

竹笋加工副产物功能成分研究进展

Progress on utilization of bamboo shoot by-products and functional components

汤娇娇¹ 李珂^{1,2} 张智鑫¹

TANG Jiao-jiao¹ LI Ke^{1,2} ZHANG Zhi-xin¹

郑拾林¹ 李宗军^{1,2} 童光祥³

ZHENG Shi-lin¹ LI Zong-jun^{1,2} TONG Guang-xiang³

(1. 湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2. 湖南省食品科学与生物技术重点实验室, 湖南 长沙 410128; 3. 湖南惊石农业科技有限公司, 湖南 益阳 413400)

(1. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Hunan Province Key Laboratory of Food Science and Biotechnology, Changsha, Hunan 410128, China; 3. Hunan Jingshi Agricultural Science and Technology Co., Ltd., Yiyang, Hunan 413400, China)

摘要:对竹笋加工过程中副产物功能成分进行了总结,如竹笋预煮水、竹笋压榨汁;对废弃笋头中多糖、膳食纤维、甾醇、游离氨基酸、多酚的提取方法和功能作用机制研究等进行了综述,并指出了未来竹笋加工副产物基础研究和应用领域发展方向。

关键词:竹笋;功能成分;膳食纤维;作用机理

Abstract: The functional components of bamboo shoot by-products, such as bamboo shoots pre-cooking water, bamboo shoot juice, bamboo shoot roots in polysaccharide, sterol, free amino acids, dietary fiber, polyphenols extraction method of optimization were summarized. The function mechanism research was reviewed in detail, putting forward the future by-products from the processing of bamboo shoot development direction in basic research and applied research. It is expected to provide a reference for the utilization of bamboo shoot resources.

Keywords: bamboo shoots; function ingredients; dietary fiber; mechanisms

中国竹笋品种共有 30 余种,其中最常见的是毛竹笋(*Phyllostachys edulis*)、早竹笋(*Phyllostachys praecox*)以及哺鸡笋(*Phyllostachys iridescens*)。新鲜竹笋在采收

后很快会发生木质化、结构变硬、表面褐变,导致其食用品质严重下降甚至丧失^[1]。近年来不少研究者着力于研究采用不同贮藏措施抑制竹笋木质化进程,延长竹笋货架期^[2-3]。常见的物理处理方法主要有低温贮藏^[4-5]、气调贮藏^[6]、热处理^[7],化学处理方法主要采用褪黑素^[8]、草酸^[9]、水杨酸^[7]等抑制竹笋氧化进程。但保鲜处理仍无法解决竹笋全年供应问题,对新鲜竹笋进行加工处理仍是当前竹笋行业的主流。

竹笋加工过程中会产生以笋壳和木质化严重的笋头为主的大量竹笋副产物,后续废弃物处理容易造成环境污染问题。以毛竹笋加工成罐头产品为例,竹笋笋尖利用率仅占 30%,丢弃的笋壳及笋头约占 70%^[10]。竹笋副产物与竹笋本身营养物质含量差别较小,针对竹笋副产物中多糖、膳食纤维、游离氨基酸等进行提取条件优化,以其抗氧化性、抗炎活性、降血脂等生物活性应用于保健品、饮料等食品中具有十分广阔的前景。文章拟对竹笋加工过程中副产物的功能成分进行详细综述,并对未来竹笋加工副产物的基础研究及应用领域发展方向进行展望,旨在为减轻环境压力和提高企业经济效益提供依据。

1 竹笋产品及其主要副产物

1.1 竹笋清水罐头

竹笋罐头是新鲜竹笋经剥壳清洗、预煮、漂洗冷却、切片包装、灭菌冷却而成^[11-12]。基加工过程会产生大量的竹笋水和笋煮水。其中竹笋清水罐头加工过程中所产生的竹笋水营养成分与新鲜竹笋汁相当,可作为生产笋汁饮料的原料,为竹笋罐头加工企业废液处理开辟新道

基金项目:主要农产品质量安全检测与关键控制技术研究示范(编号:2018XK2006)

作者简介:汤娇娇,女,湖南农业大学在读硕士研究生。

通信作者:李珂(1982—),男,湖南农业大学高级实验师,博士。

E-mail: leekel4@163.com

收稿日期:2021-01-17

路^[13]。以保加利亚乳杆菌(*Lactobacillus bulgaricus*)和嗜热链球菌(*Streptococcus thermophilus*)为菌种制成发酵剂,对雷竹笋清水罐头竹笋水进行发酵处理,所得雷笋乳酸菌饮料凝胶状态良好、组织光滑细腻,具有浓郁竹笋清香^[14]。

1.2 竹笋笋干

传统笋干制备通常是由新鲜竹笋预煮后经过压榨,采用太阳直射晒干,水分充分排除后进行浸泡复水即可烹饪食用,干燥过程中的酶促和非酶促反应导致竹笋表面褐变、营养成分受损^[15]。针对竹笋笋干制备过程中压榨环节产生的竹笋汁废弃物,通过罗汉果汁提取液进行混合复配,得到酸甜适中、口感良好的高品质竹笋饮料^[16]。此外,林丽静等^[17]将竹笋全笋进行熟化、脱苦去涩、切片干燥后与五谷粉进行混合复配造粒,得到营养丰富、携带方便的冲泡形特殊竹笋风味固体饮料。

1.3 发酵竹笋

相较于上述两种加工方式,发酵竹笋则更具地方特色。例如,傣味酸笋一直深受云南地区居民欢迎,但制作原料龙竹竹笋自身苦味成为推广难题,而利用乳酸菌发酵可以改善酸笋不良风味,同时延长产品货架期。酸笋在清水包装贮藏过程中易出现笋体失水的情况^[18],利用乳酸菌制备发酵液代替清水,既为发酵竹笋添加特殊酸香味,同时解决了笋体失水等产品品质问题^[19]。由于竹笋头含有较高含量的粗纤维,不易被微生物降解导致口感粗糙不适,因此发酵竹笋制作过程中,通常将笋头舍弃,采用简单填埋方式进行处理,造成一定资源浪费。将竹笋笋头可食用部分制成 0.6~0.7 cm 厚度的笋片,可得到风味好、色泽自然的低糖笋脯产品^[20],这也为竹笋笋头的利用提供了方向。

