

# 高新技术在天然产物及其健康食品加工中的应用

朱吟非<sup>1</sup>, 康淞皓<sup>2</sup>, 刘星宇<sup>1</sup>, 彭郁<sup>1</sup>, 李茉<sup>1</sup>, 倪元颖<sup>1</sup>, 温馨<sup>1,\*</sup>

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 健康食品是一类相较于普通食品有额外健康益处的食品。近年来, 随着健康食品产业蓬勃发展, 健康食品已逐渐走进群众视野, 成为行业热点。天然产物是一类生物活性化合物, 在健康食品中扮演着重要的角色, 而加工是健康食品产业发展中至关重要的部分, 健康食品的研发离不开日新月异的食物加工技术。基于此, 本文对健康食品的高新加工技术进行综述, 综合比较和分析健康食品在天然产物生产、活性成分保护、成分改性、保鲜灭菌、产品设计等加工步骤中所应用的高新技术, 并对未来应用高新技术研发健康食品的发展与需求进行展望。

**关键词:** 高新技术; 健康食品; 天然产物; 活性保护; 改性; 保鲜

## Application of High and New Technology in Processing of Natural Products and Healthy Foods

ZHU Yinfei<sup>1</sup>, KANG Songhao<sup>2</sup>, LIU Xingyu<sup>1</sup>, PENG Yu<sup>1</sup>, LI Mo<sup>1</sup>, NI Yuanying<sup>1</sup>, WEN Xin<sup>1,\*</sup>

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Healthy foods are foods that have additional health benefits when compared with ordinary foods. In recent years, with the vigorous development of the healthy food industry, healthy foods have gradually entered the public eye and become a hot spot. Natural products are a class of bioactive compounds that play an important role in healthy foods, and the processing is a vital part of the development of the healthy food industry. The development of healthy foods is inseparable from the ever-changing food processing technology. Based on this, this article summarizes the high-tech processing technologies for healthy foods, comprehensively compares and analyzes the high and new technologies applied in the processing steps such as natural product production, active ingredient protection, component modification, preservation, sterilization, and product design, and provides an outlook on the future development of healthy foods by using high and new technologies.

**Keywords:** high and new technology; healthy foods; natural products; activity preservation; modification; preservation

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230821-155

中图分类号: TS201.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 05-0335-10

引文格式:

朱吟非, 康淞皓, 刘星宇, 等. 高新技术在天然产物及其健康食品加工中的应用[J]. 食品科学, 2024, 45(5): 335-344.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230821-155. <http://www.spkx.net.cn>

ZHU Yinfei, KANG Songhao, LIU Xingyu, et al. Application of high and new technology in processing of natural products and healthy foods[J]. Food Science, 2024, 45(5): 335-344. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230821-155. <http://www.spkx.net.cn>

健康食品是指在普通食品的营养和风味基础上, 额外赋予食品健康功能, 提高对人体健康有益物质的含量或降低有害物质的含量, 使其更好调节人体机能, 有益于人体健康的食品<sup>[1]</sup>。国外也有观点认为其与功能性食品

类似, 凡是在食品的基本营养价值之外对健康有额外益处的食品均可称为健康食品<sup>[2]</sup>。由于缺乏相关法律法规及标准, 健康食品的定义与范围在国内乃至世界范围内尚未明确统一。但可以肯定的是, 健康食品的种类繁多,

收稿日期: 2023-08-21

基金项目: 中国科协第八届青年人才托举工程 (2022QNRC001)

第一作者简介: 朱吟非 (2001—) (ORCID: 0000-0002-1732-7929), 女, 硕士研究生, 研究方向为果蔬加工。

E-mail: yfzhu1217@163.com

\*通信作者简介: 温馨 (1991—) (ORCID: 0000-0002-4549-0547), 女, 副教授, 博士, 研究方向为果蔬加工理论与技术、天然产物与功能食品、农产品加工副产物综合利用。E-mail: xin.wen@cau.edu.cn

通过不同技术可将食品原料按需求加工为不同种类的健康食品，如含特定有益成分食品、减少或去除特定有害成分食品、特定功能食品、天然食品、有机食品等，或按用途分为保健食品、功能性食品、膳食营养补充剂、有机食品、绿色食品等。

近年来，随着生活节奏加快、老龄化加剧及食品营养相关知识的普及、国民健康意识的增强，人民群众对健康食品的需求不断增加，健康食品成为食品行业的热点话题，受到了普遍的关注与重视。由国务院印发的《国民营养计划（2017—2030年）》与《“健康中国2030”规划纲要》分别指出，要“大力发展满足不同需求的健康食品产业，加快食物（农产品、食品）加工营养化转型”<sup>[3]</sup>；“制定实施国民营养计划，深入开展食物营养功能评价研究”<sup>[4]</sup>，为我国食品健康行业的快速发展提供了良好的社会环境。据统计，我国健康食品市场规模约为9 575.65亿元，2025年预计将达到11 408亿元，即将成为全球最大的健康食品市场，前景十分广阔<sup>[5]</sup>。

表1 健康食品加工步骤中的主要技术  
Table 1 Key technologies in healthy food processing

| 加工单元   | 健康食品加工技术    | 出现年代  | 食品领域的主要应用                    |
|--------|-------------|-------|------------------------------|
| 天然产物提取 | 超临界提取       | 1970s | 啤酒花、香气、香料、着色剂、富含维生素的提取物、特定脂质 |
|        | 微波辅助提取      | 1980s | 化合物分离分析                      |
|        | 超声辅助提取      | 1990s | 风味物质、植物精油、色素、酚类等             |
|        | 酶辅助提取       | 1990s | 脂质、植物提取物                     |
|        | 发酵辅助提取      | 2010s | 酚类、色素、有机酸、膳食纤维               |
|        | 生物合成技术      | 2010s | 蛋白质、维生素、矿物质等各类营养成分           |
| 活性成分保护 | 微胶囊         | 1970s | 精油、蛋白质、色素                    |
|        | 脂质体         | 1980s | 维生素、矿物质、多酚、类胡萝卜素、生物活性肽       |
|        | 纳米乳液        | 2000s | 酚类、脂肪酸                       |
|        | Pickering乳液 | 2010s | 酚类、色素                        |
| 改性     | 欧姆加热        | 1910s | 液体、半固体、混合物                   |
|        | 微波加热        | 1940s | 含水分的食品                       |
|        | 红外加热        | 1940s | 较薄的食品或食品表面                   |
|        | 臭氧          | 1960s | 改性：淀粉、蛋白质等                   |
|        | 超高压         | 1990s | 改性：淀粉、蛋白质等                   |
|        | 酯化          | 1990s | 淀粉、多糖、多酚、脂肪酸等                |
| 灭菌     | 辐照          | 1940s | 香料、坚果、果蔬                     |
|        | 臭氧          | 1960s | 灭菌：蛋类、肉类、水产品                 |
|        | 超高压         | 1990s | 灭菌：饮料、果蔬                     |
|        | 冷等离子体       | 2010s | 果蔬、肉制品、乳制品                   |
| 产品设计   | 生物信息学       | 1950s | 分子筛选与监测                      |
|        | 数据建模、机器学习   | 1960s | 产品开发、工厂设计                    |
|        | 3D打印        | 1980s | 糕点、儿童食品、易吞咽食品                |

注：1970s表示20世纪70年代，其他以此类推。

健康食品的设计、研发与生产都离不开食品加工技术。从智人使用简单工具进行分割、烧烤，到古人进行烹饪、腌制、发酵、冷冻与干燥，再到今天的工业加工与高新技术，食品加工技术伴随着人类历史不断进步与

发展。但传统的加工技术往往存在时间长、产能低、营养与风味等被破坏、存在污染及残留等问题，不能满足消费者对食品越来越高的各项需求。近几年出现的一些新型食品加工技术，如微波、超声波、酶处理等辅助提取技术，欧姆加热、微波加热等加热技术，脉冲电场、超高压、低温等离子体等灭菌技术作为传统工业加工中不同单元操作的替代技术，已被证明能更好地保留食品的营养、风味、颜色及质地等特性，降低了对能源、水和加工助剂的需求，减少了废弃物及副产品的产生，保证了食品的安全和品质<sup>[6]</sup>。目前健康食品在各生产加工步骤中所应用的主要技术如表1所示。

