食药同源植物外泌体提取、鉴定及应用研究进展

李娇娇，胥雯，韩亚蓝*

（云南农业大学食品科学技术学院，云南昆明 650000）

摘要：外泌体是由细胞分泌的纳米级（直径约 30~150 nm）脂质双层膜囊泡，其内富含多种具有重要生物学功能的活性物质，包括蛋白质、核酸、脂质及小分子等。近年来，食药同源植物来源外泌体样纳米囊泡（Plant-Derived Exosomes-Like Nanoparticles，PELNs）因其优异的生物活性、良好的生物相容性及潜在的治疗应用价值，已成为生物医学领域备受关注的研究热点。该文详细从食药同源植物外泌体的提取、鉴定方法进行了归纳，分析了 PELNs 中常见成分的生理活性，并对目前食药同源植物外泌体功效研究进行总结，旨在加深对食药同源外泌体的作用价值认识，为外泌体的开发利用提供技术支撑，有望为功能性食品领域资源的开发提供理论依据。

关键词：食药同源植物；植物外泌体样纳米囊泡；提取；鉴定；生物活性

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.9.0703

Research Progress on Extraction, Identification and Application of Exosomes from Food and Medicine-Related Plants

LI Jiaojiao, XU Wen, HAN Yalan*

（College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650000, China）

Abstract:Exosomes are nanoscale (approximately 30~150 nm in diameter) lipid bilayer membrane vesicles secreted by cells, which are rich in various bioactive substances with important biological functions, including proteins, nucleic acids, lipids and small molecules. In recent years, plant-derived exosomes-like nanoparticles (PELNs) from food-medicine homologous plants have become a research hotspot in the biomedical field due to their excellent biological activity, good biocompatibility and potential therapeutic application value. This paper summarizes in detail the extraction and identification methods of exosomes from food-medicine homologous plants, analyzes the physiological activities of common components in PELNs, and summarizes the current research on the efficacy of exosomes from food-medicine homologous plants. It aims to deepen the understanding of the functional value of food-medicine homologous exosomes, provide technical support for the development and utilization of exosomes, and is expected to offer theoretical basis for the development of resources in the field of functional foods.

Key words: food-medicine homologous plants; plant-derived exosome-like nanoparticles (PELNs); extraction;identification; biological activity

外泌体（Exosomes）是由细胞分泌，直径约为 30~150 nm 的脂质双层细胞外囊泡（Extracelulav Vesicle，EV），通过多囊体与质膜融合从细胞中释放[1]。植物外泌体样纳米囊泡（Plant-Derived Exosomes-Like Nanoparticles，PELNs）是一类膜囊泡，起源于真核植物细胞的多囊泡体，通过与质膜的融合释放到细胞外（图 1 所示）。它们的形态、释放机制和成分与哺乳动物来源的细胞外囊泡相似。高尔基反面网络结构调控形成早期胞内体（Early Endosome，EE），早期胞内体趋于成熟后，内体膜（Endosome Membrane）内陷，形成腔内囊泡（Intraluminal Vesicles，ILVs），选择性积累各种细胞内生物分子。晚期胞内体阶段，伴随着多泡体形成，与质膜或溶酶体合并，在与质膜融合后，纳米囊泡被释放到细胞外空间，被释放的囊泡就是外泌体[2]。PELNs 富含多种生物活性成分，包括功能性脂质、蛋白质、RNA 以及小分子活性物质。大量研究表明 PELNs 在多种疾病治疗领域具有重要应用价值，

收稿日期：2025-05-20；修回日期：2025-08-11；接受日期：2025-08-13

基金项目：云南省兴滇英才支持计划青年项目（XDYC-QNRC-2023-0400）

作者简介：李娇娇（2001-），女，硕士研究生，研究方向：食药同源功效研究，E-mail：1265672731@qq.com

通讯作者：韩亚蓝（1990-），女，博士，副研究员，研究方向：离子通道药理学，E-mail：hanyalan26@163.com

如结肠炎[3]、肿瘤[4]、真菌感染[5]、肝病[6]、皮肤保护[7]及牙周炎[8]等，并显示出显著的免疫调节特性。

“食药同源”是指兼具食用和药用价值的天然资源，这类物质在中国传统饮食和医学中具有重要地位。它们既能提供营养，又可用于防病治病。早在夏商周时期，“食药同源”思想已被广泛认可，食疗成为部分疾病的首选方案。《神农本草经》中将大枣、枸杞、薏苡仁等 50 余种日常食物，按“上品养命”原则将其列入无毒补益类，体现“食养”思想，体现了古人对食物与药物关系的深刻认识[9]。随着健康意识的提升和中医药文化的复兴，“食药同源”愈发受到关注，成为满足人们对天然、绿色、健康食品需求的新选择。

食药同源植物来源的外泌体样纳米囊泡富含天然活性成分，如蛋白质、核酸、脂质等[10-15]，其中蛋白质含量最高，约占总成分的 40%（图 2 所示）。与来源于动物细胞的外泌体囊泡相比，食药同源植物来源的 PELNs 还具有优异的生物相容性、低免疫原性、出色的组织穿透能力以及卓越的安全特性[16]。同时，食药同源植物来源的 PELNs 来源广泛、资源丰富，具有潜在前景与潜力[17]。这些特性使食药同源植物外泌体在医药、功能食品和化妆品领域展现出广阔的应用潜力。因此，本文对食药同源植物外泌体的提取方法、鉴定技术、生物学功能及其潜在应用等方面的研究进行总结和归纳，期望为食药同源植物外泌体资源研究提供参考，推动其在健康食品及医药领域的广泛应用。

