

# 基于波谱技术的人参活性成分加工变化机制解析及功效保持策略研究

杨涵童 孔令蕙 江萌萌 王英秀 李翔国

(延边大学农学院, 吉林 延吉 133002)

**摘要:** 人参作为药食同源植物, 其核心活性成分人参皂苷因抗氧化、抗炎等生理功能被广泛应用, 但其结构与活性易受食品加工影响。在清洗、蒸煮、发酵等加工环节, 温度、pH、微生物酶系会通过水解、氧化等反应改变人参活性成分的种类、含量及稳定性, 其内在的“成分转化—活性—生物利用度”联动机制是当前研究的核心与难点。该研究结合高效液相色谱(HPLC)、核磁共振(NMR)、液相色谱—质谱联用(LC-MS)等波谱技术, 系统解析加工对人参活性成分的影响机制, 提出加工参数优化、微生物发酵、纳米递送系统等 6 类功效保持策略, 建立加工过程成分监测模型。在此基础上, 对该领域未来的重点研究方向与发展趋势进行了展望。

**关键词:** 人参; 活性成分; 波谱分析; 加工技术; 功效保持

## Processing mechanism and efficacy maintenance strategy of ginseng active ingredients based on spectroscopy technology

YANG Hantong KONG Linghui JIANG Mengmeng WANG Yingxiu LI Xiangguo

(Agricultural College of Yanbian University, Yanji, Jilin 133002, China)

**Abstract:** Ginseng, as a medicinal and edible plant, has ginsenosides as its core active components, which are widely applied due to their physiological functions such as antioxidant and anti-inflammatory activities; however, their structures and activities are easily affected by food processing. During processing steps such as cleaning, steaming/boiling, and fermentation, temperature, pH, and microbial enzyme systems alter the types, contents, and stability of active components through reactions such as hydrolysis and oxidation. The intrinsic linkage mechanism of "component transformation-activity-bioavailability" constitutes a core focus and challenge in current research. This study, based on spectroscopic techniques including high-performance liquid chromatography (HPLC), nuclear magnetic resonance (NMR), and liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS), systematically elucidates the mechanisms by which processing affects the active components of ginseng. Six categories of efficacy maintenance strategies, such as processing parameter optimization, microbial fermentation, and nano-delivery systems, are proposed, and a component-monitoring model for the processing procedure is established. On this basis, future key research directions and development trends in this field are further prospected.

**Keywords:** ginseng; active ingredients; spectral analysis; processing technology; efficacy maintenance

人参作为重要的药食同源植物, 其健康功效主要归因于人参皂苷、多糖、多酚等生物活性成分, 这些成分也被证实具有缓解环境毒素毒性的潜力<sup>[1]</sup>。然而, 这些成分在食品加工过程中并非稳定不变。从清洗、切片到蒸煮、

干燥、发酵, 每一步都可能引发复杂的水解、氧化、异构化及微生物转化反应, 这与食品加工对营养成分的普遍影响规律相一致<sup>[2]</sup>, 同时也会导致活性成分的种类、含量、结构乃至生物利用度发生显著改变<sup>[3-4]</sup>。例如, 传统热加工

**基金项目:** 吉林省科技厅项目(编号: 20220404012NC); 吉林省现代农业产业技术体系(编号: JLARS-2025-040304)

**通信作者:** 李翔国(1980—), 男, 延边大学副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: 2420187676@qq.com

**收稿日期:** 2025-09-06 **改回日期:** 2026-03-12

**引用格式:** 杨涵童, 孔令蕙, 江萌萌, 等. 基于波谱技术的人参活性成分加工变化机制解析及功效保持策略研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(5): 1-9.

**Citation:** YANG Hantong, KONG Linghui, JIANG Mengmeng, et al. Processing mechanism and efficacy maintenance strategy of ginseng active ingredients based on spectroscopy technology[J]. Food & Machinery, 2026, 42(5): 1-9.

在促进稀有人参皂苷生成的同时,常伴随热敏性成分的降解<sup>[5-6]</sup>;微生物发酵能显著提升某些皂苷的生物利用度,但其转化效率受菌株和工艺参数影响极大,批次稳定性难以控制<sup>[7-8]</sup>。因此,仅仅描述加工前后成分含量的变化是远远不够的,必须深入揭示其内在的化学转化规律与分子作用机制。

在这一研究进程中,现代波谱技术发挥着不可替代的核心作用。传统的化学成分分析方法难以实现复杂体系中多种成分的动态、原位监测与精细结构解析。而高效液相色谱(HPLC)、核磁共振(NMR)、液相色谱-质谱联用(LC-MS)等波谱技术,凭借其高分离效能、高灵敏度、能够提供精确的定性定量信息以及深入的分子结构洞察能力,已成为解析人参加工“黑箱”过程的利器<sup>[9-11]</sup>。通过系统应用这些技术,能够实时追踪关键活性成分在加工过程中的动态变化轨迹;精准识别新生成的转化产物并阐明其转化路径;从分子水平上揭示加工参数(如温度、时间、pH、压力)与成分变化之间的关系。这种基于机制的理解,是后续设计高效、靶向的功效保持策略的前提。文章旨在系统阐述如何运用波谱技术解析人参加工过程中的成分变化机制,并基于此认知,全面梳理和评述现有的及前沿的功效保持策略,以期为推动人参产业向精准化、标准化方向发展提供技术支撑。

# 1 基于波谱技术的加工过程中人参活性成分变化机制解析

## 1.1 热加工过程中皂苷的转化规律与分子机制

热加工(如蒸煮、干燥、烘焙)是人参相关产品生产中最常见的工序,其通过热能驱动一系列化学反应,对人参皂苷的结构与组成产生深远影响。高效液相色谱技术在此领域的应用最为广泛,它能够精确量化加工前后各人参皂苷单体含量的变化。研究<sup>[12-13]</sup>表明,在 90~100 ℃下蒸煮 80~100 min,原人参二醇型皂苷(如 Rb1、Rc、Rb2)和原人参三醇型皂苷(如 Rg1、Re)会通过水解、脱水等反应,逐步转化为稀有人参皂苷,如 Rg3、Rg5、Rk1 等。特别是黑人参加工中的反复蒸煮工艺,被证实是显著提高 Rg3、Rk1、Rg5 等稀有人参皂苷含量的有效手段<sup>[14]</sup>。Chen 等<sup>[5]</sup>在风味人参片加工中发现,120 ℃烘焙 30 min 可使 Rb1 向 Rg3 的转化率达到 28%。高效液相色谱的动态监测能够绘制出关键皂苷随温度和时间变化的转化曲线,为确定最佳热处理终点(如 Rg3 含量达到峰值时)提供直接依据<sup>[9]</sup>。