2 竹笋副产物功能成分提取利用

有研究^[21]表明,笋壳和笋头的营养成分组成与新鲜竹笋相似,且其纤维素和木质素含量显著高于新鲜竹笋,而竹笋经过长时间浸泡,营养成分部分溶于竹笋水中,这种浸泡竹笋水与鲜榨竹笋汁含量相当。通过对竹笋副产物中多糖、膳食纤维、多酚类化合物以及甾醇等功能成分进行提取再利用^[22-24],可深入挖掘竹笋副产物功能价值。

2.1 多糖

竹笋多糖的常用提取方法主要有热水提取法、超声辅助提取法、微波辅助提取法和酶辅助提取法。但这些提取方法还存在提取工序复杂、自动化程度低和效率低的缺点,影响了其产业化应用,而目前有关竹笋多糖提取新工艺或方法的研究甚少。Chen 等^[25]研究发现,采用快速溶剂萃取法,提取温度 126 ℃,循环次数 2 次,单次循环提取时间 22 min,竹笋多糖得率最高达(9.96 ±

0.39)%,显著高于热水提取法的,且提取物抗氧化能力较强,提取时间较短,易于工业化操作。有研究^[26]表明,竹笋笋头多糖含量显著高于笋尖及中部,可作为供能物质促进竹笋的进一步生长。对竹笋笋头进行多糖提取后喂养中华绒螯蟹,能够有效提高中华绒螯蟹血细胞总数、超氧化物歧化酶活性等免疫指标^[27]。综上,对竹笋笋头中多糖进行提取后,可添加在饲料中作为免疫增强剂。

2.2 膳食纤维

膳食纤维虽然不能被人体吸收利用,但在维护肠道微生物群稳定性方面发挥重要作用,被列为继碳水化合物、蛋白质、脂肪、水、矿物质、维生素六大营养素之后的“第七类营养素”。竹笋及其副产物中膳食纤维含量丰富,以发酵法、酶法为主的生物提取,以酸碱法和有机试剂法为主的化学提取是目前常用的提取方法。其中发酵法通常是利用乳酸杆菌属(*Lactobacillus*)对竹笋笋头进行发酵处理,最佳发酵工艺参数为接种量 4%,发酵温度 40 ℃,发酵时间 24 h,料液比 1:10 (g/mL),以此方法制备的总膳食纤维得率最高为(80.2 ± 0.6)%,其溶胀力、持水力、阳离子交换力和结合水力明显改善^[28]。化学法提取竹笋副产物中膳食纤维主要通过酸性或碱性溶液提取,酸性提取对膳食纤维提取率影响大小是 pH 值 > 料液比 > 提取温度 > 提取时间,碱液提取对膳食纤维提取率影响大小是 pH 值 > 提取温度 > 料液比 > 提取时间,显然,pH 值对膳食纤维的提取率具有较大影响^[29]。经超临界流体萃取竹笋油后的竹笋残渣,对其进行酸碱浸提不溶性膳食纤维,可使蛋白质降解,大分子糖类水解,但此方法制备膳食纤维得率还较低,仍需进一步改进工艺^[30]。未来膳食纤维的提取方法还将朝着提取率高、纯度高、工艺简单、投资少、污染少和耗能少等方向发展。对笋头膳食纤维进行提取后,添加到酸奶中可有效提高酸奶黏度和持水力,减少乳清析出,且使用粒径小的膳食纤维对酸奶口感影响最小^[31]。综上,笋头膳食纤维提取后可添加到食品中,提升食用品质。

2.3 植物甾醇

竹笋中含有丰富的植物甾醇,如 β -谷甾醇、豆甾醇和芸苔甾醇^[32],经驯化后黑曲霉发酵的竹笋笋头中总甾醇含量从(532.3 ± 19.3) mg/100 g 增加到(1 156.0 ± 32.4) mg/100 g,其中 β -谷甾醇、豆甾醇含量相应提高近两倍^[24]。与传统正己烷萃取相比,超临界萃取技术在竹笋甾醇提取效率(91.4%)、甾醇总量提取(265.3 mg/g)以及主要单体含量上远高于正己烷萃取的^[10]。吕国提等^[33]以毛竹笋笋头为原料,采用有机试剂提取法、超声辅助提取法、微波辅助提取法、酶解辅助提取法和超临界 CO₂ 萃取法进行 β -谷甾醇提取,结果表明微波辅助提取法耗时短、提取率高(2.72%)、能耗低,可用于实验室小规模使用。超声波辅助提取笋头甾醇可在料液比 1:

31 (g/mL), 超声功率 410 W, 超声时间 10.5 min, 颗粒粒径 86 目的条件下得到总甾醇提取率为 0.317%, β -谷甾醇提取率为 0.249%^[34]。

2.4 游离氨基酸

竹笋中蛋白质以低分子量组蛋白为主, 游离氨基酸含量丰富, 根据竹笋品种的不同有 7~8 种游离氨基酸为人体必需氨基酸(赖氨酸、丝氨酸、蛋氨酸、组氨酸、亮氨酸、异亮氨酸和苯丙氨酸)^[35]。采用超滤和反渗透法^[36]对水煮笋加工过程中产生的废液进行提取分离, 可得到酪氨酸、丝氨酸、谷氨酸及赖氨酸等一系列人体必需氨基酸, 可用于功能性食品、饮品和调味品中。将竹笋烫漂液、罐内液、压榨汁以及笋煮液浓缩后超滤, 运用响应面法得到最佳条件为温度 33.25 °C, 料液浓度 6.92%, 压力 0.811 MPa, 此条件下的膜通量为 9.758 L/(m²·h), 可得到分子量 <5 kDa 的竹笋寡肽^[37]。涂佳等^[38]利用盐酸对笋头进行水解, 活性炭脱色, 浓缩结晶后采用电位滴定法提取酪氨酸, 其 L-酪氨酸提取率稍低于动物样品, 竹笋头成本低廉, 来源广泛, 更适合于工业化生产。

