电场非热效应在功能性成分提取中的应用研究进展

高颖，杨天若，杨哪*，金亚美，徐学明
（江南大学食品学院，江苏无锡 214122）

摘要：电场辅助提取能够改善传统提取方式对功能性物质提取时效率低、能耗高、目标产物损失等问题，但其作用机制复杂，规模化应用较少。电场辅助提取技术利用非热效应，即电穿孔作用能够有效破坏细胞膜和细胞壁，促进胞内和细胞间隙的功能性物质释放。研究表明，电场强度、频率、处理时间、介质特性等参数对提取产率和回收率具有显著影响。鉴于此，该文综述了电场非热效应在功能性成分提取中的研究进展，阐述了不同作用机制和影响因素，介绍了电场在植物、动物、微生物源功能性成分提取的应用以及与其他技术联用的情况。融合多种技术手段可提升提取效率并推动产业化进程，该研究为电场技术在功能性物质规模化提取中的应用提供了理论基础。

关键词：电场；提取；功能性成分；非热效应；影响因素；应用

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.8.0532

Progress in the Application of Non-Thermal Effect of Electric Field in the Extraction of Functional Ingredients

GAO Ying, YANG Tianruo, YANG Na*, JIN Yamei, XU Xueming
(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Electric Field-Assisted Extraction can improve the problems of low efficiency, high energy consumption and loss of target products in the extraction of functional substances by traditional methods. However, its mechanism of action is complex and its large-scale application is limited. Electric Field-Assisted Extraction Technology utilizes the non-thermal effect, namely electroporation, to effectively disrupt cell membranes and cell walls, promoting the release of intracellular and intercellular functional substances. Studies have shown that parameters such as electric field intensity, frequency, treatment time, and medium characteristics have a significant impact on extraction yield and recovery rate. In view of this, this paper reviews the research progress of the Non-Thermal Effect of Electric Fields in the extraction of functional components, elaborates on different mechanisms of action and influencing factors, and introduces the application of electric fields in the extraction of functional components from plant, animal, and microbial sources as well as their combined use with other technologies. The integration of multiple technological approaches can enhance extraction efficiency and promote industrialization, providing a theoretical foundation for the large-scale application of electric field technology in functional substance extraction.

Key words: Electric Field; Extraction; Functional compounds; Non-Thermal effects; Influencing factors; Applications

功能性成分是指植物、动物、微生物等天然原料中具有特定活性或药用价值的成分。这些成分如多酚、黄酮、多糖、萜类化合物、短肽和生物素等，通常具有抗癌、抗肿瘤、抗氧化[1]，抑菌，抗炎[2]等功效，因此，高效提取这些功能性物质对功能食品的开发具有重要意义。传统的提取方法如溶剂浸提、热回流等虽然操作简单，但分离提取效率低，且可能对目标产物具有不同程度的破坏。近年来，提取技术呈现多元化的发展趋势，已报道的新技术包括超临界流体提取、亚临界水提取、纳米材料辅助提取、膜分离提取、物理场辅助提取等等，其中电场辅助提取作为一种非传统的物理场辅助提取技术，也被广泛的研究和报道[3]。

电场辅助提取技术是指在提取过程中对复杂电解质体系施加一定强度和频率的电场，过程产生的热效应和非热效应促进带电溶质的相互作用，改变生物膜的通透性包括电穿孔和电崩溃，从而促进功能性成分从细胞内或者

