DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251013001
引用格式: 王道平, 李青, 姜阳明, 等. 药食同源植物外泌体提取、结构表征及生物活性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(5): 91–100.
WANG DP, LI Q, JIANG YM, *et al*. Research progress on extraction, structural characterization and bioactivity of exosomes from medicinal and edible homologous plants [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(5): 91–100. (in Chinese with English abstract).

药食同源植物外泌体提取、结构表征及生物活性研究进展

王道平[1], 李　青[1], 姜阳明[1], 魏福晓[1], 陈佳林[1], 杨宁线[2*], 周　美[1*]
(1. 贵州省天然产物研究中心, 贵阳　550014; 2. 贵州医科大学大学公共卫生与健康学院, 贵阳　561113)

摘　要: 药食同源植物外泌体是由植物细胞分泌的类囊泡结构, 含有蛋白、核酸、脂质体和小分子等成分。这些囊泡在植物生长代谢、组织修复和自我防御中发挥重要作用。药食同源植物外泌体安全性高, 来自不同药食同源植物的外泌体在炎症、骨质疏松、癌症和伤口愈合等方面显示出良好的治疗效果。药食同源植物外泌体凭借其独特的性质, 能有效穿梭于细胞间以辅助疾病治疗, 是小分子药物和核酸的递送载体, 因此, 其在生物技术、农业和健康领域的重要性日益凸显。本文综述了分离和制备药食同源植物外泌体的方法, 并重点介绍了柠檬、姜黄、人参、生姜和葡萄柚等药食同源植物衍生的纳米囊泡在疾病治疗中的应用。同时, 还介绍了药食同源植物外泌体在药物递送、抗炎、抗骨质疏松和抗氧化等方面的应用及未来前景, 对推动药食同源植物资源的深度开发利用具有重要意义。

关键词: 药食同源植物; 外泌体; 提取; 结构表征; 生物活性

Research progress on extraction, structural characterization and bioactivity of exosomes from medicinal and edible homologous plants

WANG Dao-Ping[1], LI Qing[1], JIANG Yang-Ming[1], WEI Fu-Xiao[1], CHEN Jia-Lin[1], YANG Ning-Xian[2*], ZHOU Mei[1*]
(1. *Natural Products Research Center of Guizhou Province*, *Guiyang* 550014, *China*;
2. *College of Public Health*, *Guizhou Medical University*, *Guiyang* 561113, *China*)

ABSTRACT: Exosomes from medicinal and edible homologous plants are vesicle-like structures secreted by plant cells, containing components such as proteins, nucleic acids, liposomes and small molecules. These vesicles play significant roles in plant growth metabolism, tissue repair and self-defense. Exosomes from medicinal and edible

收稿日期: 2025-10-13
基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合基础 MS[2025]121); 贵州省天然产物研究中心高层次人才科研启动基金项目(天产自 J 字 [2025] 02-14 号); 贵州医科大学高层次人才科研启动基金项目([2023]039 号)
第一作者: 王道平(1979—), 男, 副研究员, 主要研究方向为食药分析测试与评价。E-mail: wdp_7897@aliyun.com
***通信作者:** 杨宁线(1983—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为食药资源功能开发及转化。E-mail: nxyang2020@126.com
周美(1986—), 女, 博士, 正高级实验师, 主要研究方向为食品营养研究。E-mail: 1127599776@qq.com

homologous plants are safe, which from different plants demonstrate promising therapeutic effects on inflammation, osteoporosis, cancer and wound healing. Due to their unique properties, exosomes from medicinal and edible homologous plants effectively shuttling through cells to aid disease treatment, and can serve as small molecule drugs and nucleic acids carriers. Therefore, exosomes from medicinal and edible homologous plants are growing with relevance in biotechnology, agriculture and health. This study reviewed the methods for separating and preparing exosomes from medicinal and edible homologous plants and highlighted their application in disease treatment using nanovesicles derived from plants such as lemon, turmeric, ginseng, ginger and grapefruit. It introduced the applications and future prospects of exosomes from medicinal and edible homologous plants in drug delivery, anti-inflammatory, anti-osteoporosis and antioxidant. This review aims to promote the in-depth development and utilization of medicinal and edible plant resources.

KEY WORDS: medicinal and edible homologous plants; exosomes; extraction; structural characterization; bioactivity

0 引 言

药食同源植物是指既可作为食材满足营养要求，又具备药用功效用于预防或治疗疾病的植物资源。早在《黄帝内经太素》中就明确了药食同源概念，提出“空腹为食，患者为药”的观点，药食同源植物的应用既承载了中国传统饮食与医药文化的智慧，也通过现代技术阐释了其科学内涵[1]。截至 2025 年，国家卫生健康委员会、国家市场监督管理总局公布药食同源植物共有 106 种[2]。研究表明，药食同源植物富含多糖、皂苷、生物碱、蛋白质、黄酮、酚类、矿物质等，具有抗氧化、抗炎、降血糖、降血脂、抗肿瘤、抑菌等药理活性。目前，针对药食同源植物的研究多集中在多糖及功能性小分子化合物上，而药食同源植物外泌体的提取及应用正成为目前的研究热点。

药食同源植物外泌体是指由药食同源植物细胞分泌的、直径为 30~150 nm 的膜性囊泡，内含丰富的生物活性分子，如脂质、蛋白质、微小 RNA (micro RNA, miRNA)等，具有良好的膜渗透性和组织穿透性，在细胞间通讯及物质运输过程中发挥着关键作用[3]。药食同源植物外泌体由于具有天然来源、安全性高、稳定性好、靶向传递、协同增效等众多优点[4−5]，已被广泛应用于炎症、肿瘤、细菌感染等疾病的预防和治疗，同时还用于核酸、蛋白质及小分子药物靶向递送。

药食同源植物为外泌体的提取提供了广泛来源，在可扩展应用方面具有独特的优势。药用或普通植物可能存在潜在的风险，易被机体免疫系统识别为外来物质，触发免疫反应，其安全性需进一步评估[6−7]。在长期的药食同源植物食用过程中，人体已经形成了一定的耐受性，安全性高。据文献报道，来自不同药食同源植物的外泌体化学物质组成不同，生物活性差异较大[8]。本研究综述了药食同源植物外泌体的提取分离、药理活性及应用，系统比较了提取技术、结构表征、药理活性及作用机制，同时还展望了药食同源植物外泌体在药物递送、功能食品、化妆品等领域的应用。本综述整合了当前研究结果和关键技术，为药食同源植物外泌体研究提供了系统的理论支撑，为推动生物医药与食品产业发展具有重要意义。