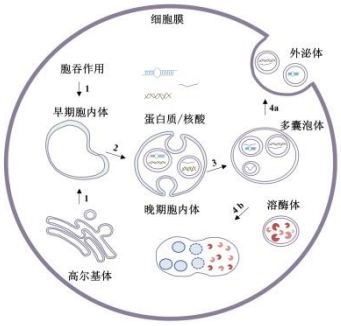

图 1 植物外泌体形成机制

Fig.1 The formation mechanism of plant exosomes

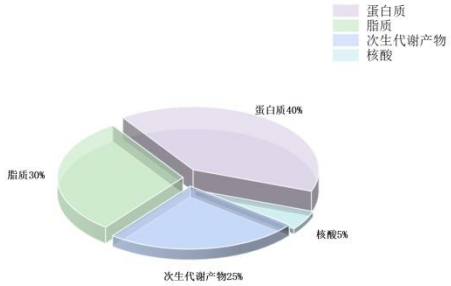

图 2 植物外泌体活性成分占比

Fig.2 The proportion of active components in plant exosomes

1 食药同源植物外泌体的提取方法

基于植物的物理及化学特性，已经开发了许多提取方法，在这些方法中，应用最多的是超速离心、聚合物沉淀、蔗糖梯度离心及尺寸排阻色谱（见表 1 所示）。而超速离心法常被看作提取植物外泌体的金标准技术，传统方法是将植物磨成汁液过滤后通过超速离心进行分离。但植物细胞具有细胞壁，存在胞间连丝等复杂连接结构，让植物源外泌体在分离和提取过程中变得困难。目前还没有研究报道能够兼具外泌体含量、纯度及生物活性等特性良好的最佳提取方法[18]。因此，在植物源外泌体的提取过程中，采用多种提取方法相结合的复合提取策略可能较单一方法更具优势，能够显著提高外泌体的得率和纯度等特性。例如，在 Yun 等[19]对生姜外泌体的提取过程中，使用密度梯度离心结合多聚物沉淀法成功制备生姜外泌体，并对其物理特性和生物活性进行了详细表征和分析。此外，为了进一步得到含量及纯度相对较高的 PELNs，Jackson 等[20]研究了一种基于疏水相互作用色谱

（Hydrophobic Interaction Chromatography，HIC）的毛细管聚合物（Capillary Polymer，CCP）纤维尖端固相萃取技术，该技术通过使用下游表征技术评估 PELNs 的基本质量，如尺寸、完整性和含量，同时保持其纯度和完整性。随着食药同源植物外泌体在药物递送、免疫调节、食品工业及再生医学等领域都展现出广泛应用前景，亟需对其提取分离方法进行系统性优化与标准化改进，以满足规模化生产需求，并确保外泌体的产量、纯度提高及批次间重复性一致。

表 1 食药同源植物外泌体的主要提取方法及优缺点

Table 1 Extraction methods and advantages and disadvantages of food and drug homologous exosomes

提取方法	提取来源	提取原理	优势	劣势	参考文献
超速离心法	西兰花	基于沉降系数、密度等差异	操作简单、不依赖化学试剂、安全性高	反复超高速离心，破坏细胞结构，其部分成分缺失	[21-23]
密度梯度离心法	苹果	利用外泌体的密度	纯度较高，能够有效除去脂质、蛋白质等杂质	提取繁琐复杂，耗时长，样品处理量小，且蔗糖介质对外泌体的生物活性产生一定影响	[24-26]
多聚物沉淀法	人参	利用外泌体的溶解度	操作简单，成本低，适合大批量生产	外泌体可能会引入一些杂质，使其纯度较低	[27,28]
尺寸排阻色谱法	蓝莓	用不同成分的分子差异	能保持外泌体结构完整，适合后续研究	上样柱子规格有限制，且收集的外泌体中可能还含有其他细胞的囊泡	[29-32]

2 食药同源植物外泌体的鉴定方法

对食药同源植物外泌体进行鉴定是研究其生物学功能、开发临床应用和确保研究可靠性的基础。在植物外泌体分离过程中，常伴随细胞碎片、蛋白质、多糖及多酚类物质的共沉淀，严重影响外泌体制品的纯度。为确保获得高纯度外泌体，需通过特征性表面标志物鉴定结合多步纯化策略，并对其生物活性成分进行系统的理化表征和功能验证（包括体外细胞实验和体内动物模型评估）。然而，由于缺乏国际公认的植物外泌体鉴定标准，不同研究团队采用的方法学差异导致数据可比性和实验可重复性面临严峻挑战。因此，亟需建立标准化的植物外泌体鉴定与质量控制体系，这不仅能更精确鉴定食药同源外泌体的特性，还能为药食同源植物外泌体的质量评价提供科学依据，推动植物外泌体产业化应用。

2.1 形态结构鉴定

在透射电子显微镜（Transmission Electron Microscope，TEM）或扫描电子显微镜（Scanning Electron Microscope，SEM）下，动物外泌体多呈典型“杯状托状”形态，膜表面光滑，脂质双层结构均一[33]。与动物外泌体相比，植物外泌体虽形态相似但其膜表面并非完全光滑，部分 PELNs 表面存在明显的膜蛋白突起或胞壁碎片附着，形成“毛刺样”外观，这是区别于动物外泌体的特征之一[34]。微生物外泌体形态则较为多样，除球形外，可见管状、椭球形、不规则碎片等多种形态，表面常带有鞭毛残基、菌毛蛋白或脂多糖（Lipopolysaccharide，LPS）突起[35]，与植物外泌体有明显区别。

2.2 粒径大小及电荷

确定食药同源植物外泌体的大小和表面电荷被认为是准确表征外泌体不可或缺的因素，因为它证实了外泌体物理特性的完整性。不同粒径的植物外泌体可能携带不同的生物分子，参与不同的生理过程。例如，较小粒径的外泌体可能更容易穿透细胞间隙，在细胞间传递信号分子，而较大粒径的外泌体可能携带更多的蛋白质或核酸，对植物的生长发育、免疫防御等产生影响。电位影响植物外泌体与细胞表面的相互作用。电位绝对值越低，PELNs 越易与细胞膜发生静电吸附和后续内吞；电位绝对值越高，则稳定性更好但相互作用效率下降[36]。

