真空油炸技术及其在淀粉基食品中的应用

王香存[1]， 陈 龙[1,2]， 金征宇[*1,2]
（1. 江南大学 食品学院，江苏 无锡 214122；2. 江南大学 食品科学与技术国家重点实验室，江苏 无锡 214122）

摘要： 油炸是一种常用的食品加工方式，油炸食品因其独特的色香味受到消费者喜爱。淀粉基食品是油炸食品常用原料，薯条、油条、方便面等淀粉基油炸食品均为餐桌上的常见美食。但油炸过程可能会产生丙烯酰胺等危害物质，过量食用油炸食品会导致超重、肥胖和其他慢性疾病，对人们的身体健康不利。因此，人们开发了新型油炸技术来提高油炸食品品质，真空油炸就是其中较为成熟的一种。本文重点介绍了真空油炸技术的原理、优点及与其它技术的联用，详细阐述了真空油炸技术对淀粉特性的影响及其在淀粉基食品中的应用，以期为真空油炸淀粉基食品的进一步发展提供参考，创造出更健康的淀粉基油炸食品，减少饮食相关慢性疾病的发生。

关键词： 真空油炸；淀粉基食品；淀粉性质；应用
中图分类号：TS 23 **文章编号：**1673-1689(2022)11-0001-09 **DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2022.11.001

Vacuum Frying Technology and its Application in Starchy Foods

WANG Xiangcun[1], *CHEN Long*[1,2], *JIN Zhengyu*[*1,2]
(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Frying is a commonly used food processing method, and fried foods are very popular with consumers because of their unique color, flavor and taste. Starchy foods are common ingredients of fried foods. Starchy fried foods such as French fries, deep-fried dough sticks and instant noodles are common delicacies on the table. However, the frying process may produce harmful substances such as acrylamide, and excessive consumption of fried foods may cause overweight, obesity and other chronic diseases, which are harmful to our health. Therefore, new frying technologies have been developed to improve the quality of fried foods, and vacuum frying is one of the more mature technologies. This paper focuses on the principle and advantages of vacuum frying technology and its combination with other technologies, and describes its effects on starch properties and its applications in starchy foods in details. The purpose of this study is to provide reference for the further development of vacuum fried starchy foods, to create healthier starchy fried foods, and to reduce the incidence of diet-related chronic diseases.

Keywords: vacuum frying, starchy foods, starch properties, applications

收稿日期： 2022-06-08
基金项目： 国家自然科学基金青年科学基金项目(32101990)；江苏省基础研究计划(自然科学基金)青年基金项目(BK20200617)。
* **通信作者：** 金征宇(1960—)，男，博士，教授，博士研究生导师，主要从事碳水化合物资源开发与利用研究。
E-mail：fpcenter@jiangnan.edu.cn

油炸是一种传统的食品加工方式,以油脂为介质进行传热和传质来熟制食品[1]。油炸食品因制备快捷且具有金黄色泽、芳香气味和酥脆口感,受到广大消费者的喜爱[2]。但在油炸过程中,食品水分在高温下迅速沸腾并以水蒸气的形式蒸发出去,导致食品内部气压降低,油脂在压力差作用下进入食品内,使油炸食品吸油量升高[3]。而高油脂含量的油炸食品摄入可能会增加高血压、糖尿病等心脑血管疾病及乳腺癌的发病率,不利于人类健康[4]。人们用了很多方法来降低油炸食品吸油量,如在油炸前对食品进行预处理,调整用油种类、油炸温度和时间,给食品进行涂膜处理等[5]。近年来,新型油炸技术成为研究热点,真空油炸、超声波、微波辅助油炸及各种技术间的联用大大降低了油炸食品的吸油量[6]。

真空油炸是一种较为成熟的新型油炸技术,是食品在减压或真空条件脱水熟化的过程[7]。由于气压降低,食品水分在低温下沸腾蒸发,食品熟化后形态和营养成分得到最大程度保留。研究表明,与常压油炸相比,真空油炸可以显著降低油炸食品吸油量,提高食品品质[8]。目前,真空油炸技术已广泛应用于果蔬制品、肉制品等的加工过程中。

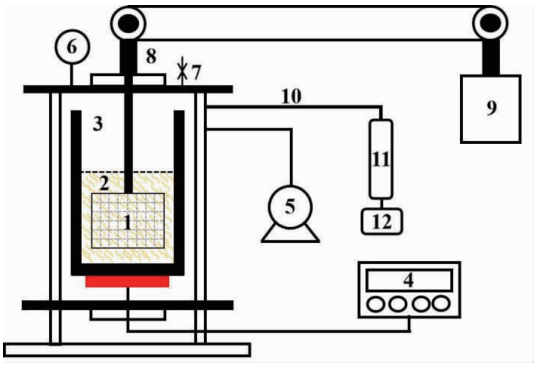
淀粉是油炸食品原料的主要组分之一,常见油炸食品如薯片、方便面等均含有丰富的淀粉。在油炸过程中,淀粉会发生结构改变、糊化和老化等一系列理化变化,其消化性能也会受到影响[9]。与常压油炸相比,使用真空油炸技术加工淀粉基食品,可以更好地保护食品营养成分与感官品质,减少食品吸油量[10]。