然而,高效液相色谱提供的主要是含量信息,对于转化机制和产物结构的深层解析需要液相色谱-质谱联用和核磁共振技术的联用。液相色谱-质谱联用/质谱通过其强大的结构鉴定能力,能够阐明热加工中皂苷转化的具体路径。例如,它可证实 Rb1 转化为 Rg3 是通过失去两个葡萄糖基实现的;而 Rg5 的生成则可能涉及进一步的

脱水反应<sup>[13]</sup>。核磁共振技术,特别是二维核磁共振谱图,能够无破坏性地解析新生成皂苷的精确化学结构,包括苷元类型、糖基种类、连接位置及构型,这对于确认黑参等深加工产品中的新化合物(如新的达玛烷型三萜皂苷)至关重要<sup>[10]</sup>。综合这些波谱技术揭示的机制可知,热加工对人参皂苷的影响具有“双向性”:一方面,适度的热处理是生产高活性稀有人参皂苷的必要手段;另一方面,过高的温度或过长时间会导致皂苷过度降解乃至结构破坏,同时造成热敏性氨基酸(如天冬氨酸)和多酚类成分的大量损失<sup>[5-6]</sup>,并可能影响其对抗环境毒素毒性的潜力<sup>[15]</sup>。这种机制认知提示,热加工工艺优化的核心在于精准平衡“有益转化”与“有害降解”。这一原则具有普遍意义,在其他热敏性中药材(如猪苓)的干燥加工中,通过综合评分法等方法优化干燥参数以最大化保留活性成分,也是研究的核心<sup>[16]</sup>。

## 1.2 微生物发酵过程中的生物转化机制解析

微生物发酵是利用微生物及其酶系对人参底物进行生物修饰,旨在提高活性成分功效和生物利用度的绿色加工技术。这一过程的机制解析高度依赖于波谱技术。液相色谱-质谱联用技术,尤其是高分辨质谱与非靶向代谢组学策略的结合,成为追踪发酵体系中复杂成分动态变化的强大工具。它能够全景式地扫描发酵液中皂苷及其代谢产物的变化,清晰展示例如原人参皂苷 Rb1 如何被微生物分泌的 $\beta$ -葡萄糖苷酶逐步水解,最终转化为化合物 K(CK)的完整路径<sup>[7,11]</sup>。Adiamo 等<sup>[11]</sup>在体外结肠发酵模型中的应用即展示了液相色谱-质谱联用技术在识别酚类化合物微生物转化产物方面的能力,该思路同样适用于人参皂苷。

核磁共振技术则从另一个维度提供了关键信息。通过比较发酵前后提取物的核磁共振谱图,可以非靶向性地发现新出现的特征信号峰,进而指导新转化产物的分离与结构鉴定。这对于发现新的、具有潜在更高活性的发酵衍生皂苷至关重要<sup>[10]</sup>。波谱分析共同揭示,微生物发酵转化的优势在于其特异性和高效性,能够定向地将大分子、低生物利用度的原型皂苷转化为小分子、高活性的次级皂苷(如 CK),使其肠道吸收率提升 10~15 倍<sup>[7]</sup>,见图 1。然而,机制研究也明确了其挑战所在:不同菌株(乳酸菌、曲霉菌等)的酶系组成与活性差异巨大,导致转化效率和产物谱系存在显著批次波动(可达 $\pm 20\%$ )<sup>[7-8]</sup>。因此,基于波谱技术的代谢轮廓分析,可用于筛选高效、稳定的发酵菌株,并优化发酵工艺参数(温度、pH、时间),以实现转化过程的可控与标准化。

## 1.3 高静水压(HHP)等非热加工技术的作用机制

高静水压(HHP)作为一种非热加工技术,为热敏性人参活性成分的提取与保留提供了新途径。其机制与热加工有本质不同,主要依靠超高静压(通常 300~600 MPa)

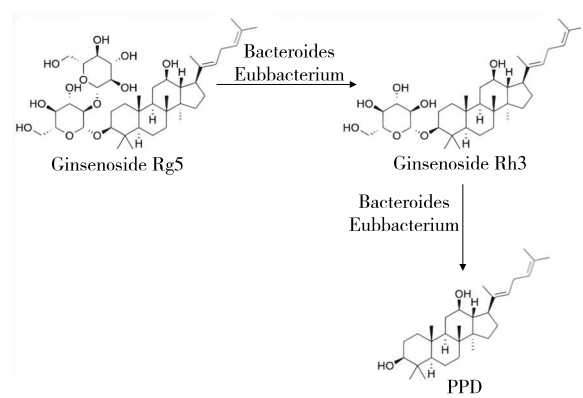


图1 细菌对人参皂苷的化学转化<sup>[13]</sup>

Figure 1 Chemical transformation of ginsenosides by bacteria

的物理作用。高效液相色谱对比分析直观地展示了其效果:Lee等<sup>[17]</sup>研究发现,300 MPa高静水压处理鲜人参,其皂苷提取率较传统热水提取提升了25%。更重要的是,液相色谱—质谱联用和核磁共振的结构分析证实,经高静水压处理后提取的人参皂苷,其质谱碎片离子和核磁共振化学位移与未经处理的原料基本一致,表明高压处理并未引发皂苷糖苷键的水解或苷元骨架的化学变化<sup>[17-18]</sup>。

高静水压技术的主要作用在于利用高压使细胞壁和膜结构发生不可逆的破裂或渗透性改变,从而促使胞内活性成分更充分、更快地溶出到提取介质中,整个过程在常温或低温下进行,避免了热效应导致的成分降解与变性<sup>[18-19]</sup>。因此,高静水压技术的核心优势在于“物理破壁,低温保留”,这种技术特别适用于鲜人参、人参原浆等追求最大化保留天然成分的产品开发。当然,波谱技术也助力于评估该技术的边界,例如研究不同压力水平、保压时间对成分溶出效率和微观结构的影响,以确定最佳工艺。