收稿日期：2025-04-15；修回日期：2025-07-26；接受日期：2025-07-28

基金项目：国家自然科学基金项目（32172353）

作者简介：高颖（2002-），女，硕士研究生，研究方向：新型食品加工技术，E-mail：6240112021@stu.jiangnan.edu.cn

通讯作者：杨哪（1982-），男，博士，副研究员，研究方向：食品电磁加工，E-mail：yangna@jiangnan.edu.cn

细胞间质的释放和溶出[4-7]。常见的电场发生方式有脉冲电场（Pulsed Electric Field，PEF）、欧姆加热（Ohmic Heating，OH）、感应电场（Induced Electric Field，IEF）等。PEF 通过短时间施加高强度的脉冲电压，产生瞬时高电场，其特点是能量聚焦、有效作用时间短、样品介质温度上升较小，适合用于热敏性物质的提取[8]。OH 则利用极板间电流通过物料时产生的焦耳热效应来加热样品，同时具有电场的非热效应，特点是升温速度快且加热均匀，由于采用了金属电极，通常不适于酸性介质的提取处理。IEF 利用交变磁场通过电磁感应原理产生电场，是交变电场（Alternating Electric Field，AEF）技术的一种衍生形式，其核心优势在于能实现样品的非接触式加热[9]，故特别适合于酸性多相复杂电解质体系。与传统的提取方法相比，由于具有非热效应，电场辅助提取可以减少对提取物的降解和破坏[10-12]。

近年来，电场辅助提取各种功能性物质的研究报道日益增多[13]，然而不同电场对原料及细胞组织物料产生非热效应及增效作用原理尚未完全阐明。鉴于此，本文综述了当前对电场辅助提取功能性物质的最新应用研究，包括影响电场非热效应的因素以及在功能性成分提取的应用前沿进展，以期为电场类技术在功能性物质提取领域的研究提供参考。

1 电场非热效应的作用机制

1.1 细胞膜电穿孔理论

细胞膜由磷脂双分子层和蛋白质组成，具有电学特性。在外加电场作用下，细胞膜两侧会形成电位差[14,15]（图1）。随着电场强度的提升，跨膜电位也随之增大。当跨膜电位达到一定阈值时，细胞膜的脂质双分子层结构变得不稳定，原本有序排列的磷脂分子间的相互作用被破坏，分子间距变大，在细胞膜上形成一些微小的孔隙。随着电场作用的时间增长，孔隙直径不断扩大，部分微孔进一步融合，形成更大的孔道，导致细胞膜通透性增加。当电场撤离时，较小的微孔会逐渐闭合，而较大的微孔可能需要更长时间修复，甚至无法完全修复[16,17]。对于植物源活性成分提取，电场非热效应不仅作用于细胞膜，还能通过电机械应力破坏细胞壁结构[18]。植物细胞壁由纤维素、半纤维素和果胶构成，其紧密性直接影响成分释放。研究表明，PEF 通过极化作用诱导纤维素微纤丝断裂，同时干扰果胶分子间的钙离子桥接，导致细胞壁软化并形成微孔通道[19]。这些孔隙为目标物的溶出提供了可能。

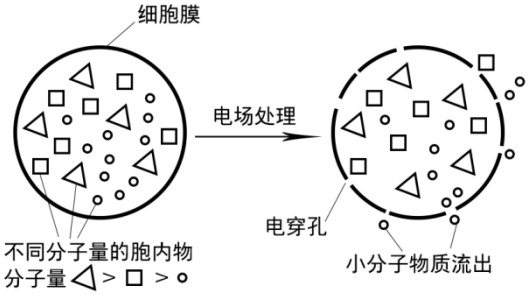

图 1 细胞膜电穿孔机理图

Fig.1 Mechanism Diagram of Cell Membrane Electroporation

1.2 分子间相互作用

适宜强度的电场可改变分子的运动状态和环境，从而显著影响分子的扩散系数。在电场作用下，带电分子受到电场力的作用定向移动，部分不带电的分子也会因为电场诱导产生极化，其运动方向和速度都会受到电场力的影响[20]。这种额外的电场力加剧了分子在电场方向上的运动，增加了分子的平均自由程，进而导致分子扩散系数增大。

电场的非热效应可以影响分子间作用力。它能干扰分子的电荷分布和电子云结构，使分子间的诱导偶极和瞬时偶极发生变化，削弱范德华力[21]。同样地，当电场影响氢键的供体或受体时，氢键网络会被破坏，分子间的氢键发生断裂或重排。在一些多糖类物质的提取中，电场非热效应能够削弱分子间静电引力，降低提取阻力，使分子更易从细胞内释放出来，并且在提取介质中更容易分散和溶解[22,23]。此外，电场的引入会改变体系中原有静电相互作用平衡，其作用机制包括增强同电荷分子间的斥力以及影响异电荷分子间的结合状态[24]。