目前大部分健康食品所提供的额外健康益处来源于原料中或额外添加的天然产物，天然产物是健康食品中额外健康益处的主要来源，如酚类物质的抗癌、抗炎、抗氧化作用<sup>[7]</sup>，生物活性肽的降血压、免疫调节作用<sup>[8]</sup>。然而，目前的文献往往专注于新技术的发展趋势，或分析某一类技术、食品原料，对比天然产物及其健康食品与高新技术这两个相互关联的行业热点仍较少，对二者整体趋势缺乏系统总结。基于此，本文将对近期应用于健康食品不同加工步骤中的高新技术进行简要介绍分析，以期对未来健康食品的进一步开发提供参考和帮助。

1 健康食品加工高新技术在天然产物生产中的应用

食品原料中的天然产物含量往往较低，需要额外进行提纯生产。天然产物的提取方法原理不一、种类繁多，但大多都是通过解除细胞中活性物质与其他物质、结构的结合，从而达到促进其释放、与介质充分接触溶解的目的。也有通过基因层面的设计编辑，直接生产目标产物的合成生物技术，更为绿色、环保、高效，但仍需继续探索。

1.1 超声波、微波辅助提取技术

超声波辅助提取和微波辅助提取技术目前已广泛用于各类活性物质的提取中，原理均为加速活性物质的释放及溶解。超声波、微波辅助提取技术较多应用于酚类及多糖类物质的提取，其主要区别在于前者通过冲击对细胞结构造成破坏，后者则通过升高温度。

超声辅助提取通过空化、热和机械3种效应，使液体压缩和膨胀循环形成瞬态气泡，对细胞壁造成机械冲击从而破裂，增大介质分子的运动速度和穿透力，提高反应速率，相较于微波处理具有时间短、温度低、适应性广等优势<sup>[9]</sup>。微波辅助提取技术则通过高频率振动使食品内的极性分子相互碰撞、挤压，使温度升高、活性物质快速浸出，具有选择性强、效率高、对环境无污染、质量稳定等特点<sup>[10]</sup>，但不适于水分较少的食品原料。

Shen Siwei等<sup>[11]</sup>发现用超声波与微波联合辅助提取三七多糖, 所得产品热稳定性、流变性和抗氧化性均优于传统方法。Li Junhui等<sup>[12]</sup>从经高压灭菌、超声处理后的香菇中提取多糖, 以达到尽可能破坏细胞壁和提高得率的目的。Sharma等<sup>[13]</sup>将超声辅助提取、微波辅助提取与传统提取方法作比较, 发现两种方法从南瓜皮和果肉中所提取的类胡萝卜素较传统方法均提高了1倍左右; 但由于超声波对活性物质的降解及微波处理所产生的热量, 提取参数存在上限, 过高的功率会使活性物质含量下降<sup>[14]</sup>。因此, 也可将多种技术进行联合应用以获得更好的提取效果。

1.2 超临界萃取 (supercritical fluid extraction, SFE) 和亚临界流体萃取 (sub-critical fluid extraction, SUBE) 技术

SFE技术有别于传统的溶剂萃取方法, 具有安全性高、选择性好、萃取速度快、不存在溶剂残留等优势<sup>[15]</sup>。SFE以超过临界温度和压力的流体为萃取剂, 温度较高, 多以CO<sub>2</sub>作溶剂应用于脂质等非极性或弱极性物质的提取, 但也可通过添加适当的助溶剂调节溶剂极性; SUBE以低于临界温度及压力的溶剂为萃取剂, 依据有机物相似相溶的原理, 通过浸泡过程中的分子扩散过程, 使原料中的目标产物转移到液态的萃取剂中, 再通过减压蒸发将萃取剂与目标产物分离, 温度较低, 溶剂常用丙烷、丁烷、二甲醚或水。因此, 可根据需要提取的目标产物极性及其热敏性进行二者之间的选择。

采用乙醇改性亚临界水萃取姜黄素, 可增加姜黄素的溶解度并有效防止其热降解<sup>[16]</sup>; 类似地, 在超临界CO<sub>2</sub>萃取时添加极性助溶剂, 可对黄酮、氨基酸等极性物质进行提取分离<sup>[17-18]</sup>。Lefebvre等<sup>[19]</sup>通过控制SFE参数, 选择性地从迷迭叶中分离出了迷迭香酸、鼠尾草酸与叶绿素; 当SFE与SUBE联合使用时, 则可进一步提高萃取效率。如Kamchonemenukool等<sup>[20]</sup>先后用超临界CO<sub>2</sub>萃取法和亚临界液化二甲醚萃取法提取米糠粕饼中的 $\gamma$ -谷维素时, 由于CO<sub>2</sub>一次萃取时除去了其他非极性化合物,  $\gamma$ -谷维素易被二次萃取时液化的二甲醚溶出, 所提取的 $\gamma$ -谷维素含量远高于传统方法及其他方法联用, 达8 128.51 mg/100 g。

1.3 生物预处理技术

生物预处理技术是指通过对产品进行发酵辅助提取或者酶辅助提取, 以提高天然产物的得率<sup>[21]</sup>。微生物和酶均可以降解细胞壁, 使活性成分在不受破坏的情况下更易于提取, 并使细胞中的一些前体成分得到释放, 通过分解或与内源酶反应, 从而提高原料中活性物质的含量。微生物发酵还能够充分利用加工废弃物, 产生新的风味及活性成分, 并降低有毒物质的含量, 如红毛丹皮<sup>[22]</sup>、鳄梨种子<sup>[23]</sup>等均可通过固态发酵辅助提取酚类物

质。也有研究利用副干酪乳杆菌产生的蛋白酶及乳酸对蟹壳分别进行脱蛋白及脱钙处理, 以破坏几丁质与碳酸钙、蛋白质形成的网络结构, 提取几丁质, 而当发酵与低强度超声 (<1 W/cm<sup>2</sup>) 联合使用时, 细菌的代谢活性能够得到增强, 达到缩短发酵时间、提高生产速率的目的<sup>[24]</sup>。

酶辅助萃取法相较于发酵法具有天然、简便、绿色、温和、高效、专一等优点, 但成本较高, 适用于需要用酶水解特定物质的食品原料。该法多应用于植物, 如果蔬、药材等, 主要采用果胶酶、纤维素酶; 也有应用于鱼类的酶辅助水萃取法<sup>[25]</sup>, 常采用蛋白酶。Amulya等<sup>[26]</sup>用纤维素酶辅助提取茄子皮中的花青素, 最高产量可达2 040.87 mg/kg (以没食子酸计); Durmus等<sup>[27]</sup>发现, 酶辅助提取使柠檬皮提取物中酚类化合物的含量增加了2~4倍。

1.4 合成生物技术

合成生物技术起源于基因工程技术, 是一种运用系统生物学、工程学等原理, 在基因层面进行设计编辑, 人为地构建新的细胞、生命系统或生物体的新兴技术。这一技术的发展使得搭建“细胞工厂”, 利用微生物辅助合成、改进特定的食品成分及天然产物成为可能, 且相较于传统的食品原料生产方式, 合成生物技术对环境、土地等的要求大大降低, 具有效率高、成本低、产品质量好等优点<sup>[28]</sup>。