1.4 其他加工技术的机制初探与波谱分析应用

除上述主要技术外,其他加工环节同样需要波谱技

术来阐明其影响。例如,药材的趁鲜加工(如清洗、切片)对后续成分保留至关重要,这在丹参、黄芩等药材中已被证实可显著提升活性成分保留率<sup>[20]</sup>。在即食人参薯片的加工中,浸泡、预热、蒸煮、冷冻和冻干等多个步骤串联,高效液相色谱分析显示每个环节都会对总皂苷、单体皂苷及氨基酸含量产生累积影响<sup>[5]</sup>。FTIR(傅里叶变换红外光谱)可通过特征吸收峰(如1 050 cm<sup>-1</sup>附近的C—O—C伸缩振动)的变化,快速评估加工过程中皂苷等成分是否发生整体性的官能团改变或降解<sup>[21]</sup>。超声波辅助提取技术,其空化效应、机械效应能促进成分释放,这属于可减少营养损失的新型加工技术范畴<sup>[22]</sup>。高效液相色谱监测证实其可提升提取率30%以上,但液相色谱—质谱联用也提示需控制超声温度(如50℃以下)以防止局部过热引起成分变化<sup>[23]</sup>,这与其他新型加热技术(如红外加热)中通过参数优化来减少活性成分降解的研究结论一致<sup>[24]</sup>。精准控制温度、时间等参数是提升活性成分含量的关键,这在肉桂的炮制研究中也有体现<sup>[25]</sup>,也体现了新型加热技术中参数精确控制的重要性<sup>[24]</sup>。计算机模拟消化(in silico)与体外消化模型结合液相色谱—质谱联用分析,可用于预测和评估人参蛋白在加工后经消化可能产生的生物活性肽,拓展功效研究的维度<sup>[26]</sup>。

1.5 不同加工技术影响机制对比分析

为清晰呈现不同加工技术对人参活性成分的影响差异,现将主要加工技术的作用机制、优势与不足整理如表1所示。

2 基于明确变化机制的人参活性成分功效保持策略

2.1 加工参数的精准优化与动态调控

针对热加工“双向效应”的机制,策略核心在于通过优化温度、时间、pH、介质等参数,最大化有益转化,最小化有害降解。这正契合了减少食品加工过程中营养素损失的通用策略思想,即通过对加工介质、分段处理等方式的调控来实现目标<sup>[27]</sup>。这需要对加工中营养成分的流失机制有清晰认识<sup>[28]</sup>,也离不开高效液相色谱等技术的实

表1 主要加工技术的作用机制、优势与不足

Table 1 Mechanisms, advantages, and disadvantages of the main processing technologies

| 加工技术                | 作用机制                                   | 优势                        | 不足                           |
|---------------------|----------------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 热加工(蒸煮、干燥)          | 高温引发水解、脱水、异构化,促进原皂苷向稀有人参皂苷转化(如Rb1→Rg3) | 操作简便、成本低,稀有人参皂苷转化率高(达28%) | 热敏成分降解(损失率15%~25%),需精准控温     |
| 微生物发酵               | 微生物酶(β-葡萄糖苷酶)断裂糖苷键,转化为高活性皂苷(如Rb1→CK)   | 生物利用度提升10~15倍,多酚含量增加50%   | 菌株差异导致批次波动(±20%),需标准化参数      |
| 高静水压(HHP)           | 300~400 MPa高压破裂细胞壁,常温提取活性成分            | 取率提升25%,热敏成分保留率>90%       | 设备成本高,处理规模<100 L/批次          |
| 其他加工技术(浸泡、非热技术、超声波) | 50%乙醇浸泡促进皂苷溶出(溶出率65%);超声波空化效应加速成分释放    | 绿色环保,浸泡成本低,超声波提取率提升30%    | 浸泡>4 h使皂苷水解(损失15%),超声波需控温50℃ |

时反馈。例如,基于“Rb1 向 Rg3 转化动力学”和“热敏氨基酸热降解动力学”的高效液相色谱研究数据,可建立数学模型,优选出“95 °C 煮沸 90 min+70 °C 分段干燥”的工艺,使 Rg3 含量提升 40%,同时将氨基酸损失控制在 10% 以内<sup>[13]</sup>。这实质上是利用了不同成分对温度敏感性的差异。该思路在其他药材加工中也被证实有效,如通过优化干燥参数减少肉苁蓉、丹参中活性成分的损失<sup>[29-30]</sup>。响应面法、人工智能算法可与此结合,建立多目标优化模型<sup>[31-32]</sup>。其优势是直接嵌入现有工艺,成本低;难点在于需针对不同人参品种、部位和产品目标建立庞大的参数数据库。

## 2.2 微生物发酵过程的标准化与定向调控

针对微生物发酵批次稳定性差、转化机制复杂的挑战,功效保持策略转向对发酵过程的精细调控。利用液相色谱—质谱联用代谢组学分析作为筛选工具,可以从大量菌株中挑选出转化效率高、产物谱稳定、副产物安全的优良发酵菌种或菌群组合(如特定比例的乳酸菌与酵母菌混合发酵)<sup>[8]</sup>。在发酵过程中,可借助在线或离线波谱监测(如近红外光谱、定期液相色谱—质谱联用取样),实时监控关键皂苷(如 CK)的含量变化,进而通过反馈控制系统自动调节温度、pH 或补料策略,确保发酵终点的一致性和目标产物的得率<sup>[8]</sup>,见图 2。此策略能从根本上提升发酵产品的品质均一性,但技术要求高,初期投入大。

