌毒素	<i>B. bassiana</i> 毒素	苹果渣、橙皮渣	<i>Beauveria bassiana</i>	[52]
维生素	维生素 E	米糠	<i>Bacillus subtilis</i> XZI-125	
	维生素 B ₃	米糠	<i>Bacillus subtilis</i> XZI-125	[53]

道^[58], 某些酚类化合物还具有抗菌、抗动脉粥样硬化、抗肿瘤、抗癌和抗炎等潜力。植物性副产物中酚类化合物只有少部分以可溶性形式存在, 绝大部分以不溶性形式与细胞壁化学物质(包括果胶、纤维素、阿拉伯木聚糖和结构蛋白)通过共价键、酯键、醚键等相结合, 难以提取, 严重影响其生理活性功能的发挥^[50]。发酵过程中, 微生物通过次级代谢途径产生具备抗氧化性能的酚类物质, 或者通过胞外酶的酶促作用从底物基质中释放出酚类物质^[45]。酚类化合物主要可分为黄酮和酚酸两大类, 常见的酚酸有阿魏酸、没食子酸、香草酸、鞣花酸、对羟基苯甲酸、香豆酸和芥子酸等。

植物性副产物中酚酸类物质增加的根本原因是其结构的变化。胡博涵^[69]采用分光光度法和 HPLC 法分析几种曲霉发酵麸皮中总酚酸和阿魏酸的释放量, 随后对发酵麦麸进行电镜扫描, 发现已由密质的交联结构变得疏松, 交联结构断裂, 内侧表面出现凹凸斑痕和空穴, 从而使其释放出生物活性物质, 提高了发酵麦麸中的总酚和阿魏酸含量, 进而其抗氧化能力提高。杜小燕等^[70]利用 *Aspergillus awamori* 发酵麦麸, 发现 *Aspergillus awamori* 使束缚的阿魏酸游离出来, 且咖啡酸、丁香酸和阿魏酸浓度高的酚类提取物, 其抗氧化性也较强。

研究^[45]表明, 各种木质纤维素材料是生产没食子酸和鞣花酸的良好基质, 尤其是发酵农作物及果蔬加工副产物, 如豆粕、高粱秸秆、玉米芯、麦麸、石榴籽等。郭丽等^[42]以 *Lentinus edodes* 为菌种发酵蓝莓果渣, 其总酚和没食子酸含量均先上升后下降, 且发酵第 8 天达最大值; 酚类化合物含量上升除基质结构变化释放酚类物质外, 还可能是由于发酵微生物合成了可溶性酚类化合物; 鞣花酸含量逐渐下降, 可能归因于鞣花酸中含有许多易被氧化的酚羟基, 发酵过程中被氧化消耗^[79]。

2.2 对黄酮的影响

植物性加工副产物是潜在的生物活性物质黄酮的重要来源, 主要包括柚皮苷、橙皮苷、大豆异黄酮和芦丁等^[72]。具有清除自由基、抗氧化^[73]、降低癌症和糖尿病发生率、预防心脑血管疾病和抗微生物等多种药理作用^[74]。黄酮是酚类化合物的最大组成部分, 根据中央三碳的氧化程度、是否成环、B 环的联接位点等特点, 可将黄酮分为黄酮类、黄酮醇类、二氢黄酮类、异黄酮类、黄烷类和花色苷类等多种结构类型。

黄酮多以 O-糖苷的形式存在, 与葡萄糖、半乳糖、鼠李糖、阿拉伯糖和木糖等结合, O-β-糖苷键主要通过微生物 α-糖苷酶在肠道中水解产生苷元^[75]。Fukumoto 等^[76]指出, 与糖基化黄酮相比, 苷元型的抗氧化活性较高。微生物在发酵过程中产生丰富的酶系, 如纤维素酶、果胶酶、β-葡萄糖苷酶、柚皮苷酶和 α-鼠李糖苷酶等^[77]。其中, β-葡萄糖苷酶作用于黄酮 C3 和 C7 位置上的键, 使葡