合成生物技术的适用范围广, 可生产包括蛋白质、脂质、矿物质、维生素在内的各种宏量、微量营养素。如, 构建表达乳糖转运蛋白和将鸟苷二磷酸甘露糖转化为鸟苷二磷酸岩藻糖的酶的质粒, 并引入目标菌株以生产可作为母乳低聚糖添加至配方奶粉中的2'-岩藻糖基乳糖<sup>[29]</sup>; 通过模块化酶组装构建多酶复合物改造酿酒酵母, 其番茄红素产量增加58%, 滴度达到有文献报道以来最高 (2 300 mg/L)<sup>[30]</sup>; 耶氏解脂酵母经改造后的工程菌株, 其 $\beta$ -胡萝卜素产量可以达到6.5 g/L<sup>[31]</sup>。不难预料, 随着合成生物学技术的发展, 将会有越来越多的食品及成分通过这一技术生产; 但是由于其在2010年前后才真正兴起成为研究热点<sup>[32]</sup>, 其商业生产及安全性验证等问题尚未解决, 而关键的基因编辑技术也需要在各种“细胞工厂”未成熟之前反复探索选择。

## 2 食品加工高新技术在健康食品活性成分保护中的应用

大多数天然产物在应用中存在着生物利用率低、溶解性差、加工过程及胃肠道环境中稳定性差等问题, 极易在发挥作用前丧失活性或降解。食品运载体系是食品工业中的一类新兴技术, 可将活性物质用一定的结构及成分结合或包裹, 从而起到保护作用。



## 2.1 乳液

乳液是由一种及以上与另一种流体不混溶的流体以液滴的形式制备而成的分散系统。这种系统在热力学上不稳定,需要小分子表面活性剂、两亲聚合物或固体颗粒等界面活性成分以形成界面层,以使其达到稳定状态。

Pickering乳液作为一种新型乳液,与传统乳液采用分子乳化剂乳化不同,是由固体颗粒作为乳化剂进行稳定,拓展了其应用范围。在Pickering乳液中,乳化剂颗粒以不可逆的形式吸附于油-水界面,产生了较大的空间位阻,因此与通过分子表面活性剂稳定的乳液相比,Pickering乳液通常具有更高的抗聚结性,且对于物理条件的变化具有很强的稳定性,能较好地应用于食品加工过程中,通过不同的载体及工艺达到对天然产物进行运载的目的<sup>[33]</sup>。牛付阁等<sup>[34]</sup>制备了以资源丰富、价格低廉的纳米纤维素为载体的Pickering乳液并验证了其贮藏稳定性,表明其是一种适用性广的功能性成分运送体系;吴彤等<sup>[35]</sup>以牛蒡RG-1型果胶多糖/玉米醇溶蛋白复合颗粒为稳定剂构建Pickering乳液,所递送姜黄素的生物利用度最高可达60%以上。

纳米乳液的液滴尺寸通常较小( $<1\ 000\ \text{nm}$ ),相较于其他乳液,透光度、黏稠度较高,适用于制作透明、半透明或需要特定口感的饮料等<sup>[36]</sup>。纳米乳液常用于装载亲脂性活性物质或提取物,如类胡萝卜素<sup>[37]</sup>和南瓜籽油<sup>[38]</sup>。此外,纳米乳液的比表面积较大,在装载率高的同时,所需要的乳化剂浓度也较高。

双乳液( $W_1/O/W_2$ )通常需要两步乳化,使分散相液滴中包裹着更小的液滴,也被称为“乳液中的乳液”。双乳液液滴粒径大小在数十微米到数十纳米不等,同样常用于生物活性物质的封装递送,控制释放效果好、适用范围广,但由于其长期稳定性较差、步骤不够简便而尚未得到广泛应用<sup>[39]</sup>,仍需进一步开发新的乳化工艺及乳化剂。

## 2.2 脂质体

脂质体是一种由双层磷脂分子及其他物质自发在水中形成的球形结构,其传统制备方法通常为将脂质溶解在有机溶剂中后,蒸发有机溶剂,使脂质分散在水介质中形成悬浮液,如薄层分散法。此外,也出现了加热、均质等新制备方法。脂质体大小介于 $10\sim 10\ 000\ \text{nm}$ 之间,具有两亲性,可用于封装不同极性的物质,通常单层脂质体适于封装亲水性化合物,而多层适于封装亲脂性化合物。

脂质体因其靶向运送、控制释放能力和高生物相容性而被广泛用作医药、食品和化妆品等各个领域的载体,但由于结构中存在脂质导致其化学及热力学稳定性较差,因此常增加其他修饰材料以增加其在食品加工贮藏过程和消化道中的稳定性<sup>[40]</sup>。

通过选择不同的工艺及壁材,可封装不同的功能成分并设计解决不同问题,提高活性成分的生物利用率。如将酸樱桃多酚包封在壳聚糖脂质体里并喷雾干燥,可用于强化酸奶营养并使其在贮藏期间保持稳定<sup>[41]</sup>;以高压均质技术制备大豆卵磷脂纳米脂质体并以此为载体递送槲皮素,可靶向递送至结肠癌细胞并表现出良好的抗肿瘤能力<sup>[42]</sup>;N-琥珀酰壳聚糖包被的聚乙二醇脂质体能有效增强虾青素的稳定性和其在肠道中的靶向迁移能力<sup>[43]</sup>。

## 2.3 微胶囊

对天然产物进行微胶囊化包埋是一种有效提高化合物稳定性的方法,它是指将需要保护的芯材包裹在一定结构及成分的壁材内,控制其在特定条件下释放。这一技术在食品、药品、化妆品中都开始逐渐普及,它不仅能保护不稳定、易降解的活性物质,还可以在特定条件下实现靶向递送及缓释,从而使被包埋的物质均匀、长时间地发挥作用,具有稳定性好、负载率高等优点。通过采用不同的物理、化学处理方法,如混合、均质、喷雾、超声、添加溶剂等,并控制混合物的环境条件,可使活性分子自发封装形成微胶囊<sup>[44]</sup>。微胶囊发展至今已达纳米级,大小不一、形状多样,常用壁材主要有糊精、淀粉、明胶、乳清蛋白等;常用方法有喷雾干燥、冷冻干燥、静电纺丝(喷雾)、脂质体和微凝胶等,可视原料性质及加工需求选择不同的工艺及材料<sup>[45]</sup>。

微胶囊可应用于健康食品的多个品类,如糖果、饮料、调味酱、焙烤制品等。天然产物微胶囊化不但能提高天然产物的溶解度、生物利用度,延长其货架期,还能掩盖其可能存在的不良口感、风味,以提升产品的感官特性<sup>[46]</sup>。如用糯米淀粉、改性淀粉、麦芽糊精等作为壁材<sup>[47]</sup>,能有效减少黑枸杞花青素在肠液中的降解;Rivas等<sup>[48]</sup>通过喷雾干燥菊粉、麦芽糊精和番石榴汁以微胶囊化类胡萝卜素,在贮存60 d后抗氧化活性没有发现损失,证明微胶囊化能够较好地隔绝外部环境对活性成分所造成的破坏。包埋精油、金属离子可在起到保护作用的同时避免产生氧化味;多肽、植物提取物等则需要通过微囊化改善口感。

## 3 高新技术在健康食品成分改性中的应用

### 3.1 热加工技术

热处理会破坏食品中的维生素、酚类等有益成分,也会使淀粉、蛋白质等变性,使其更易消化或改善食品形状。应用于健康食品的热加工技术主要有微波加热、红外加热、欧姆加热等高效加热技术。微波加热通过电磁波振荡与电场变换使极性分子摩擦和碰撞,从而达到加热效果,具有效率高、耗能低等优势,但会出现加热不均匀的情况,即“冷点”和“热点”<sup>[49]</sup>。红外加热同

样引起分子摩擦碰撞,并且会传递一部分热量,但红外的穿透能力很低,只能加热食品表面以下几毫米,限制了其应用<sup>[50]</sup>。欧姆加热是一种电技术,可以快速均匀地加热食物,耗时短、易控制,并且能保持食品的颜色和营养价值,但它的电极与食品直接接触,存在一定的安全隐患<sup>[51]</sup>。