通过标准提取方法分离出的植物外泌体经过蔗糖密度梯度离心纯化排除干扰后，通过动态光散射（Dynamic Light Scattering，DLS）确定其尺寸和表面电荷，结果发现植物外泌体的直径约为 50 至 500 nm[37]，显示-15 至 -35 mV 的负电荷[38]。

2.3 纳米粒子追踪分析（Nanoparticle Tracking Analysis，NTA）

纳米粒子追踪分析（NTA）在外泌体研究发挥着重要作用，它能够精准测定粒径分布，精确监测浓度变化，进而优化提取与纯化的方法，为食药同源植物外泌体在药物载体等领域的应用开发提供关键参数。

Li 等[39]通过超速离心结合蔗糖梯度离心离心法从生姜汁中分离得到生姜外泌体样纳米颗粒（Ginger-derived Exosome-like Nanoparticles，GDENs）。经纳米颗粒跟踪分析（NTA）测定，GDENs 的颗粒为每毫升浓度约为 3.5×10^{10} 个；采用 BCA 法测定总蛋白含量，总蛋白浓度为 5.76 μg·mL^{-1}。为了评估 PELNs 的纯度，Teng 等[19]使用高纯度制备程序分离了 PELNs，并计算了 PELNs 计数与总蛋白质浓度的比值。经评估，PELNs 的纯度为 1.3×10^{11} 颗粒/mg 总蛋白。

2.4 蛋白质组学分析

一些食药同源植物外泌体含有独特的植物特异性蛋白组分，其中最典型的是组蛋白 H2A 第 95 位丝氨酸磷酸化修饰。该修饰位点作为植物特有的表观遗传标记该位点经 MLK4 激酶催化，能调控拟南芥开花时间并影响组蛋白变化 H2A.Z 的富集[40]。通过蛋白质组学技术，可以鉴定出这些特征蛋白质，从而与其他来源的外泌体相区别。在动物外泌体中常见的蛋白标记物有四跨膜蛋白超家族（CD9、CD81、CD63）、膜微结构域蛋白 flotillin 及肿瘤易感基因产物 *TSG101* 等[41]。此外，Zhao 等[42]研究结果证明，蛋白质穿透蛋白 1（Penetration1，pen1）、蛋白质穿透蛋白 3（Penetration3，pen3）和四跨膜蛋白 8（Tetraspanin8，TET8）可能是植物外泌体样纳米颗粒（PELNs）中潜在的蛋白质标记物。

2.5 脂质组学分析

食药同源植物外泌体的脂质成分具有独特性，含有植物特有的脂肪酸和磷脂等。例如，植物外泌体中可能富含一些与植物细胞膜稳定性和功能相关的脂质。动物和微生物外泌体的脂质组成与植物外泌体存在明显差异，通过脂质组学分析可以发现这些区别。

Kim 等[43]通过对葡萄柚、生姜、柠檬和葡萄四种常见植物外泌体样纳米颗粒进行脂质组学分析，发现不同来源 PELNs 的脂质组成（如磷脂酸、二半乳糖甘油二酯等）存在显著差异；其中姜源外泌体膜富含磷脂酸（≈42%）和甘油糖脂，这些脂质可能协同其吸附的姜酚/姜烯酚等活性小分子，共同赋予抗炎、抗癌等药理作用。

2.6 核酸分析

食药同源植物外泌体中的核酸包括特定的 mRNA、miRNA 等，这些核酸序列具有植物基因组的特征。通过核酸测序和生物信息学分析，可以确定其来源是否为植物，从而与动物和微生物外泌体区分开来。

Cai 等[44]研究以拟南芥与真菌病原体灰霉病菌为对象，发现拟南芥受感染时，四跨膜蛋白 8 和四跨膜蛋白 9（Tetraspanin9，TET9）标记的外泌体样细胞外囊泡会大量聚集于感染部位。研究人员从感染叶片的质外体流体中分离出 PELNs，并鉴定出 42 个高度富集的拟南芥 sRNAs（包括 TAS1c-siR483、TAS2-siR453、IGN-siR1 和 miR166），这些 PELNs 递送的 sRNAs 进入真菌细胞后，靶向切割灰霉菌毒力基因（如 BC1G_10728、BC1G_10508 和 BC1G_08464），导致其表达下降，从而削弱病原菌致病力。TET8/TET9 双突变体因 PELNs 形成受阻，胞外 sRNA 水平显著降低，对灰霉菌更易感，进一步证明 PELNs 介导的跨界 RNAi 是区别于非囊泡核酸的独特免疫机制。

近年研究发现，人参来源的外泌体具有独特的核酸组成特征。通过系统的组学分析和功能验证，研究人员鉴定出人参外泌体中富含多种具有生物活性的 miRNA 分子。实验证实，这些外泌体可作为天然高效的纳米递送载体，将其携带的功能性 miRNA 有效传递至哺乳动物间充质干细胞内，从而诱导干细胞向神经细胞分化[45]，该发现不仅证实了植物外泌体作为生物相容性纳米载体的应用潜力，更为神经再生医学提供了新的治疗策略。

表 2 部分食药同源植物外泌体的成分及功效研究

Table 2 Research on the Components and Functions of Some Edible and Medicinal Exosomes

食药同源外泌体主要成分	功效研究	参考文献
脂质	食用姜来源的外泌体的脂质成分影响免疫细胞的活性和炎症因子的产生。	[46]
	人参来源的外泌体中的脂质成分可促进组织修复和再生过程，抑制黑色素瘤的生长。	[47]
	人参中含有脂质成分的外泌体可抑制胶质瘤细胞生长。	[48]
蛋白质	大蒜外泌体通过其丰富的蛋白质成分发挥抗炎和软骨保护作用。	[49]
	鱼腥草源外泌体的 miRNA（miR166a-3p、miR858a/b）靶向病毒基因组的关键区域，抑制病毒复制和增殖，从而发挥抗病毒作用。	[50]
核酸	苦瓜源外泌体的 miRNA（miR-5266）通过下调 *MMP-9* 的表达，增强紧密连接蛋白（如 ZO-1 和 claudin-5）的表达，从而保护血脑屏障。	[44]