萄糖基团游离出来, 得到活性更高的苷元; 而 α-L-鼠李糖苷酶可特异性切割许多天然葡萄糖苷末端的鼠李糖基, 如柚皮苷、芦丁、槲皮苷和橙皮苷等^[78], 提升了天然黄酮的功能活性。豆粕经 *Bacillus pumilus*、*Bacillus subtilis* 或 *Aspergillus oryzae* 等菌株发酵后会使得糖苷型异黄酮(大豆苷、黄豆黄苷和染料木苷)代谢为游离型异黄酮(大豆苷元、黄豆黄素和染料木素), 提高豆粕营养品质^[79]。此外, 王露^[50]用 *Monascus spp.* 和 *Bacillus BS2* 混合发酵番石榴叶, 相对于未发酵基质, 其总黄酮、槲皮素与山奈酚含量分别增加了 2.0, 13.0, 6.8 倍。有研究^[80]认为, 这可能是由于糖苷类化合物首先被去糖基化形成槲皮素-3-O-葡萄糖苷和山奈酚-3-O-葡萄糖苷, 再由这些菌株分泌的 β-葡萄糖苷酶使位于 3-O 和 7-O 位置的葡萄糖基团游离出来, 得到苷元型的槲皮素和山奈酚。

郭丽等^[42]以 *Lentinus edodes* 为菌种发酵蓝莓果渣, 发酵第 12 天时花色苷含量达最大值 1.878 mg/g。这可能是在纤维素酶和果胶酶的作用下, 果渣的细胞壁被破坏, 从而附着在纤维素、果胶质上的花色苷被释放出来。Hugnh 等^[80]研究表明, 通过微生物发酵从植物副产物中生产高活性的黄酮时, 细胞壁与天然黄酮的相对位置是一个重要的考虑因素。只有已知结合的类型和糖苷键连接的位置, 才可以更好地选择所需的酶或微生物, 从而从植物性加工副产物中获取可利用性更强、活性更高的黄酮。

2.3 对植物多糖的影响

植物多糖又称植物多聚糖, 是一类由醛糖或酮糖通过糖苷键连接而成的天然高分子多聚物, 也是植物体内非常重要的一种生物活性物质, 具有免疫调节、抗癌、抗氧化、预防心血管疾病、护肝以及抗辐射等多重功效^[81]。目前, 主要用于植物多糖生产的菌种有 *Xanthomonas*、*Leuconostoc*、*Sphingomonas* 和 *Alcaligenes genera* 等^[82]。贾丰^[59]以 *Saccharomyce* 为菌种发酵苹果渣, 最后经超声辅助热水浸提法获得了 3 种苹果渣多糖: 苹果原渣多糖、苹果酒渣多糖和苹果醋渣多糖, 此 3 种多糖为非晶态物质, 呈无定型态结构, 具有一定的抗氧化性和良好的加工特性。米糠多糖是具有多种生理活性的功能因子, 主要以半纤维素的形式镶嵌于稻谷果皮。张超杰^[60]利用 *Fomitopsis pinicola* 发酵制备米糠多糖, 当米糠多糖中阿拉伯糖、木糖、半乳糖及甘露糖所占比重较大时, 抗氧化性较强。史俊祥^[61]利用 *Saccharomyces cerevisiae* CGMCC 2.119 等 4 种菌发酵麸皮, 发现 *Saccharomyces cerevisiae* 与 *Bacillus subtilis* 混菌发酵时的效果最好, 麸皮多糖产量为 44.55 mg/g, 且 Diquat 诱导的 Wistar 大鼠机体的氧化应激反应在麸皮多糖粗制品的参与下可以得到有效缓解。王园等^[83]利用 *Saccharomyces cerevisiae* 与 *Bacillus subtilis* 混菌发酵得到麸皮多糖具有

较好的抗炎活性。由于植物多糖的分子量、聚合度以及结构均能影响其生物活性,并且聚合度越高,越不利于多糖在生物体内发挥活性作用,甚至对机体产生毒害作用^[84]。因此,将多糖降解为小分子片段,降低分子量是多糖及其产品开发急待解决的问题。