不同的热加工技术在熟制食品的过程中,也会对各成分分子起到不同的改性作用。如微波加热可能会改变淀粉的结构,600 W和700 W微波分别处理木薯淀粉5、15、30 s和60 s均会降低其溶胀和持水能力<sup>[52]</sup>。此外,微波加热还会导致淀粉颗粒内结晶域的破裂和重排,并诱导糖苷键断裂,进一步导致淀粉颗粒碎裂<sup>[53]</sup>,影响其溶胀、持水能力、持油能力、消化率等特性<sup>[54]</sup>。但红外加热可以增强木薯淀粉的膨胀能力,这可能是因为红外加热后的木薯淀粉分子之间的键出现扭曲,使水分子与淀粉分子有更多的接触<sup>[55]</sup>。Li Xuerui等<sup>[56]</sup>发现,欧姆加热会降低豆浆中蛋白的发泡性和溶解性,但会增加其乳化性,适于制作相关饮料类产品。

### 3.2 臭氧处理

臭氧可用于延长食品的保质期,同时常用于对饮用水进行消毒、降解农药残留、促进种子发芽和淀粉改性等场景<sup>[57]</sup>。当臭氧分子与有机物接触时,其强氧化性会导致各种化学反应,从而使微生物死亡、蛋白质变性、脂肪聚集、酶失活,进而影响食品的质构、稳定性及货架期等指标。

氧化是淀粉化学改性的传统方法之一,该过程需要次氯酸钠、过硫酸铵和过氧化氢等试剂,这些化学试剂会产生工业废水,导致成品存有痕量残留物,同时有产量低、安全性差等缺点。已有研究表明,利用臭氧的氧化性处理淀粉可使淀粉膨胀,糊化值增加,还可以增加玉米淀粉的凝胶强度,适于3D打印等场景<sup>[58]</sup>,因此采用臭氧改性淀粉是一项很有前景的新型绿色技术。此外,由于臭氧可以促进蛋白质交联及破坏蛋白质结构,经臭氧处理的牛奶会出现蛋白质聚集,适用于快速制作奶酪等产品或分离牛乳中的蛋白质<sup>[59]</sup>。通过研究臭氧对不同食品原料成分的作用,可定向开发改变食品某些特征的新方法。

### 3.3 酯化技术

酯化技术指通过酯化反应在原分子上连接新的功能性基团或改变其构型,从而获得原分子没有的生理活性或其他性质,具有可设计、效率高、效果好、成本低等优点,是使用较广泛的化学改性方法之一。酯化技术不仅能够增强食品成分或天然产物的活性、稳定性,还可增加其溶解度,赋予其新的特性。如用硫酸基团取代柑橘囊衣果胶寡糖中的羟基生成半合成酸性多糖,可使其体外抗肿瘤活性增强<sup>[60]</sup>;用磷钨杂多酸催化酯化黑米花

青素,得到了一种抗氧化性高于VE的亲脂花青素,拓展了花青素的应用范围<sup>[61]</sup>。改性淀粉也是酯化改性技术的常见应用方向。如辛烯基琥珀酸酐、琥珀酸酐、十二烯基琥珀酸酐等具有很强的疏水性,与淀粉酯化可在引入疏水性的同时保留淀粉主链的亲水性,这种两亲性改性淀粉同时具有高稳定性和封装性能,广泛应用于疏水活性物质的包埋或增溶<sup>[62]</sup>。杨家川<sup>[63]</sup>从荞麦麸皮中提取纤维素,选择乙酸水解法制备纳米晶后对其进行酯化改性,开发了一种具有降脂功能的纤维素纳米颗粒。然而,目前的酯化手段仍比较传统,未来随着对绿色环保工业技术需求的加大,现在的直接合成法或许将逐渐被采用酶法及微生物法进行酯化反应而取代。

### 3.4 超高压技术

超高压技术是指在高静水压力(100~1 000 MPa)条件下处理食品的技术。在超高压作用下,食品中的大分子如蛋白质分子,其氢键、离子键、水合作用和疏水相互作用发生改变,三级和四级结构遭到破坏,蛋白质结构膨胀松散,使其暴露出更多的酶切位点,提高了酶对蛋白质的催化效率和体外消化率<sup>[64]</sup>。超高压处理提高蛋白质消化率的另一个机制可能是通过破坏胰蛋白酶抑制剂中非共价键和二硫键等结构,从而降低抑制剂的活性<sup>[65]</sup>。需要注意的是,处理压力的提高和时间的延长也需在适中的范围内,如木瓜蛋白酶与超高压联合嫩化驼肉,加压时间超过20 min时胶原蛋白及肌肉细胞会遭到破坏,导致驼肉最大剪切力上升<sup>[66]</sup>;Linsberger-Martin等<sup>[67]</sup>发现在60 ℃、600 MPa处理条件下,豌豆和大豆中的蛋白质消化率显著增加,但压力过高则会使蛋白质分子链紧缩,导致其难以消化<sup>[68]</sup>。超高压还可以破坏淀粉的结构与功能,提高抗性淀粉比例,延缓淀粉消化从而控制餐后血糖上升,有益于人体健康<sup>[69]</sup>。而对于食品中的膳食纤维,超高压处理能够破坏不溶性膳食纤维的氢键,使其结构松散、保水能力增加、葡萄糖及胆固醇吸附能力增强,在控糖、控脂、预防便秘等健康食品开发方向均可应用<sup>[70]</sup>。因此,超高压技术可用于开发清洁标签的健康食品,在保留产品所需的感官特性同时提升食品的营养价值。

## 4 高新技术在健康食品灭菌保鲜中的应用

### 4.1 臭氧保鲜技术

臭氧具有强氧化性,用途广泛,其功能包括抗菌、抗病毒、消灭害虫和降解农药残留等。臭氧的微生物杀灭效应已经得到了广泛证明,它可以通过氧化破坏包括革兰氏阳性、阴性细菌及真菌、酵母、孢子和营养细胞在内的微生物中的各种细胞成分,从而对其产生致命作用,有效提高食品的安全质量。因此,臭氧



处理已成为目前消毒食品使用最广泛的方法之一<sup>[71]</sup>。Predmore等<sup>[72]</sup>对草莓和莴苣中人源诺如病毒替代品(鼠诺如病毒、灵长类杯状病毒)的气态臭氧灭活进行了研究,发现臭氧灭活病毒的机制为破坏病毒颗粒结构并降解病毒表面蛋白,从而使病毒失活。臭氧在食品工业中还可以与其他技术相结合应用,以提高消毒效率,缩短食品加工时间。如臭氧处理与乳酸溶液、紫外线处理等其他消毒步骤联用,能够在保持食品营养的同时大幅提高消毒效果<sup>[73]</sup>。

#### 4.2 超高压杀菌技术

作为新兴的非热加工技术,超高压技术的优点为仅破坏大分子中的非共价键,而不会破坏风味、颜色等感官特性;加工温度低,对营养物质影响小,耗能低,绿色环保;处理时压力在整个食品中均匀传递,与大小和形状无关,目前常用于流体、半流体及对固体形状没有要求的食品产品。超高压不但能够破坏微生物细胞的致密大分子,从而使其失去生存能力,还具有良好的风味及营养保留能力,约300~400 MPa的压力可将肠炎沙门氏菌、大肠杆菌和金黄色葡萄球菌等细菌有效减少至低于原来的1/1 000<sup>[74]</sup>。例如,经600 MPa、6 min、60 °C处理即可完全灭活甘蔗汁中的微生物,并钝化多酚氧化酶和过氧化物酶活性<sup>[75]</sup>。与此类似,苹果汁的超高压灭菌在灭活微生物的同时糖酸比提升,且与其他灭菌方法相比,风味物质损失最少<sup>[76]</sup>。Arakawa等<sup>[77]</sup>将超高压应用于清酒产品灭菌中,以减少巴氏杀菌过程中尿素等前体物质与乙醇自发反应而产生的可能致癌物氨基甲酸乙酯。坚果饮料经200 MPa或300 MPa超高压均质处理后,产品的保质期从3 d分别延长至30 d和57 d<sup>[78]</sup>。此外,超高压还可用于预制菜的灭菌加工中,如超高压处理糖醋排骨可以在达到灭菌效果的同时减少有机酸分解,增加鲜味氨基酸,改善其风味和口感<sup>[79]</sup>。