2.5 多酚

近年来, 有不少学者以竹为材料对多酚类及黄酮类化合物的提取工艺进行了研究, 但大部分研究是针对竹叶进行, 其中包括坤旭峰等^[39]、王紫薇等^[40]采用乙醇萃取的方法进行竹叶总黄酮提取工艺研究。针对笋头总黄酮提取方法优化, 得到最佳提取工艺为超声功率 200 W, 乙醇提取剂浓度 60%, 浸提温度 80 °C, 时间 65 min, 料液比 1:30 (g/mL), 此条件下总黄酮提取率较高达 (4.2±0.1) mg/g^[41]。竹笋副产物中多酚提取方法仍处于初级阶段, 有待进一步研究与分析, 以提高笋头附加值, 开拓产品应用新领域。

竹笋副产物功能成分提取方法的比较与评价见表 1。

3 竹笋副产物功能成分作用

竹笋及其副产物中富含各种功能成分如维生素(维生素 A、维生素 B₁、维生素 B₂、维生素 B₆、维生素 C、维生素 E)、氨基酸和矿物质, 以及植物甾醇、多酚化合物等。鉴于这些关键功能成分, 竹笋被证明具有抗氧化性、降血脂、益生元活性、抗糖尿病、抗肥胖、抗炎以及抗高血压等作用^[35]。

3.1 抗氧化性

竹笋的抗氧化性主要由于多酚类化合物以及抗坏血酸等对 DPPH、ABTS 以及 FRAP 等自由基的清除及抗氧化能力^[47]。Park 等^[48]在毛竹笋中鉴定出 8 种酚酸类物质: 原儿茶酸、对羟基苯甲酸、儿茶素、咖啡酸、绿原酸、丁香酸、对香豆酸以及阿魏酸, 提取物中抗氧化活性较高且具有一定浓度依赖性。竹笋中硒、锌、铜等矿物质是细胞抗氧化系统重要组成因子, 缺硒会大大降低谷胱甘肽过

氧化物酶活性, 导致过氧化损伤^[49]。竹笋黄酮类化合物及甾醇有强抗氧化能力, 当两者浓度相同时, 总甾醇对 DPPH 自由基的清除能力要优于总黄酮, 3.00 mg/mL 的总甾醇对 DPPH 自由基的清除能力相当于 5.00 mg/mL 的总黄酮^[50]。目前, 天然抗氧化剂在食品、临床应用上的需求量较大, 而生长迅速、抗氧化成分含量多的竹类植物用于生产天然抗氧化剂的前景十分良好。

3.2 降血脂能力

甾醇类化合物是一类公认的降胆固醇功能因子, FDA 提出, 每天至少摄入 1.3 g 植物甾醇或 3.4 g 植物甾烷醇才能起到降血脂的作用, 而植物甾醇中谷甾醇降血脂效果最好^[51]。研究^[10]表明, 竹笋甾醇提取物具有较好的降脂和调节脂质代谢活性, 且竹笋甾醇提取物中所含的不饱和脂肪酸(亚油酸、亚麻酸)具有优良降低血清甘油三酯作用。竹笋笋头作为竹笋加工过程中的大宗废弃物, 其中甾醇类化合物含量丰富, 降血脂作用显著, 但其作用机理及代谢机理还需深入探究, 后续可从竹笋笋头出发, 以甾醇类化合物为中心, 采用动物试验探究其作用机理。

3.3 益生元活性

竹笋纤维能够缓解高脂饮食诱导小鼠产生的胰岛素抵抗, 与纯晶体纤维相比, 竹笋膳食纤维能够激活 Akt 磷酸化通路, 诱导 PGC-1 α 表达升高, AMP K 以及 p38 磷酸化增加^[52]。同时, 竹笋的益生元活性及抗肥胖功能也是竹笋膳食纤维通过调节小鼠肠道微生物群起作用^[53], 与 Chen 等^[54]通过超声及酶促方法提取竹笋笋头中多糖来促进益生菌增殖和提高短链脂肪酸(SCFAs)含量, 从而表现出更好益生菌活性的研究结果相吻合。鉴于竹笋具有良好的益生元活性, 且其具体作用机理的研究较少, 说明其具有广阔的开发空间和应用前景, 后续可结合多组学研究思路, 从基因表达、蛋白活性变化、代谢产物变化以及肠道微生物等方面系统探究其益生元活性。

3.4 抗炎活性

植物甾醇是细胞膜重要组成成分, 与胆固醇在动物体内作用相类似, 医学上, 植物甾醇常被用作皮肤细胞生长促进剂、抗炎剂以及伤口愈合剂^[55]。竹笋生物碱能抑制细胞外调节蛋白激酶(ERK)信号, 对 RAW 264.7 细胞具有抗炎作用^[56]。Lu 等^[57]采用基因芯片技术评价竹笋油(利用超临界二氧化碳获得的富含植物甾醇提取物)发现, 竹笋甾醇通过下调白细胞介素 11、趋化因子、TGF 配体、成纤维细胞生长因子和肿瘤坏死因子及相应受体基因起到对试验性小鼠非细菌性前列腺炎的保护作用。针对竹笋壳中黄酮类化合物进行提取试验证明, 黄酮类化合物对细菌有强抑制作用, 其生理活性与竹叶黄酮相当^[58]。