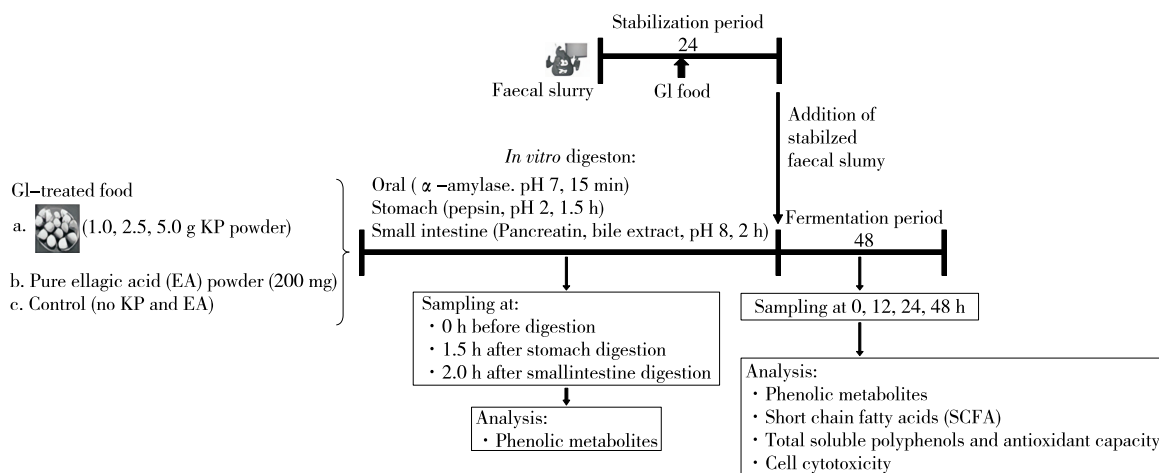


图 2 体外消化和发酵试验<sup>[31]</sup>

Figure 2 *In-vitro* digestion and fermentation experiment

## 2.3 纳米递送与微胶囊化技术

针对人参皂苷在加工、贮藏及体内环境中易受光、热、氧、酸碱和消化酶影响的稳定性与生物利用度问题,纳米递送系统和微胶囊技术提供了有效的物理隔离与修饰方案,见图 3。其机制是通过载体材料(如脂质体、多糖、蛋白质)将活性成分包裹起来,形成保护屏障。陈筱婷<sup>[34]</sup>研究表明,将人参皂苷 CK 封装于大豆卵磷脂脂质体中,可使其在模拟胃肠液中的稳定性提高 4 倍,生物利用度增加 3 倍。将人参多酚包埋于麦芽糊精等壁材中,能显著减缓其在贮藏期间的氧化,3 个月后保留率较未包埋样品提升 50%<sup>[35-36]</sup>。该策略的优势是全方位提升稳定性、水分散性和可控释放性;挑战在于需选择安全、可降解的载体材料(如果胶、壳聚糖),并优化封装工艺以平衡包封率、负载量和成本<sup>[35]</sup>。

## 2.4 协同保护剂的科学复配

基于加工中活性成分降解多由氧化、水解等反应介导的机制,添加天然协同保护剂是一种简便有效的策略。其作用机制包括:清除自由基(抗氧化)、螯合催化

降解的金属离子、调节体系 pH 以稳定成分等。例如,添加 0.1% 的迷迭香提取物与 0.05% 的维生素 E,可通过协同抗氧化效应,有效抑制人参制品在加工和贮藏中的氧化酸败,减少活性损耗 10%~15%<sup>[23]</sup>,见图 4。天然植物提取物(如多酚、皂苷、生物活性肽)因其安全性高,正逐步替代合成添加剂,不仅能保护活性成分,有时还能赋予产品额外的健康属性<sup>[23,37]</sup>。此策略的关键在于明确添加物与目标成分之间的相互作用,避免负面影响风味或引入新的不稳定性,并需通过试验确定最佳添加量和复配比例。

## 2.5 绿色非热加工技术的集成与创新

为从根本上避免热损伤,集成应用多种非热加工技术成为前沿策略。其核心理念是利用不同物理场的协同作用,在低温下实现高效加工。例如,“超声波预处理”可以破坏细胞结构,再结合“HHP 提取”,可以在低温下大幅提高皂苷的提取效率和速率<sup>[18,21]</sup>。脉冲电场、冷等离子体等技术也可与生物活性化合物协同,用于人参的杀菌、改性或辅助提取,在保障安全的同时更好地保留功能成

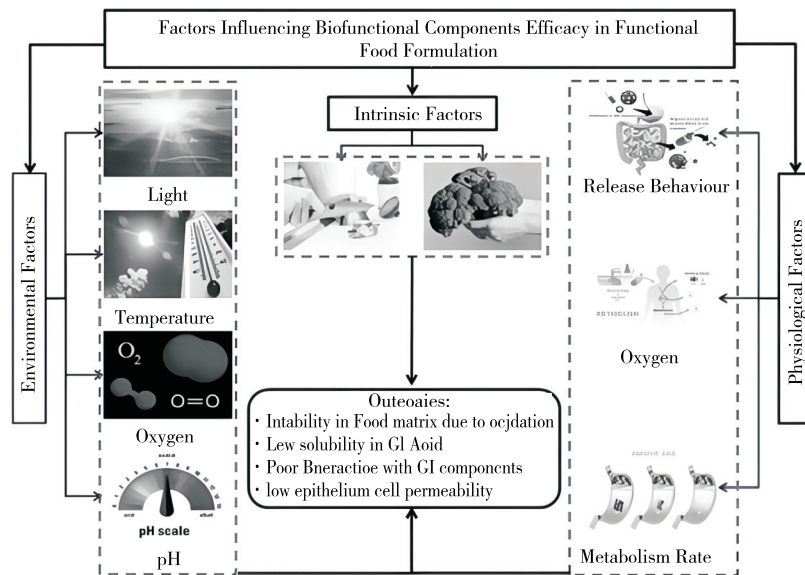
图3 功能性食品配方中影响生物功能成分功效的因素<sup>[33]</sup>

Figure 3 Factors influencing biofunctional components and efficacy in functional food formulation