2.4 对其他生物活性物质的影响

2.4.1 植物色素 植物色素也是重要的生物活性物质之一,具有营养、保健、药用、着色作用等诸多功能活性,且食用安全,对促进人体健康有很大帮助^[85]。Buzzini 等^[86]利用 *Rhodotorula glutinis* 和 *Debaromyces castellii* 混菌发酵玉米糖浆(通过玉米淀粉的酸水解获得的工业副产物)可以有效提高类胡萝卜素产量。Miura 等^[87]研究证明,来自 *Erwinia uredovora* 的 *crtE*、*crtB*、*crtI* 和 *crtY* 以及来自 *Agrobacterium aurantiacum* 的 *crtZ* 和 *crtW* 基因均可以生物合成类胡萝卜素,将这些基因簇移入食品级酵母 *Candida utilis*,发现转基因酵母能获取更多的虾青素、 β -类胡萝卜素和番茄红素。

2.4.2 单细胞蛋白 单细胞蛋白又称微生物菌体蛋白,含有丰富的蛋白质(占干细胞重量的 60%~82%)、碳水化合物、脂肪、维生素和核酸等营养元素^[88]。据报道^[89],酵母菌和类酵母菌株是利用植物性加工副产物(马铃薯渣、木薯渣和甘蔗渣等)生产单细胞蛋白最经济的菌种,其中甘蔗渣又成为被研究得最多的底物之一。Khan 等^[90]以 *Saccharomyces cerevisiae* 为菌种发酵 5 种不同的果蔬加工副产物(香蕉皮、芒果渣、甜橙皮、石榴皮和苹果渣),发现以香蕉皮作为基质时获取的单细胞蛋白含量最高,占粗蛋白含量的 58.62%。

2.4.3 真菌毒素 作为一类生物活性物质,真菌毒素在农业上对害虫的生物防治起重要作用。Desgranges 等^[91]利用固态发酵技术通过植物性副产物废渣生产 *Beauveria bassiana* 以期获取真菌毒素杀灭害虫,其原理是 *Beauveria bassiana* 分生孢子附着在宿主表面建立病原性相互作用,随后真菌分泌一系列酶(几丁质酶、酯酶、蛋白酶和脂肪酶)渗透至害虫表皮并进入体内,最后毒素进入淋巴组织,破坏其免疫系统。

3 总结与展望

植物性食品加工工业中产生的大量副产物因其利用不足而造成的经济损失和环境破坏问题十分严峻。食品工业未来的发展方向必定在于寻求适宜的处理方式使这些有机副产物残渣变为低成本、高价值的产品。尽管现阶段各类生物活性物质的开发利用手段日益先进,但其食品安全问题仍需特别注意。如某些微生物在发酵过程中会产生有毒化合物,某些微生物蛋白可能会引起人体过敏反应,单细胞蛋白中的核酸会导致胃肠道疾病^[91]等,因此还需进一步加强各类生物活性物质的体内外毒理学

研究,才能有效明确食品工业中各类副产物固态生物转化工艺的实施方案,为从植物性加工副产物中获取的生物活性物质在食品保健、饲料研发、医药制品等诸多领域更深层次的开发利用提供理论依据。