#### 4.3 低温等离子体技术

等离子体主要通过气体放电产生,是包含光子、电子、自由基、激发和非激发分子、正离子和负离子等粒子,并带有净中性电荷的混合物。目前低温等离子体的主要应用方向是延长食品的保质期、降解农药残留等,具有便捷安全、能耗低、杀菌效果好、无需加热、无污染等优点。低温等离子体技术被广泛用于各种果蔬、坚果、香料等的表面杀菌;而在肉品、乳品与水产品的保鲜中,低温等离子体中的粒子可以灭活其内源酶,并杀灭微生物,有效延长生鲜食品的货架期,确保其安全性<sup>[80]</sup>。徐艳阳等<sup>[81]</sup>在电源功率400 W的条件下处理生姜片4.6 min,杀菌率达99.89%,感官品质无明显变化。Cheng Junhu等<sup>[82]</sup>发现,低温等离子体处理对虾15 min后,其主要致敏原原肌球蛋白的免疫球蛋白E与最易与其结合两种肽(P1 LENRSLSDEEMDALENQ、P2 DRLEDELVNEKEKYKSITDE)的结合能力分别下降了9.97%和19.50%,在保鲜的同时降低了相关产品的过敏风

险。但低温等离子体与辐射类似,其产生的活性氧有可能对产品中的大分子,尤其是对脂质的结构及其感官特性造成影响,如轻微分解、变色、产生特殊气味等,因此更适用于低脂食品的处理<sup>[83]</sup>。

#### 4.4 辐照保鲜技术

食品辐照是指通过紫外线、可见光、红外线、无线电波等非电离辐射,或 $\gamma$ 射线、X射线、加速电子束等电离辐射,破坏食品或农产品中的细菌、病毒等微生物,并能够较好保留食品风味、颜色、味道、营养价值及其他特性的一种非热加工技术<sup>[84]</sup>。辐照技术应用于食品杀菌已有较长时间,但通过对辐射种类、剂量及温度、时间等条件进行创新改进,可对不同种类及货架期需求的食品达到降低微生物数量至完全灭菌等不等的效果。郭嘉等<sup>[85]</sup>发现,1.64 kGy  $\gamma$ -辐照能有效延缓羊肚菌贮藏过程中的软化及褐变。对于灭菌或消毒效果要求较高的情况,辐照也可与其他物质联用以达到更好的效果,如通过添加碳酸盐和柠檬酸盐增加婴幼儿奶粉中孢子的辐射敏感性,从而降低辐射剂量<sup>[86]</sup>;喷洒消毒剂微酸性电解水与短波紫外线-发光二极管辐照联用可协同减少食品接触表面材料上牢固的大肠杆菌O157:H7生物膜,且比任一单独处理更有效<sup>[87]</sup>。

### 5 高新技术在天然产物健康食品产品设计方面的应用

食品设计与传统和半经验的“食品产品开发”相比,更加专注于微观结构,通过逆向思维,即通过结果(需求)倒推,寻找能够生产出目标产品的原料、工艺、参数等。在这一过程中,除考虑营养、健康、个性化等因素外,跨学科知识的参与也常常不可或缺。

#### 5.1 3D打印技术

3D打印是一种新型制造技术,在发明初期主要应用于机械、医学等领域,近年来开始在食品及药品生产中崭露头角,通过将材料分层连续堆叠的方式生产三维产品。3D食品打印结合了3D打印和食品制造技术,适用范围广、开发前景广阔,既可以精确控制营养成分,如使用特定营养补充剂定制食品,在节约资源的同时实现个性化膳食、可持续制造;也可以改善食品的感官性状,如颜色、外型、质地、风味等,以增加健康食品的可接受度<sup>[88]</sup>。其具体方法包括激光烧结、黏结剂喷射、热熔挤出、喷墨3D等,其中热熔挤出打印是目前食品工业中最常用的技术。

在3D打印生产天然产物健康食品的过程中,影响产品质量的因素包括原料性质、建模情况、打印参数等,通过对打印材料黏弹性、稳定性及流动能力,打印速度、温度、方法等的调整,可以获得不同结构及质地的健康食品<sup>[89]</sup>。如向玉米粉中添加胡芦巴胶和亚麻籽

蛋白(0%~10%)能显著降低其黏度、硬度,并增加打印精度和强度,从而制作易吞咽、形状特殊的幼儿食品<sup>[90]</sup>。此外,3D打印后通过特定处理,使产品的外形、质地和营养等形状发生改变的技术称为4D打印,如使用短波紫外辐射触发3D打印紫薯糊中麦角甾醇向VD的营养转化,可减少因VD缺乏而引起的儿童与老年人骨质疏松和骨质疏松,进一步提升了产品的营养成分密度且减少了相应原料的使用<sup>[91]</sup>。

目前,3D打印生产食品的速度仍较为缓慢,未来仍需进行工艺优化探究,如对参数进行更精确的控制、预先进行物理仿真建模、用喷墨或激光打印代替挤出法,以达到在提升速度的同时提高精度;而由于打印材料对产品品质有直接影响,因此仍需要对各种食品原料的特性,尤其是物理学性质进一步研究,以便加速新产品的开发与应用,以早日实现大批量工业化生产。

## 5.2 数字化技术

数字化技术是一种利用电子工具、系统、设备和资源,如应用程序、硬件设备和通信网络等,进行数据处理、存储和传输的技术。而在今天,数字化技术主要指数据处理与通信。通过数据采集与计算驱动,能够发现新成分、寻找新组合,辅助确定天然产物健康食品的生产配方与参数。例如,对百里香精油中的4种主要化学物质进行包括数据库筛选与分子对接在内的生物信息学分析,预测了其抗炎作用并进行了进一步验证,可应用于食品及药品中<sup>[92]</sup>;Tura等<sup>[93]</sup>通过应用混合效应模型中的D-最优设计法,开发了一种基于发展中国家当地粮食作物的高能量及营养密度儿童辅食;非负矩阵分解和两步正则化最小二乘法的机器学习方法可以在基于营养成分的情况下,开发不同口味的食品及膳食<sup>[94]</sup>。

此外,对天然产物健康食品而言,其供应链环节长、情况复杂、影响因素多,涉及农业种植与食品加工、生产、销售等多个环节,需要高效的管理、判断与监控系统。通过应用一些新兴的工业4.0技术,如区块链、物联网、大数据分析等,能够提高生产力,降低安全及其他可能的风险,增强整个供应链的可追溯性和可持续性<sup>[95]</sup>。随着信息科学技术的发展,这些数字化技术在食品工业中的应用将进一步整合,不仅能加快天然产物健康食品加工模型的建立与新品的商业化设计开发,还能促进信息流通及产业转型,缩短天然产物健康食品从研发者到消费者的路径。

## 6 结 语

在天然产物健康食品加工过程中应用高新技术,不仅能够起到增加或富集食品活性成分的作用,更能保证食品的安全、风味与营养,极大提高健康食品的品质。

此外,高新技术同样加快了健康食品的研发速度,并将逐步取代传统技术和加工单元,从而促进健康食品行业的快速发展。

然而,对于快速发展的健康食品产业,支持其生产创新的高新技术在未来的自身发展方向及研发目标中仍需注意:1)不同技术的适用对象及条件不同,特点各异。对单一技术,应根据自身特点,探明其在各应用条件、对象之间的差异及作用机理,总结其优点与不足,进行定向改进创新;2)在技术联用方面,不同组合之间尚有很大的实验空间,需重视“逆向”“拆分”“重组”等思维的应用,实验最佳组合以达到弥补单一技术应用方面的不足,拓宽应用领域;3)一项技术从出现到最终投入实际生产,往往需要数年甚至数十年的时间,因此在创新技术的同时,应以应用为导向,尽量简化流程、普及知识、降低成本,以使开发与应用并重;4)同一技术可以出现在不同的加工单元,或者说一项技术可以完成多个加工步骤,可探索如何应用尽可能少的加工步骤达到加工目的;5)出于对可持续发展的考虑,应重点开发绿色、天然的新技术,降低污染与能耗,逐步淘汰对资源及环境不友好的旧技术。