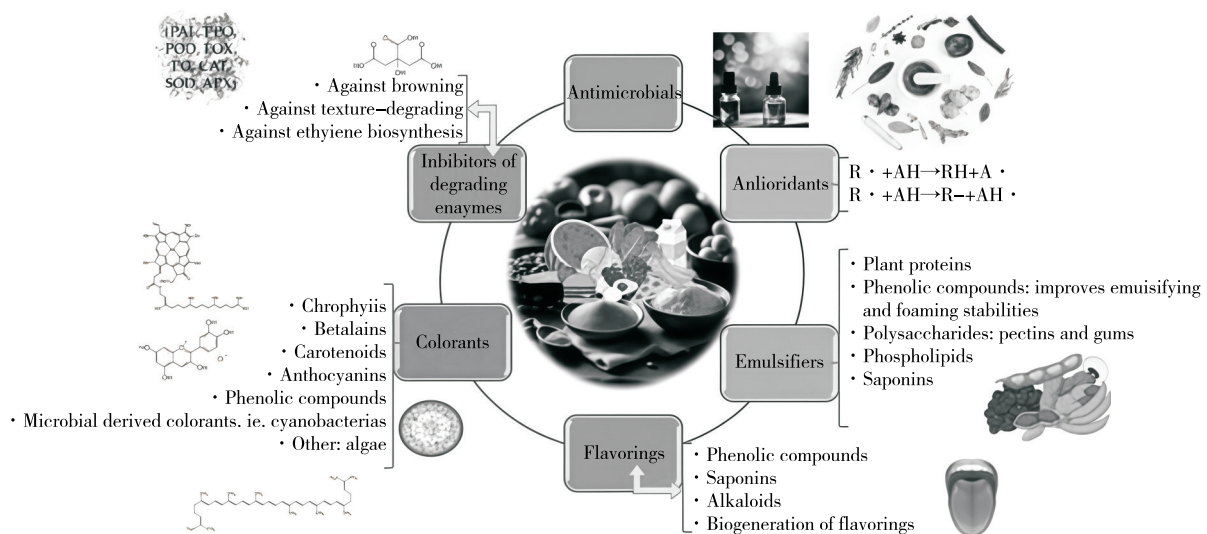
图4 天然物质和食品应用中的功能成分<sup>[23]</sup>

Figure 4 Functional components in natural substances and food applications

分<sup>[38]</sup>。这些技术联用方案需要深入研究其协同机制,并解决设备成本高、规模化放大难的问题,但其代表了大健康食品加工的未来绿色方向<sup>[39-40]</sup>。

## 2.6 活性包装与智能保鲜系统

针对产品在贮运流通环节面临的氧化和微生物污染风险,基于机制设计活性包装是一道重要防线。其机制是将具有抗氧化、抗菌功能的天然生物活性物质(如人参自身多酚、植物精油、纳米银)负载于包装材料或制成可食性薄膜,使其在包装内部缓慢释放,创造一个局部的保护性微环境<sup>[41-42]</sup>。例如,将人参多酚与鱼肌原纤维蛋白

复合制成可食性薄膜覆盖于人参片表面,既能阻隔氧气,又能持续释放抗氧化成分,实现双重保护<sup>[41]</sup>。智能包装则可集成时间—温度指示剂、新鲜度指示剂等,可视化地监控产品质量变化。该策略环保且能延长货架期,但对包装材料的机械性能、阻隔性能和活性成分的控释技术提出了更高要求<sup>[42]</sup>,见图5。

## 2.7 功效保持策略对比及创新应用建议

为更好地选择和应用人参活性成分功效保持策略,现将各策略的核心优势、局限性及适用场景整理如表2所示。

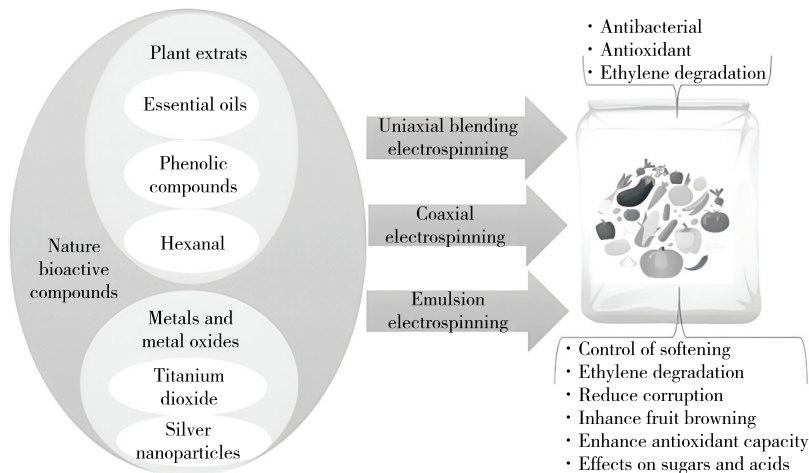


图 5 用于功能材料的天然生物活性化合物<sup>[42]</sup>

Figure 5 Natural bioactive compounds for functional materials

表 2 各策略的核心优势、局限性及适用场景

Table 2 Core advantages, limitations, and applicable scenarios of strategies

| 功效保持策略     | 核心优势                    | 适用场景                    | 创新应用建议                                          |
|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|
| 优化加工参数     | 成本低、易落地,活性保留率提升 15%~25% | 传统人参制品(红参、人参片)          | 结合响应面法,建立“品种—参数—活性”关联模型 <sup>[33]</sup>         |
| 微生物发酵与生物转化 | 生物利用度提升 10~15 倍,副产物可利用  | 高活性产品(发酵饮品、CK 提取物)      | 采用混合发酵(乳酸菌:酵母菌=3:1),提升转化稳定性 <sup>[8]</sup>      |
| 纳米递送系统     | 稳定性提升 3~4 倍,贮藏保留率达 78%  | 功能性食品(口服液、软胶囊)          | 用果胶替代合成载体,降低成本且符合天然需求 <sup>[35]</sup>           |
| 协同作用添加物    | 操作简便,活性损耗减少 10%~15%     | 加工及贮藏全环节                | 添加 0.1% 迷迭香提取物+0.05% 维生素 E,抑制氧化 <sup>[23]</sup> |
| 新型非热加工技术   | 保留热敏成分,效率高,绿色环保         | 热敏性人参活性成分提取,高品质人参制品加工   | “超声波+HHP”联用,实现高效温和提取 <sup>[18,21]</sup>         |
| 智能包装和可食性薄膜 | 持续保护,环保,减少化学防腐剂         | 人参制品贮藏和运输,尤其适合即食型、鲜人参制品 | 开发人参多酚—蛋白复合薄膜,实现活性缓释 <sup>[41]</sup>            |