参考文献

- [1] LIPINSKI B, HANSON C, LOMAX J, et al. Reducing food loss and waste [J]. World Resources Institute Working Paper, 2013, 22(1): 1-40.
- [2] 张煜欣, 刘慧燕, 方海田, 等. 马铃薯淀粉加工的副产物及资源化利用现状[J]. 中国果菜, 2020, 40(1): 46-52.
- [3] 高铭坤, 温广宇, 钱芳. 微生物对白酒酒糟的转化利用研究进展[J]. 食品与机械, 2018, 34(2): 191-194.
- [4] SADIH P K, KUMAR S, CHAWLA P, et al. Fermentation: A boon for production of bioactive compounds by processing of food industries wastes (by-products) [J]. Molecules, 2018, 23(10): 2 560-2 593.
- [5] DWIVEDI S, MALIK C, CHHOKAR V. Molecular structure, biological functions, and metabolic regulation of flavonoids [M]. Plant Biotechnology: Recent Advancements and Developments. Springer: Singapore, 2017: 171-188.
- [6] SAINI N, GAHLAWAT S K, LATHER V. Flavonoids: A nutraceutical and its role as anti-inflammatory and anticancer agent [M]. Plant Biotechnology: Recent Advancements and Developments. Springer: Singapore, 2017: 255-270.
- [7] CORREIA A L, BISSELL M J. The tumor microenvironment is a dominant force in multidrug resistance [J]. Drug Resistance Updates, 2012, 15(1/2): 39-49.
- [8] HUR S J, LEE S Y, KIM Y C, et al. Effect of fermentation on the antioxidant activity in plant-based foods [J]. Food Chemistry, 2014, 160(1): 346-356.
- [9] 张玉荣, 高佳敏, 周显青, 等. 谷物磨粉工艺对其淀粉损伤及特性影响研究进展 [J]. 中国粮油学报, 2017, 32(3): 135-140.
- [10] 刘平. 木薯渣饲料资源化开发研究 [J]. 养殖与饲料, 2009(31): 55-59.
- [11] 高大响, 黄小忠. 1 株黑曲霉固态发酵豆渣生产纤维素酶及淀粉酶工艺的优化 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45(22): 218-220.
- [12] 丁重阳, 王玉红, 章克昌. 箱式固态发酵生产纤维素酶的研究 [J]. 酿酒, 2003, 30(2): 33-35.
- [13] 林捷, 谭兆赞, 罗伟诚. 利用木薯渣进行纤维素分解菌混合发酵工艺研究 [J]. 安全与环境学报, 2005, 5(6): 26-29.
- [14] 涂璇, 薛泉宏, 司美茹, 等. 多元混菌发酵对纤维素酶活性的影响 [J]. 工业微生物, 2004, 34(1): 30-34.
- [15] 姜心. 苹果渣固态混菌发酵产复合酶的研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2010: 1-10.
- [16] 吴慧清, 吴清平, 郭楚盛, 等. 饲用复合酶产生菌好食脉孢霉发酵条件研究 [J]. 微生物学通报, 2003, 30(3): 33-37.