## 参考文献:

- [1] 孙宝国,刘慧琳.健康食品产业现状与食品工业转型发展[J].食品科学技术学报,2023,41(2):1-6. DOI:10.12301/spxb202300126.
- [2] ESSA M M, BISHIR M, BHAT A, et al. Functional foods and their impact on health[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 60(3): 1-15. DOI:10.1007/S13197-021-05193-3.
- [3] 国务院办公厅.《国民营养计划(2017-2030年)》[EB/OL]. (2017-07-13) [2023-06-01]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/13/content\\_5210134.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/13/content_5210134.htm).
- [4] 中共中央 国务院.《“健康中国2030”规划纲要》[EB/OL]. (2016-10-25) [2023-06-01]. [https://www.gov.cn/zhengce/2016-10/25/content\\_5124174.htm](https://www.gov.cn/zhengce/2016-10/25/content_5124174.htm).
- [5] 中研网.中国健康食品行业市场调研 健康食品行业分析[R/OL]. (2022-12-15)[2023-06-01]. <https://www.chinairn.com/scfx/20221215/180724428.shtml>.
- [6] GAVAHIAN M, KHANEGHAH A M. Editorial overview: “emerging processing technologies to improve the safety and quality of foods”[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 152: 112296. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112296.
- [7] 郭新竹,宁正祥.天然酚类化合物及其保健作用[J].食品工业,2002,23(3):28-29.
- [8] SÁNCHEZ A, VÁZQUEZ A. Bioactive peptides: a review[J]. Food Quality and Safety, 2017, 1(1): 29-46. DOI:10.1093/fqsafe/fyx006.
- [9] NAIK A S, SURYAWANSHI D, KUMAR M, et al. Ultrasonic treatment: a cohort review on bioactive compounds, allergens and physico-chemical properties of food[J]. Current Research in Food Science, 2021, 4: 470-477. DOI:10.1016/j.crf.2021.07.003.
- [10] EKEZIE C F, SUN D W, CHENG J H. Acceleration of microwave-assisted extraction processes of food components by integrating technologies and applying emerging solvents: a review of latest developments[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 67: 160-172. DOI:10.1016/j.tifs.2017.06.006.

- [11] SHEN S W, ZHOU C, ZENG Y B, et al. Structures, physicochemical and bioactive properties of polysaccharides extracted from *Panax notoginseng* using ultrasonic/microwave-assisted extraction[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112446. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112446.
- [12] LI J H, ZHU Y Y, GU F T, et al. Efficient isolation of immunostimulatory polysaccharides from *Lentinula edodes* by autoclaving-ultrasonication extraction and fractional precipitation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 237: 124216. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.124216.
- [13] SHARMA M, BHAT R. Extraction of carotenoids from pumpkin peel and pulp: comparison between innovative green extraction technologies (ultrasonic and microwave-assisted extractions using corn oil)[J]. Foods, 2021, 10(4): 787. DOI:10.3390/foods10040787.
- [14] WANG X Y, LIU X Y, SHI N W, et al. Response surface methodology optimization and HPLC-ESI-QTOF-MS/MS analysis on ultrasonic-assisted extraction of phenolic compounds from okra (*Abelmoschus esculentus*) and their antioxidant activity[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134966. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.134966.
- [15] MARTÍNEZ-ÁVILA M, RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ J, GUTIÉRREZ URIBE J A, et al. Selective supercritical fluid extraction of non-polar phytochemicals from black beans (*Phaseolus vulgaris* L.) by-products[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2022, 189: 105730. DOI:10.1016/j.supflu.2022.105730.
- [16] REZAEI F, EIKANI M H, NOSRATINIA F, et al. Optimization of ethanol-modified subcritical water extraction of curcuminoids from turmeric (*Curcuma longa* L.) rhizomes: comparison with conventional techniques[J]. Food Chemistry, 2023, 410: 135331. DOI:10.1016/J.FOODCHEM.2022.135331.
- [17] VARAEE M, HONARVAR M, EIKANI H M, et al. Supercritical fluid extraction of free amino acids from sugar beet and sugar cane molasses[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2019, 144: 48-55. DOI:10.1016/j.supflu.2018.10.007.
- [18] SIQUEIRA S, FALCÃO-SILVA S D V, AGRA F D M, et al. Biological activities of *Solanum paludosum* Moric. extracts obtained by maceration and supercritical fluid extraction[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2011, 58(3): 391-397. DOI:10.1016/j.supflu.2011.06.011.
- [19] LEFEBVRE T, DESTANDAU E, WEST C, et al. Supercritical fluid chromatography development of a predictive analytical tool to selectively extract bioactive compounds by supercritical fluid extraction and pressurised liquid extraction[J]. Journal of Chromatography A, 2020, 1632: 461582. DOI:10.1016/j.chroma.2020.461582.
- [20] KAMCHONEMENUKOOL S, WONGWAIWECH D, THONGSOOK T, et al. Subcritical liquified dimethyl ether and supercritical fluid carbon dioxide extraction of gamma oryzanol from rice bran acid oil[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 14: 100672. DOI:10.1016/J.JAFR.2023.100672.
- [21] 曾维星, 程贤, 张竿晦, 等. 生物预处理技术在天然产物提取中的应用研究进展[J]. 生物化学工程, 2020, 54(5): 45-52.
- [22] YEPES-BETANCUR D P, MÁRQUEZ-CARDOZO C J, CADENA-CHAMORRO E M, et al. Solid-state fermentation-assisted extraction of bioactive compounds from hass avocado seeds[J]. Food and Bioprocess Processing, 2021, 126: 155-163. DOI:10.1016/j.fbp.2020.10.012.
- [23] CERDA-CEJUDO N D, BUENROSTRO-FIGUEROA J J, SEPÚLVEDA L, et al. Recovery of ellagic acid from mexican rambutan peel by solid-state fermentation-assisted extraction[J]. Food and Bioprocess Processing, 2022, 134: 86-94. DOI:10.1016/j.fbp.2022.05.001.
- [24] XING Y F, AWEYA J J, JIN R, et al. Low-intensity ultrasound combines synergistically with *Lactocaseibacillus paracasei* fermentation to enhance chitin extraction from crab shells[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 179: 114651. DOI:10.1016/j.lwt.2023.114651.
- [25] AITTA E, DAMERAU A, MARSOL-VALL A, et al. Enzyme-assisted aqueous extraction of fish oil from Baltic herring (*Clupea harengus membras*) with special reference to emulsion-formation, extraction efficiency, and composition of crude oil[J]. Food Chemistry, 2023, 424: 136381. DOI:10.1016/J.FOODCHEM.2023.136381.
- [26] AMULYA P, UL ISLAM R. Optimization of enzyme-assisted extraction of anthocyanins from eggplant (*Solanum melongena* L.) peel[J]. Food Chemistry: X, 2023, 18: 100643. DOI:10.1016/J.FOCHX.2023.100643.
- [27] DURMUS N, KILIC-AKYILMAZ M. Bioactivity of non-extractable phenolics from lemon peel obtained by enzyme and ultrasound assisted extractions[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102571. DOI:10.1016/J.FBIO.2023.102571.
- [28] ARUN K B, ANOOPKUMAR A N, SINDHU R, et al. Synthetic biology for sustainable food ingredients production: recent trends[J]. Systems Microbiology and Biomanufacturing, 2022, 3(1): 137-149. DOI:10.1007/S43393-022-00150-3.
- [29] HOLLANDS K, BARON M C, GIBSON J K, et al. Engineering two species of yeast as cell factories for 2'-fucosyllactose[J]. Metabolic Engineering, 2018, 52: 232-242. DOI:10.1016/j.ymben.2018.12.005.
- [30] KANG W, MA T, LIU M, et al. Modular enzyme assembly for enhanced cascade biocatalysis and metabolic flux[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4248. DOI:10.1038/s41467-019-12247-w.
- [31] LARROUDE M, CELINSKA E, BACK A, et al. A synthetic biology approach to transform *Yarrowia lipolytica* into a competitive biotechnological producer of  $\beta$ -carotene[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2018, 115(2): 464-472. DOI:10.1002/BIT.26473.
- [32] BRUCHEZ A, POSSANI L, DE SOUZA A R L, et al. Historical perspective of synthetic biology in food production[J]. Advances in Bioscience and Biotechnology, 2022, 13(10): 443-453. DOI:10.4236/ABB.2022.1310029.
- [33] CHEON J, HAJI F, BAEK J, et al. Pickering emulsions for functional food systems[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 11: 100510. DOI:10.1016/J.JAFR.2023.100510.
- [34] 牛付阁, 韩备竞, 寇梦璇, 等. 纳米纤维素颗粒稳定的Pickering乳液的性能研究[J]. 中国食品学报, 2020, 20(6): 166-172. DOI:10.16429/j.1009-7848.2020.06.020.
- [35] 吴彤, 冯进, 黄午阳, 等. 牛蒡果胶多糖/玉米醇溶蛋白复合颗粒稳定的Pickering乳液构建及对姜黄素的递送功效[J]. 食品科学, 2023, 44(14): 37-46. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221102-014.
- [36] ØYE G, SIMON S, RUSTAD T, et al. Trends in food emulsion technology: pickering, nano-, and double emulsions[J]. Current Opinion in Food Science, 2023, 50: 101003. DOI:10.1016/J.COFS.2023.101003.
- [37] CHEN L, YOKOYAMA W, LIANG R, et al. Enzymatic degradation and bioaccessibility of protein encapsulated  $\beta$ -carotene nano-emulsions during *in vitro* gastro-intestinal digestion[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100(C): 105177. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.105177.
- [38] ORDOÑEZ LOZADA M I, RODRIGUES MALDONADE I, BOBROWSKI RODRIGUES D, et al. Physicochemical characterization and nano-emulsification of three species of pumpkin seed oils with focus on their physical stability[J]. Food Chemistry, 2020, 343(14): 128512. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128512.