3 展望

尽管基于波谱技术的人参加工机制与功效保持研究已取得显著进展,但面对大健康产业对产品精准化、高效化、个性化的更高要求,仍存在若干关键挑战与广阔发展空间。未来研究应着力于贯通“基础机制—技术工艺—产品应用”的全链条,推动人参加工从经验导向迈向精准设计的新阶段。

(1) 深化“加工—代谢—功效”的跨尺度联动机制研究。

尽管已有研究揭示了多种加工条件下成分的转化途径,但对其在体内的最终去向及实际健康效应的阐述仍不够深入,未来需建立更为系统、完整的研究体系。在加工阶段,可运用在线液相色谱—质谱联用或过程分析技术对关键成分的转化动力学进行原位、实时监测,并与微观结构变化(如通过扫描电子显微镜观察细胞破损程度)

相互关联,进而构建更精准的“加工参数—成分变化”预测模型。

在代谢与功效层面,应进一步融合先进体外模型与多组学技术。例如,借助液相色谱—质谱联用/质谱代谢组学追踪加工产物在仿生消化后的代谢轨迹,结合转录组学分析其对肠道上皮细胞或免疫细胞关键信号通路的影响,在分子与细胞层面直接建立加工产物与生物效应之间的关联<sup>[11,37,43]</sup>。此外,可利用无菌动物或菌群定制动物模型,验证经加工的人参提取物如何通过调控肠道菌群的结构与功能,从而影响宿主全身能量代谢、免疫稳态等,系统阐述“加工改变成分→成分调控菌群→菌群干预宿主健康”的远端作用链条<sup>[7,13]</sup>。这些工作将为人参功能食品的“按需设计”奠定科学基础。

(2) 推动多模态绿色加工技术的智能集成与产业化适配。

当前,单一加工技术往往难以同时兼顾效率、品质与成本。未来的技术突破应聚焦于多种绿色非热加工技术(如超声波、高压均质、脉冲电场、冷等离子体)的智能集成与协同优化。例如,研究“脉冲电场预处理”提升细胞膜通透性后,如何调整后续“低温高压萃取”的工艺参数,从而在更低能耗下实现更高提取效率,并借助核磁共振及活性检测评价协同处理对成分结构及功能活性的影响<sup>[38-39]</sup>。

与此同时,人工智能与机器学习将在工艺优化中发挥关键作用。通过积累不同产地、批次人参原料的波谱指纹(如高效液相色谱、近红外光谱)及其对应优质产品数据,可训练预测模型,最终实现基于原料特性的工艺参数自适应推荐与在线调控。此外,为推进产业化,需开展工程放大研究,并与装备制造领域协同创新,开发适用于人参黏稠浆料或固体原料的连续式、规模化绿色加工设备,配套建立全过程质量控制标准,推动实验室技术向稳定、高效的工业应用转化<sup>[19,40]</sup>。

(3) 构建全生命周期评价体系并驱动个性化产品开发。

要推动人参产业的可持续发展与价值提升,必须跨越单一加工环节,构建覆盖“育种/种植—采收—加工—包装—贮运—消费—废弃物回收”的全生命周期评价体系。这需要整合波谱成分分析、环境检测及经济分析手段,量化各环节的活性成分保留率、能耗、水耗、碳排放与成本,建立“营养—环境—经济”三重综合评价模型<sup>[44-45]</sup>。该模型可为产业选择可持续加工路线、为政策制定生态标识提供依据。

在此框架下,个性化产品开发将成为重要方向。基于精准营养理念,未来研究应结合人群基因组、代谢组及膳食数据,明确不同健康状态人群(如慢性炎症、糖代谢异常、高强度脑力劳动者)对人参活性成分组合的差异化需求。进而,利用前述智能加工技术定向制备富含特定功效组分(如高Rg3型、高CK型、高多糖型)的原料基料,并通过柔性制造技术开发多样化剂型与食品形态(例如3D打印营养软糖、速溶凝胶颗粒、个性化复合功能饮品),最终衔接数字健康平台,实现“检测—推荐—定制”一体化服务模式。

(4) 拓展人参活性成分在“大健康+”领域的跨界融合创新。

人参活性成分的应用场景应进一步拓宽,实现从传统健康产品向“健康赋能型原料”的转变。在食品工业中,可深入探索人参皂苷、多酚作为天然抗氧化剂、保鲜剂或风味改良剂,在肉制品、食用油及烘焙食品中的应用潜力与作用机制,逐步替代化学合成添加剂<sup>[23]</sup>。

在美妆与个人护理领域,可基于人参皂苷的抗炎、抗氧化及促进细胞活性等功能,利用纳米脂质体或聚合物

胶束等递送技术,开发具有抗衰老、修护功效的高端护肤品或头皮护理产品,并系统评估其经皮吸收效率与局部生物学效应<sup>[34,42]</sup>。在医药辅料方面,可研究改性人参多糖作为药物缓释载体或伤口敷料水凝胶基质的可行性。

此外,应积极推进人参加工副产物(如参渣)的高值化利用,例如将其碳化制备用于水处理的生物质吸附材料,或通过发酵转化制备植物促生菌剂,实现资源循环利用<sup>[32,46]</sup>。这些跨界应用的关键在于系统开展安全性、有效性及稳定性评价,并加强食品科学、材料科学、化妆品科学及环境工程等多学科协同创新。这种交叉融合的研究模式,正如在柑橘转运蛋白研究<sup>[47]</sup>或黄精等药食同源植物开发中所展现的<sup>[48]</sup>,将成为推动人参产业走向“健康赋能”新阶段的重要动力。