电场的非热效应影响物料的流变特性[25]，增强了传质过程，也会促进提取效率的提高。分子扩散系数的增大加快了溶质在提取介质中的扩散，使功能性成分更快地从细胞内或细胞间质扩散到细胞外的提取介质中，从而缩短了传质时间[26]。该作用力的改变破坏了分子聚集的稳定性，使功能性成分更容易从其原本的聚集态或与其他物质的结合态中解离出来，导致传质过程中的阻力降低[27]。在固液提取体系中，这种流变特性的改善协同增强了溶剂渗透和溶质扩散，最终提高了提取效率[28]。

2 影响电场非热效应提取效率的因素

2.1 电场参数

电场强度[29,30]、处理时间[31]、脉冲频率和脉冲宽度[32]是影响功能性成分提取效率的四个关键参数。研究表明，当电场强度较低、处理时间较短、脉冲频率较低或脉冲宽度较小时，细胞膜上的跨膜电位缺失，导致形成的微孔数量有限且孔径较小，功能性成分难以充分释放，提取效率显著降低。然而，当电场强度过高、处理时间过长、脉冲频率过高或脉冲宽度过大时，细胞膜可能因过度损伤而导致细胞内物质大量溢出。与此同时，已提取的功能性成分在强电场长时间作用下易发生降解或变性，导致提取纯度和质量下降。因此，适宜的电场强度、处理时间、脉冲频率和脉冲宽度能够产生适度的跨膜电位，促进微孔的形成和稳定，增强胞内分子扩散效果，使细胞内的功能性成分更易释放到提取介质中。

2.2 物料特性

物料类型影响功能性成分的提取。不同种类的物料拥有不同的功能性成分和样品组织结构，例如，植物类原料富含多糖、黄酮、生物碱等多种成分；动物类原料以蛋白质、多肽、脂肪酸等为主；微生物类原料则含有丰富的胞内蛋白、多糖、以及次级代谢产物如抗生素等。由于原料成分的差异，在电场非热效应下其响应机制和释放特性表现不同。植物中的多糖和黄酮类物质在电场作用下，可通过细胞膜微孔的形成和分子间作用力的改变，从胞内扩散到提取介质中[33]；动物组织中的蛋白质，需要精确控制电场参数，避免因电场强度过高导致蛋白质变性[34]；而微生物源物质提取则需要针对其特殊细胞壁结构、菌体的形状优化电场条件[31]。

结构简单的微生物细胞，细胞膜直接暴露，电场作用于细胞膜，促使成分释放。结构复杂的细胞如植物细胞，有细胞壁、液泡等，细胞壁由纤维素、半纤维素和果胶等组成，不同植物的成分比例不同。纤维素含量高的细胞壁结构坚韧，需较高电场强度改变结构以促进有效成分的释放；果胶含量高的细胞壁在电场下易软化降解，利于提取[33]。这些复杂结构和特殊细胞壁组成会消耗额外的电场能量，进而影响微通道的形成和成分的释放效率[35]。此外，细菌细胞壁的肽聚糖结构，因革兰氏阳性菌和阴性菌的差异，也会导致电场的不同作用效果。

原料中目标成分的初始含量也会影响功能性成分的提取[36]。含量比例高时，电场作用下更多的成分通过细胞膜微孔释放，较易实现高提取率；含量比例低时，即便电场条件适宜，因初始量少提取难度仍大，需更长处理时间来提升回收率，且低含量目标成分易受杂质干扰，影响提取纯度。

2.3 介质特性

介质的电导率、介电常数[29]、粘度[37,38]影响功能性成分的提取。电导率直接影响电场在介质中的能量传递；介电常数体现了介质在电场中的极化特性；粘度决定了分子在介质中的扩散速度和传质效率。溶剂会影响整个提取系统的电学特性，选择合适电学特性和流体特性的介质，是高效提取的关键。

3 电场非热效应在功能性成分提取中的应用

3.1 在植物源功能性成分提取中的应用

随着健康消费理念升级，植物源功能性成分（如多酚、萜类、生物碱等）在食品、医药等领域的应用价值持续攀升。将电场技术应用于功能性成分提取能够加快回收速率，减少目标产物破坏，部分研究发现不同类型电场对提取物也具有一定的选择性，但其作用原理暂未阐明（表 1）。