- [39] KUMAR A, KAUR R, KUMAR V, et al. New insights into water-in-oil-in-water (W/O/W) double emulsions: properties, fabrication, instability mechanism, and food applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 128: 22-37. DOI:10.1016/J.TIFS.2022.07.016.
- [40] LIU W L, HOU Y Y, JIN Y Y, et al. Research progress on liposomes: application in food, digestion behavior and absorption mechanism[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 104: 177-189. DOI:10.1016/j.tifs.2020.08.012.
- [41] AKGÜN D, GÜLTEKİN-ÖZGÜVEN M, YÜCETEPE A, et al. Stirred-type yoghurt incorporated with sour cherry extract in chitosan-coated liposomes[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101(C): 105532. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.105532.
- [42] MELCHIOR S, CODRICH M, GORASSINI A, et al. Design and advanced characterization of quercetin-loaded nano-liposomes prepared by high-pressure homogenization[J]. Food Chemistry, 2023, 428: 136680. DOI:10.1016/J.FOODCHEM.2023.136680.
- [43] LIU A Y, CHAI X H, ZHU S, et al. Effects of *N*-succinyl-chitosan coating on properties of astaxanthin-loaded PEG-liposomes: environmental stability, antioxidant/antibacterial activities, and *in vitro* release[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 244: 125311. DOI:10.1016/J.IJBIOMAC.2023.125311.
- [44] GONÇALVES R F S, MARTINS J T, DUARTE C M M, et al. Advances in nutraceutical delivery systems: from formulation design for bioavailability enhancement to efficacy and safety evaluation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 78: 270-291. DOI:10.1016/j.tifs.2018.06.011.
- [45] SHARIF N, KHOSHNOUDI-NIA S, JAFARI S M. Nano/microencapsulation of anthocyanins: a systematic review and meta-analysis[J]. Food Research International, 2020, 132: 109077. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109077.
- [46] DELFANIAN M, SAHARI A M. Improving functionality, bioavailability, nutraceutical and sensory attributes of fortified foods using phenolics-loaded nanocarriers as natural ingredients[J]. Food Research International, 2020, 137: 109555. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109555.
- [47] 陈程莉. 黑枸杞花青素提取及微胶囊制备研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020: 31-38.
- [48] RIVAS J C, CABRAL L M C, ROCHA-LEÃO M H M. Microencapsulation of guava pulp using prebiotic wall material[J]. Brazilian Journal of Food Technology, 2021, 24: e2020213. DOI:10.1590/1981-6723.21320.
- [49] ZENG S Y, LI M G, LI G H, et al. Innovative applications, limitations and prospects of energy-carrying infrared radiation, microwave and radio frequency in agricultural products processing[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 121: 76-92. DOI:10.1016/J.TIFS.2022.01.032.
- [50] PU Y Y, SUN D W. Prediction of moisture content uniformity of microwave-vacuum dried mangoes as affected by different shapes using NIR hyperspectral imaging[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 33: 348-356. DOI:10.1016/j.ifset.2015.11.003.
- [51] TORGBO S, SUKATTA U, KAMONPATANA P, et al. Ohmic heating extraction and characterization of rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) peel extract with enhanced antioxidant and antifungal activity as a bioactive and functional ingredient in white bread preparation[J]. Food Chemistry, 2022, 382: 132332. DOI:10.1016/J.FOODCHEM.2022.132332.
- [52] OYEYINKA A S, AKINWARE O R, BANKOLE T A, et al. Influence of microwave heating and time on functional, pasting and thermal properties of cassava starch[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 56(1): 215-223. DOI:10.1111/ijfs.14621.
- [53] LI Y, HU A J, WANG X Y, 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. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2019.05.046.
- [54] PAN Y Y, SUN D W, CHENG J H, et al. Non-destructive detection and screening of non-uniformity in microwave sterilization using hyperspectral imaging analysis[J]. Food Analytical Methods, 2018, 11(6): 1568-1580. DOI:10.1007/s12161-017-1134-5.
- [55] URAIVES P, CHOOMJAIHAN P. Some physicochemical properties of tapioca starch during infrared heat treatment[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 301: 12-44. DOI:10.1088/1755-1315/301/1/012044.
- [56] LI X R, YE C W, TIAN Y, et al. Effect of ohmic heating on fundamental properties of protein in soybean milk[J]. Journal of Food Process Engineering, 2018, 41(3): e12660. DOI:10.1111/jfpe.12660.
- [57] RAGHUNATHAN R, PANDISELVAM R, KOTHAKOTA R, et al. The application of emerging non-thermal technologies for the modification of cereal starches[J]. LWT-Food Science & Technology, 2021, 138(1): 110795. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110795.
- [58] JUNIOR M M, CASTANHA N, ANJOS D P B C, et al. Ozone technology as an alternative to fermentative processes to improve the oven-expansion properties of cassava starch[J]. Food Research International, 2019, 123: 56-63. DOI:10.1016/j.foodres.2019.04.050.
- [59] PANDISELVAM R, SINGH A, AGRIPOULOU S, et al. A comprehensive review of impacts of ozone treatment on textural properties in different food products[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 127: 74-86. DOI:10.1016/J.TIFS.2022.06.008.
- [60] 朱凯, 刘闪闪, 叶兴乾, 等. 柑橘囊果胶多糖及其降解产物硫酸酯化对抗肿瘤活性的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(2): 23-30. DOI:10.16429/j.1009-7848.2022.02.003.
- [61] 于殿宇, 张星震, 仲文, 等. 磷钨杂多酸的固定化及其酯化黑米花青素的研究[J]. 中国食品学报, 2021, 21(7): 188-196. DOI:10.16429/j.1009-7848.2021.07.023.
- [62] CAO F, LU S M, WANG L, et al. Modified porous starch for enhanced properties: synthesis, characterization and applications[J]. Food Chemistry, 2023, 415: 135765. DOI:10.1016/J.FOODCHEM.2023.135765.
- [63] 杨家川. 高脂肪吸附性荞麦纤维素纳米晶的制备及其降脂功能研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022: 91-93.
- [64] HAN X, SUN Y, HUANGFU B X, et al. Ultra-high-pressure passivation of soybean agglutinin and safety evaluations[J]. Food Chemistry: X, 2023, 18: 100726. DOI:10.1016/J.FOCHX.2023.100726.
- [65] GUERRERO-BELTRÁN A J, ESTRADA-GIRÓN Y, SWANSON G B, et al. Pressure and temperature combination for inactivation of soymilk trypsin inhibitors[J]. Food Chemistry, 2009, 116(3): 676-679. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.03.001.
- [66] 孙树远, 陈琪, 何静, 等. 木瓜蛋白酶与超高压技术嫩化驼肉的研究[J]. 中国食品学报, 2023, 23(4): 239-250. DOI:10.16429/j.1009-7848.2023.04.023.
- [67] LINSBERGER-MARTIN G, WEIGLHOFFER K, PHUONG T P T, et al. High hydrostatic pressure influences antinutritional factors and *in vitro* protein digestibility of split peas and whole white beans[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 51(1): 331-336. DOI:10.1016/j.lwt.2012.11.008.