## 参考文献

- [1] JUNG E M, LEE S H, LEE G S. Protective effects of Korean red ginseng against toxicity of endocrine-disrupting chemicals [J]. *Journal of Ginseng Research*, 2023, 47(2): 193-198.
- [2] 覃佳铭. 食品加工技术对食品营养成分的影响研究[J]. *现代食品*, 2025(12): 121-123.
- [3] QIN J M. Research on the influence of food processing technology on the nutritional composition of food[J]. *Modern Food*, 2025(12): 121-123.
- [4] BAI J, ZHU Z X, LUO W, et al. Microbial fermentation affects the structure-activity relationship of bioactive compounds in ginseng and its applications in fermentation products: a review [J]. *Foods*, 2025, 14(14): 2 473.
- [5] YE X W, LI C S, ZHANG H X, et al. Saponins of ginseng products: a review of their transformation in processing[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2023, 14: 1177819.
- [6] CHEN J L, DU B, CAI W X, et al. Ginsenosides and amino acids in flavored ginseng chips as affected by food formulation and processing technology[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 62(1): 517-524.
- [7] BAE H J, CHUNG S I, LEE S C, et al. Influence of aging process on the bioactive components and antioxidant activity of ginseng (*Panax ginseng* L.) [J]. *Journal of Food Science*, 2014, 79(10): H2 127-H2 131.
- [8] JI H Y, GUO L D, YU D, et al. Application of microorganisms in panax ginseng: cultivation of plants, and biotransformation and bioactivity of key component ginsenosides[J]. *Archives of Microbiology*, 2024, 206(11): 433.
- [9] SENANAYAKE D, TORLEY P J, CHANDRAPALA J, et al. Microbial fermentation for improving the sensory, nutritional and functional attributes of legumes[J]. *Fermentation*, 2023, 9 (7): 635.
- [10] 常翠, 陈思思, 王娟, 等. HPLC法测定大鼠皮肤中三七皂苷 R1 和人参皂苷 Rb1[J]. *中成药*, 2017, 39(9): 1 885-1 888.

- CHANG C, CHEN S S, WANG J, et al. Determination of notoginsenoside R1 and ginsenoside Rb1 in rat skin by HPLC [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2017, 39(9): 1 885-1 888.
- [10] ZHAO X T, DOU D Q, QU Y, et al. Structure elucidation and NMR spectral assignments of one new dammarane-type triterpenoid saponin from black ginseng[J]. Journal of Asian Natural Products Research, 2024, 26(5): 636-643.
- [11] ADIAMO O Q, BOBASA E M, PHAN A D T, et al. In-vitro colonic fermentation of kakadu plum (*Terminalia ferdinandiana*) fruit powder: microbial biotransformation of phenolic compounds and cytotoxicity[J]. Food Chemistry, 2024, 448: 139057.
- [12] 张淼, 秦昆明, 李伟东, 等. 人参炮制过程中化学成分变化及机制研究[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(19): 3 701-3 706.
- ZHANG M, QIN K M, LI W D, et al. Research on chemical reactions during ginseng processing[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2014, 39(19): 3 701-3 706.
- [13] ELSAMAN T, MUDDATHIR A M, MOHIELDIN E A M, et al. Ginsenoside Rg5 as an anticancer drug: a comprehensive review on mechanisms, structure-activity relationship, and prospects for clinical advancement[J]. Pharmacological Reports, 2024, 76(2): 287-306.
- [14] HUANG L, LI H J, WU Y C. Processing technologies, phytochemistry, bioactivities and applications of black ginseng-a novel manufactured ginseng product: a comprehensive review[J]. Food Chemistry, 2023, 407: 134714.
- [15] AYU SILFIA BUDIASHI K, EKA HANDREAN G. The anti-aging properties of panax ginseng: a narrative review of mechanisms and clinical evidence[J]. International Journal of Health and Pharmaceutical (IJHP), 2025, 5(1): 157-164.
- [16] 刘丽婷. 基于综合评分法结合分形理论对猪苓干加工方法的研究[D]. 天津: 天津中医药大学, 2020: 47-51.
- LIU L T. Study on the drying processing method of polyporusumbellatus based on comprehensive scoring and fractal theory[D]. Tianjin: Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, 2020: 47-51.
- [17] LEE M S, JUNG S, OH S, et al. Effect of high hydrostatic pressure extract of fresh ginseng on adipogenesis in 3T3-L1 adipocytes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(12): 2 409-2 415.
- [18] 张海军, 李媛媛, 钟祥静. 超高压灭菌技术在食品加工中的应用探讨[J]. 粮油与饲料科技, 2024(2): 10-12.
- ZHANG H J, LI Y Y, ZHONG X J. Discussion on the application of ultra-high pressure sterilization technology in food processing[J]. Grain and Feed Technology, 2024(2): 10-12.
- [19] BALA BALASUBRAMANIAM V M, MARTÍNEZ-MONTEAGUDO S I, GUPTA R. Principles and application of high pressure-based technologies in the food industry[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2015, 6(1): 435-462.
- [20] 张雪梅. 丹参、黄芩药材趁鲜加工关键技术与质量影响研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021: 59.
- ZHANG X M. Study on key technology and quality influence of fresh processing of *salvia miltiorrhiza* and *scutellaria baicalensis*[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2021: 59.
- [21] SHAMS R, KAUR S, DASH K K, et al. A review of emerging technologies for the extraction of bioactive compounds from berries (phalsa berries) [J]. Horticulturae, 2024, 10(5): 455.
- [22] 金锋. 新型食品加工技术对食品营养的影响[J]. 中国食品工业, 2023(15): 106-107, 110.
- JIN F. Influence of new food processing technologies on food nutrition[J]. China Food Industry, 2023(15): 106-107, 110.
- [23] NIETO G, MARTÍNEZ-ZAMORA L, PEÑALVER R, et al. Applications of plant bioactive compounds as replacers of synthetic additives in the food industry[J]. Foods, 2023, 13(1): 47.
- [24] 蔡明珏. 新型加热技术在食品加工中的应用及其研究进展[J]. 现代盐化工, 2022, 49(2): 67-68.
- CAI M J. Application and research progress of new heating technologies in food processing[J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2022, 49(2): 67-68.
- [25] 骆声秀. 肉桂产地加工与炮制一体化工艺及其质量评价研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2018: 94-95.
- LUO S X. Integrated technology of origin processing and Paozhi for *Cinnamomi cortex* and study on its quality evaluation[D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2018: 94-95.
- [26] DU C, GONG H S, ZHAO H W, et al. Recent progress in the preparation of bioactive peptides using simulated gastrointestinal digestion processes[J]. Food Chemistry, 2024, 453: 139587.
- [27] 薛逸秋. 减少食品加工过程中营养损失的策略[J]. 食品安全导刊, 2024(22): 104-106.
- XUE Y Q. Strategies to reduce nutrient loss in food processing [J]. Journal of Food Safety Guide, 2024(22): 104-106.
- [28] 郑腾霄. 食品加工过程中营养成分流失的机制与调控方法研究[J]. 食品安全导刊, 2025(13): 108-110.
- ZHENG T X. Study on the mechanism and regulation of nutrient loss in food processing[J]. Journal of Food Safety Guide, 2025(13): 108-110.
- [29] 陈奥. 肉苁蓉切片射频真空干燥特性、品质及热质传递规律研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2025: 67-68.
- CHEN A. Study on the characteristics, quality and heat and mass transfer law of radiofrequency vacuum drying of *cistanche slices*[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2025: 67-68.
- [30] 王雨晨. 丹参采后干燥特性及品质变化研究[D]. 济南: 山东中医药大学, 2022: 56.