作者综述了真空油炸技术的原理、优点、与其它技术的联用及其在淀粉基食品中的应用,以期为真空油炸技术在淀粉基食品中的应用提供参考。

1 真空油炸概述

1.1 真空油炸原理

根据压力的不同,油炸可以分为常压、减压和加压 3 种类型[11]。常压下,水的沸点为 100 ℃。真空条件下,水的沸点降低,食品中的水分可以在较低温度下脱除,油炸时间缩短,食品中的营养素也可以得到较好保留。如图 1 所示,工业生产中的真空油炸系统通常由 3 个部分构成:高强度真空泵、真空油炸室和蒸汽冷凝收集器[12]。真空泵在油炸开始之前打开,使系统保持真空状态。油炸室下方的加热器开启后加热食用油,当油温达到预定温度时,通过旋转手柄将装有食物的篮网浸入热油中。在油炸过程中,食物被加热,其脱除的水以蒸气形式通过真空管流入蒸气冷凝收集器[10]。



1.油炸篮;2.油炸室;3.真空室;4.温度传感器;5.真空泵;6.压力表;7.破碎阀;8.升降轴;9.电机;10.排汽管;11.冷凝液收集器;12.储水罐

图 1 真空油炸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vacuum frying

1.2 真空油炸的优点

1.2.1 油炸温度低,营养物损失小 常压油炸温度通常在 150~200 ℃,而真空油炸的温度大约在 90~100 ℃内。真空油炸处于低温低压条件,低温可有效抑制食品营养物质的分解,食品中酚类、维生素类等营养物质得到保留[7]。Albertos 等[13]的研究发现,与传统常压油炸胡萝卜片相比,真空油炸胡萝卜片的酚类含量更高,并具有更强的抗氧化性能。Soto 等[14]发现,真空油炸木瓜片中维生素 A 原胡萝卜素的生物转化率较高。将真空油炸木瓜片饲喂大鼠后不会增加大鼠血浆中的血糖、胆固醇或甘油三酯含量。食品营养素大多对热敏感,在高温油炸过程中容易受热分解而失去营养价值。真空油炸过程温度较低,可以有效防止食品中营养素的损失。真空油炸技术的优点见图 2。

1.2.2 氧含量低,危害物生成少 油炸过程中会产生潜在有害物质[15],如还原糖和氨基酸在高温下发生美拉德反应产生丙烯酰胺等致癌物质[16]。油炸体系中氧气的存在也使得油脂发生氧化劣变并产生有害物质[17]。油炸温度和氧气含量是影响美拉德反应和脂质氧化的重要因素。而真空油炸过程中低温和低氧的条件可以有效抑制美拉德反应和脂质氧化进程,从而减少油炸过程中不良产物的生成[18]。有

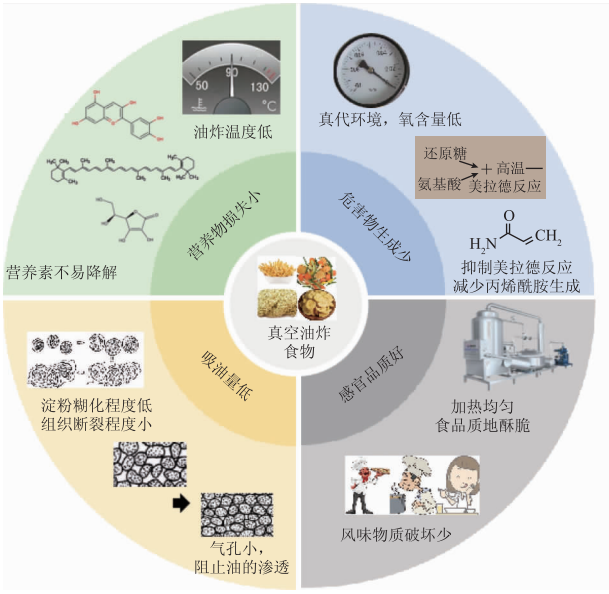


图 2 真空油炸技术的优点

Fig. 2 Advantages of vacuum frying technology

研究报道,真空油炸(125 ℃)比传统油炸(165 ℃)可减少 98%的丙烯酰胺生成量[19]。Yam 等对真空油炸和常压油炸两种鱼豆腐油炸方式进行了比较,发现真空油炸处理可以有效缓解油脂氧化进程,防止炸油劣化[20]。Belkova 等用真空油炸技术加工马铃薯片,发现真空油炸薯片的丙烯酰胺含量远低于常压油炸薯片[21]。同时,真空油炸薯条中己醛和 2-戊基呋喃含量也较低,因为真空油炸有效抑制了脂质的氧化进程[22]。

1.2.3 吸油量低,健康程度高 水分流失和油脂吸收是油炸过程中两个重要的物质传递现象,真空油炸食品的含水量和含油量更低,有利于货架期延长。Ayustaningwarno 等用真空油炸技术生产了一种更健康的芒果零食[23]。未成熟芒果在 10 kPa、100 ℃条件下真空油炸 20 min,可在不吸油的情况下失水干燥,获得脆度与色泽,并能保持抗坏血酸和 β-胡萝卜素的含量。Deng 等采用响应面法优化真空油炸香菇片工艺参数,发现油炸温度 105 ℃,真空度-0.085 MPa、油炸时间 27.3 min 时香菇片总油含量降低了 33.54%[24]。常压油炸条件下食品组织基质降解严重,导致食品表面形成更多孔隙,油通过孔隙进入食品内部。真空油炸过程中的温度较低,水的蒸汽压也较低,这种低温低压环境将减少食品组织细胞断裂和损伤,从而减少油的吸收[25]。另一方面,油炸食品的吸油量随着油炸时间增长而增加[26]。真空油炸时间短,加热和水分蒸发快使得真空油炸食品具有更低的吸油量[27]。