- [68] 郭蔚波, 赵燕, 徐明生, 等. 不同处理方式下蛋白质结构变化与体外消化性关系研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(1): 327-333. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180612-181.
- [69] LI W H, BAI Y F, MOUSAA S A S, et al. Effect of high hydrostatic pressure on physicochemical and structural properties of rice starch[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(6): 2233-2241. DOI:10.1007/s11947-011-0542-6.
- [70] SANG J Q, LI L, WEN J, et al. Chemical composition, structural and functional properties of insoluble dietary fiber obtained from the Shatian pomelo peel sponge layer using different modification methods[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 165: 113737. DOI:10.1016/J.LWT.2022.113737.
- [71] EPELLE E I, MACFARLANE A, CUSACK M, et al. Ozone application in different industries: a review of recent developments[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 454: 140188. DOI:10.1016/j.cej.2022.140188.
- [72] PREDMORE A, SANGLAY G, LI J, et al. Control of human norovirus surrogates in fresh foods by gaseous ozone and a proposed mechanism of inactivation[J]. Food Microbiology, 2015, 50: 118-125. DOI:10.1016/j.fm.2015.04.004.
- [73] PYATKOVSKYY T, SHYNKARYK M, YOUSEF A, et al. Fresh produce sanitization by combination of gaseous ozone and liquid sanitizer[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 210: 19-26. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2017.03.031.
- [74] SEHRAWAT R, KAUR P B, NEMA K P, et al. Microbial inactivation by high pressure processing: principle, mechanism and factors responsible[J]. Food Science and Biotechnology, 2021, 30: 19-35. DOI:10.1007/s10068-020-00831-6.
- [75] SREDEVI P, JAYACHANDRAN L E, RAO P S. Response surface optimization and quality prediction of high pressure processed sugarcane juice (*Saccharum officinarum*)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 152: 112190. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112190.
- [76] ZHU D S, ZHANG Y Y, KOU C C, et al. Ultrasonic and other sterilization methods on nutrition and flavor of cloudy apple juice[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 84: 105975. DOI:10.1016/J.ULTSONCH.2022.105975.
- [77] ARAKAWA G, YOKOI K. Application of multiple ultra-high-pressure homogenization to the pasteurization process of Japanese rice wine, sake[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2023, 136(2): 117-122. DOI:10.1016/J.JBIOSEC.2023.05.003.
- [78] CODINA-TORRELLA I, GUAMIS B, ZAMORA A, et al. Microbiological stabilization of tiger nuts' milk beverage using ultra-high pressure homogenization. A preliminary study on microbial shelf-life extension[J]. Food Microbiology, 2018, 69: 143-150. DOI:10.1016/j.fm.2017.08.002.
- [79] SUN Y, ZHANG L L, ZHANG H, et al. Effects of two sterilization methods on the taste compositions of sweet and sour spare ribs flavor[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 104: 104143. DOI:10.1016/J.JFCA.2021.104143.
- [80] ANSARI A, PARMAR K, SHAH M. A comprehensive study on decontamination of food-borne microorganisms by cold plasma[J]. Food Chemistry: Molecular Sciences, 2022, 4: 100098. DOI:10.1016/j.fochms.2022.100098.
- [81] 徐艳阳, 李雪凤. 低温等离子体处理对生姜片杀菌效果及品质的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(2): 192-201. DOI:10.16429/j.1009-7848.2023.02.019.
- [82] CHENG J H, WANG H F, SUN D W. Insight into the IgE-binding sites of allergenic peptides of tropomyosin in shrimp (*Penaeus Chinensis*) induced by cold plasma active particles[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 234: 123690. DOI:10.1016/J.IJBIOMAC.2023.123690.
- [83] 樊润泽, 祁苗, 张新颖, 等. 冷等离子体对肉蛋白的影响及其在肉品保藏加工中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 250-259. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220401-011.
- [84] BISHT B, BHATNAGAR P, GURURANI P, et al. Food irradiation: effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 372-385. DOI:10.1016/J.TIFS.2021.06.002.
- [85] 郭佳, 陈谦, 徐攀, 等. 基于正交偏最小二乘判别分析探究<sup>60</sup>Co-γ辐照对羊肚菌采收后低温贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(21): 315-323. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20211204-051.
- [86] ROBICHAUD V, BAGHERI L, SALMIERI S, et al. Effect of γ-irradiation and food additives on the microbial inactivation of foodborne pathogens in infant formula[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 139: 110547. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110547.
- [87] SONG H, YOON S, HA J. Effects of slightly acidic electrolysed water spraying and ultraviolet C light-emitting diode irradiation combination on the inactivation kinetics of *Escherichia coli* biofilms on food contact surfaces[J]. Food Control, 2023, 152: 109879. DOI:10.1016/J.FOODCONT.2023.109879.
- [88] ALAMI A H, OLABI A G, KHURI S, et al. 3D printing in the food industry: recent progress and role in achieving sustainable development goals[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2024, 15(2): 102386. DOI:10.1016/j.asej.2023.102386.
- [89] WASEEM M, TAHIR A U, MAJEED Y. Printing the future of food: the physics perspective on 3D food printing[J]. Food Physics, 2023, 1: 100003. DOI:10.1016/J.FOODP.2023.100003.
- [90] NIU D, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Investigation of 3D printing of toddler foods with special shape and function based on fenugreek gum and flaxseed protein[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253(5): 127203. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.127203.
- [91] CHEN J L, ZHANG M, SAKAMON D. UV-C irradiation-triggered nutritional change of 4D printed ergosterol-incorporated purple sweet potato pastes: conversion of ergosterol into vitamin D<sub>2</sub>[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 150: 111944. DOI:10.1016/J.LWT.2021.111944.
- [92] RIGHI N, DEGHIMA A, ISMAIL D, et al. Chemical composition and *in vivo/in silico* anti-inflammatory activity of an antioxidant, non-toxic essential oil from *Thymus algeriensis* Boiss. & Reut.[J]. South African Journal of Botany, 2023, 157: 64-74. DOI:10.1016/J.SAJB.2023.03.050.
- [93] TURA D C, BELACHEW T, TAMIRU D, et al. Optimization of dabi teff-field pea based energy and protein dense novel complementary food with improved sensory acceptability using D-optimal mixture design[J]. Heliyon, 2023, 9(8): e19029. DOI:10.1016/J.HELIYON.2023.E19029.
- [94] LEI Z F, HAQ U A, DORRAKI M, et al. Composing recipes based on nutrients in food in a machine learning context[J]. Neurocomputing, 2020, 415: 382-396. DOI:10.1016/j.neucom.2020.08.071.
- [95] ABBATE S, CENTOBELLI P, CERCHIONE R. The digital and sustainable transition of the agri-food sector[J]. Technological Forecasting & Social Change, 2023, 187: 122222. DOI:10.1016/J.TECHFORE.2022.122222.