1 药食同源植物外泌体提取纯化方法

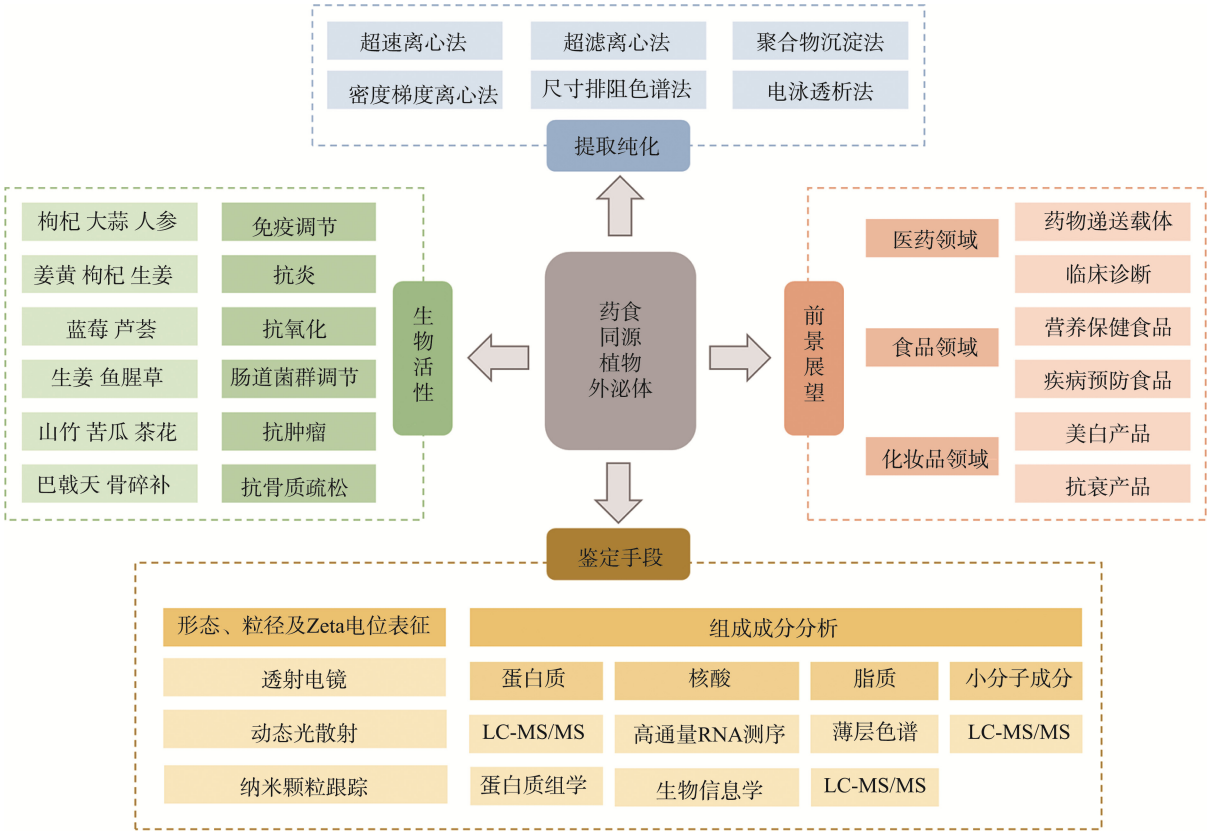
药食同源植物外泌体提取、结构表征及生物活性研究思路和方法如图 1 所示，目前，针对药食同源植物外泌体的提取已经形成了一定的技术体系，各种提取方法优缺点见表 1。

1.1 超速离心法

超速离心法是通过不同离心力产生的沉降速度差异，将混合物中不同大小和密度的颗粒分开，从而实现外泌体分离。具体流程如下:在 4 ℃条件下，通过低速离心(如 3000×*g*, 30 min)，去除液体中的植物纤维等大颗粒杂质；再进行中速离心(如 10000×*g*, 60 min)，去除细胞碎片和较大细胞器；最后采用超高速离心(如 150000×*g*, 90 min)，沉淀即为初步纯化的外泌体[9−10]。该方法操作简单、可重复性较好。然而，该方法需分步操作，耗时长，且设备昂贵，提取成本较高。此外，该方法获得的外泌体纯度难以满足高精度实验分析需求。

1.2 密度梯度离心法

密度梯度离心法是外泌体分离纯化的关键技术之一，该方法是利用外泌与样本中其他组分在浮力密度上的差异来获取高纯度外泌体样本，密度梯度离心法需要依靠高速离心来沉淀外泌体[11−12]。通过其他提取方法得到的纯度较低的外泌体，进一步使用密度梯度介质如蔗糖、碘克沙醇等对不同密度的组分进行再次分层，除去蛋白质类等杂质，通过该方法能够将外泌体再次集中在某一个密度层，有效提升外泌体的纯度。密度梯度离心法具有以下优点：实验操作方案成熟、简单、重复性好等，在对样本纯度要求较高的实验场景中被广泛应用。然而，该技术存在一定的局限性，如密度梯度介质的精准配制、人工成本、设备昂贵等。



注：液相色谱-串联质谱仪(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)。

图 1　药食同源植物外泌体提取、结构表征及生物活性研究

Fig.1　Research on extraction, structural characterization and bioactivity of exosomes from medicinal and edible homologous plants

表 1　药食同源植物外泌体提取方法、原理及优缺点

Table 1　Isolation methods, principles, advantages and disadvantages of exosomes for medicinal and edible homologous plants

制备方法	提取原理	优点	缺点	平均粒径/nm	参考文献
超速离心法	采用梯度离心与超高速离心结合	操作简单，方法成熟	耗时长，设备昂贵，收率低	70.09±19.24	[7]
蔗糖密度梯度离心法	用不同的密度梯度分离纯化外泌体	纯度高，可区分不同密度囊泡	耗时长，产量有限	50~70	[8]
超滤离心法	利用不同孔径的滤膜保留特定大小的外泌体	操作简单快捷，不需要昂贵设备	滤膜吸附会造成损失，剪切力可能会破坏外泌体结构	119±52	[9]
尺寸排阻色谱法	不同尺寸外泌体通过多孔介质进行分离	保持外泌体的完整性，不受剪切力的破坏	耗时长，产量有限，设备造价高	100~160	[10]
聚合物沉淀法	聚合物与水分子相互作用导致外泌体沉淀	操作简便，无需昂贵设备	纯度较低，自动化困难	156.5±29.7	[11]
电泳透析法	通过电泳定向分离带电杂质，再透析截留外泌体	耗时短，纯度高	操作烦琐，收率低	100~150	[12]

1.3　超滤离心法

超滤离心法是利用截留分子量实现外泌体分离富集的技术，根据外泌体与样本中其他组分在尺寸及分子量上的显著差异，通过离心驱动下的选择性渗透作用，实现目标组分的分离与富集。具体操作如下：在 4 ℃条件下，先采用不同孔径的微孔滤膜过进行抽滤，再用超滤方法进一步离心，截留外泌体，去除液体中小分子、缓冲液等成分，实现外泌体的分离富集[13−14]。超滤离心法具有以下优点：操作简便，不依赖大型仪器，提取时间较短，成本较低，适用于对纯度要求相对较低的大量样本的快速预处理。然而，超滤离心法仍存在局限性，如回收率低等。

1.4 尺寸排阻色谱法

尺寸排阻色谱法是基于多孔色谱填料的“分子筛效应”, 根据样本中不同组分的流体力学尺寸差异实现分离的一种方法。外泌体因无法进入色谱填料的微孔结构, 将随流动相优先被洗脱, 而尺寸更小的组分, 如蛋白质、小分子杂质等可渗透至填料微孔内, 洗脱时间更久, 从而实现外泌体的分离[15–16]。该技术的优点在于通过流动相的低压驱动即可实现组分分离, 能够最大程度避免外泌体结构受损, 从而完整保留其结构与生物活性, 同时还具有不同批次实验结果稳定、处理效率高等优点。然而, 尺寸排阻色谱法仍存在一些局限性, 由于受柱容量的限制, 单次最大处理体积较小, 大规模分离时需频繁更换色谱柱以避免填料堵塞或分离效率下降, 难以满足大规模外泌体制备的需求。此外, 当样本中存在与外泌体尺寸相近的杂质时, 可能会与外泌体共同被洗脱, 从而影响外泌体纯度。