1.2.4 保留食品风味,感官品质好 与常压油炸相比,真空油炸食品具有更优越的质构、色泽和风味等感官品质[28]。在真空油炸过程中,水分从食品表面迅速蒸发,水分排出的地方变干,形成多孔结构,有利于食品形成酥脆质地[29]。此外,油炸食品物料中的呈香呈味成分多为水溶性成分,在真空油炸过程中,食品物料在真空状态和低温条件下缓慢加热,在低温的过程中极少溶出。而且随着油炸过程中食品物料中水分的不断减少,食品物料中的呈香呈味成分得到进一步浓缩,赋予真空油炸食品更浓郁的风味品质[22]。Tirtawijaya 等用真空油炸技术油炸鳕鱼,发现与常压油炸相比,真空油炸鳕鱼的外观、香气和风味等感官品质更佳[18]。Albertos 等在真空油炸前对苹果片进行超高压预处理,提高了苹果片的质构品质[30]。Islam 等采用真空油炸技术对毛豆进行油炸处理,并用数学模型描述了油炸毛豆的脱水动力学。发现真空油炸毛豆的干燥动力学和有效水分扩散率提高,含油量和水分活度较低,色泽和质构也得到明显改善[31]。

2 真空油炸与其它技术的联用

与常压油炸相比,真空油炸可以生产出含油量更低且感官品质更优质的食品。但是,真空油炸对设备要求较高,且油炸过程非常耗时耗能。为了克服真空油炸技术的局限性,常常将其与其他技术联合使用[32]。

2.1 微波

微波是一类频率在 300 MHz~300 GHz 范围内的电磁波[33]。为了防止对通信设备的干扰,民用微波频率规定为 915 MHz 和 2 450 MHz[34]。其中,915 MHz 是工业生产常用的微波频率,2 450 MHz 是家用微波炉使用的微波频率[35]。在微波加热过程中,食品中的水分等极性分子随着交变电场方向的变化产生剧烈摩擦和碰撞,将电磁能转化为热能,促进水分蒸发,并提高食品的温度[36]。微波加热具有方便快捷、热效率高、营养损失少等诸多优点[37]。将微波技术应用于真空油炸可以提高水分蒸发速率、加快传质、缩短油炸时间[38]。Su 等结合核磁共振和激光共聚焦扫描显微镜对微波辅助真空油炸薯片的脱

水动力学、水分和油脂分布状况进行了分析[25]。结果表明,与真空油炸相比,微波辅助真空油炸显著提高了水分蒸发率和有效水分扩散率,且微波功率越高,水分蒸发率和有效水分扩散率越高。Su 等的研究发现,微波辅助真空油炸鳕鱼片的气孔更细小均匀,含油量低,且外观质地较好[39]。食品在微波场存在的条件下快速均匀脱水,在更短的时间内完成油炸过程[40]。

2.2 超声波

超声波是一类频率在 20 kHz~10 MHz 的机械波,在介质中传播时会产生击碎、乳化、扩散、机械振荡等作用力使物体内部产生高温、高压的冲击波和微射流,加速体系的传热和传质过程[41]。超声波不能在真空中传播,但可以用于真空油炸预处理过程[42],有效提高食品脱水效率并改善食品品质[43]。Fan 等采用超声波对真空油炸紫薯片进行脱水预处理,并用低场核磁共振技术测定油炸紫薯片的水分含量,发现超声预处理降低了油炸紫薯片的平衡水分含量[44]。在真空油炸前对食品进行超声波脱水预处理可以有效缩短油炸时间,降低油炸食品吸油量。Shen 等的研究发现,超声预处理可以显著改善真空油炸苹果片的介电性质,降低苹果片的含水量和吸油量,同时提高其抗氧化性能[45]。Devi 等的研究也表明,超声预处理可以减少真空油炸薯片的吸油量,并且不会对薯条的感官品质造成不良影响[46]。