3 食药同源植物外泌体应用

3.1 抗氧化与抗炎

近年来，食药同源植物外泌体在抗炎、抗氧化领域的研究取得显著进展。Guan 等[51]证实，桑叶外泌体中的脂质成分可有效清除活性氧（Reactive Oxygen Species，ROS），诱导巨噬细胞由促炎 M1 型向抗炎 M2 型转化，重塑静脉微环境以促进组织修复的功效，为血管疾病治疗提供新策略。枸杞衍生纳米囊泡则通过激活 AMPK/SIRT1/PGC1α 信号通路，改善骨骼肌质量与功能，展现出对抗骨骼肌衰老的潜力[52]。

在炎症性疾病治疗方面，人参外泌体通过激活巨噬细胞自噬，靶向 IKK/IκB/NF-κB 信号通路，调节 M1/M2 极化平衡，有效缓解小鼠炎症性肠病[53]；葛根衍生外泌体通过调控巨噬细胞极化增强抗炎效应[54]。此外，新鲜地黄外泌体中 rgl-miR-7972 对脂多糖诱导的急性肺炎症具有显著保护作用，其机制涉及抑制促炎因子（IL-1β、IL-6、TNF-α）、ROS 及 NO 生成，并促进 M2 型巨噬细胞极化[56]。

在最新发表的研究中，Han 等[56]学者开发了一种基于苦瓜外泌体的新型纳米递药系统（CUR@McVs），用于探索其在 2 型糖尿病治疗中的应用价值。该研究揭示了 CUR@McVs 的双重治疗机制：一方面，苦瓜外泌体基质本身具有显著的抗氧化、抗炎及组织修复功能；另一方面，其负载的姜黄素能够突破传统口服制剂的局限，通过淋巴转运系统实现高效的胃肠道吸收和胰腺靶向递送。机制研究表明，这种复合纳米系统不仅能通过激活 Nrf2/ARE 信号通路显著降低胰岛 β 细胞内的 ROS 水平，还能有效抑制 TNF-α、IL-6 等促炎因子的表达，从而改善胰岛微环境并保护 β 细胞功能。

上述研究系统揭示了食药同源植物外泌体的多靶点抗炎、抗氧化机制以及作为药物载体的靶向治疗系统，不仅拓展了植物外泌体生物学功能的认知边界，更为开发新型生物活性药物、功能性食品及保健品提供理论依据，为推动其在医药与健康领域的转化应用奠定重要基础。

3.2 免疫调节

在生命科学领域，食药同源植物外泌体因其独特生物学特性与潜在应用价值，成为免疫调节研究的前沿热点，为免疫相关疾病防治及健康维护提供了创新路径。巨噬细胞作为免疫系统中的重要组成部分，在免疫调节中发挥重要作用。早在 Mu 等[57]的研究中就已表明 PELNs 可以被肠道巨噬细胞吸收并间接调节免疫反应。Cao 等[58]发现人参来源的外泌体能够特异性调节巨噬细胞极化状态，并增加 M1 巨噬细胞相关细胞因子的分泌，包括 TNF-α、IL-12 和 IL-6，间接参与免疫调节并抑制黑色素瘤生长。

在肿瘤免疫治疗领域，基于植物源性外泌体样纳米囊泡（PELNs）构建的功能性水凝胶展现出强大的免疫调节潜力[59]。该水凝胶由人参来源的外泌体样纳米囊泡（Ginseng-Derived Exosome-like Nanovesicles，GDEN）与菠菜来源的外泌体样纳米囊泡（Spinach-Derived Exosome-like Nanovesicles，SDEN）组成，其中 SDEN 与马来酰亚胺修饰的 OVA257-264 肽缀合形成 SDEN@OVA。瘤内注射后，SDEN@OVA 通过催化氧气生成缓解肿瘤微环境（Tumor Mircroenvironment，TME）缺氧状态，减少免疫抑制，并促进树突状细胞（Dendritic cells，DC）成熟与

T 细胞激活；同时，GDEN 可重塑肿瘤相关巨噬细胞表型，进一步逆转免疫抑制，实现免疫治疗效果的级联放大。这种基于PELNs的水凝胶策略，充分发挥植物外泌体来源广泛、生物相容性优异的优势，为克服免疫抑制性TME、提升癌症免疫治疗疗效提供了极具前景的解决方案。

上述研究系统阐释了食药同源植物外泌体在免疫调节中的关键作用机制，不仅推动了免疫相关基础研究的发展，更为创新疗法开发、功能性健康产品研制奠定了理论基础。随着研究的不断深入，食药同源植物外泌体有望在免疫疾病治疗与健康促进领域发挥更大价值。