1.5 聚合物沉淀法

聚合物沉淀法是利用空间位阻效应与溶剂排除效应实现外泌体分离的技术手段, 聚合物分子(如聚乙二醇)在水溶液中可与水分子结合形成水合层, 通过竞争性排除外泌体表面的水分子, 显著降低外泌体在溶液中的溶解度; 同时, 聚合物分子的空间占位作用会压缩外泌体的分散空间, 使外泌聚集, 在适宜温度下孵育一定时间后, 通过低速离心(3000~5000×g)即可收集到外泌体沉淀[17–18]。该方法的优点在于无需依赖高速离心设备, 常规低速离心机即可完成, 大幅降低了技术实施的硬件成本; 且操作简单, 无需复杂的前处理或梯度制备。然而, 该技术存在局限性, 聚合物的纯化特异性不足, 在外泌体聚集的同时, 样本中蛋白质、游离核酸也会因溶解度降低而与外泌体共同沉淀, 导致外泌体中杂质较多, 实际应用中往往需要额外增加纯化步骤获取纯度较高的外泌体。

1.6 电泳透析法

电泳透析法是一种利用透析袋的孔径选择性与电场的定向迁移作用制备外泌体的方法。根据外泌体的尺寸选择合适孔径的透析袋, 允许小分子杂质通过但截留外泌体, 将待分离样本装入透析袋后置于电泳缓冲液中, 施加稳定电场, 在电场力作用下, 直径小于透析袋孔径的可溶性杂质因带电性而产生定向迁移, 进入外部缓冲液, 而外泌体因尺寸大于膜孔, 被截留于透析袋内部[19–20]。电泳透析法的优点在于所需设备为常规电泳仪、透析袋及配套容器, 无需依赖高价专用设备, 硬件投入成本较低。但是该方法存在一定局限性, 需定期更换电泳方向、精准控制时间与电压切换。

总之, 在植物外泌体的实际提取操作中, 不存在“一刀切”的标准化方案, 核心在于以实验目标为导向, 结合实验室现有设备配置、待处理样本的具体规模(体积/重量)以及应用场景需求, 进行提取方法的灵活组合与个性化优化。

2 药食同源植物外泌体鉴定手段

2.1 形态表征

形态表征是药食同源植物外泌体鉴定的核心, 目的是通过观察外泌体的微观形态特征, 验证其尺寸大小及结构完整性, 为后续功能研究及应用开发提供基础依据。透射电子显微镜因具备超高分辨率, 成为观察植物外泌体形态的首选方法。通过电子显微镜观察, 能够直观地判断外泌体的提取是否成功, 以及外泌体的形态是否完整。从形态特征来看, 药食同源植物外泌体与动物来源外泌体无显著差异, 在透射电子显微镜视野下, 二者均呈现典型的茶托状中空结构, 直径通常为 30~150 nm, 若视野中出现符合上述尺寸与形态的结构, 且双层膜结构清晰, 可初步证实成功分离外泌体[21]。

2.2 粒径及 Zeta 电位表征

外泌体的粒径分布和 Zeta 电位是评估其纯度、稳定性及生物活性的核心指标, 需通过专业表征技术测定, 目前常用的方法为动态光散射法[22]和纳米颗粒跟踪分析法[23]。动态光散射法基于布朗运动原理, 纳米颗粒在溶液中随机运动, 其运动速度与粒径成反比。通过检测激光照射颗粒后产生的散射光强度波动计算粒径及分布, 常用多分散指数评估分布均一性, 分散指数小于 0.3 为均一体系, 该方法操作便捷, 但是容易受到大颗粒物质的干扰, 适用于均一分散体系。纳米颗粒跟踪分析是通过光学显微镜实时捕捉单个纳米颗粒的布朗运动轨迹, 再通过软件追踪每一个颗粒的位移计算单个颗粒的粒径, 该方法受大颗粒物质干扰较小, 可用于多项复杂体系。

2.3 组成成分分析

2.3.1 蛋白质

药食同源植物外泌体中含有多种蛋白质, 目前主要是利用高效液相色谱-串联质谱法(high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, HPLC-MS/MS)技术及蛋白质组学等方法进行鉴定。这些蛋白质主要分为 3 类: (1)结构蛋白, 如膜联蛋白、热休克蛋白, 维系外泌体囊泡结构稳定性, 保障活性成分靶向递送; (2)酶类蛋白, 如氧化还原酶、水解酶, 参与植物次生代谢, 赋予外泌体抗氧化、抗炎等生物活性; (3)信号蛋白, 如受体激酶, 可介导细胞间信号传递, 调控机体生理功能[24–25]。已有研究表明, 源自葡萄柚与柠檬的外泌体样纳米颗粒, 其所含蛋白质涵盖热休克蛋白、甘油醛-3-磷酸脱氢酶、果糖二磷酸醛缩酶及网格蛋白等类型, 表明其可能在外泌体形成过程中发挥着重要作用[26], 另一项研究表明, 来自西蓝花的蛋白

质包含水通道蛋白, 这些蛋白有助于在压力条件下维持细胞膜的稳定性[27]。对番茄根部分泌的外泌体蛋白质展开研究后发现, 其中存在参与植物-微生物互作及细胞壁重塑的细胞质蛋白质, 这一结果表明该类蛋白质在植物病原体防御机制中具有重要作用[28]。石榴外泌体含几丁质酶、脂质转运蛋白[29–30], 青梅、黄精外泌体中含有抗炎、免疫相关蛋白, 如 TET8HE、HSP70 等[31–32]。此外, 对蛋白质翻译后修饰(如磷酸化、糖基化)进行表征, 可进一步阐明其功能调控机制, 如枸杞外泌体中糖基化蛋白可增强肠道黏膜黏附性, 提升活性成分生物利用度[33]。

2.3.2　核　酸

药食同源植物外泌体内部包裹的核酸主要包括 miRNA、环状 RNA (circular RNA, circRNA)、小 RNA、干扰 RNA (small interfering RNA, siRNA)、信使 RNA (messenger RNA, mRNA)片段等, 是外泌体发挥生物活性的核心物质之一, 当前主要采用高通量 RNA 测序和生物信息学等方法进行鉴定表征[34]。核酸不仅是药食同源植物外泌体的重要组成部分, 更因其在生物标志物领域的应用潜力及明确的功能作用, 在相关研究中备受关注[35]。例如, 鱼腥草外泌体中含有 miR858a、miR858b、miR166a-3p、miR168a-3p、miR168b-3p、miR8175 及 novel_mir2 等 miRNA, 具有抗病毒作用[36]; 姜外泌体则包含 osa-miR164d、zma-miR396g-5p、vvi-miR396b、stu-miR156f-5p、novel-40 与 novel-45 等成分, 可发挥抗炎及免疫调节功效[37]; 石榴外泌体含有 ath-miR159a、ath-miR162a-3p、ath-miR166b-3p、ath-miR396b-5p, 现阶段主要用于功能 RNA 相关研究[21]; 忍冬叶外泌体中检测到 miR-novel1、ath-miR396b-5p 等 miRNA[38], 具备抗炎活性。此外, 蓝莓外泌体中 miR156、miR168、miR390 等家族的 miRNA 含量, 显著高于其细胞内其他部位, 而这些 miRNA 多与抗炎、抗氧化及细胞代谢调节功能相关[39]。