2.3 微波–超声波联用

微波和超声波技术常常结合起来使用,二者可以产生协同效应,提高真空油炸效率和食品质量[32]。据报道,微波和超声波的结合可以增强油炸过程中的脱水过程并改善真空油炸水果和蔬菜的质量[47]。Su 等研究了微波–超声波真空油炸紫肉马铃薯的干燥动力学和品质特性,发现微波和超声波的结合显著提高了真空油炸过程中食品水分的蒸发速率,缩短了油炸时间[32]。此外,紫肉马铃薯片的水分活度降低,总花色苷含量增加,质构和色泽也得到显著改善。油的吸收是油炸过程中重要的传质现象,而吸油量高会增加生产成本,同时高含油量油炸食品的摄入对人体健康不利[48]。微波和超声波联用可以有效降低真空油炸食品的吸油量,并且一定条件下微波和超声波功率越高,油炸食品的吸油量越少[39]。Islam 等的研究发现,与单独使用微波或超声波真空油炸相比,微波–超声波辅助真空油炸处理显著缩短了毛豆的油炸加工时间,且油炸毛豆的含水量和含油量更低,具有更优的色泽和质地[49]。油炸食品的吸油量和油分布取决于其外壳层的微观结构[50]。油炸后冷却阶段压力降低使油通过食品表层的微孔渗入食品内部[51]。微波–超声波辅助真空油炸食品吸油量的大幅降低可归因于微波和超声波能量引起的油炸时间的缩短和食品表层微观结构的变化[32]。微波–超声波辅助真空油炸使食品表层具有较高孔隙率、更均匀的孔隙分布以及更光滑的内表面[52]。与微波真空油炸相比,超声波与微波组合真空油炸在水分快速蒸发和均匀加热方面具有更大的优势,可以在短时间内生产出质地更酥脆且色泽更具吸引力的油炸食品[53]。Faruq 等研究发现超声波与微波的联合应用使苹果片在真空油炸过程中快速脱水,形成酥脆质地,其天然味道和色泽也得到了较大程度的保留[54]。Devi 等使用 4 种油炸条件对蘑菇条进行油炸,即真空油炸、微波真空油炸、超声波真空油炸和微波–超声波真空油炸。研究发现微波–超声波真空油炸蘑菇条中蛋白质、总酚化合物和总黄酮化合物得到了更大程度保留。微波与超声联合处理产生的协同作用能显著降低真空油炸蘑菇条的水分活度和吸油量,并保留原始样品的颜色[55]。真空油炸与其它技术的联用的特点见表 1。

表 1 真空油炸与其它技术的联用

Table 1 Combinations of vacuum frying and other technologies

技术	原理	优点	局限	文献
微波	内部偶极分子如水分子等高频往复运动,产生“内部摩擦”而使被加热物料温度升高,加快水分蒸发	快速加热;安全无污染;可有效降低油炸食品含水量和吸油量	微波加热存在不均匀现象;要防止微波击穿设备腔体,因而对设备要求高	[56–57]
超声波	超声波传播时产生高温、高压的冲击波和微射流,加速体系的传热、传质过程	省时,省材,节能,运行成本低;可有效降低油炸食品吸油量,提高食品品质	仅使用超声波辅助油炸技术很难达到理想效果,常与微波技术联用	[31, 43]
微波–超声波	微波和超声波的协同效应,提高食品干燥动力学,加快水分脱除,使食品温度升高	提高油炸效率,缩短油炸时间;降低食品含油量和危害物生成;更好地保留风味和营养物质	对设备要求高,运行成本高	[31, 54]

3 真空油炸对淀粉性质的影响

3.1 淀粉糊化特性

糊化特性是淀粉重要理化特性之一,是指淀粉在一定温度条件下吸水膨胀,破裂形成均匀糊状溶液的过程[58]。真空油炸条件下,由于真空度较低,水的沸点降低甚至低于淀粉糊化所需温度,淀粉不易糊化,结构松散,具有较高的吸油渗透性[10]。Sobukola等研究发现,真空油炸过程中水沸点温度低于淀粉糊化所需的温度(55~65 ℃),淀粉很难糊化,颗粒形态较为完整[59]。相反,如果使用较低的真空度(33.21 kPa)油炸样品,淀粉可以发生糊化。食品水分含量也是影响淀粉糊化特性的重要因素,真空油炸过程中会加速水分蒸发,从而使食品表面水分含量过低导致淀粉糊化不足[24]。Contardo等发现真空油炸面团的吸水指数较低[60],用DSC测定真空油炸面团中淀粉糊化度,发现与常压油炸面团(糊化程度约98.3%)相比,9.9 kPa下真空油炸面团的糊化程度较低,仅为53.8%。

3.2 淀粉消化特性

淀粉消化率的差异与淀粉本身物理状态以及加工过程中形成的微观结构类型有关[61]。研究表明,真空油炸过程可以有效降低淀粉的消化率,增加抗性淀粉含量[62]。与常压油炸相比,在真空油炸过程中,淀粉糊化受到抑制而消化性降低[60]。Contardo等研究了真空油炸对淀粉消化率的影响[63]。研究结果表明,真空油炸(6.5 kPa)淀粉糊化率较低(28%)。体外消化实验表明,快消化淀粉含量为27%,慢消化淀粉含量为70%,消化率较慢,与生面团的消化率相似。另一项研究将真空油炸(气压9.9 kPa,温度115 ℃)和常压油炸面团分别饲喂SD大鼠。饲喂真空油炸面团大鼠进食60 min后体内血糖值达到最高(血糖升高较慢),而饲喂常压油炸面团大鼠进食仅30 min后血糖达到最大值,真空油炸显著降低了面团的升糖指数和消化率[60]。此外,油炸过程中淀粉与脂质可以通过疏水相互作用和氢键作用形成淀粉-脂质复合物[64]。淀粉-脂质复合物具有很强的抗酶解性能,也被称为RS5型抗性淀粉[65]。真空油炸过程中淀粉与脂质相互作用产生淀粉-脂质复合物,使淀粉对酶的敏感性降低,降低淀粉消化性能[66]。