3.5 降压降脂能力

刘连亮^[37]从竹笋副产物浓缩液中分离得到一种二

肽,通过动物试验发现,100 mg/(kg·d)竹笋废液提取物的降压效果与 10 mg/(kg·d)阳性对照药物 Captopril 相近,利用超高效液相色谱—质谱(UPLC-MS)技术确定该作用二肽为天冬氨酸—酪氨酸(Asp-Try),同时还发现,竹笋废液提取物与竹茹三萜复配能够显著升高血清 NO 水平,增加肝脏 NOS 活性,具有较强协同增效作用,对自发性高血压模型大鼠有显著降压及抗氧化应激效果。竹笋废液中含有的类黄酮化合物能够增加肝脏中GSH-Px

表 1 竹笋副产物功能成分提取方法的比较与评价

Table 1 Extraction methods and evaluation of functional component from bamboo shoot by-products

提取成分	原料	提取方法	提取条件	结果	优缺点
多糖	笋头	快速溶剂萃取法 ^[42]	料液比 10 : 1 (mL/g)、温度 49 ℃、超声功率 240 W、时间 40 min	产物得率 8.76%	就产物得率来看,微波—超声辅助提取法最高,但其动力消耗大,不适合企业处理大批量样品;传统热水浸提法时间长,产物得率相对较低;酶解法操作复杂,要求酶活较高,成本偏高;相比之下,快速溶剂萃取法具有时间短,产物得率高,成本较低的优点
		微波—超声辅助提取法 ^[43]	料液比 30 : 1 (mL/g)、水浴温度 95 ℃、水浴时间 2.0 h、超声功率 600 W、微波功率 300 W、微波—超声波时间 30 min	产物得率 10.05%	
		传统热水浸提法 ^[42-43]	料液比 30 : 1 (mL/g)、93 ℃ 恒温水浴锅处理 2.0 h	产物得率 7.61%	
			料液比 20 : 1 (mL/g)、沸水浴提取 4 h	产物得率 7.15%	
		酶解法 ^[25]	料液比 20 : 1 (mL/g)、 <i>m</i> 纤维素酶 : <i>m</i> 果胶酶 : <i>m</i> 木瓜酶 = 1 : 1 : 1、质量分数 1%、温度 50 ℃、时间 80 min	产物得率 8.32%	
膳食纤维	品质不佳笋肉及笋头	发酵法 ^[44]	根霉、原料粉 20 目、料液比 15 : 1 (mL/g)、温度 34 ℃、时间 32 h	产物得率 54.53%	发酵法制备竹笋笋头中膳食纤维具有产物得率高、条件控制简单的优点,但发酵时间较长;化学法处理时间较短,但化学试剂的残留量及消耗量大,成本高
	笋头及笋壳	化学法 ^[29]	酸液提取 pH 值为 2、料液比 10 : 1 (mL/g)、温度 50 ℃、时间 100 min	产物得率 47.98%	
			碱液提取 pH 值为 12、料液比 20 : 1 (mL/g)、温度 70 ℃、时间 100 min	产物得率 45.26%	
β-谷甾醇	笋头	有机试剂提取法 ^[33]	95%乙醇萃取、时间 20 min、料液比 15 : 1 (mL/g)、温度 55 ℃、	产物含量 3.65%	有机试剂提取法产物含量较高;超声辅助提取法具有提取率高、能耗低等优点,微波辅助萃取所需时间短,但在甾醇提取剂选择上仍有待商讨
		超声辅助提取法 ^[45-46]	甲醇萃取、超声功率 360 W、料液比 10 : 1 (mL/g)、时间 30 min	产物含量 2.88%	
			正己烷萃取、原料粉 86 目、料液比 30 : 1 (mL/g)、超声功率 410 W、时间 10.5 min	产物含量 0.25%	
		微波辅助提取法 ^[45]	甲醇萃取、微波功率 480 W、料液比 10 : 1 (mL/g)、时间 60 s	产物含量 2.72%	
游离氨基酸	竹笋预煮水及笋汁	超滤、反渗透法 ^[36]	/	酪氨酸、丝氨酸、谷氨酸及赖氨酸等多种人体必需氨基酸	超滤、反渗透法操作复杂,不利于工厂大规模使用;水解法耗时较长且提取率低,仍需进一步研究
	笋头	水解法 ^[38]	料液比 7 : 1 (mg/mL)、pH 值 5.6、时间 60 min	提取率 0.109%; 纯度 90.6%	
多酚	笋头	超声辅助提取法 ^[41]	60% 乙醇萃取、料液比 1 : 30 (g/mL)、超声功率 200 W、时间 65 min、温度 85 ℃	提取率 (4.2 ± 0.1) mg/g	笋头中多酚提取有待进一步研究与分析

活性和肝脏 SOD 酶活力,抑制血浆中过氧化脂质的升高,从而降低血浆中 LDL-c 的含量,体现出对脂质的调节作用。综上,竹笋副产物浓缩液中含有较多对人体健康有益作用的营养物质,尤其体现在降压降脂能力上。

4 结论及展望

在未来的基础研究方面,可从竹笋副产物的生物活性成分入手,结合多组学研究思路探索其对机体的生物活性,多方面系统阐明竹笋副产物对机体的功能。 β -谷甾醇与 *Gemcitabine* (治疗胰腺癌药物) 的协同作用,诱导 G0/G1 期细胞凋亡,抑制 NF- κ B 活性,增加 Bax 蛋白表达同时降低 Bcl-2 蛋白表达,从而有效抑制胰腺癌细胞生长^[59]。同时甾醇所具有的抗氧化活性和降压降脂能力表明,竹笋副产物中丰富的甾醇类物质具有非常良好的食疗价值,将竹笋副产物重新利用,开发为一种新的食疗方案,对特定人群进行补充其中生物活性物质具有广阔发展前景。竹笋副产物中膳食纤维能够调节肠道微生物环境,增加有益菌生成^[60],说明在高度复杂和竞争的肠道生态系统中,纤维和微生物的关系可以用来直接针对特定的微生物群活性。竹笋副产物可成为膳食纤维的良好来源,通过使用竹笋副产物加工产品能够有效保持肠道微生物群健康。