表 1 电场在植物源性功能性成分提取中的应用

Table 1 Application of Electric Fields in the Extraction of Plant-derived Functional Ingredients

目标提取物	原料	电场类型	主要结论	参考文献
多酚	生姜、大麻籽、柑橘、亚麻籽壳	PEF	PEF 辅助提取多酚总含量提高，提取时间缩短，纯度提高；电场强度、脉冲次数为主要影响因素	[4,39-41]
	绿茶、柑橘	PEF	PEF 辅助提取提高了细胞崩解率，有利于多酚释放	[42,43]
	啤酒渣、荔枝皮	PEF	PEF 辅助提取能够减少对多酚的损伤，提高提取物的抗菌、抗氧化和免疫调节活性	[44,45]
	葡萄修剪残渣	OH	OH 能够快速、均匀地加热物料，减少对酚类物质的破坏	[46]
	橄榄叶	AEF	AEF 处理能提高提取效率，正弦波比方波更能有效破坏细胞结构	[47]
多糖	桃胶、秋葵、紫花山柰、海带	PEF	PEF 辅助提取能提高多糖提取率，缩短提取时间	[11,48-50]
	白蘑菇	PEF	PEF 辅助提取能提高多糖的提取效率，电脉冲和温度对提取性能存在协同效应	[12]
	柑橘皮	IEF	IEF 提取可以提高果胶产率，果胶单糖组成发生变化，果胶颜色较浅，果皮残留物表面碎裂明显	[51]
蛋白质	石蒜、钝顶节螺旋体、螺旋藻	PEF	PEF 辅助提取能提高蛋白质提取率，减少对蛋白质生物活性的破坏，对蛋白质的影响具有一定的选择性	[52-54]
	淡水蓝藻	PEF	PEF 辅助可以促进藻蓝蛋白的提取，但是对提取原料的细胞结构具有一定的选择性	[55]
	扁豆	OH	低电场提取扁豆蛋白质会增加其疏水表面和巯基的可及性	[56]
萜烯类化合物	番茄皮、红球藻	PEF	PEF 辅助提取能够提高萜烯类化合物的提取率	[57,58]
	藏红花	PEF	PEF 会破坏柱头细胞，增强细胞内化合物的可提取性	[59]
	番茄加工副产品	PEF	PEF 会使番茄皮植物细胞尺寸减小、细胞间分离，可能是由于孔隙形成和细胞内物质泄漏导致	[60]

3.1.1 多酚

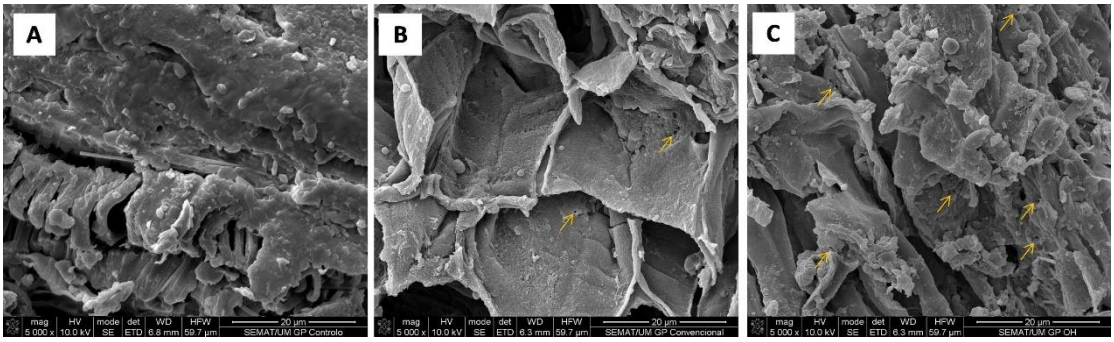

图 2 未处理（A）、常规加热（B）和（C）OH 处理后葡萄渣的电镜照片

Fig.2 Electron micrographs of grape pomace after untreated (A), conventional heating (B), and ohmic heating (C) treatments