4 真空油炸在淀粉基食品中的应用

与常压油炸相比,真空油炸具有低压、低温、低氧的特点,可以最大限度保持食品营养成分[67]。与常压油炸相比,使用真空油炸技术加工淀粉基食品可以更好地保护食品营养成分与感官品质,减少食品吸油量[68]。

4.1 薯类

油炸薯片和薯条等薯类零食受到众多消费者的喜爱。用真空油炸技术加工薯类食品。可以缩短油炸时间,减少危害物质的生成并改善薯片品质[69]。木薯、番薯和马铃薯等可用作真空油炸食品的原料。Sobukola等使用真空油炸技术生产黄肉木薯片并进行了工艺条件优化,通过调整真空度、油炸温度和油炸时间得到品质属性较好的油炸木薯片[70]。Xu等以紫甘薯粉、大豆分离蛋白和黄原胶为包衣材料,开发了一种真空油炸面包虾面糊体系,提高了油炸面包虾的抗氧化性能[71]。油的种类会影响真空油炸薯类食品的营养与感官品质。Soto等研究发现[72],与棕榈油相比,大豆油提高了真空油炸番木薯冷却过程中类胡萝卜素的保留率。这是因为大豆油中的不饱和脂肪酸可与类胡萝卜素的双键竞争氧气,起到抗氧化作用。可以通过使用真空油炸预处理手段优化真空油炸薯类食品感官品质。García等对木薯片进行热烫预处理,降低了真空油炸木薯片的吸油量并保持了其色泽和脆性[73]。Qiu等对微波-超声波辅助真空油炸甘薯片的品质展开研究[74],在一定范围内,随着超声波功率的增大和处理时间的延长,薯片的吸油率和含水量不断降低,炸甘薯片的质地更脆。

4.2 油炸方便面

方便面是一种常见的淀粉基油炸食品,真空油炸可作为油炸方便面的重要生产手段。Vernaza等以添加了大豆分离蛋白和RS3型抗性淀粉的面团为原料,采用真空油炸工艺开发出含油量低且耐消化的油炸方便面[75]。通过对常压油炸和真空油炸方便面的吸油量进行比较,发现真空油炸方便面的油脂含量比常压油炸方便面少3%。这是因为常压油炸方便面表面形成了更多的孔隙结构,油脂更容易渗入。另一项研究中,Vernaza等在面团中添加10%的RS2、RS3和青香蕉粉3种抗性淀粉,并分别采用常压和真空油炸工艺制作方便面。与常压油炸相

比,真空油炸方便面吸油量减少 3%,且抗性淀粉的保留量更高[76]。

4.3 其它

南瓜、山药、香蕉和木瓜等常见食品中也含有丰富的淀粉,可作为油炸食品加工原料。王文成等发现真空低温油炸山药脆片在色泽和含油率方面明显优于常压油炸方法[77]。Huang 等使用微波–超声波辅助真空油炸技术加工南瓜片,缩短了油炸时间,同时南瓜片的结构得到较好保护,其含水量和含油量均较低[78]。在真空油炸前进行适当预处理可以有效改善油炸食品理化和感官特性。渗透脱水、微波加热和热风干燥 3 种预处理后的真空油炸香蕉片含油量均较低,且表现出更好的色泽和质构特性[79]。冷冻预处理后的真空油炸木瓜片具有较为良好的色泽、硬度等感官品质,并较好地保留了总黄酮、胡萝卜素等物质的抗氧化活性[80]。

5 展 望

近年来,随着人们物质生活水平的提高,越来越多的消费者追求健康、低油低脂的饮食。真空油炸可以较大程度保留食品营养成分,降低食品吸油量,生产出低脂美味的淀粉基食品。但是,真空油炸技术对设备要求和使用成本均较高,其在快餐店等餐饮行业中的应用尚存在一定限制,真空油炸与其他辅助加热技术的联用是未来研究重点。真空辅助油炸实际上是物料脱水的过程,因此真空油炸除了与微波和超声波技术连用,未来研究也可以将其与红外、脉冲电场等新型干燥技术相结合,提高真空油炸效率,生产出营养和感官品质更佳的油炸食品。

参考文献:

[1] DASH K K,SHARMA M,TIWARI A. Heat and mass transfer modeling and quality changes during deep fat frying:a comprehensive review[J]. Journal of Food Process Engineering,2022,45(4):e13999.
[2] 王露莹,张慜,杨子涵. 预煎炸冷冻食品锅贴的配方优化[J]. 食品与生物技术学报,2020,39(7):51-58.
[3] 陈龙. 油炸过程中淀粉结构变化与吸油特性研究[D]. 无锡:江南大学,2019.
[4] GANESAN K,XU B. Deep frying cooking oils promote the high risk of metastases in the breast-a critical review[J]. **Food and Chemical Toxicology**,2020,144:111648.
[5] XIE D,GUO D,GUO Z,et al. Reduction of oil uptake of fried food by coatings:a review[J]. **International Journal of Food Science & Technology**,2021,57(6):3268-3277.
[6] DEVI S,ZHANG M,JU R,et al. Recent development of innovative methods for efficient frying technology[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**,2021,61(22):3709-3724.
[7] PANKAJ S K,KEENER K M. A review and research trends in alternate frying technologies[J]. **Current Opinion in Food Science**,2017,16:74-79.
[8] SOSA MORALES M E,SOLARES ALVARADO A P,AGUILERA BOCANEGRA S P,et al. Reviewing the effects of vacuum frying on frying medium and fried foods properties[J]. **International Journal of Food Science & Technology**,2021,57(6):3278-3291.
[9] WANG Y,CHEN L,YANG T,et al. A review of structural transformations and properties changes in starch during thermal processing of foods[J]. **Food Hydrocolloids**,2021,113:106543.
[10] WANG Y,WU X,MCCLEMENTS D J,et al. Effect of new frying technology on starchy food quality[J]. **Foods**,2021,10(8):1852.
[11] 欧阳玲花,朱雪晶,何家林,等. 不同品种马铃薯用于真空油炸薯条的适宜性[J]. 食品与发酵工业,2021,47(19):230-236.
[12] PANDEY A,RAVI N,CHAUHAN O. Quality attributes of vacuum fried fruits and vegetables:a review[J]. **Journal of Food Measurement and Characterization**,2020,14(3):1543-1556.
[13] ALBERTOS I,MARTIN-DIANA A B,SANZ M,et al. Effect of high pressure processing or freezing technologies as pretreatment in vacuum fried carrot snacks[J]. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**,2016,33:115-122.
[14] SOTO M,SERVENT A,POUCHERET P,et al. Carotenoid absorption in rats fed with vacuum-fried papaya chips depends on processed food microstructure associated with saturated and unsaturated oils[J]. **Food Research International**,2021,142:110223.
[15] 陈龙,王谊,程昊,等. 油炸食品中潜在的几类危害物及其消减技术[J]. 中国食品学报,2022,22(2):376-389.

[16] 王敏,杨雅利,沈海亮,等. 油炸马铃薯中丙烯酰胺形成的影响因素及控制措施的研究进展[J]. 农产品加工,2019(1):66-71.
[17] 陈龙,王谊,程昊,等. 水相高温处理对淀粉结构与性质的影响[J]. 食品与生物技术学报,2021,40(11):1-11.
[18] TIRTAWIJAYA G,LEE M J,NEGARA B F S P,et al. Effects of vacuum frying on the preparation of ready-to-heat batter-fried and sauced chub mackerel(*Scomber japonicus*)[J]. **Foods**,2021,10(8):1962.
[19] GUO D,WAN P,LIU J,et al. Use of egg yolk phospholipids to boost the generation of the key odorants as well as maintain a lower level of acrylamide for vacuum fried French fries[J]. **Food Control**,2021,121:107592.
[20] YAMSAENGSUNG R,YAEED S,OPHITHAKORN T. Vacuum frying of fish tofu and effect on oil quality usage life[J]. **Journal of Food Process Engineering**,2017,40(6):e12587.
[21] BELKOVA B,HRADECKY J,HURKOVA K,et al. Impact of vacuum frying on quality of potato crisps and frying oil[J]. **Food Chemistry**,2018,241:51-59.
[22] AYUSTANINGWARNO F,DEKKER M,FOGLIANO V,et al. Effect of vacuum frying on quality attributes of fruits[J]. **Food Engineering Reviews**,2018,10(3):154-164.
[23] AYUSTANINGWARNO F,VAN GINKEL E,VITORINO J,et al. Nutritional and physicochemical quality of vacuum-fried mango chips is affected by ripening stage,frying temperature,and time[J]. **Frontiers in Nutrition**,2020,7:95.
[24] DENG K,CHEN J,TIAN Y,et al. Optimization of process variables on physical and sensory attributes of shiitake (*Lentinula edodes*) slices during vacuum frying[J]. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**,2019,54:162-171.
[25] SU Y,ZHANG M,FANG Z,et al. Analysis of dehydration kinetics,status of water and oil distribution of microwave-assisted vacuum frying potato chips combined with NMR and confocal laser scanning microscopy[J]. **Food Research International**,2017,101:188-197.
[26] LIU Y,TIAN J,ZHANG T,et al. Effects of frying temperature and pore profile on the oil absorption behavior of fried potato chips[J]. **Food Chemistry**,2021,345:128832.
[27] JUVVI P,SELVI M K,DEBNATH S. Effect of vacuum frying on quality attributes of pear(*Pyrus communis* L) chips and blended oil[J]. **Journal of Food Processing and Preservation**,2020,44(6):e14488.
[28] FANG M,HUANG G J,SUNG W C. Mass transfer and texture characteristics of fish skin during deep-fat frying,electrostatic frying,air frying and vacuum frying[J]. **LWT–Food Science and Technology**,2021,137:110494.
[29] MAU J L,TSENG J,WU C R,et al. Instrumental texture and sensory preference of vacuum-fried shiitake crisps as affected by isomalto-oligosaccharide pretreatment[J]. **International Journal of Food Properties**,2021,24(1):859-870.
[30] ALBERTOS I,RICO D,MARTIN - DIANA A B. Improving the texture of healthy apple snacks by combining processing and technology(high pressure and vacuum frying)[J]. **Journal of Food Processing and Preservation**,2020,44(3):e14352.
[31] ISLAM M,ZHANG M,FAN D. Ultrasonically enhanced low-temperature microwave-assisted vacuum frying of edamame:effects on dehydration kinetics and improved quality attributes[J]. **Drying Technology**,2019,37(16):2087-2104.
[32] SU Y,ZHANG M,BHANDARI B,et al. Enhancement of water removing and the quality of fried purple-fleshed sweet potato in the vacuum frying by combined power ultrasound and microwave technology[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**,2018,44:368-379.
[33] SUN Y,ZHANG M,FAN D. Effect of ultrasonic on deterioration of oil in microwave vacuum frying and prediction of frying oil quality based on low field nuclear magnetic resonance(LF-NMR)[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**,2019,51:77-89.
[34] GUO Q,SUN D W,CHENG J H,et al. Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry[J]. **Trends in Food Science & Technology**,2017,67:236-247.
[35] GUZIK P,KULAWIK P,ZAJAC M,et al. Microwave applications in the food industry:an overview of recent developments[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**,2021,62(29):1-20.
[36] 胡蕾琪,郭长凯,潘志海,等. 微波场对食品的非热效应研究进展[J]. 食品与发酵工业,2020,46(16):270-275.
[37] 张群. 果蔬微波冷冻干燥关键技术研究[J]. 食品与生物技术学报,2022,41(4):112.
[38] ZHANG X,ZHANG M,ADHIKARI B. Recent developments in frying technologies applied to fresh foods[J]. **Trends in Food Science & Technology**,2020,98:68-81.
[39] SU Y,ZHANG M,ZHANG W. Effect of low temperature on the microwave-assisted vacuum frying of potato chips[J]. **Drying Technology**,2016,34(2):227-234.
[40] SHI H,ZHANG M,YANG C. Effect of low-temperature vacuum frying assisted by microwave on the property of fish fillets