在未来的应用研究方面,竹笋副产物中各营养成分提取方法还需进一步改进,未来发展方向必然朝着提取率高、纯度高、工艺简单以及耗能少等方向深入。甾醇提取方法目前还存在提取溶剂残留问题,乙醇、正己烷等有机溶剂对甾醇的生物活性影响较大,未来竹笋副产物中甾醇类化合物可采用超临界 CO₂ 萃取技术^[61] 进行提取再利用,其中溶剂选择 CO₂ 具有来源广、无污染、无残留等优点。亚临界水萃取法^[62] 是一种良好代替酸碱化学试剂萃取膳食纤维的方法,在 120~350 °C 的亚临界温度范围内,压力为 2~15 MPa 的高压范围内进行提取,增加水溶剂溶解度。溶剂使用无毒、便宜的水资源,且不需要进行分离萃取膳食纤维过程,能源消耗相应也降低。

竹笋中膳食纤维含量较高,但是针对竹笋不同部位的膳食纤维含量研究目前尚缺,其形态及结构特征研究上未加以开发相应产品,后续可从竹笋不同部位的膳食纤维着手研究,对竹笋头中不溶性膳食纤维进行改性,进一步扩大其利用途径。此外,在饮料、保健食品开发方向上,生物转化技术具有成本低、效率高、污染少等优点,故运用该手段对竹笋甾醇进行深入研究开发,以及利用微生物发酵法高产量低成本制备竹笋甾醇,可为相关企业的产品研发提供思路。

参考文献

- [1] LI Dong, JARUKITT L, LI Li, et al. Hydrogen peroxide accelerated the lignification process of bamboo shoots by activating the phenylpropanoid pathway and programmed cell death in postharvest storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 153: 79-86.
- [2] 董春风, 赵一鹤. 竹笋采后木质化研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(13): 16-20.
- [3] DONG Chun-feng, ZHAO Yi-he. Research progress on post-harvest lignification of bamboo shoots [J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(13): 16-20.
- [4] 周大祥, 汪开拓, 匡文玲, 等. 果糖处理对冷藏雷竹笋品质和木质化的影响及其调控机制研究[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(15): 175-183.
- [5] ZHOU Da-xiang, WANG Kai-tuo, KUANG Wen-ling, et al. Effects of fructose treatment on quality and lignification of bamboo shoots (*Phyllostachys praecox*) during cold storage and its regulation mode involved[J]. *Food & Fermentation Industries*, 2020, 46(15): 175-183.
- [6] ZHENG Jian, LI Shen-ge, ALI M, et al. Effects of UV-B treatment on controlling lignification and quality of bamboo (*Phyllostachys prominens*) shoots without sheaths during cold storage[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(5): 1 387-1 395.
- [7] SONG Li-li, CHEN Hang-jun, GAO Hai-yan, et al. Combined modified atmosphere packaging and low temperature storage delay lignification and improve the defense response of minimally processed water bamboo shoot[J]. *Springer International Publishing*, 2013, 7(1): 147.
- [8] 陈学红, 秦卫东, 马利华, 等. 高氧气调包装对绿芦笋木质化的影响[J]. *食品科学*, 2009, 30(22): 350-353.
- [9] CHEN Xue-hong, QIN Wei-dong, MA Li-hua, et al. Effect of high oxygen modified atmosphere packaging on lignification of green asparagus[J]. *Food Chemistry*, 2009, 30(22): 350-353.
- [10] LUO Zi-sheng, FENG Si-min, PANG Jie, et al. Effect of heat treatment on lignification of postharvest bamboo shoots (*Phyllostachys praecox* f. *prevernalis*.) [J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(4): 2 182-2 187.
- [11] LI Chang-tao, SUO Jin-wei, XUAN Ling-ling, et al. Bamboo shoot-lignification delay by melatonin during low temperature storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 156: 1 109-1 118.
- [12] ZHENG Jian, LI Shen-ge, XU Yan-hong, et al. Effect of oxalic acid on edible quality of bamboo shoots (*Phyllostachys prominens*) without sheaths during cold storage[J]. *LWT*, 2019, 109: 194-200.
- [13] 陆柏益. 竹笋中甾醇类化合物的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 62-101.
- [14] LU Bo-yi. Studies on phytosterols in bamboo shoot[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 62-101.
- [15] 刘翔, 叶麟, 申光辉, 等. 响应面法优化清水竹笋软罐头加工工艺研究[J]. *食品工业*, 2018, 39(5): 119-123.
- [16] LIU Xiang, YE Lin, SHEN Guang-hui, et al. Process optimization of soft canned bamboo shoots by response surface methodology[J]. *Food Industry*, 2018, 39(5): 119-123.
- [17] 肖开恩, 何金兰, 钟美, 等. 即食竹笋罐头的研制[J]. *食品与机械*, 2003, 19(2): 23-24.