多酚作为植物源苯丙素类代谢产物的典型代表，其分子结构特征为含两个及以上邻二酚羟基，这种独特的电子传递机制赋予其超氧阴离子清除能力，使其在肉制品护色（抑制脂质过氧化）及抗皱精华配方（DPPH 自由基清除率）等场景展现卓越应用价值。由于其自身极易被氧化，所以提取时需要在相对温和的环境，尽量避免与空气长时间接触。李晓娟等[4]对比了 PEF、超声辅助（Ultrasonic Field，UF）、溶剂提取（Solvent Extraction，SE）和传统热提取（Traditional Thermal Extraction，TTE）四种方法对生姜酚提取效能的影响，发现 PEF 处理组提取率达 13.36 mg/g ĐW，较 UF（11.15 mg/g ĐW）、SE（10.30 mg/g ĐW）及 TTE（9.81 mg/g ĐW）分别提升 19.82%、22.91%和 36.19%。其中，UF 虽然具有一定的破壁作用，但受空化阈值的限制。PEF 不仅可以改变细胞膜通透性，还能缩短提取时间。该实验中，PEF 有效处理时间仅为 0.38 ms，能在极短时间内实现细胞破坏和生姜酚的释放。较短的提取时间减少了活性物质的损失，也有利于提高提取量。此外，研究表明，提取效果随脉冲宽度呈现先增后降的趋势，这可能源于过度的脉冲作用使细胞膜受到激烈的不可逆损伤，胞内盐离子溶出，降低细胞膜电位差，

反而不利于细胞持续裂解。Ahmad Shiekh 等[61]研究了 PEF 参数对番荔枝叶抗氧化物提取效率的影响，结果表明，细胞解体指数（Zc）与电场能量输入（电场强度和脉冲数）呈正相关，在最优参数组合（6 kV cm^{-1}，300 次脉冲，比能量 142 kJ/kg，处理 5 min）时达到峰值。PEF 处理后抗氧化物的提取产率比未处理的高 5.2%，达到 13.28%。值得注意的是，PEF 预处理不仅提高了提取率，其提取物的生物活性（抗氧化性和抑菌活性）也显著增强。Ferreira-Santos 等[62]采用 OH 技术提取葡萄渣中的酚类物质时，通过扫描电镜（SEM）观察到典型的电穿孔结构（图 2），OH 组的提取率较未处理组上升 27.1%，这一发现与 Jesus 等[46]在葡萄修剪残渣（VPR）多酚提取中的研究结果相似，证实电场诱导的细胞膜通透性改变是提升植物活性成分提取效率的关键机制。

3.1.2 多糖

多糖作为由单糖单元经糖苷键缩合形成的天然高分子化合物，在生物体系中主要承担能量储存（如糖原、淀粉）和结构构建（如纤维素）等关键生物学功能。植物多糖的提取更多面临的是提取效率低下、分离纯化步骤复杂等问题，而新兴技术则受限于工艺放大可行性不足。目前，电场辅助提取技术因其非热效应和传质强化特性，近年来持续受到学界重视。该技术已成功应用于豆渣[63]、秋葵[48]、柚皮[64]等典型农副产物的多糖提取，并充分验证了电场调控能有效破坏植物细胞壁结构并促进活性成分释放。戴临雪[49]采用 PEF 预处理工艺优化紫花山柰多糖的提取，数据显示在电场强度 31 kV cm^{-1}、脉冲数 64 次时，多糖提取率可达 405 mg/g，较传统热水浸提法（264 mg/g）提升 1.53 倍。Yang 等[51]采用 IEF 从柑橘皮残渣中提取果胶，在磁场强度 1.39 T、提取时间 15 min 的条件下，最大得率达 9.16%，显著高于传统的提取方法。多项研究表明，电场辅助具有提取时间短、能耗低、提取率高的特点，能有效避免多糖在高温下的降解问题，更好地保留其生物活性。