2.3.3　脂质组成

药食同源植物外泌体的脂质双分子层结构以各类磷脂为核心组成成分, 该结构是维系外泌体形态完整与理化性质稳定的关键结构基础, 对其在生物体内的存活、运输及功能发挥具有不可替代的支撑作用[40]。主要采用薄层色谱法和 LC-MS/MS 等方法进行检测。从脂质组成来看, 药食同源植物外泌体中已鉴定出的关键磷脂类物质包括磷脂酸 (phosphatidic acid, PA)、磷脂酰乙醇胺 (phosphatidylethanolamine, PE)、磷脂酰胆碱 (phosphatidylcholine, PC)、二半乳糖二酰甘油 (digalactosyldiacylglycerol, DGDG)及单半乳糖二酰甘油 (monogalactosyldiacylglycerol, MGDG)。其中, PA、PE、PC 作为真核生物细胞膜及囊泡结构中的保守性脂质成分, 在植物源与动物源细胞外囊泡中均广泛存在[41]。值得注意的是, 不同来源药食同源植物外泌体, 其磷脂种类及相对含量呈现明显差异。这种脂质组成的差异性可能通过调控外泌体的膜流动性、表面电荷分布及膜蛋白构象, 进而影响其生物学功能的发挥, 如物质转运效率、信号分子传递能力及与靶细胞的相互作用机制。已有研究实例表明: 生姜外泌体中, PA 的相对含量显著高于其他磷脂成分, 成为其脂质组成的标志性特征, 而大蒜外泌体中, PE 与 PC 则占据主导地位, 构成其脂质谱的核心组分[42–43]。

2.3.4　小分子功效成分

研究表明, 源自不同药食同源植物的外泌体, 内部富集了多种来自宿主植物的小分子活性成分, 例如酚类、黄酮类、挥发油及有机酸类化合物, 这些成分对维持外泌体生物功能活性发挥着关键作用。当前, 针对外泌体中小分子功效成分的检测, 主流技术为 LC-MS/MS。柠檬来源的外泌体, 其核心活性成分包括橙皮苷、柚皮苷、新橙皮苷、柠檬苦素与柠檬酸等[44–46]。石榴外泌体中含有矢车菊素-3-葡萄糖苷与矢车菊素-3,5-二葡萄糖苷; 姜黄外泌体中检出姜黄素、去甲姜黄素及双去甲姜黄素[47]; 生姜外泌体则包含 6-姜酚、6-葛缕酚等活性成分[48]。此外, 绿茶外泌体的主要功能性成分包括儿茶素、表没食子儿茶素没食子酸酯与咖啡因[49]。

3　生理功能

3.1　免疫调节

药食同源植物外泌体在免疫调节方面发挥着重要作用, 展现出精准的“双向调控”能力, 其机制主要涉及对免疫细胞活性的调节以及免疫反应的平衡, 既能增强免疫低下群体的免疫功能, 又能抑制过度激活的免疫反应。如枸杞外泌体能有效促进细胞迁移和抑制炎症因释放, 表明枸杞外泌体在免疫调节中具有重要作用, 可帮助免疫系统恢复活力[50]。大蒜外泌体的作用更偏向肠道黏膜免疫, 其含有的大蒜素与硫化物可抑制肠道内过度活化的巨噬细胞分泌肿瘤坏死因子-α (tumor necrosis factor-α, TNF-α)、白细胞介素-6 (interleukin-6, IL-6)等促炎因子, 同时修复肠道上皮细胞间的紧密连接, 强化肠道免疫屏障, 改善因菌群紊乱引发的免疫失衡, 为肠道健康提供保护[51]。此外, 人参来源的外泌体可抑制 M2 型巨噬细胞的极化从而发挥免疫调节作用[52]。

3.2　抗　炎

药食同源植物外泌体通过靶向炎症信号通路、清除炎症介质、修复炎症损伤组织, 从而实现高效抗炎效果。姜黄外泌体能直接抑制核因子 κB (nuclear factor kappa-light-chain-enhancer of activated B cells, NF-κB)信号通路的激活, 抑制促炎因子的释放。在脂多糖诱导的肺炎小鼠模型中, 姜黄外泌体可阻止 NF-κB 向细胞核转移, 减

少肺部炎症细胞浸润, 降低 TNF-α、IL-6 的表达水平; 在溃疡性结肠炎模型中, 其还能保护肠道黏膜, 降低疾病活动指数, 且效果远优于直接口服姜黄素[53–54]。枸杞外泌体则通抑制 p38 丝裂原活化蛋白激酶(p38 mitogen-activated protein kinase, p38 MAPK)磷酸化, 阻断 NF-κB p65 核转位, 下调 B 细胞淋巴瘤-2 相关 X 蛋白(B-cell lymphoma 2-associated X protein, Bax)、半胱天冬氨酸蛋白酶-3/7 (Caspase-3/7), 上调胰岛素样生长因子 1 (insulin-like growth factor 1, IGF-1)、血管内皮生长因子 A (vascular endothelial growth factor A, VEGF-A), 减少炎症级联反应的放大, 改善心功能、减少梗死面积及纤维化[55]。葛根外泌体能有效地促进 M2 巨噬细胞的极化发挥抗炎作用[56]。生姜外泌体能有效抑制 NOD 样受体家族含 pyrin 结构域蛋白 3 (NOD-like receptor family pyrin domain containing 3, NLRP3)炎性小体的激活, 降低炎症因子水平, 通过诱导自噬和防止细胞局部死亡等机制发挥抗炎作用[57]。在酒精摄入诱导的慢性脑炎症模型中, 燕麦外泌体能够减少促炎性细胞因子释放, 从而防止乙醇引起的神经退行性病变[58]。

3.3 抗氧化

氧化应激与心脑血管、代谢和癌症等多种疾病的发生发展密切相关[59]。研究表明, 药食同源植物外泌体富含多种抗氧化物质, 具有较好的抗氧化活性, 减轻降低氧化应激引起的细胞的损伤。如蓝莓外泌体中含有丰富的花青素能够有效清除自由基, 减少自由基对细胞的攻击[60]。芦荟外泌体可通过激活核因子 E2 相关因子 2 (nuclear factor erythroid 2-related factor 2, Nrf2)/抗氧化反应元件(antioxidant response element, ARE)信号通发挥抗氧化活性[61–62]。

3.4 肠道菌群调节

肠道微生物群在维持肠道健康方面起着至关重要的作用, 微生物群的紊乱会破坏肠道屏障, 诱发各种疾病[63]。药食同源植物外泌体对肠道微生物群落结构和功能具有重要的调节作用。研究发现, 生姜外泌体可以影响肠道菌群的组成和丰度, 调节肠道微生物群落的结构, 给予生姜外泌体后, 小鼠肠道内的乳酸菌和拟杆菌数量增加, 乳酸菌和拟杆菌是有益菌, 能够产生短链脂肪酸等有益物质, 促进肠道健康[54]。马齿苋外泌体能显著改变肠道菌群多样性, 改善由葡聚糖硫酸钠诱导的菌群紊乱, 并促进微生物结构的恢复[64]。鱼腥草外泌体可通过调节肠道菌群结构, 改善肠道微生态环境, 上调 Occludin、MUC-2、ZO-1 等肠道屏障蛋白表达, 强化黏膜防御功能, 在溃疡性结肠炎模型中展现出抗炎与屏障修复协同效应[65]。艾叶外泌体富集抗炎菌, 抑制促炎菌, 通过菌群重塑和屏障修复协同作用改善溃疡性结肠炎[66]。