- XIAO Kai-en, HE Jin-lan, ZHONG Mei, et al. Preparation of ready-to-eat bamboo-shoot can[J]. Food & Machinery, 2003, 19(2): 23-24.
- [13] 王平. 笋汁饮料的开发与加工工艺[J]. 食品与机械, 1997, 13(2): 18.
- WANG Ping. Development and processing technology of bamboo shoot juice beverage[J]. Food & Machinery, 1997, 13(2): 18.
- [14] 曹小敏, 陆胜民. 雷笋乳酸菌饮料的加工工艺研究[J]. 江西农业学报, 2005(3): 51-54.
- CAO Xiao-min, LU Sheng-min. Study on processing technology of bamboo shoot drink through fermentation of lactobacilli[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2005(3): 51-54.
- [15] 吕朝燕, 高智席, 刘德粉, 等. 盐量对盐煮干制方竹笋品质的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 183-188, 216.
- LU Zhao-yan, GAO Zhi-xi, LIU De-fen, et al. Effect of salt amount on the quality of chimonobambusa quadrangularis shoots dried by salt boiling[J]. Food & Machinery, 2020, 36(8): 183-188, 216.
- [16] 王睿, 孙鹏, 李贵节, 等. 响应面法优化方竹笋汁饮料工艺研究[J]. 食品科技, 2015, 40(2): 114-119.
- WANG Rui, SUN Peng, LI Gui-jie, et al. Formulation optimization of chimonobambusa quadrangularis bamboo shoots beverage by response surface methodology[J]. Food Science & Technology, 2015, 40(2): 114-119.
- [17] 林丽静, 黄晓兵. 竹笋固体饮料加工技术[J]. 热带农业工程, 2016, 40(Z1): 29-31.
- LIN Li-jing, HUANG Xiao-bing. Bamboo shoots solid beverage processing technology[J]. Tropical Agricultural Engineering, 2016, 40(Z1): 29-31.
- [18] 邱坚. 傣味酸笋的加工工艺[J]. 竹子研究汇刊, 2003(3): 59-61.
- QIU Jian. Processing technique of dai flavor sour bamboo shoots[J]. Journal of Bamboo Research, 2003(3): 59-61.
- [19] 李梅. 竹笋发酵保鲜关键技术研究及产品开[D]. 成都: 西华大学, 2018: 80-102.
- LI Mei. Research on key technology of bamboo shoot fermentation and fresh-keeping and product development[D]. Chengdu: Xihua University, 2018: 80-102.
- [20] 涂佳, 艾文胜, 刘翔博, 等. 毛竹春笋低糖笋脯的加工研究[J]. 湖南林业科技, 2012, 39(5): 51-53.
- TU Jia, AI Wei-sheng, LIU Xiang-bo, et al. Processing technology of lower sugar preserved spring shoot of Phyllostachys pubescens[J]. Hunan Forestry Science and Technology, 2012, 39(5): 51-53.
- [21] 张帅, 郑宝东, 林良美, 等. 笋壳多糖的微波-超声波联合辅助提取工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品科学, 2015, 36(16): 72-76.
- ZHANG Shuai, ZHENG Bao-dong, LIN Liang-mei, et al. Microwave-Ultrasonic assisted extraction and antioxidant activity of polysaccharides from bamboo shoot shell[J]. Food Chemistry, 2015, 36(16): 72-76.
- [22] 林良美. 笋壳活性膳食纤维的提取及降糖降脂功能特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016: 45-89.
- LIN Liang-mei. Study on extraction of active dietary fiber from bamboo shoot shell and its hypoglycemic and lipid-lowering functions[D]. Fuzhou: Fuzhou Agriculture and Forestry University, 2016: 45-89.
- [23] 杨乐, 王洪新. 笋壳黄酮分离纯化工艺及其抗氧化性[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(8): 184-189.
- YANG Le, WANG Hong-xin. Extraction, purification and antioxidant of total flavonoids from bamboo shell[J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 36(8): 184-189.
- [24] 陈如寿. 竹笋残渣中植物甾醇的制取及发酵工艺研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2012: 45-66.
- CHEN Ru-shou. Study on preparation and fermentation of phytosterol from bamboo shoot residue[D]. Chongqing: Chongqing Technology and Business University, 2012: 45-66.
- [25] CHEN Guang-jing, FANG Chu-chu, RAN Chun-xia, et al. Comparison of different extraction methods for polysaccharides from bamboo shoots (*Chimonobambusa quadrangularis*) processing by-products[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 130: 903-914.
- [26] 李荣, 刀定伟, 向明欢, 等. 版纳甜龙竹笋不同部位营养特征分析[J]. 林业科技开发, 2010, 24(4): 76-78.
- LI Rong, DAO Ding-wei, XIANG Ming-huan, et al. Analysis on nutrient quantity in different parts of dendrocalamus hamiltonii shoots[J]. Development of Forestry Science and Technology, 2010, 24(4): 76-78.
- [27] 李义, 俞泉宇, 陈亚军, 等. 竹笋多糖对中华绒螯蟹免疫调节作用的研究[J]. 饲料工业, 2014, 35(12): 16-20.
- LI Yi, YU Quan-yu, CHEN Ya-jun, et al. Studies on immunoregulation effect of bamboo shoots polysaccharide on eriocheir sinensis[J]. Feed Industry, 2014, 35(12): 16-20.
- [28] 李璐, 徐灵芝, 黄亮, 等. 发酵法制备雷竹笋膳食纤维的工艺研究[J]. 中国酿造, 2016, 35(4): 176-180.
- LI Lu, XU Ling-zhi, HUANG Liang, et al. Dietary fiber preparation by Phyllostachys praecox fermentation [J]. China Brewing, 2016, 35(4): 176-180.
- [29] 王昕岑, 张静, 王淑培, 等. 化学法提取竹笋加工废弃物中膳食纤维的研究[J]. 武夷学院学报, 2017, 36(6): 23-29.
- WANG Xin-cen, ZHANG Jing, WANG Shu-pei, et al. Study on chemical extraction of dietary fiber from bamboo shoot processing waste[J]. Journal of Wuyi University, 2017, 36(6): 23-29.
- [30] 陈龙. 方竹笋残渣毛油和膳食纤维提取工艺研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2014: 59-98.
- CHEN Long. Study on extraction technology of crude oil and dietary fiber from bamboo shoot residue[D]. Chongqing: Chongqing Technology and Business University, 2014: 59-98.
- [31] 方东亚. 改性笋头膳食纤维的结构、功能性质及在酸奶中的应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2019: 23-45.
- FANG Dong-ya. Study on the structure and function properties of modified bamboo shoot head dietary fiber and its application in