- [17] 李思聪. 混菌固态发酵豆渣的研究及其在肉鸡生产上的初步应用[D]. 成都: 四川农业大学, 2011: 36-44.
- [18] 谢普军, 黄立新, 张彩虹, 等. 固态发酵生产蛋白饲料的研究进展[J]. 生物质化学工程, 2014, 48(5): 39-46.
- [19] ERGUN S O, UREK R O. Production of ligninolytic enzymes by solid state fermentation using *Pleurotus ostreatus* [J]. *Annals of Agrarian Science*, 2017, 15(2): 273-277.
- [20] RASTOGI S, SONI R, KAUR J, et al. Unravelling the capability of *Pyrenophora phaeocomes* S-1 for the production of ligno-hemicellulolytic enzyme cocktail and simultaneous bio-delignification of rice straw for enhanced enzymatic saccharification[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 222(1): 458-469.
- [21] 王雪, 刘太林, 杨焜梅, 等. 产漆酶真菌的筛选及发酵产酶条件的优化[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(23): 31-33.
- [22] 刘广民, 董永亮, 薛建良, 等. 果蔬废弃物厌氧消化特征及固体减量研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(3): 27-30, 49.
- [23] MAMMA D, CHRISTAKOPOULOS P. Biotransformation of citrus by-products into value added products[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2014, 5(4): 529-549.
- [24] HORN S J, VAAJE-KOLSTAD G, WESTERENG B, et al. Novel enzymes for the degradation of cellulose[J]. *Biotechnology For Biofuels*, 2012, 5(1): 45-57.
- [25] 王耸, 刘艳苓, 姜泽东, 等. 棘孢曲霉固态发酵柚皮产柚苷酶的条件优化[J]. 微生物学通报, 2015, 42(10): 1 936-1 944.
- [26] 许锡凯, 辛嘉英, 孙铁男, 等. 好食脉孢菌发酵过程中酶活性变化对麸皮阿魏酸释放的影响[J]. 饲料研究, 2019(7): 72-77.
- [27] 吴昌正. 黑曲霉固态发酵茶梗产单宁酶及利用磁性纳米粒子固定化单宁酶研究[D]. 厦门: 集美大学, 2014: 30-36.
- [28] SALIM A A, GRBAV ČIĆ S, ŠEKULJICA N, et al. Production of enzymes by a newly isolated *Bacillus* sp. TMF-1 in solid state fermentation on agricultural by-products; The evaluation of substrate pretreatment methods [J]. *Bioresource Technology*, 2017(228): 193-200.
- [29] 段睿, 邓永平, 刘晓兰, 等. 好食脉孢菌固态发酵醋糟产木聚糖酶的工艺优化[J]. 食品与机械, 2019, 35(10): 214-217.
- [30] 陈晓萍. 副产物玉米皮固态发酵高值化的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 1-30.
- [31] SÁNCHEZ S R, SÁNCHEZ I G, ARÉVALO-VILLEN A M, et al. Production and immobilization of enzymes by solid-state fermentation of agroindustrial waste[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2015, 38(3): 587-593.
- [32] 董佳程. 黑曲霉降解马铃薯纤维素作用强化的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 36-44.
- [33] 苗圃. 枯草芽孢杆菌固态发酵米糠及其降甘油三酯功能的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014: 10-12.
- [34] 冯海燕. 枯草芽孢杆菌 XZI125 改善米糠的功能活性成分并提高其营养价值的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012: 9-12.
- [35] 马光, 郭继平. 米曲霉发酵玉米秸秆产纤维素酶饲料条件的优化[J]. 生物技术, 2010, 20(6): 81-85.
- [36] MENDOZA-CAL A, CUEVAS-GLORY L, LIZAMA-UC G, et al. Naringinase production from filamentous fungi using grapefruit rind in solid state fermentation[J]. *African Journal of Microbiology Research*, 2010(19): 1 964-1 969.
- [37] 蒋红菊, 杨加志, 宋加妹, 等. 高产果胶酶菌株选育及发酵产酶条件优化的研究进展[J]. 中国酿造, 2010(11): 1-5.
- [38] 田林茂, 张红燕, 刘成, 等. 黑曲霉 HG-1 发酵苹果渣生产果胶酶的工艺优化及部分酶学性质[J]. 生物技术, 2008, 18(2): 76-79.
- [39] 邓毛程, 王瑶, 李胜. 黑曲霉利用菠萝皮培养基发酵产果胶酶的研究[J]. 中国酿造, 2009(7): 106-108.
- [40] SEYIS I, AKSOZ N. Xylanase production from *Trichoderma harzianum* 1073 D 3 with alternative carbon and nitrogen sources[J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2005, 43(1): 37-40.
- [41] MAMMA D, KOURTOGLOU E, CHRISTAKOPOULOS P. Fungal multienzyme production on industrial by-products of the citrus-processing industry [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(7): 2 373-2 383.
- [42] 郭丽, 王鹏, 马志婷. 香菇固态发酵对蓝莓果渣产物活性成分的研究[J]. 北方园艺, 2014(11): 143-146.
- [43] 孙晓明. 好食脉孢菌发酵小麦麸皮释放阿魏酸及其衍生物研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2019: 13-27.
- [44] SCHMIDT C G, GONSALVES L M, PRIETTO L, et al. Antioxidant activity and enzyme inhibition of phenolic acids from fermented rice bran with fungus *Rizhopus oryzae*[J]. *Food Chemistry*, 2014, 146(3): 371-377.
- [45] VENTURA J, BELMARES R, AGUILERA-CARBO A, et al. Fungal biodegradation of tannins from creosote bush (*Larrea tridentata*) and tar bush (*Fluorensia cernua*) for gallic and ellagic acid production[J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2008, 46(2): 213-217.
- [46] GAN R Y, LI H B, GUNARATNE A, et al. Effects of fermented edible seeds and their products on human health: Bioactive components and bioactivities[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2017, 16(3): 489-531.
- [47] LUN O K, WAI T B, LING L S. Pineapple cannery waste as a potential substrate for microbial biotransformation to produce vanillic acid and vanillin[J]. *International Food Research Journal*, 2014, 21(3): 953-958.
- [48] RAZAK D L A, RASHID N Y A, JAMALUDDIN A, et al. Cosmeceutical potentials and bioactive compounds of rice bran fermented with single and mix culture of *Aspergillus oryzae* and *Rhizopus oryzae* [J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2017, 16(2): 127-134.