3.5 抗肿瘤

药食同源植物外泌体在癌症治疗中的应用已受到广泛关注, 如从山竹果皮中分离的外泌体通过靶向丝氨酸/苏氨酸蛋白激酶 1 (serine/threonine kinase 1, AKT1)、丝裂原活化蛋白激酶 1 (mitogen-activated protein kinase 1, MAPK1)等核心靶点, 调控磷脂酰肌醇 3-激酶(phosphatidylinositol 3-kinase, PI3K)/蛋白激酶 B (protein kinase B, AKT)、丝裂原活化蛋白激酶(mitogen-activated protein kinase, MAPK)等信号通路, 激活凋亡通路与自噬通路, 上调 Bax/B 细胞淋巴瘤-2 (B-cell lymphoma 2, Bcl-2)比值, 增加微管相关蛋白 1 轻链 3-II (microtubule-associated proteins 1A/1B light chain 3-II, LC3-II)/微管相关蛋白 1 轻链 3-I (microtubule-associated protein 1A/1B-light chain 3-I, LC3-I)表达, 在体外显著抑制 GL261 胶质瘤细胞增殖与迁移, 且对 HEK293 正常细胞无明显毒性[15,67]。芦荟外泌体通过激活 Caspase-1/3/7/9-GSDMD/E 通路, 触发胰腺癌细胞焦亡, 表现为细胞肿胀、膜破裂及炎症因子 IL-18 释放。在 Panc-1 异种移植小鼠模型中, 4 mg/kg 剂量的芦荟外泌体抑瘤效果与顺铂相当, 且无体重下降等毒性反应[68]。从辣木籽中提取的外泌体通过调节 Bcl-2 蛋白的表达以及破坏线粒体膜电位来实现抗癌作用[69]。苦瓜外泌体对乳腺癌表现出显著的抗癌活性, 能有效抑制癌细胞的增殖和迁移, 并通过促进活性氧的产生和损害线粒体功能来诱导细胞凋亡[70]。来自茶花的外泌体对乳腺癌细胞具有细胞毒性作用, 能够抑制肿瘤生长并降低迁移能力[71]。

3.6 抗疗骨质疏松

药食同源植物外泌体被广泛用于骨质疏松预防与治疗。巴戟天来源外泌体可通过激活裂原活化蛋白激酶(mitogen-activated protein kinase, MAPK)-环磷酸腺苷反应元件结合蛋白(cAMP-response element binding protein, CREB)/核糖体 S6 激酶 1 (ribosomal S6 kinase 1, RSK1)轴促进成骨前体细胞增殖, 并上调成骨标志物 Runt 相关转录因子 2 (Runt-related transcription factor 2, RUNX2)、骨钙素(osteocalcin, OCN), 从而改善绝经后骨质疏松症[72]。山药外泌体通过激活骨形态发生蛋白 2 (bone morphogenetic protein 2, BMP-2)/磷酸化 p38 丝裂原活化蛋白激酶(phosphorylated p38 mitogen-activated protein kinase, p-p38)依赖性的 Runt 相关转录因子 2 (Runt-related transcription factor 2, Runx2)通路, 促进骨生长[73]。柠檬外泌体显著促进了胶原蛋白的合成, 有助于维持骨基质并维护整体骨健康[74]。骨碎补外泌体通过上调 BMP-2 与 Runx2, 激活 BMP/Smad 信号轴, 显著逆转骨质疏松症[75]。四棱藤外泌体可通过促进成骨分化、抑制破骨细胞生成等, 显著改善骨质疏松骨代谢失衡[76]。

4　药食同源植物外泌体应用前景

4.1　医药领域

药物递送方面, 药食同源植物外泌体是天然纳米囊泡, 具有生物相容性高、免疫原性低、可负载亲疏水药物的特性, 能突破传统药物递送中易降解、靶向弱、毒性强等瓶颈问题。同时, 由于药食同源植物外泌体本身携带功能性小分子, 兼具治疗和递送的双重功效, 在医药领域应用潜力显著[77]。如生姜外泌体作为天然载体可高效装载紫杉醇, 其脂质膜结构保护药物免受降解, 同时通过上调特定 miRNA 增强药物对乳腺癌、肺癌细胞的增殖抑制作用, 与游离紫杉醇联用可使肿瘤抑制率提升至 65%, 且减少药物对正常组织的毒性暴露[78]。纤维蛋白凝胶负载枸杞外泌体递送系统, 靶向梗死心肌区域, 通过抑制 p38 MAPK/NF-κB p65 通路减少心肌损伤, 显著提升小鼠存活率与心功能[79]。未来, 药食同源植物外泌体在医药领域的研究将朝着更加精准、高效的方向发展。

4.2　食品领域

功能性食品开发方面, 由于药食同源植物外泌体富含多种生物活性成分, 如抗氧化剂、免疫调节剂等, 能够提升食品的营养价值和保健功能。如, 生姜外泌体预绑定到益生菌表面, 使益生菌在肠道中能高效且专一地摄取外泌体, 摄取效率较未改造益生菌提升达 21 倍[80]。在功能食品开发方向上, 目前已形成多维度应用布局。在肠道健康领域, 生姜外泌体可通过调节乳酸菌活性, 黄芪外泌体可平衡肠道菌群, 因此可开发为缓解肠道炎症、改善消化功能的食品。在代谢调节领域, 芦荟外泌体在改善胰岛素抵抗和慢性炎症方面具有显著疗效[81], 为糖尿病前期人群专属功能食品提供思路。在抗氧化领域, 蓝莓外泌体的花青素可降低氧化应激, 可融入果汁、酸奶等食品, 满足消费者抗衰需求。随着人们对健康食品的需求不断增加, 预计未来相关产品的市场份额将不断扩大, 推动食品行业向更加健康、营养的方向发展。

4.3　化妆品领域

在化妆品领域, 药食同源植物外泌体因富含抗氧化剂、保湿因子等成分, 具有优异的皮肤渗透性, 能够有效改善皮肤的生理状态, 延缓皮肤衰老, 增强皮肤的免疫力[82]。如人参外泌体中的人参皂苷 Rg1 可激活默信息调节因子 1 (sirtuin 1, SIRT1)抗衰老通路, 抑制皮肤成纤维细胞凋亡, 在动物实验中可使皮肤胶原蛋白含量增加 35%, 延缓皮肤皱纹产生[83]。又如, 枇杷外泌体及细胞液在促进皮肤细胞存活、抗炎、抑制黑色素生成等方面具有显著功效[84]。未来, 药食同源植物外泌体有望成为化妆品行业的重要原料, 开发出更多具有高效护肤功效的产品, 满足消费者对天然、安全、有效的护肤需求。

5　结束语

药食同源植物外泌体凭借其独特的结构、丰富的生物活性成分以及相较于普通植物外泌体的显著优势, 在免疫调节、抗氧化应激、肠道菌群调节等方面发挥着重要作用, 为医药、食品、化妆品等多个领域带来了新的发展机遇。然而, 目前该领域的研究仍面临诸多挑战。

首先, 现有提取技术存在产量低、纯度不足、成本高昂的问题, 难以满足规模化生产需求; 靶向修饰技术尚处于实验室阶段, 活性成分负载率与稳定性有待提升。其次, 缺乏统一的质量控制标准与安全性评价体系, 外泌体的储存稳定性关键数据不足; 原料供应、成本控制等产业化环节尚未形成成熟方案。最后, 多数研究仅证实外泌体的整体功效, 对其具体的活性成分及作用靶点、信号调控通路缺乏深入解析, 且不同植物来源外泌体的协同作用机制尚未阐明, 制约了精准产品的研发。

在植物外泌体产业化探索持续深入的背景下, 药食同源植物外泌体的研发和发展将聚焦于技术突破与产业应用。技术突破层面, 未来的首要任务是基于微流控芯片分离和免疫亲和层析等创新技术实现外泌体的高效分离, 其次是优化植物外泌体中生物活性成分的负载效率和表面修饰技术, 提升治疗效果; 在产业应用领域方面, 持续的技术创新正推动植物来源外泌体成为高效安全的药物递送载体和疾病诊断标记物, 从而促进精准医疗发展。此外, 药食同源植物外泌体在食品行业将推动高品质功能性食品的研发。综上所述, 对药食同源植物外泌体的研究和开发具有重要的科学意义和实际应用价值, 科研人员需加强跨学科交流合作, 加强其作用机制、生物安全性和产品稳定性等的深入研究。

参考文献

[1] 许梦粤, 曾长立, 王红波. 药食同源植物多糖提取方法、结构解析和生物活性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023(19): 216–224, 44.
XU MY, ZENG CL, WANG HB. Advances in extraction method, structural analysis and bioactivity of polysaccharides from medicinal and edible homologous plants [J]. Food Research and Development, 2023(19): 216–224, 44.