- yoghurt[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019: 23-45.
- [32] ZHENG Xu-xun, CHEN Ru-shou, YIN Zhong-yi, et al. Phytosterols elevation in bamboo shoot residue through laboratorial scale solid-state fermentation using isolated aspergillus niger CTBU[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2014, 172(8): 4 078-4 083.
- [33] 吕国提, 林丽静, 朱冰清, 等. 毛竹笋笋头中 β -谷甾醇不同提取方法的比较研究[J]. 农业机械, 2012(27): 111-114.
- LU Guo-ti, LIN Li-jing, ZHU Bing-qing, et al. Comparative study on different extraction methods of β -sitosterol from the head of *Phyllostachys hirsute* [J]. Agricultural Machinery, 2012 (27): 111-114.
- [34] 陈如寿, 殷钟意, 郑旭煦, 等. 响应面法优化竹笋剩余物甾醇的超声辅助提取工艺[J]. 食品科学, 2012, 33(14): 85-90.
- CHEN Ru-shou, YIN Zhong-yi, ZHENG Xu-xun, et al. Optimization of Ultrasonic-Assisted extraction process from bamboo shoot scraps by response surface analysis[J]. Food Chemistry, 2012, 33 (14): 85-90.
- [35] WANG Yu-lin, CHEN Jia, WANG Da-mao, et al. A systematic review on the composition, storage, processing of bamboo shoots: Focusing the nutritional and functional benefits [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 71: 1 041-1 053.
- [36] 张英. 毛竹笋加工剩余物生物活性物质提取技术研究[Z]. 福建省, 福建建瓯颖食物产有限公司, 2005-06-16.
- ZHANG Ying. Study on the extraction technology of bioactive substances from the processing residues of bamboo shoots[Z]. Fujian Province, Fujian Jian 'ou Ying Food Production Co., Ltd., 2005-06-16.
- [37] 刘连亮. 竹笋降血压降脂有效成分及其活性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 62-88.
- LIU Lian-liang. Study on the antihypertensive and lipid-lowering active components of bamboo shoots[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 62-88.
- [38] 涂佳, 艾文胜, 刘翔博, 等. 麻竹笋干提取 L-酪氨酸实验[J]. 湖南林业科技, 2013, 40(5): 48-50.
- TU Jia, AI Wen-sheng, LIU Xiang-bo, et al. Extraction of L-tyrosine from dried bamboo shoots of *dendrocalamus laliforus* [J]. Hunan Forestry Science and Technology, 2013, 40(5): 48-50.
- [39] 坤旭锋, 吴章桥, 卓蕾, 等. 梁山慈竹竹叶黄酮提取工艺的初步研究[J]. 现代园艺, 2020, 43(13): 13-14.
- KUN Xu-feng, WU Zhang-qiao, ZHUO Lei, et al. A preliminary study on the extraction technology of flavonoids from bamboo leaves of *Arachnostachys liangshanensis* [J]. Modern Gardening, 2020, 43(13): 13-14.
- [40] 王紫薇, 涂明锋, 叶文峰, 等. 淡竹叶黄酮提取工艺优化及抗氧化性研究[J]. 山东化工, 2020, 49(2): 17-20.
- WANG Zi-wei, TU Ming-feng, YE Wen-feng, et al. Study on optimization of extraction technology and antioxidation of flavonoids from bamboo leaves[J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(2): 17-20.
- [41] 张静, 王淑培, 阙茂垚, 等. 竹笋加工废弃物中总黄酮的提取工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(1): 23-27.
- ZHANG Jing, WANG Shu-pei, QUE Mao-yao, et al. Extraction technology of total flavonoids from bamboo shoot processing waste[J]. Food Research & Development, 2017, 38(1): 23-27.
- [42] CHEN Guang-jing, BU Fan, CHEN Xu-hui, et al. Ultrasonic extraction, structural characterization, physicochemical properties and antioxidant activities of polysaccharides from bamboo shoots (*Chimonobambusa quadrangularis*) processing by-products[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 112: 208-216.
- [43] 陈灿辉, 林彤, 江文韬, 等. 响应面法优化笋头多糖微波-超声波辅助提取工艺[J]. 食品工业科技, 2020, 41(16): 201-206, 291.
- CHEN Can-hui, LIN Tong, JIANG Wen-tao, et al. Optimization of microwave-Ultrasonic assisted extraction polysaccharides from basal part of bamboo by response surface methodology[J]. Food Industry Science & Technology, 2020, 41(16): 201-206, 291.
- [44] 李状, 朱德明, 李积华, 等. 发酵法制备竹笋下脚料膳食纤维的研究[J]. 热带作物学报, 2014, 35(8): 1 638-1 642.
- LI Zhuang, ZHU De-ming, LI Ji-hua, et al. Study on preparation of dietary fiber from bamboo shoot waste by fermentation[J]. Journal of Tropical Crops, 2014, 35(8): 1 638-1 642.
- [45] 吕国提. 毛竹笋头中 β -谷甾醇的提取分离研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013: 35-50.
- LU Guo-ti. Study on extraction and isolation of β -sitosterol from the head of bamboo shoot[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013: 35-50.
- [46] 林丽静, 吕国提, 李积华, 等. 响应面法优化毛竹笋笋头中 β -谷甾醇提取工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(22): 269-271, 275.
- LIN Li-jing, LU Guo-ti, LI Ji-hua, et al. Optimization of extraction process of β -sitosterol from the head of *Phyllostachys hirsuta* by response surface methodology[J]. Food Industry Science & Technology, 2012, 33(22): 269-271, 275.
- [47] GUALTIERO M, FRANCESCA C, MADDALENA C, et al. Optimization of microwave: Assisted extraction of antioxidants from bamboo shoots of *Phyllostachys pubescens* [J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2020, 25(1): 358-369.
- [48] PARK E, JHON D. The antioxidant, angiotensin converting enzyme inhibition activity, and phenolic compounds of bamboo shoot extracts[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 43 (4): 655-659.
- [49] NIRMALA C, BISHT M, BAJWA H, et al. Bamboo: A rich source of natural antioxidants and its applications in the food and pharmaceutical industry [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 77: 519-526.
- [50] 彭昕, 黄亮, 王平, 等. 雷竹笋总黄酮和总甾醇的抗氧化性与抑菌性[J]. 经济林研究, 2017, 35(3): 179-185.
- PENG Xin, HUANG Liang, WANG Ping, et al. Antioxidant and