- [49] 郭丽, 王鹏. 食用蕈菌固态发酵蓝莓果渣代谢产物及其抗氧化特性[J]. 食品科学, 2015, 39(7): 137-142.
- [50] 王露. 番石榴叶活性多酚组分快速鉴别及发酵释放与转化机制[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 11-34.
- [51] 黄梅华, 何全光, 淡明, 等. 火龙果皮乳酸菌发酵产品体外抗氧化能力研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(17): 70-74.
- [52] 杨守凤, 徐建雄. 基于复合益生菌和枯草芽孢杆菌发酵转化大豆异黄酮的比较研究[J]. 饲料研究, 2014(3): 1-4.
- [53] 王丽夏. 黄浆水的蝇虫草发酵及其功能活性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017: 2-43.
- [54] 刘宏丽, 郭晓军, 狄聪颖, 等. 产 β -葡萄糖苷酶芽孢杆菌的筛选及水解大豆异黄酮糖苷研究[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2017, 36(6): 621-629.
- [55] RUVIARO A R, BARBOSA P P M, MACEDO G A. Enzyme-assisted biotransformation increases hesperetin content in citrus juice by-products[J]. Food Research International, 2019, 124: 213-221.
- [56] PÉREZ-NÁJERA V C, LUGO-CERVANTES E, AMAYA-DELGADO L, et al. Biotransformation of hesperidin from lime peel (*Citrus limetta* Risso) in solid fermentation by *Aspergillus saitoi* [J]. CyTA Journal of Food, 2018, 16(1): 537-543.
- [57] DAI C, MA H, HE R, et al. Improvement of nutritional value and bioactivity of soybean meal by solid-state fermentation with *Bacillus subtilis* [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 86: 1-7.
- [58] BUENOSTRO-FIGUEROA J J, VELÁZQUEZ M, FLORES-ORTEGA O, et al. Solid state fermentation of fig (*Ficus carica* L.) by-products using fungi to obtain phenolic compounds with antioxidant activity and qualitative evaluation of phenolics obtained[J]. Process Biochemistry, 2017 (62): 16-23.
- [59] 贾丰. 苹果渣固体发酵多糖活性, 结构与加工特性研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017: 1-39.
- [60] 张超杰. 担子菌发酵制备米糠多糖及其活性研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2015: 1-26.
- [61] 史俊祥. 麸皮多糖微生物发酵制备及其粗制品抗氧化活性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017: 2-48.
- [62] 张倩茹. 玉米芯多糖的菌酶协同发酵工艺及其体外活性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018: 1-47.
- [63] 张帆. 小麦麸皮中低聚木糖的生物酶法制备技术研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2013: 3-29.
- [64] 王曦冉. 粗糙脉孢菌与牛粪发酵玉米芯栽培巴西菇效果的比较分析[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2019: 4-29.
- [65] 刘志刚. 稻谷加工副产物发酵生产类胡萝卜素的开发与开发[D]. 南昌: 南昌大学, 2012: 83-85.
- [66] DURSUN D, DALGIÇ A C. Optimization of astaxanthin pigment bioprocessing by four different yeast species using wheat wastes[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2016, 7: 1-6.
- [67] ERYILMAZ E B, DURSUN D, DALGIÇ A C. Multiple optimization and statistical evaluation of astaxanthin production utilizing olive pomace[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2016, 7: 224-227.
- [68] JAMAL P, AKBAR I, YUMI Z, et al. Process development for maximum lycopene production from selected fruit waste and its antioxidant and antiradical activity[J]. Journal of Food Processing and Technology, 2016, 7(4): 576-581.
- [69] 胡博涵. 利用发酵法释放麦麸中束缚型酚酸及其抗氧化活性的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015: 1-28.
- [70] 杜小燕, 吴晖, 赵超敏, 等. 泡盛曲霉发酵麦麸过程中酚类物质含量的变化与三种酶活性的相关性[J]. 现代食品科技, 2015, 31(4): 69-76.
- [71] 郭增军, 谭林, 徐颖, 等. 鞣花酸类化合物在植物界的分布及其生物活性[J]. 天然产物研究与开发, 2010, 22(3): 163-168, 184.
- [72] LIU Zun-ying, PAN Yu-rong, LI Xiao-shuang, et al. Chemical composition, antimicrobial and anti-quorum sensing activities of pummelo peel flavonoid extract[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 109: 862-868.
- [73] SIMITZIS P E, CHARISMIADOU M A, GOLIOMYTIS M, et al. Antioxidant status, meat oxidative stability and quality characteristics of lambs fed with hesperidin, naringin or α -tocopheryl acetate supplemented diets [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99 (1): 343-349.
- [74] SALEH R M, KABLI S A, AL-GARNI S M, et al. Enhancement of the total phenolic and flavonoid contents and antioxidant activity of some fruit peels by solid state fermentation of *Trichoderma* V6[J]. Cardiovascular Diseases, 2017, 29(2): 13-20.
- [75] KIM S S, PARK K J, AN H J, et al. Phytochemical, antioxidant, and antibacterial activities of fermented Citrus unshiu byproduct [J]. Food Science and Biotechnology, 2017, 26(2): 461-466.
- [76] FUKUMOTO L R, MAZZA G. Assessing antioxidant and prooxidant activities of phenolic compounds[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(8): 3 597-3 604.
- [77] LIN Sen, ZHU Qin-qin, WEN Ling-rong, et al. Production of quercetin, kaempferol and their glycosidic derivatives from the aqueous-organic extracted residue of litchi pericarp with *Aspergillus awamori* [J]. Food Chemistry, 2014, 145: 220-227.
- [78] YADAV V, YADAV P K, YADAV S, et al. α -L-Rhamno-