3.1.3 蛋白质

蛋白质作为食品核心营养素，在生物的生长发育和代谢过程中承担着多种多样的职责。传统提取工艺普遍面临提取效率受限、能耗偏高以及易引发蛋白质变性和结构损伤等瓶颈问题。而电场辅助提取技术因其非热力学作用特性，在保持蛋白质构象完整性方面展现出显著优势。Wang 等[65]系统研究了 PEF 对小球藻蛋白提取的强化机制，发现在电场强度为 20 kV cm^{-1}、处理时间为 100 μs 的条件下，蛋白质提取率达到最高值，约为 75%。与传统热浸提法相比，PEF 处理后蛋白质提取率提高了 20%~30%。当电场强度超过 25 kV cm^{-1} 或处理时间超过 200 μs 时，蛋白质提取率呈现显著下降趋势，可能是由于细胞过度破坏导致细胞内其他物质泄漏。Chittapun 等[55]对比研究了 PEF 技术对两种淡水蓝藻（*Nostoc commune* TUBT05 和 *Oscillatoria okeni* TISTR8549）提取藻蓝蛋白的效果，*N. commune* 在 20 kV cm^{-1} 时能够实现最佳的细胞破坏效果；而由于其细胞结构的差异，*O. okeni* 则在 15 kV cm^{-1} 获得最大提取效率。此外，PEF 处理对藻蓝蛋白的提取效果在 *N. commune* 中显著优于 *O. okeni*，这种差异反映了电场辅助提取的物种特异性，可能源于细胞壁结构或藻蓝蛋白亚细胞定位的不同。

3.1.4 萜烯类化合物及其衍生物

萜烯类化合物作为由异戊二烯单元通过头尾缩合形成的有机物，在食品的风味增强、护肤抗氧化、植物生长调节剂等领域具有重要应用价值。在提取植物萜烯类化合物时，传统溶剂萃取法及蒸馏技术普遍存在传质阻力大、热力学损伤及选择性差等缺陷。George 等[66]研究发现，利用 PEF 技术提取啤酒花中的 *α*-酸和 *β*-酸，不仅能够显著提高提取效率，还能提升提取物的纯度。*α*-酸的提取率比传统方法提高了 30%~40%，*β*-酸的提取率提高 20%~30%。同时，*α*-酸和 *β*-酸的纯度分别比传统方法提高了 15%~20%和 10%~15%。形态分析结果表明，PEF 处理能够破坏啤酒花颗粒的细胞壁和细胞膜，促进分子扩散。在 10~20 kV cm^{-1} 的电场强度下，细胞膜上形成了明显的微孔结构，孔径范围为 50~200 nm。

3.2 在动物源功能性成分提取中的应用

相较于植物源功能性成分的提取研究，电场非热效应在动物源功能性成分提取中的应用尚处于探索阶段，目前研究主要集中在动物蛋白的组分提取。Zhou 等[67]利用高压 PEF 从贻贝中提取蛋白质时，证实电场参数的调控显著影响蛋白质得率。研究表明，20 kV cm^{-1} 的电场强度能够实现最佳的蛋白质提取效果（提取率达 77.08%），且提取时间相比传统方法更短。此外，脉冲次数也会显著影响提取率。过高的脉冲数（>8）会破坏细胞壁和膜结构，造成大量胞内物质泄漏，从而影响后续纯化效果。PEF 处理不会改变贻贝蛋白质的分子量分布。Yang 等[68]研究发现，PEF 处理能改变凡纳滨对虾精氨酸激酶（Arginine Kinase，AK）粗提物的结构特性，降低其致敏性。虽然 AK 分子量不变，但 PEF 引起的二级结构改变和表面特性变化使其致敏性显著降低，且这种效果随电场强度

和处理时间的增加而增强。Liu 等[69]采用 PEF 辅助超临界流体萃取鲑鱼蛋白时，发现 PEF 处理显著提高了液体提取物中的蛋白质含量，尤其是在内脏提取物中，蛋白质含量达到 67.1 g/100 g。此外，PEF 有助于固体基质保留更多矿物质，且所测重金属的含量均低于安全限值。现有研究表明，在一些特定的提取条件下，电场辅助可能对目标蛋白具备一定的选择性提取潜力，但其原理仍有待发掘。