- bacteriostatic activities of total flavonoids and total sterols in the bamboo shoots of Thunb[J]. Economic Forest Research, 2017, 35(3): 179-185.
- [51] SHINNICK F L. FDA letter regarding enforcement discretion with respect to expanded use of an interim health claim rule about plant sterol/stanol esters and reduced risk of coronary heart disease[J/OL]. Food and Drug Administration. (2003-02-14) [2021-03-25]. <https://www.fda.gov/>.
- [52] LI Xiu-fen, FU Bai-ting, GUO Juan, et al. Bamboo shoot fiber improves insulin sensitivity in high-fat diet-fed mice[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 49: 156-172.
- [53] LI Xiu-fen, GUO Juan, JI Kai-long, et al. Bamboo shoot fiber prevents obesity in mice by modulating the gut microbiota[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 112-123.
- [54] CHEN Guang-jing, CHEN Xu-hui, YANG Bing, et al. New insight into bamboo shoot (*Chimonobambusa quadrangularis*) polysaccharides: Impact of extraction processes on its prebiotic activity[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 367-377.
- [55] 于学珍, 马世平, 李海涛, 等. 植物甾醇凝胶促进烧伤创面愈合及抗炎作用[J]. 中国天然药物, 2007(2): 130-133.
- YU Xue-zhen, MA Shi-ping, LI Jin-tao, et al. Promoting action of wound healing and antiinflammation action of phytosterol gel[J]. Chinese Natural Medicine, 2007(2): 130-133.
- [56] REN Yan, MA Yi-sha, ZHANG Zhi-dan, et al. Total alkaloids from bamboo shoots and bamboo shoot shells of *Pleioblastus amarus* (Keng) Keng f. and their anti-inflammatory activities [J]. Molecules, 2019, 24(15): 1 102-1 114.
- [57] LU Bai-yi, CAI Hua-fang, HUANG Wei-su, et al. Protective effect of bamboo shoot oil on experimental nonbacterial prostatitis in rats[J]. Food Chemistry, 2010, 124(3): 1 017-1 023.
- [58] 许丽旋, 蔡建秀. 竹笋壳黄酮提取液抑菌效应初步研究[J]. 世界竹藤通讯, 2006(4): 29-31.
- XU Li-xuan, CAI Jian-xiu. Preliminary study on antimicrobial effect of flavonoids extract from bamboo shoot shell[J]. World Bamboo & Rattan News, 2006(4): 29-31.
- [59] 曹张琦. β -谷甾醇协同吉西他滨通过诱导凋亡和抑制上皮间质转化的抗胰腺癌作用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019: 22-30.
- CAO Zhang-qi. Effects of β -sitosterol and gemcitabine on pancreatic cancer by inducing apoptosis and inhibiting epithelial-mesenchymal transformation [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019: 22-30.
- [60] LESZEK M, CHRISTIAN G, LEIDY L, et al. Microbiota-directed fibre activates both targeted and secondary metabolic shifts in the distal gut[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1-15.
- [61] TRAMONTIN D, CARRERA S, ASSREUY J, et al. Response surface methodology (RSM) to evaluate both the extraction of triterpenes and sterols from jackfruit seed with supercritical CO₂ and the biological activity of the extracts [J/OL]. Journal of Food Science and Technology. (2021-01-04) [2021-03-25]. <https://www.webofscience.com/>.
- [62] BING Li, MAHAM A, ZUHAIR A, et al. Subcritical water extraction of phenolics, antioxidants and dietary fibres from waste date pits[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(6): 112-118.
- (上接第 6 页)
- [18] 田晓琳. 高压糊化玉米、糯玉米和糜子淀粉重结晶过程中性质和结构变化研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
- TIAN Xiao-lin. Retrogradation properties of maize, waxy maize and proso millet starches gelatinized by ultra high pressure[D]. Xianyang: Northwest Agriculture & Forestry University, 2014.
- [19] GOELP K, SINGHAL R S, KULKARNI R. Studies on interactions of corn starch with casein and casein hydrolysates[J]. Food Chemistry, 1999, 64(3): 383-389.
- [20] PREECEK E, DROST E, HOOSHYAR N, et al. Confocal imaging to reveal the microstructure of soybean processing materials[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 147: 8-13.
- [21] YOSHIKAWA Y, YASUIKE T, YAGI A, et al. Transverse elasticity of myofibrils of rabbit skeletal muscle studied by atomic force microscopy[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 1999, 256(1): 13-19.
- [22] LIN Song-yi, WANG Jia, ZHAO Ping, et al. Optimized antioxidant peptides fractions preparation and secondary structure analysis by MIR[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 59: 151-157.
- [23] 李媛. 基于 β -乳球蛋白纳米颗粒稳定的高内相 Pickering 乳液的制备、表征与应用[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- LI Yuan. Preparation, characterization and application of high internal phase pickering emulsions stabilized by β -lactoglobulin nanoparticles[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [24] WANG Tao, SUN Xiu-hua, ZHOU Zhan-xiang, et al. Effects of microfluidization process on physicochemical properties of wheat bran[J]. Food Research International, 2012, 48(2): 742-747.
- [25] CHEN Jia-lun, GAO Dong-xiao, YANG Le-tian, et al. Effect of microfluidization process on the functional properties of insoluble dietary fiber[J]. Food Research International, 2013, 54(2): 1 821-1 827.
- [26] 胡志和, 赵旭飞, 鲁丁强, 等. 超高压结合温热处理对脱脂乳透光率和粒径及蛋白溶解性的影响[J/OL]. 食品科学. (2020-12-07) [2021-07-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20201207.1017.010.html>.
- HU Zhi-he, ZHAO Xu-fei, LU Ding-qiang, et al. Effects of ultra-high pressure combined with mild heat treatment on light transmittance and particle size and protein solubility of skim milk[J/OL]. Food Science. (2020-12-07) [2021-07-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20201207.1017.010.html>.