3.3 塑造肠道微生物群

肠道是人体最大的免疫器官和消化器官，肠道健康对于维持人体整体健康至关重要。食药同源植物外泌体可以调节肠道微生物群落结构，改善肠道屏障功能，促进肠道健康。

枸杞衍生的外泌体能够调节肠道微生物群的组成和功能，增加一些有益菌如*Akkermansiaceae*科、*Akkermansia*、*Christensenellaceae_R_7_group* 等的相对丰度，减少有害菌的生长。通过重建未观察状态分析预测发现，枸杞外泌体处理组中矿物质吸收和视黄醇代谢等代谢途径显著增加。此外，枸杞外泌体还可以增强肠道屏障功能，增加结肠组织中紧密连接蛋白 Tjp1 和 Occludin 的表达，促进 *Muc2* 基因的转录，保护结肠黏液层，减轻炎症反应[60]。此外，葛根来源的外泌体样纳米囊泡对葡聚糖硫酸钠（Dextran Sulfate Sodium，DSS）诱导的结肠炎具有显著的预防作用，且呈剂量依赖性。该外泌体可有效减少肺部的炎症，选择性地调节肠道微生物群的组成。在 DSS 诱导的结肠炎小鼠模型中，葛根外泌体处理组小鼠的体重减轻、疾病活动指数以及结肠长度缩短等情况得到明显改善，结肠组织切片显示上皮层破坏得到修复，杯状细胞增加，肺部炎症和组织损伤也明显减轻。在 Duan 等[61]的研究中发现，西兰花衍生的外泌体样纳米颗粒（Broccoli-Derived Exosome-Like Nanoparticles，BD-ELNs）是一种具有高度胃肠道稳定性的天然产物，可以改善洛哌丁胺（Loperamide，LOP）诱导的小鼠便秘。从机制上讲，BD-ELNs 被肠道微生物吸收，恢复了 LOP 紊乱的肠道微生物群，并改变了 SCFA 和色氨酸的微生物代谢，荧光显微镜、16S rRNA 基因测序和非靶向代谢组学的结果证明了这一点。

借助植物外泌体与肠道菌群之间相互作用，将植物外泌体作为药物治疗手段，使得外泌体能够通过塑造肠道菌群环境来缓解炎症疾病。

3.4 肝脏保护

肝脏作为人体核心代谢器官，承担物质代谢、解毒及免疫调节等重要生理功能，而酒精性肝病（Alcoholic Liver Disease，ALD）、非酒精性脂肪肝（Non-alcoholic Fatty Liver Disease，NAFLD）等肝脏疾病已成为危害人类健康的重大公共卫生问题。近年来，食药同源植物外泌体在肝脏保护领域的研究取得重要进展，为肝脏疾病防治提供了新思路。

在 ALD 防治研究中，枸杞衍生外泌体展现出显著的肝脏保护效应[60]。基于急性酒精性肝损伤小鼠模型的研究表明，枸杞外泌体干预可有效减轻肝脏炎症反应，显著降低血清中谷丙转氨酶（Alanine Aminotransferase，ALT）、谷草转氨酶（Aspartate Aminotransferase，AST）和乳酸脱氢酶（Lactate Dehydrogenase，LDH）等肝功能损伤标志物水平。机制研究发现，枸杞外泌体可激活核因子 E2 相关因子 2（Nuclear Factor Erythroid 2-Related Factor 2，*Nrf2*）/血红素加氧酶 1（Heme Oxygenase 1，*HO-1*）抗氧化信号通路，通过上调 *Nrf2*、*HO-1* 等抗氧化基因转录表达，增强肝脏抗氧化应激能力，从而减轻酒精诱导的氧化损伤，对 ALD 发挥保护作用。另有研究表明人参外泌体在 ALD 中也具有一定保护作用[62]。在酒精性肝损伤中，肝细胞凋亡是肝功能受损的重要表现。人参外泌体可通过调控凋亡相关蛋白：半胱氨酸蛋白酶 3（Cysteine aspartate-specific protease-3，Caspase-3）以及细胞淋巴瘤 2 蛋白（B-cell lymphoma 2 protein，Bcl-2）等的表达，抑制肝细胞凋亡，保护肝细胞结构和功能。

针对 NAFLD，蒲公英外泌体在调节脂质代谢、抑制肝脏脂肪沉积方面表现出潜在应用价值[63]。研究证实，蒲公英外泌体可显著降低肝脏组织中甘油三酯（Triglyceride，TG）、总胆固醇（Total Cholesterol，TC）和低密度脂蛋白胆固醇（Low-Density Lipoprotein Cholesterol，LDL-C）含量，同时提升高密度脂蛋白胆固醇（High-Density Lipoprotein Cholesterol，HDL-C）水平，有效改善脂质代谢紊乱。分子机制层面，蒲公英外泌体通过调控过氧化物酶体增殖物激活受体 α（Peroxisome Proliferator-Activated Receptor Alpha，PPARα）、脂肪酸结合蛋白 1（Fatty Acid Binding Protein 1，FABP1）等关键脂质代谢相关基因的表达，促进脂肪酸 β-氧化与转运，抑制肝脏脂肪合成与蓄

积，从而对 NAFLD 发挥防治作用。

上述研究表明，食药同源植物外泌体通过调节氧化应激和脂质代谢等多重机制，在 ALD 和 NAFLD 防治中展现出显著潜力，为开发基于植物外泌体的肝脏疾病创新疗法提供了重要理论依据。

3.5 抗菌作用

研究表明，食药同源植物外泌体因其独特的抗菌、抗氧化及抗炎特性，在多种疾病治疗领域展现出广阔的应用前景，包括恶性肿瘤、寄生虫感染（如疟疾）及口腔炎症性疾病等[64]。Kumaran 等[65]研究团队通过构建慢性牙周炎小鼠模型，系统评估了生姜外泌体的治疗作用。其研究揭示，生姜外泌体能够特异性识别并靶向结合牙龈卟啉单胞菌表面的血红素结合蛋白 35（Hemin-Binding Protein 35，HBP35），通过多重机制发挥治疗作用：（1）显著抑制病原菌的生长增殖；（2）干扰细菌生物膜的形成和附着；（3）阻碍细菌的迁移扩散。这种靶向干预作用有效降低了牙龈卟啉单胞菌的致病性，为慢性牙周炎的临床治疗提供了新的干预策略。