(*Aristichthys nobilis*)[J]. **Journal of Food Process Engineering**,2019,42(4):e13050.
[41] 任广跃,靳力为,段续,等. 超声处理对果蔬干燥速率及品质的影响[J]. 食品与生物技术学报,2020,39(4):9-17.
[42] 徐大山,胡爱军,郑捷,等. 超声波与物理场组合食品技术研究进展[J]. 食品工业,2020,41(10):280-283.
[43] GOULA A M,KOKOLAKI M,DAFTSIOU E. Use of ultrasound for osmotic dehydration: the case of potatoes[J]. **Food and Bioproducts Processing**,2017,105:157-170.
[44] FAN K,ZHANG M,BHANDARI B. Osmotic ultrasound dehydration pretreatment improves moisture adsorption isotherms and water state of microwave-assisted vacuum fried purple fleshed sweet potato slices[J]. **Food and Bioproducts Processing**,2019,115:154-164.
[45] SHEN X,ZHANG M,BHANDARI B,et al. Effect of ultrasound dielectric pretreatment on the oxidation resistance of vacuum-fried apple chips[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**,2018,98(12):4436-4444.
[46] DEVI S,ZHANG M,JU R,et al. Water loss and partitioning of the oil fraction of mushroom chips using ultrasound-assisted vacuum frying[J]. **Food Bioscience**,2020,38:100753.
[47] SANTACATALINA J,CONTRERAS M,SIMAL S,et al. Impact of applied ultrasonic power on the low temperature drying of apple[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**,2016,28:100-109.
[48] LIU Y,TIAN J,DUAN Z,et al. Effect of oil surface activity on oil absorption behavior of potato strips during frying process[J]. **Food Chemistry**,2021,365:130427.
[49] ISLAM M M,ZHANG M,BHANDARI B,et al. A hybrid vacuum frying process assisted by ultrasound and microwave to enhance the kinetics of moisture loss and quality of fried edamame[J]. **Food and Bioproducts Processing**,2019,118:326-335.
[50] CHEN L,MA R,ZHANG Z,et al. Impact of frying conditions on hierarchical structures and oil absorption of normal maize starch [J]. **Food Hydrocolloids**,2019,97:105231.
[51] LIBERTY J T,DEHGHANNYA J,NGADI M O. Effective strategies for reduction of oil content in deep-fat fried foods:a review [J]. **Trends in Food Science & Technology**,2019,92:172-183.
[52] SU Y,ZHANG M,ZHANG W,et al. Application of novel microwave-assisted vacuum frying to reduce the oil uptake and improve the quality of potato chips[J]. **LWT–Food Science and Technology**,2016,73:490-497.
[53] TEKIN Z H,BASLAR M,KARASU S,et al. Dehydration of green beans using ultrasound-assisted vacuum drying as a novel technique:Drying kinetics and quality parameters[J]. **Journal of Food Processing and Preservation**,2017,41(6):e13227.
[54] AL FARUQ A,ZHANG M,ADHIKARI B. A novel vacuum frying technology of apple slices combined with ultrasound and microwave[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**,2019,52:522-529.
[55] DEVI S,ZHANG M,MUJUMDAR A S. Influence of ultrasound and microwave-assisted vacuum frying on quality parameters of fried product and the stability of frying oil[J]. **Drying Technology**,2021,39(5):655-668.
[56] FARUQ A A,ZHANG M,FAN D. Modeling the dehydration and analysis of dielectric properties of ultrasound and microwave combined vacuum frying apple slices[J]. **Drying Technology**,2019,37(3):409-423.
[57] ZHANG M,TANG J,MUJUMDAR A,et al. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables[J]. **Trends in Food Science & Technology**,2006,17(10):524-534.
[58] 周梦露,钱晓洁,孙冰华,等. 蛋白质及其水解物对谷物淀粉糊化、回生及消化性的影响研究进展[J]. 中国粮油学报,2022,37(2):180-187.
[59] SOBUKOLA O,DUEIK V,BOUCHON P. Understanding the effect of vacuum level in structure development and oil absorption in vacuum-fried wheat starch and gluten-based snacks[J]. **Food and Bioprocess Technology**,2013,6(8):2010-2017.
[60] CONTARDO I,VILLALÓN M,BOUCHON P. In vivo study on the slow release of glucose in vacuum fried matrices[J]. **Food Chemistry**,2018,245:432-438.
[61] 米红波,邓婷月,李毅,等. 抗性淀粉的消化特性及其在食品中的应用[J]. 食品与生物技术学报,2021,40(9):9-15.
[62] OGINNI O,SOBUKOLA O,HENSHAW F O,et al. Effect of starch gelatinization and vacuum frying conditions on structure development and associated quality attributes of cassava-gluten based snack[J]. **Food Structure**,2015,3:12-20.
[63] CONTARDO I,PARADA J,LEIVA A,et al. The effect of vacuum frying on starch gelatinization and its in vitro digestibility in starch-gluten matrices[J]. **Food Chemistry**,2016,197:353-358.
[64] WANG S,CHAO C,CAI J,et al. Starch-lipid and starch-lipid-protein complexes:a comprehensive review[J]. **Comprehensive**