[2] 周怡霞, 覃璐琪, 刁娆, 等. 药食同源植物中干预糖尿病的活性物质研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(11): 333–342.
ZHOU YX, QIN LQ, DIAO R, *et al*. Research progress in bioactive compounds in medicine food homologous plants for intervention in diabetes [J]. Food Science, 2025, 46(11): 333–342.

[3] SHU F, YANG N, YU F, *et al*. Temporary immersion bioreactor system: From standardized production to precise application of food-medicinal plant exosomes [J]. Food and Medicine Horizon (FMH), 2025, 1(3): 45–58.

[4] FAN S, CHEN J, TANG C, *et al*. Edible plant extracellular vesicles: An emerging tool for bioactives delivery [J]. Frontiers in Immunology, 2022,

13: 1028418.

[5] WANG L, CHEN N, ZHAO L, *et al*. Edible exosome-like nanoparticles from *Portulaca Oleracea* L. as potential biomarkers for ulcerative colitis diagnosis [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, 26(5): 2211.

[6] STANLY C, KIM H, ANTONUCCI G, *et al*. Crosstalk between the immune system and plant-derived nanovesicles: A study of allergen transporting [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2021, 9: 760730.

[7] ZHENG J, YU L, CHEN W, *et al*. Circulating exosomal microRNAs reveal the mechanism of Fructus Meliae Toosendan-induced liver injury in mice [J]. Scientific reports, 2018, 8: 2832.

[8] ZENG Y, DENG X, SHEN L, *et al*. Advances in plant-derived extracellular vesicles: Isolation, composition, and biological functions [J]. Food & Function, 2024, 15(23): 11319–11341.

[9] ALZAHRANI FA, KHAN MI, KAMELI N, *et al*. Plant-derived extracellular vesicles and their exciting potential as the future of next-generation drug delivery [J]. Biomolecules, 2023, 13: 839.

[10] HAN R, ZHOU D, JI N, *et al*. Folic acid-modified ginger-derived extracellular vesicles for targeted treatment of rheumatoid arthritis by remodeling immune microenvironment via the PI3K-AKT pathway [J]. Journal of Nanobiotechnology, 2025, 23(1): 41.

[11] RAIMONDO S, NASELLI F, FONTANA S, *et al*. *Citrus limon*-derived nanovesicles inhibit cancer cell proliferation and suppress CML xenograft growth by inducing TRAIL-mediated cell death [J]. Oncotarget, 2015, 6(23): 19514–19527.

[12] MUN JG, SONG D, KEE JY, *et al*. Recent advances in the isolation strategies of plant-derived exosomes and their therapeutic applications [J]. Current issues in molecular biology, 2025, 47(3): 144.

[13] ALSAID F, DAVILA B, HE B. Plant-derived extracellular vesicles and nanoparticles: Origins, functions, and applications [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2026, 14: 1758558.

[14] SHU F, YANG N, YU FL, *et al*. Temporary immersion bioreactor system: An excellent strategy for preparing high-quality controlled extracellular vesicles from food and medicine homology plants [J]. Food & Medicine Homology, 2025, 2: 9420123.

[15] LUO X, ZHANG X, XU A, *et al*. Mechanistic insights into the anti-Glioma effects of exosome-like nanoparticles derived from *Garcinia Mangostana* L.: A metabolomics, network pharmacology, and experimental study [J]. International Journal of Nanomedicine, 2025, 20: 5407–5427.

[16] SERGAZY S, ADEKENOV S, KHABAROV I, *et al*. Harnessing mammalian-and plant-derived exosomes for drug delivery: A comparative review [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, 26(10): 4857.

[17] SURESH A, RAVILLA J, NARAYANAN J, *et al*. *Mango ginger*-derived exosome-like nanovesicles promotes diabetic wound healing via inducing the promigratory protein, follistatin-like 1 [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 20: e146991.

[18] LO KJ, WANG M, KUO C, *et al*. Optimizing isolation methods and exploring the therapeutic potential of lotus-derived extracellular vesicles in modulating inflammation and promoting wound healing [J]. ACS Biomaterials Science & Engineering, 2025, 11(7): 4424–4435.

[19] YANG M, LIU X, LUO Q, *et al*. An efficient method to isolate lemon derived extracellular vesicles for gastric cancer therapy [J]. Journal of nanobiotechnology, 2020, 18(1): 100.

[20] SHU F, SARSAIYA S, REN L, *et al*. Metabolomicanalysis of plant-derived nanovesicles and extracellular vesicles from *Pinellia ternata*: Insights into a temporary immersion bioreactor system [J]. Physiol Plant, 2024, 176(6): e70016.

[21] DAD HA, GU T, ZHU A, *et al*. Plant exosome-like nanovesicles: Emerging therapeutics and drug delivery nanoplatforms [J]. Molecular Therapy, 2021, 29(1): 13–31.

[22] YOON HJ, WON JP, LEE HG, *et al*. Green *Onion*-derived exosome-like nanoparticles prevent ferroptotic cell death triggered by glutamate: Implication for GPX4 expression [J]. Nutrients, 2025, 16(19): 3257.

[23] FU J, LIU Z, FENG Z, *et al*. *Platycodon grandiflorum* exosome-like nanoparticles: The material basis of fresh platycodon grandiflorum optimality and its mechanism in regulating acute lung injury [J]. Journal of Nanobiotechnology, 2025, 23(1): 270.

[24] POCSFALVI G, TURIAK L, AMBROSONE A, *et al*. Physiochemical and protein datasets related to citrus juice sac cells-derived nanovesicles and microvesicles [J]. Data in Brief, 2018, 22: 251–254.

[25] STANLY C, MOUBARAK M, FIUME I, *et al*. Membrane transporters in *Citrus clementina* fruit juice-derived nanovesicles [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(24): 6205.

[26] POCSFALVI G, TURIAK L, AMBROSONE A, *et al*. Protein biocargo of citrus fruit-derived vesicles reveals heterogeneous transport and extracellular vesicle populations [J]. Journal of Plant Physiology, 2018, 229: 111–121.

[27] MARTINEZ-BALLESTA M, GARCIA -GOMEZ P, YEPES-MOLINA L, *et al*. Plasma membrane aquaporins mediates vesicle stability in broccoli [J]. PLoS One, 2018, 13(2): e0192422.

[28] MONICA DP, ALFREDO A, ANTONIETTA L, *et al*. Plant roots release small extracellular vesicles with antifungal activity [J]. Plants, 2020, 9(12): 1777.