3.6 皮肤保护

皮肤作为人体的第一道防线，能够阻挡病原体入侵及保护身体免受外界环境的侵害等，而一些“食药同源”植物外泌体也被证实在皮肤保护中发挥重要作用。白藜芦醇（Resveratrol，RES）是一种具有显著抗衰老特性的化合物，但由于皮肤角质层的屏障作用，其经皮吸收效果不佳，限制了其功效。为了解决这个问题，Wei 等[66]从高山火绒草（Leontopodium alpinum）中提取出其外泌体（Leontopodium alpinum-Exosomes，LEO-EXO），将 RES 装载到 LEOEXO 中，形成 LEO-EXO@RES 复合物。外泌体的纳米级结构使其能够轻松穿透皮肤角质层，将白藜芦醇等活性成分精准递送到皮肤深层细胞，显著提高了白藜芦醇的生物利用度和稳定性，使其在皮肤中发挥更好的抗衰老效果。此外，Yang 等[67]从人参中提取出外泌体，旨在研究人参来源的外泌体是否能够调节皮肤细胞的增殖并促进小鼠模型中的伤口愈合，研究结果证实其外泌体可通过 ERK 和 AKT/mTOR 通路促进皮肤伤口愈合。

图 3 食药同源外泌体功效应用图

Fig.3 The efficacy application diagram of exosomes from food and medicine with the same origin

4 结语与展望

食药同源物质作为特殊健康资源，因绿色、健康、安全等优势在食品和医药领域应用广泛，其充分利用需挖掘多元途径，而植物外泌体（PELNs）具备物质运输、免疫调节、抗菌等功能，且来源广、安全性高，不仅为疾病治疗提供新策略，也拓展了食品科学与营养学的研究方向。当前食药同源植物外泌体研究在提取、鉴定及应用方面取得一定进展，尤其在抗氧化抗炎、免疫调节、皮肤保护等功效上展现巨大潜力，例如在功能食品中可作为天然活性成分载体提升营养利用率，在医药领域有望成为靶向药物递送系统的理想选择，在食品保鲜中能通过抗菌特性延长货架期，因此在医药、食品行业前景广阔。但研究仍面临多方面挑战，其中提取技术层面，传统方法如超速离心法存在成本高、耗时久、效率低的问题，难以同时兼顾高产量与高纯度，而基于微流控、纳米膜分离的新型技术虽在提取效率上有突破，却因不同植物外泌体的理化特性差异较大，需针对具体物种进行参数优化才能实现规模化应用；质量控制层面，现有检测多聚焦于粒径分布、颗粒浓度等基础指标，缺乏对其脂质组成、核酸含量等关键理化特性的统一量化标准，导致不同研究结果难以横向对比；功效与机制层面，尽管已发现其在调

节机体稳态等方面的积极作用，但具体分子靶点、信号通路及与肠道菌群的互作机制仍需深入解析，且长期摄入的安全性数据，如潜在免疫原性、代谢残留等，尚未形成系统研究结论；市场推广层面，消费者对这一新兴概念的认知多停留在表面，加之行业缺乏权威的功效认证体系，使得相关产品在市场教育和信任建立上存在阻力。为解决上述问题，研究需优化提取纯化技术以保障生物活性和稳定性，加强跨学科合作，结合动物模型、细胞实验、代谢组学等深入探索作用机制并强化安全性研究，推动其在功能食品、药物递送、食品安全等领域的广泛应用，同时加强消费者教育以提升认知、消除疑虑，助力产品推广。

参考文献

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

[2] ZHANG Z Y, YU Y, ZHU G X, et al. The Emerging Role of Plant-Derived Exosomes-Like Nanoparticles in Immune Regulation and Periodontitis Treatment [J]. Frontiers in Immunology, 2022, 13: 896745.

[3] ZHU M Z, XU H M, LIANG Y J, et al. Edible exosome-like nanoparticles from portulaca oleracea L mitigate DSS-induced colitis via facilitating double-positive CD4CD8T cells expansion [J]. Nanobiotechnology, 2023, 21(1): 309.

[4] YANG X F, PENG Y R, WANG Y, et al. Curcumae Rhizoma Exosomes-like nanoparticles loaded Astragalus components improve the absorption and enhance anti-tumor effect [J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2023: 81: 104274.

[5] WANG L Y, LIU Z H, DU X Y, et al, Construction and evaluation of transdermal delivery system of terbinafine-loaded plant exosomes for the treatment of cutaneous fungal infections [J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2024, 102: 1773-2247.

[6] ZHANG J, TAN J, WANG M L, et al. Lipid-induced DRAM recruits STOM to lysosomes and induces LMP to promote exosome release from hepatocytes in NAFLD [J]. Science Advances, 2021, 7(45): 1541.

[7] JEONG H, YONG D H, KIM D H, et al. Confirmation of plant-derived exosomes as bioactive substances for skin application through comparative analysis of keratinocyte transcriptome [J]. Applied Biological Chemistry, 2022, 65(7): 1-9.

[8] XIE Q, GU J, SUN Y, et al. Therapeutic Potential of Ginger Exosome-Like Nanoparticles for Alleviating Periodontitis-Induced Tissue Damage [J]. International Journal of Nanomedicine, 2024, 19: 11941-11956.

[9] 田智聪,刘晓风,杨月欣.食药同源物质在清咽止咳方面的应用与发展[J].中国食物与营养,2025,31(2):68-76.

[10] SIGIT S, ANGGRAINI B, ATIK C H, et al. Plant-derived exosome-like nanoparticles: A concise review on its extraction methods, content, bioactivities, and potential as functional food ingredient[J]. Journal of Food Science, 2021, 7: 2838-2850.

[11] 曹小敏,潘思轶.柑橘属药食同源植物次生代谢物及生物活性研究进展[J].食品科学,2022,43(23):305-315.

[12] LIU Y Z, REN C Q, ZHAN R L, et al. Exploring the Potential of Plant-Derived Exosome-like Nanovesicle as Functional Food Components for Human Health: A Review [J]. Foods, 2024, 13(5): 712.

[13] YE C, YAN C, BIAN S J, et al. Momordica charantia L.-derived exosome-like nanovesicles stabilize p62 expression to ameliorate doxorubicin cardiotoxicity [J]. Journal of Nanobiotechnology, 2024, 22(1): 464.