Reviews in Food Science and Food Safety,2020,19(3):1056-1079.

[65] 王翠萍,晁琛,王书军. 基于分子动力学模拟研究淀粉与脂质和蛋白质的相互作用:现状分析与未来趋势[J]. 食品与生物技术学报,2022,41(7):44-56.

[66] CONTARDO I,JAMES B,BOUCHON P. Microstructural characterization of vacuum-fried matrices and their influence on starch digestion[J]. **Food Structure**,2020,25:100146.

[67] 傅宝尚,林子宸,姜鹏飞,等. 即食真空油炸带鱼调理食品的工艺研究[J]. 食品研究与开发,2022,43(11):126-134.

[68] DEVI S,ZHANG M,LAW C L. Effect of ultrasound and microwave assisted vacuum frying on mushroom (*Agaricus bisporus*) chips quality[J]. **Food Bioscience**,2018,25:111-117.

[69] CHINTHA P,GIRI N,THULASIMANI K,et al. Development of low-fat and anthocyanin-rich purple sweet potato vacuum fried chips[J]. **Journal of Food Science**,2022,87(7):2894-2907.

[70] SOBUKOLA O P,AJAYI F F,FALOYE O R,et al. Characterization of some quality attributes of vacuum fried yellow fleshed cassava chips from different varieties using designed experiment[J]. **Journal of Food Processing and Preservation**,2021,45(11):e15946.

[71] XU J,JI H,DONG H,et al. A promising natural purple batter system with antioxidant activity for vacuum fried breaded shrimp[J]. **Food Science and Technology**,2021,42,e35220.

[72] SOTO M,DHUIQUE-MAYER C,SERVENT A,et al. A kinetic study of carotenoid degradation during storage of papaya chips obtained by vacuum frying with saturated and unsaturated oils[J]. **Food Research International**,2020,128:108737.

[73] GARCÍA-SEGOVIA P,URBANO-RAMOS A,FISZMAN S,et al. Effects of processing conditions on the quality of vacuum fried cassava chips(*Manihot esculenta* Crantz)[J]. **LWT–Food Science and Technology**,2016,69:515-521.

[74] QIU L,ZHANG M,WANG Y,et al. Effects of ultrasound pretreatments on the quality of fried sweet potato (*Ipomea batatas*) chips during microwave-assisted vacuum frying[J]. **Journal of Food Process Engineering**,2018,41(8):e12879.

[75] VERNAZA M G,CHANG Y K. Resistant starch and soy protein isolate in instant noodles obtained by conventional and vacuum frying[J]. **Brazilian Journal of Food Technology**,2020,23: e2018239.

[76] VERNAZA M G,CHANG Y K. Survival of resistant starch during the processing of atmospheric and vacuum fried instant noodles[J]. **Food Science and Technology**,2017,37:425-431.

[77] 王文成,高惠安,郑守斌,等. 低温真空油炸山药脆片的工艺研究[J]. 食品研究与开发,2021,42(4):101-106.

[78] HUANG M S,ZHANG M,BHANDARI B. Synergistic effects of ultrasound and microwave on the pumpkin slices qualities during ultrasound-assisted microwave vacuum frying[J]. **Journal of Food Process Engineering**,2018,41(6):e12835.

[79] UDOMKUN P,INNAWONG B. Effect of pre-treatment processes on physicochemical aspects of vacuum-fried banana chips[J]. **Journal of Food Processing and Preservation**,2018,42(8):e13687.

[80] PANDEY A,KUMAR S,RAVI N,et al. Use of partial drying and freezing pre-treatments for development of vacuum fried papaya(*Carica papaya* L.) chips[J]. **Journal of Food Science and Technology**,2020,57(6):2310-2320.