- WANG Y C. Study on drying characteristics and quality changes of *Salvia miltiorrhiza*[D]. Jinan: Shandong University of Traditional Chinese Medicine, 2022: 56.
- [31] 徐琳. 黄芪甲苷提取工艺优化及黄芪提取物在饮料中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 51.
- XU L. Optimal extraction of astragaloside IV and application of astragalus extract in beverage[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 51.
- [32] 方成维, 麻秀萍, 陈亮, 等. 石菖蒲挥发油纤维素酶辅助提取工艺优化及抑制 GABA-T 活性成分研究[J]. 食品与机械, 2024, 40(5): 146-153.
- FANG C W, MA X P, CHEN L, et al. Optimization of cellulase-assisted extraction of volatile oil from *Acorus tatarinowii* and study on its inhibitory components on GABA-T activity[J]. Food & Machinery, 2024, 40(5): 146-153.
- [33] TRIPATHY S, VERMA D K, GUPTA A K, et al. Nanoencapsulation of biofunctional components as a burgeoning nanotechnology-based approach for functional food development: a review[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2023, 53: 102890.
- [34] 陈筱婷. 食品加工中非热处理技术对果蔬营养保留的影响研究[J]. 中外食品工业, 2024(22): 5-7.
- CHEN X T. Study on the effect of non-thermal processing technologies on nutrient retention of fruits and vegetables in food processing[J]. Chinese and Foreign Food Industry, 2024 (22): 5-7.
- [35] ABAD I, CONESA C, SÁNCHEZ L. Development of encapsulation strategies and composite edible films to maintain lactoferrin bioactivity: a review[J]. Materials, 2021, 14(23): 7358.
- [36] 刘甜甜. 杭白菊提取物功效成分分析及其包封系统构建[D]. 杭州: 浙江大学, 2022: 86-87.
- LIU T T. Study on functional components and encapsulation systems construction of *Crysanthemum morifolium* ramat. cv. Hangbaiju extracts[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022: 86-87.
- [37] ROY P, TOMASSONI D, TRAINI E, et al. Natural antioxidant application on fat accumulation: preclinical evidence[J]. Antioxidants, 2021, 10(6): 858.
- [38] KUMAR A, HAILU G G, XV M, et al. Synergistic integration of high-pressure processing, pulsed electric fields, cold plasma, and UV light with bioactive compounds for enhanced food safety, quality, and shelf-life: new advances and mechanisms[J]. Food and Humanity, 2025, 5: 100757.
- [39] CHEMAT F, ROMBAUT N, MEULLEMIESTRE A, et al. Review of green food processing techniques. preservation, transformation, and extraction[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 41: 357-377.
- [40] 贺瑶, 周彤, 王静, 等. 食品加工中的营养保留技术: 从传统方法到现代创新[J]. 家电科技, 2024(4): 42-46.
- HE Y, ZHOU T, WANG J, et al. Nutrient retention techniques in food processing: from traditional methods to modern innovations[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2024(4): 42-46.
- [41] YANG F M, XUE W H, WANG J, et al. Fabrication, characterization, and enhancement strategies of fish myofibrillar protein-based films: a comprehensive review[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2024, 46: 101397.
- [42] CUI X Z, YOU Y, DING Y B, et al. Improving the function of electrospun film by natural substance for active packaging application of fruits and vegetables[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 191: 115683.
- [43] LEE D Y, NOREN HOOTEN N, O'CONNELL J F, et al. The role of ginseng and its bioactive compounds in aging: cells and animal studies[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2025, 16(1): 333-354.
- [44] AMIT S K, UDDIN MD M, RAHMAN R, et al. A review on mechanisms and commercial aspects of food preservation and processing[J]. Agriculture & Food Security, 2017, 6(1): 51.
- [45] 才妍妍. 清炒炮制工艺对广陈皮化学成分及生物学活性的影响研究[D]. 吉林: 吉林化工学院, 2024: 49-50.
- CAI Y Y. Effect of stir-frying processing on chemical composition and biological activity of *Citrus reticulata* 'Chachi' [D]. Jilin: Jilin Institute of Chemical Technology, 2024: 49-50.
- [46] LEE S H, OH M, PARK J, et al. Antioxidant and anti-inflammatory activities of the ethanolic extract of fermented red ginseng marc[J]. Food Science and Biotechnology, 2015, 24(2): 651-657.
- [47] JULIÃO M H M, SILVA S R, FERRO J A, et al. A genomic and transcriptomic overview of MATE, ABC, and MFS transporters in citrus sinensis Interaction with *Xanthomonas citri* subsp. *Citri*[J]. Plants, 2020, 9(6): 794.
- [48] 谢冰宗, 李密, 董彩文, 等. 黄精皂苷与多糖超声辅助提取工艺优化及降血糖活性研究[J]. 食品与机械, 2024, 40(1): 158-166, 196.
- XIE B Z, LI M, DONG C W, et al. Study on the technology of ultrasonic assisted combined extraction of saponins and polysaccharides from *Polygonatum sibiricum* and its hypoglycemic activity[J]. Food & Machinery, 2024, 40(1): 158-166, 196.