[14] XU Y, YAN G, ZHAO J Y, et al. Plant-derived exosomes as cell homogeneous nanoplatforms for brain biomacromolecules delivery ameliorate mitochondrial dysfunction against Parkinson's disease [J]. Nano Today, 2024, 58: 102438.

[15] 潘林思,姜黄外泌体提取鉴定、小 RNA 分析及细胞毒性研究[D].广州:仲恺农业工程学院,2023.

[16] MAO X N, LI T H, QI W H, et al. MiaoAdvances in the study of plant-derived extracellular vesicles in the skeletal muscle system [J]. Pharmacological Research, 2024: 204: 107202.

[17] DAD H A, GU T W, ZHU A Q, et al. Plant exosome-like nanovesicles: emerging therapeutics and drug delivery nanoplatforms [J]. Molecular Therapy, 2021, 29(1): 13-31.

[18] YANG B, ZHANG M, YUE L X, et al. Food-derived exosomes as the future of drug delivery [J]. Nano Research, 2024, 17(11): 9865-9886.

[19] TENG Y, REN Y, MOHAMMED S, et al. Plant-Derived Exosomal MicroRNAs Shape the Gut Microbiota [J]. Cell Host & Microbe, 2018, 24(5): 637-652.

[20] JACKSON K K, MATA C, MARCUSA R K. A rapid capillary-channeled polymer (C-CP) fiber spin-down tip approach for the isolation of plant-derived extracellular vesicles (PDEVs) from 20 common fruit and vegetable sources [J]. Talanta, 2023, 252: 123779.

[21] KILASONIYA A, GARAEVA L, SHTAM T, et al. Potential of plant exosome vesicles from grapefruit (Citrus × paradisi) and tomato (Solanum lycopersicum) juices as functional ingredients and targeted drug delivery vehicles [J]. Antioxidants, 2023, 12(4): 943.

[22] CUI S, ZHANG D, LU W. Study on the extract of Huangqi and Ezhu for the crosstalk of exosomes mediating tamoxifen resistance on LCC9 cells[J]. Journal of Clinical Oncology, 2024, 40(2): 137-144.

[23] ANSARI F J, TAFTI H A, AMANZADEH A, et al. Comparison of the efficiency of ultrafiltration, precipitation, and ultracentrifugation methods for exosome isolation [J]. Biochemistry and biophysics reports, 2024, 38: 101668.

[24] LASSER C, KOWAL J, ERDBRUGGER U, et al. Corrigendum: Isolation of exosomes by differential centrifugation: Theoretical analysis of a commonly used protocol [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 21447.

[25] TRENTINI M, ZANOLLA I, ZANOTTI F, et al. Apple derived exosomes improve collagen type I production and decrease MMPs during aging of the skin through downregulation of the NF-κB pathway as mode of action [J]. Cells, 2022, 11(24): 3950.

[26] 文武龙,张炜烨,贺雨欣,等.基于牛乳外泌体与脂质体的杂化外泌体制备及其负载青藤碱治疗类风湿性关节炎的药效学研究[J].中国中药杂志,2024,49(15):4069-4077.

[27] MIN G, JUN R C, YAN M, et al. Comparison of Yield, Purity, and Functional Properties of Large-Volume Exosome Isolation Using Ultrafiltration and Polymer-Based Precipitation [J]. Plastic and reconstructive surgery, 2022, 149(3): 638-649.

[28] JANG J, JEONG H, JANG E, et al. Isolation of high-purity and high-stability exosomes from ginseng [J]. Frontiers in plant science, 2023, 13: 1064412.

[29] BOING A N, VAN D P, GROOTEMAAT A E, et al. Single-step isolation of extracellular vesicles by size-exclusion chromatography [J]. Journal of Extracellular Vesicles, 2014, 3(1): 1-11.

[30] LENG Y, YANG L, PA S, et al. Characterization of blueberry exosome-like nanoparticles and miRNAs with potential cross-kingdom human gene targets [J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(2): 869-878.

[31] MOL E A, GOUWANS M J, DOEVDANS P A, et al. Higher functionality of extracellular vesicles isolated using size-exclusion chromatography compared to ultracentrifugation [J]. Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine, 2017, 13(6): 2061-2065.

[32] AN H, WESLEY D W, OLIVIER D B, et al. Size-exclusion chromatography-based isolation minimally alters extracellular vesicles' characteristics compared to precipitating agents [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 33641.

[33] CONG M, TAN S, LI S, et al. Technology insight: Plant-derived vesicles—How far from the clinical biotherapeutics and therapeutic drug carriers? [J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2022, 182: 114108.

[34] LIU N J, WANG N, BAO J J, et al. Lipidomic analysis reveals the importance of GIPCs in Arabidopsis leaf extracellular vesicles [J]. Molecular Plant, 2020, 13(10): 1523-1532.

[35] REGENTE M, CORTI M G, MALDONADO A M, et al. Vesicular fractions of sunflower apoplastic fluids are associated with potential exosome marker proteins [J]. FEBS letters, 2009, 583(20): 3363-3366.

[36] ROME S. Biological properties of plant-derived extracellular vesicles [J]. Food & function, 2019, 10(2): 529-538.

[37] SARVARIAN P, SAMADI P, GHOLIPOUR E, et al. Application of Emerging Plant-Derived Nanoparticles as a Novel Approach for Nano-Drug Delivery System [J]. Immunol Invest, 2021, 4: 1-21.

[38] JOKHIO S, PENG I, PENG C A, et al. Extracellular vesicles isolated from Arabidopsis thaliana leaves reveal characteristics of mammalian exosomes [J]. Protoplasma 2024, 261: 1025-1033

[39] LI Z F, WANG H Z, YAN H R, et al. Arrowtail RNA for ligand display on ginger exosome-like nanovesicles to systemic deliver siRNA for cancer suppression [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 14644.