[29] KIM JS, SONG B, CHO YE. *Pomegranate*-derived exosome-like nanovesicles containing ellagic acid alleviate gut leakage and liver injury in MASLD [J]. Food Science & Nutrition, 2025, 13(4): e70088.

[30] 毕玉芳, 黄运红, 袁涛. 石榴皮胞外囊泡抗糖尿病活性成分研究[J]. 中国中药杂志, 2024, 49(14): 3796–3803.
BI YF, HUANG YH, YUAN T. Anti-diabetic active constituents of *Pomegranate* peel-derived extracellular nanovesicles [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2024, 49(14): 3796–3803.

[31] LV Q, YANG H, XIE Y, *et al*. *Prunus mume*-derived extracellular vesicle-like particles alleviate experimental colitis via disrupting NEK7-NLRP3 interaction and inflammasome activation [J]. Journal of Nanobiotechnology, 2025, 23(1): 532.

[32] WEI C, CHEN Y, CHEN J, *et al*. miR166u-enriched *Polygonatum sibiricum* exosome-like nanoparticles alleviate colitis by improving intestinal barrier through the TLR4/AKT pathway [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 318(1): 144802.

[33] ZHANG Y, ZHANG X, KAI TH, *et al*. *Lycium ruthenicum Murray* derived exosome-like nanovesicles inhibit Aβ-induced apoptosis in PC12 cells via MAPK and PI3K/AKT signaling pathways [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 277(2): 134309.

[34] 杨松. 人参外泌体的分离鉴定及其对炎症性肠病的干预作用和机制研究[D]. 长春: 长春中医药大学, 2023.

YANG S. Isolation and identification of GDNPs and their intervention effect and mechanism in inflammatory bowel disease [D]. Changchun: Changchun University of Chinese Medicine, 2023.

[35] SAMAD AF, SAJAD M, NAZARUDDIN N, *et al*. MicroRNA and transcription factor: Key players in plant regulatory network [J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 565.

[36] ZHU H, CHANG M, WANG Q, *et al*. Identifying the potential of miRNAs in *Houttuynia cordata*-derived exosome-like nanoparticles against respiratory RNA viruses [J]. International Journal of Nanomedicine, 2023, 18: 5983–6000.

[37] YAN L, CAO Y, HOU L, *et al*. *Ginger* exosome-like nanoparticle-derived miRNA therapeutics: A strategic inhibitor of intestinal inflammation [J]. Journal of Advanced Research, 2024, 64: 205–216.

[38] 史磊, 申远, 崔红倩. 忍冬叶来源的外泌体样纳米囊泡功能 miRNA 及其应用: 中国, CN119193592A [P]. 2024-12-27.
SHI L, SHEN Y, CUI HQ. Functional miRNAs of exosome-like nanovesicles derived from *Lonicera japonica* leaves and their application: China, CN119193592A [P]. 2024-12-27.

[39] DE-ROBERITS M, SARRA A, D'ORIA V, *et al*. *Blueberry*-derived exosome-like nanoparticles counter the response to TNF-*α*-induced change on gene expression in EA.hy926 cells [J]. Biomolecules, 2020, 10(5): 742.

[40] AMBROSONE A, BARBULOVA A, CAPPETTA E, *et al*. Plant extracellular vesicles: Current landscape and future directions [J]. Plants, 2023, 12(24): 4141.

[41] ROME S. Biological properties of plant-derived extracellular vesicles [J]. Food & function, 2019, 10: 529–538.

[42] ZHANG M, VIENNOIS E, PRASAD M, *et al*. Edible *Ginger*-derived nanoparticles: A novel therapeutic approach for the prevention and treatment of inflammatory bowel disease and colitis-associated cancer [J]. Biomaterials, 2016, 101: 321–340.

[43] WANG X, LIU Y, DONG X, *et al*. Peu-MIR2916-p3-enriched *Garlic* exosomes ameliorate murine colitis by reshaping gut microbiota, especially by boosting the anti-colitic bacteroides thetaiotaomicron [J]. Pharmacological Research, 2024, 200: 107071.

[44] RAIMONDO S, URZI O, MERAVIGLIA S, *et al*. Anti-inflammatory properties of *Lemon*-derived extracellular vesicles are achieved through the inhibition of ERK/NF-*κ*B signalling pathways [J]. Journal of Cellular and Molecular Medicine, 2022, 26(15): 4195–4209.

[45] TAKAKURA H, NAKAO T, NARITA T, *et al*. *Citrus limon* L.-derived nanovesicles show an inhibitory effect on cell growth in p53-inactivated colorectal cancer cells via the macropinocytosis pathway [J]. Biomedicines, 2022, 10(6): 1352.

[46] LEI C, TENG Y, HE L, *et al*. *Lemon* exosome-like nanoparticles enhance stress survival of gut bacteria by RNAse p-mediated specific tRNA decay [J]. iScience, 2021, 24(6): 102511.

[47] LIU C, YAN X, ZHANG Y, *et al*. Oral administration of *Turmeric*-derived exosomelike nanovesicles with anti-inflammatory and pro-resolving bioactions for murine colitis therapy [J]. Journal of Nanobiotechnology, 2022, 20: 206.

[48] CHEN Z, ZHANG X, LUO L, *et al*. Untargeted metabolomics reveals raw material geographic origin as a key factor shaping the quality of ginger-derived exosome-like nanovesicles [J]. Foods, 2026, 15(2): 408.

[49] 程敏, 宋景鉴, 雷轩灏, 等. 绿茶外泌体样纳米颗粒(ELNs)延缓人体成纤维细胞衰老作用研究[J]. 茶叶通讯, 2024, 51(3): 391–400.
CHENG M, SONG JW, LEI XH, *et al*. Study on the delaying effect of green tea exosome like nanoparticles (ELNs) on the aging of human fibroblasts [J]. Journal of Tea Communication, 2024, 51(3): 391–400.

[50] XU S, ZHANG Z, ZHOU X, *et al*. *Gouqi*-derived nanovesicles (GqDNVs) promoted MC3T3-E1 cells proliferation and improve fracture healing [J]. Phytomedicine, 2025, 142: 156755.

[51] LIU X, ZHANG X, LIU H, *et al*. *Garlic*-derived exosome-like nanoparticles enhance gut homeostasis in stressed piglets: Involvement of lactobacillus reuteri modulation and indole-3-propionic acid induction [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(12): 7228–7243.

[52] CAO M, YAN H, HAN X, *et al*. Ginseng-derived nanoparticles alter macrophage polarization to inhibit melanoma growth [J]. Journal for Immunotherapy of Cancer, 2019, 7(1): 326.

[53] HUANG L, XUE F, YANKAI F, *et al*. Bioinspired microneedle patch integrating ginger vesicle-silver hybrid nanocomposites with dual antibacterial and angiogenic functions for diabetic wound healing [J]. Materials & Design, 2026, 262: 115492.

[54] GAO C, ZHOU Y, CHEN Z, *et al*. *Turmeric*-derived nanovesicles as novel nanobiologics for targeted therapy of ulcerative colitis [J]. Theranostics, 2022, 12(12): 5596–5614.

[55] ZHOU H, ZHOU X, PEI J, *et al*. A fibrin gel-loaded *Gouqi*-derived nanovesicle (GqDNV) repairs the heart after myocardial infarction by inhibiting p38 MAPK/NF-*κ*B p65 pathway [J]. Journal of Nanobiotechnology, 2025, 23(1): 515.