- sidase: A review[J]. *Process Biochemistry*, 2010, 45(8): 1 226-1 235.
- [79] LEE J H, HWANG C E, SON K S, et al. Comparisons of nutritional constituents in soybeans during solid state fermentation times and screening for their glucosidase enzymes and antioxidant properties[J]. *Food Chemistry*, 2019, 272: 362-371.
- [80] HUYNH N T, SMAGGHE G, GONZALES G B, et al. Bioconversion of Kaempferol and Quercetin glucosides from plant sources using *Rhizopus spp*[J]. *Fermentation*, 2018 (4): 102.
- [81] 邓小云, 丁登峰, 戴美红, 等. 植物多糖药理作用研究进展[J]. *中医药导报*, 2006, 12(9): 86-88.
- [82] 黄依佳, 吴剑荣, 朱莉, 等. 蓝藻多糖的分离、结构表征及抗氧化活性研究[J]. *食品与机械*, 2018, 34(2): 176-180.
- [83] 王园, 史俊祥, 段云霄, 等. 麸皮多糖微生物发酵工艺优化及其抗炎活性[J]. *食品科学*, 2018, 39(14): 192-198.
- [84] 张海芸, 贺亮, 李琴, 等. 降解对植物多糖理化性质以及生物活性影响的研究[J]. *食品与发酵科技*, 2019(3): 15-19.
- [85] 叶水英. 色素植物与植物色素的应用探析[J]. *现代农业科技*, 2018(14): 236-238.
- [86] BUZZINI P. Batch and fed-batch carotenoid production by *Rhodotorula glutinis-Debaryomyces castellii* co-cultures in corn syrup[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2001, 90 (5): 843-847.
- [87] MIURA Y, KONDO K, SAITO T, et al. Production of the carotenoids lycopene, β -carotene, and astaxanthin in the food yeast *Candida utilis* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64(4): 1 226-1 229.
- [88] NASSERI A T, RASOUL-AMINI S, MOROWVAT M H, et al. Single cell protein: Production and process[J]. *American Journal of Food Technology*, 2011, 6(2): 103-116.
- [89] 钟瑾, 刘一达, 肖愈. 辣椒籽中生物活性成分及其功能活性研究进展[J]. *食品与机械*, 2019, 35(5): 231-236.
- [90] KHAN M, KHAN S S, AHMED Z, et al. Production of single cell protein from *Saccharomyces cerevisiae* by utilizing fruit wastes[J]. *Nanobiotechnica Universale*, 2010 (2): 127-132.
- [91] DESGRANGES C, VERGOIGNAN C, LEREDEC A, et al. Use of solid state fermentation to produce *Beauveria bassiana* for the biological control of European corn borer[J]. *Biotechnology Advances*, 1993, 11(3): 577-587.