[40] HAN T T, ZHANG H, ZHOU Y M, et al. Phosphorylation of histone H2A at serine 95 is essential for flowering time and development in Arabidopsis [J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 761008.

[41] XIE S, ZHANG Q, JIANG L, et al. Current knowledge on exosome biogenesis, cargo-sorting mechanism and therapeutic implications [J]. Membranes, 2022, 12(5): 498.

[42] ZHAO B, LIN H J, JIANG X C, et al. Exosome-like nanoparticles derived from fruits, vegetables, and herbs: innovative strategies of therapeutic and drug delivery [J]. Theranostics, 2024, 14(12): 4598-4621.

[43] KIM J, LI S, ZHANG S, et al. Plant-derived exosome-like nanoparticles and their therapeutic activities [J]. Asian Journal of Pharmaceutical Sciences, 2021, 17: 53-69.

[44] CAI H, HUANG L Y, HANG R, et al. Momordica charantia Exosome-Like Nanoparticles Exert Neuroprotective Effects Against Ischemic Brain Injury via Inhibiting Matrix Metalloproteinase 9 and Activating the AKT/GSK3β Signaling Pathway [J]. Frontiers in Pharmacology, 2022, 13: 908830.

[45] XU X H, YUAN T J, HUANG Y T, et al. Plant exosomes as novel nanoplatforms for microRNA transfer stimulate neural differentiation of stem cells in vitro and in vivo [J]. Nano letters, 2021, 19: 21.

[46] ZHANG M Z, 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.

[47] ZHANG Y, LIU X, WANG L, et al. Ginseng-derived nanoparticles alter macrophage polarization to inhibit melanoma growth [J]. Journal of Nanobiotechnology, 2023, 21(1): 123.

[48] KIM J, ZHU Y, CHEN S, et al. Anti-glioma effect of ginseng-derived exosomes-like nanoparticles by active blood–brain-barrier penetration and tumor microenvironment modulation [J]. Journal of Nanobiotechnology, 2023, 21(1): 253.

[49] LI M, ZHANG Y, WANG L, et al. Garlic-derived Exosomes Alleviate Osteoarthritis Through Inhibiting the MAPK Signaling Pathway [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(10): 2345-2356.

[50] ZHU H, CHANG M J, WANG Q L, 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.

[51] GUAN P P, YUAN C J, LI J L, et al. Delivering urokinase-type plasminogen activator using mulberry leaf exosomes enables thrombolysis and remodeling of venous microenvironments [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282(P2): 136866-136868.

[52] ZHANG X L, XU S Y, ZHANG Z X, et al. Gouqi-derived nanovesicles (GqDNVs) inhibited dexamethasone-induced muscle atrophy associating with AMPK/SIRT1/PGC1α signaling pathway [J]. Journal of Nanobiotechnology, 2024, 22(1): 276.

[53] YANG S, FAN L, YIN L, et al. Ginseng exosomes modulate M1/M2 polarisation by activating autophagy and target IKK/IκB/NF-κB to alleviate inflammatory bowel disease [J]. Journal of Nanobiotechnology, 2025, 23(1): 198.

[54] WANG J Q, MA X Y, LI Y, et al. Edible Pueraria lobata-derived exosomes promote M2 macrophage polarization [J]. Molecules, 2022, 27(23): 8184.

[55] QIU F S, WANG J F, GONG M Y, et al. Rgl-exomiR-7972, a novel plant exosomal microRNA derived from fresh Rehmanniae Radix, ameliorated lipopolysaccharide-induced acute lung injury and gut dysbiosis [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2023, 165: 115007.

[56] MEI Q H, JIA H W, ZIHAN Z, et al. Momordica Charantia L.-derived extracellular vesicles achieve pancreatic-targeted delivery and repair insulin-secretory function through dual mechanisms via lymphatic transport [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 520(15): 165747.

[57] MU J, ZHUANG X, WANG Q, et al. Interspecies communication between plant and mouse gut host cells through edible plant derived exosome-like nanoparticles [J]. Molecular nutrition & food research, 2014, 58(7): 1561-1573.

[58] 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: 1-18.

[59] YANG L, ZHANG D, LU D, et al. Plant-derived exosome-like nanovesicles-created injectable hydrogel for augmented cancer immunotherapy [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 491: 152032.

[60] GUO L, DING Q Y, DUAN W H, et al. Goji-Derived Exosomes-Like Nanoparticles Ameliorate Alcohol-Induced Acute Liver Injury by modulating gut microbiota and metabolites [J]. Food & Medicine Homology, 2022, 13(8): 4321-4335.

[61] DUAN T C, WANG X Y, DONG X Y, et al. Broccoli-Derived Exosome-like Nanoparticles Alleviate Loperamide-Induced Constipation, in Correlation with Regulation on Gut Microbiota and Tryptophan Metabolism [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71: 16568-16580.

[62] 李文婧,人参外泌体对酒精性肝损伤的保护作用和机制研究[D].长春:长春中医药大学,2024.

[63] ZHANG X Y, PAN Z, WANG Y X, et al. Taraxacum officinale-derived exosome-like nanovesicles modulate gut metabolites to prevent intermittent hypoxia-induced hypertension [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2023, 161: 114572.

[64] ISOLA G. Current evidence of natural agents in oral and periodontal health [J]. Nutrients, 2020, 12(2): 585.

[65] SUNDARAM K, MILLER D P, KUMAR A, et al. Plant-derived exosomal nanoparticles inhibit pathogenicity of Porphyromonas gingivalis [J]. iScience, 2020, 23(2): 100869.

[66] WEI W, REN X, YI F, et al. Innovative Plant Exosome Delivery System for Enhancing Antiaging Potency on Skin [J]. ACS Applied Bio Materials, 2025, 8(3): 2117-2127.

[67] YANG S, LU S Y, REN L M, et al. Ginseng-derived nanoparticles induce skin cell proliferation and promote wound healing [J]. Journal of Ginseng Research, 2023, 1(47): 133-143.