[56] WU J, MA X, LU Y, *et al*. Edible *Pueraria* lobata-derived exosomes promote M_2 macrophage polarization [J]. Molecules, 2022, 27(23): 8184.

[57] ZHEN Y, ZHANG H. NLRP3 inflammasome and inflammatory bowel disease [J]. Frontiers in Immunology, 2019, 10: 411387.

[58] XU F, MU J, TENG Y, *et al*. Restoring oat nanoparticles mediated brain memory function of mice fed alcohol by sorting inflammatory dectin-1 complex into microglial exosomes [J]. Small, 2022, 18(6): 2105385.

[59] ZHANG Z, ZHANG L, GUO J. Deciphering oxidative stress in cardiovascular disease progression: A blueprint for mechanistic understanding and therapeutic innovation [J]. Antioxidants, 2025, 14(1): 39857372.

[60] ZHAO W, BIAN Y, WANG Q, *et al*. *Blueberry*-derived exosomes-like nanoparticles ameliorate nonalcoholic fatty liver disease by attenuating mitochondrial oxidative stress [J]. Acta pharmacologica sinica, 2022, 43(3): 645–658.

[61] SUN Z, ZHENG Y, WANG T, *et al*. *Aloe vera* gel and rind-derived nanoparticles mitigate skin photoaging via activation of Nrf2/ARE pathway [J]. International Journal of Nanomedicine, 2025, 20: 4051–4067.

[62] KIM MK, CHOI YC, CHO SH, *et al*. The antioxidant effect of small extracellular vesicles derived from *Aloe vera* peels for wound healing [J]. Tissue Engineering and Regenerative Medicine, 2021, 18(4): 561–571.

[63] KIM DK, RHEE WJ. Antioxidative effects of *Carrot*-derived nanovesicles in cardiomyoblast and neuroblastoma cells [J]. Pharmaceutics, 2021, 13(8): 1203.

[64] ZHU M, XU H, LIANG Y, *et al*. Edible exosome-like nanoparticles from *Portulaca oleracea* L mitigate DSS-induced colitis via facilitating double-positive $CD4^+$ $CD8^+$ T cells expansion [J]. Journal of nanobiotechnology, 2023, 21(1): 309.

[65] LI J, XU J, HUANG C, *et al*. *Houttuynia cordata*-derived exosome-like nanoparticles mitigate colitis in mice via inhibition of the NLRP3 signaling pathway and modulation of the gut microbiota [J]. International Journal of Nanomedicine, 2024, 19: 13991–14018.

[66] LI Y, SHAO S, ZHOU Y, *et al*. Oral administration of *Folium artemisiae argyi*-derived exosome-like nanovesicles can improve ulcerative colitis by regulating intestinal microorganisms [J]. Phytomedicine, 2025, 137: 156376.

[67] LI X, XU J, ZHANG P, *et al*. *Garcinia mangostana* peel-derived exosome-like nanoparticles target AKT1/MAPK1 to inhibit glioma progression via regulating PI3K/AKT and MAPK pathways [J]. International Journal of Nanomedicine, 2024, 19: 11223–11241.

[68] SHEN J, WEI T, LI M, *et al*. *Aloe vera*-derived extracellular vesicle-like particles induce gasdermin-dependent pyroptosis in pancreatic cancer via ROS-NLRP3 inflammasome axis [J]. Chinese Medicine, 2025, 20(1): 101.

[69] POTESTA M, ROGLIA V, FANELLI M, *et al*. Effect of microvesicles from *Moringa oleifera* containing miRNA on proliferation and apoptosis in tumor cell lines [J]. Cell death discovery, 2020, 6: 43.

[70] FENG T, WAN Y, DAI B, *et al*. Anticancer activity of *Bitter Melon*-derived vesicles extract against breast cancer [J]. Cells, 2023, 12(6): 824.

[71] CHEN Q, LI Q, LIANG Y, *et al*. Natural exosome-like nanovesicles from edible tea flowers suppress metastatic breast cancer via ROS generation and microbiota modulation [J]. Acta Pharmaceutica Sinica B, 2022, 12(2): 907–923.

[72] CAO Y, TAN X, SHEN J, *et al*. *Morinda officinalis*-derived extracellular vesicle-like particles: Anti-osteoporosis effect by regulating MAPK signaling pathway [J]. Phytomedicine, 2024, 129: 155628.

[73] HWANG JH, PARK YS, KIM HS, *et al*. *Yam*-derived exosome-like nanovesicles stimulate osteoblast formation and prevent osteoporosis in mice [J]. Journal of Controlled Release, 2023, 355: 184–198.

[74] BALDINI N, TORREGGIANI E, RONCUZZI L, *et al*. Exosome-like nanovesicles isolated from *Citrus limon* L. exert anti-oxidative effect [J]. Current Pharmaceutical Biotechnology, 2018, 19(11): 877–885.

[75] ZHAO Q, FENG J, FUBIN LIU, *et al*. *Rhizoma drynariae*-derived nanovesicles reverse osteoporosis by potentiating osteogenic differentiation of human bone marrow mesenchymal stem cells via targeting ER*α* signaling [J]. Acta Pharmaceutica Sinica B, 2024, 14(5): 2210–2227.

[76] GUPTA R, GUPTA S, GUPTA P, *et al*. Nüssler and A. Kumar, establishing the callus-based isolation of extracellular vesicles from *Cissus quadrangularis* and elucidating their role in osteogenic differentiation [J]. Journal of Functional Biomaterials, 2023, 14(11): 540.

[77] LIU C, YU Y, FANG LG, *et al*. Plant-derived nanoparticles and plant virus nanoparticles: Bioactivity, health management, and delivery potential [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(24): 8875–8891.

[78] ZHANG Y, LI H, WANG X, *et al*. Plant-derived exosomes from *Zingiber officinale* improve paclitaxel delivery and reduce systemic toxicity in breast cancer [J]. Journal of Nanobiotechnology, 2025, 23(1): 412.

[79] YUAN S, HE D, ZHOU X, *et al*. Greening bone healing: The emerging role of plant-derived exosome-like nanoparticles in osteoporosis and osteoarthritis therapy [J]. International Journal of Nanomedicine, 2026, 21: S569552.

[80] PAN C, JIANG X, WEI J, *et al*. Ameba-inspired strategy enhances probiotic efficacy via prebound nutrient supply [J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 1827.

[81] YOUNGCHEON S, HYUNSEOK K, SOOHWAN O, *et al*. Plant-derived extracellular vesicles as nanocarriers for combination therapy enhancing paclitaxel-based regimens in breast cancer [J]. BMB Reports, 2025, 58(2): 53–63.

[82] TU Y, CHEN L, WANG H, *et al*. Prediction and validation of targets for *Dendrobium*-derived nanovesicles in promoting skin wound healing based on immune infiltration and senescence [J]. International Journal of Nanomedicine, 2024, 19: 1629–1642.

[83] CHO EG, CHOI SY, KIM H, *et al*. *Panax ginseng*-derived extracellular vesicles facilitate anti-senescence effects in human skin cells: An eco-friendly and sustainable way sustainable way to use ginseng substances [J]. Cells, 2021, 10(3): 486.

[84] 李惠华, 吴美芳, 王伟, 等. 枇杷外泌体及细胞液基于体外水平的护肤功效研究[J]. 热带作物学报, 2023, 7: 1488–1496.
LI HH, WU MF, WANG W, *et al*. Loquat exosomes and cytosol for skin care efficacy *in vitro* [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 7: 1488–1496.

(责任编辑: 安香玉 冯东慧)