(上接第 182 页)

- [13] 刘艳, 段振华, 唐小闲, 等. 大果山楂片热风干燥特性及其动力学模型[J]. *食品工业*, 2017, 38(3): 82-87.
- [14] 宋树杰, 张舒晴, 姚谦卓, 等. 熟化甘薯片微波干燥特性及其动力学模型[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(3): 199-205.
- [15] 刘兵, 李川, 段振华, 等. 罗非鱼片渗透-真空微波干燥特性及动力学模型[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(18): 30-35.
- [16] 楚文靖, 盛丹梅, 张楠, 等. 红心火龙果热风干燥动力学模型及品质变化[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 150-155.
- [17] 巨浩羽, 杨劲松, 赵海燕, 等. 真空-蒸汽脉动烫漂预处理对百合干燥特性的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(11): 206-210, 216.
- [18] 盘喻颜, 段振华, 刘艳, 等. 火龙果片微波间歇干燥特性及其动力学研究[J]. *食品与机械*, 2019, 35(3): 195-201.
- [19] 刘旺星, 陈雄飞, 余佳佳, 等. 胡萝卜微波干燥特性及动力学模型[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(9): 68-72, 77.
- [20] 李婧怡, 段振华, 刘怡彤. 黄秋葵真空微波干燥特性及其动力学研究[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(22): 285-289.
- [21] 安可婧, 徐玉娟, 魏来, 等. 龙眼间歇真空微波干燥动力学研究[J]. *食品与机械*, 2018, 34(9): 30-36.
- [22] 李定金, 段振华, 刘艳, 等. 利用低场核磁共振技术研究调味山药片真空微波干燥过程中水分的变化规律[J]. *食品科学*, 2019, 40(5): 116-123.
- [23] 田华. 生姜微波干燥动力学模型构建[J]. *保鲜与加工*, 2020, 20(1): 127-132.

(上接第 189 页)

- [29] LYKOMITROS D, DEN BOER L, HAMOEN R, et al. A comprehensive look at the effect of processing on peanut (*Arachis spp.*) texture[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(10): 3 962-3 972.
- [30] LING Bo, OU-YANG Shao-hui, WANG Shao-jin. Radio-frequency treatment for stabilization of wheat germ: Storage stability and physicochemical properties[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 52: 158-165.

(上接第 218 页)

- [40] 刘雪梅, 陈文学, 杨铭, 等. 人参糖肽结合耐力运动对高脂血症大鼠血脂和抗氧化功能的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(17): 255-259.
- [41] 田建明, 韦康, 陈英红, 等. 人参糖肽对大鼠的抗炎和镇痛作用[J]. *中国新药杂志*, 2018, 27(14): 1 658-1 662.
- [42] 狄良娇. 人参糖肽对 A β 25-35 诱导的认知障碍大鼠抗炎与抗凋亡机制研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2015: 1-3.
- [43] LI Cai, LI Xiang-jun, MIAO Chun-sheng, et al. Ameliorative effect of ginseng glycopeptide on cross-linking of rat tail tendon collagen[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2005, 30(7): 544-547.