3.3 在微生物源功能性成分提取中的应用

大量研究表明，电场辅助可显著促进微生物源物质的提取（表 2）。Artigas-Hernández 等[70]将 PEF 预处理与低共熔溶剂相结合用于虾青素提取，相比于传统热提取，该方法不仅提取效率显著提高，所得产物的抗氧化活性也显著增强。Dimopoulos 等[71]在研究酵母细胞物质提取时发现，PEF 处理能有效促进酵母自溶速率，较对照组提高了 78%。细胞破碎指数（Z）与 PEF 处理时间和电场强度呈正相关。在 20 kV cm^{-1} 的高场强下，仅需 14 个脉冲即可达到 Z=0.5；而在 5 kV cm^{-1} 的低场强下，需要 380 个脉冲才能达到同等破碎程度。完全破碎的细胞（Z=1）在自溶过程中表现出最快的释放速率，总固体的释放时间从 5 h 减少到 2 h。此外，PEF 处理还显著提高了总固体和游离 *α*-氨基氮的释放量。尽管电场辅助在微生物源成分提取中展现出独特优势，但较多研究仅基于 PEF，其他电场的非热效应在微生物中应用主要集中于其他领域，包括污水处理与净化[24]、生物转化与能源生产[72]、微生物的检测筛选[73]、食品杀菌[74]和土地修复[75]等，这说明电场辅助技术在微生物源物质提取领域仍具有广阔的探索空间。

表 2 电场在微生物源性功能性成分提取中的应用

Table 2 Application of Electric Fields in the Extraction of Microbial - Derived Functional Components

目标提取物	提取原料	电场类型	主要结论	参考文献
虾青素	树状黄叶霉干生物质	PEF	PEF 预处理和后续孵育能提高提取效率	[70]
甲烷	微藻	PEF	PEF 处理可提高微藻的甲烷产量，且该处理过程符合工业需求	[76]
富含生物活性短链脂肪酸和有机酸的代谢产物	小球藻和螺旋藻	PEF	PEF 预处理能提高提取效率，其中类胡萝卜素的提取量相较传统提取法增加了 400%	[77]
酵母提取物	酵母细胞悬浮液	PEF	PEF 处理可使酵母细胞悬浮液发生电穿孔，加速自溶过程，提高酵母提取物中最终氨基酸和总固体的释放量	[71]

4 电场非热效应提取与其他技术的联合应用

4.1 与超声波场联用

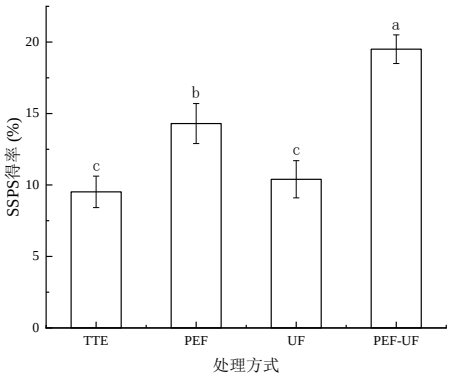

图 3 不同提取方式的 SSPS 得率

Fig.3 The yields of SPSS obtained by different extraction methods

注：图中不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

UF 提取技术是利用超声波的空化效应和机械振动促进目标成分的释放和扩散[78]，但 UF 辅助存在明显的能量阈值限制，过高的频率和功率可能导致局部过热。吴昕如[63]研究了 PEF 和 UF 协同提取水溶性大豆多糖（Soluble Soybean Polysaccharide，SSPS），相较于传统热提取或单一物理场辅助，其表现出明显的优势。在优化条件下 SSPS 得率高达 19.24%，显著高于其他提取方式（图 3）。PEF 能有效破坏植物细胞壁的纤维素结构，但对于大豆而言，

单一 UF 提取并不能表现出显著的促进作用。王宇杰[15]提取绿茶茶多酚发现，联合提取效率最高，茶多酚提取率高达 75.40%，且该方法提取的速溶绿茶粉在溶解性、理化特性及感官品质上均表现出显著优势。其机制在于，PEF 处理可使茶叶表面形成微孔通道，而超声作用可进一步扩大孔径，从而加速茶叶细胞内茶多酚、儿茶素等小分子物质的溶出（图 4）。

现有研究表明，电场与 UF 联合应用于物质提取表现出其独特的协同优势，弥补了单一电场提取的局限性，又能有效解决超声波可能对功能性成分的破坏问题[15,44,64,79]。现有研究主要集中于 PEF 联合辅助提取[80-83]，而静电场相关技术的研究相对匮乏[84]。此外，较高的设备成本也是限制电场与 UF 联合辅助提取技术发展的一个重要因素，故而目前仍处于探索阶段。

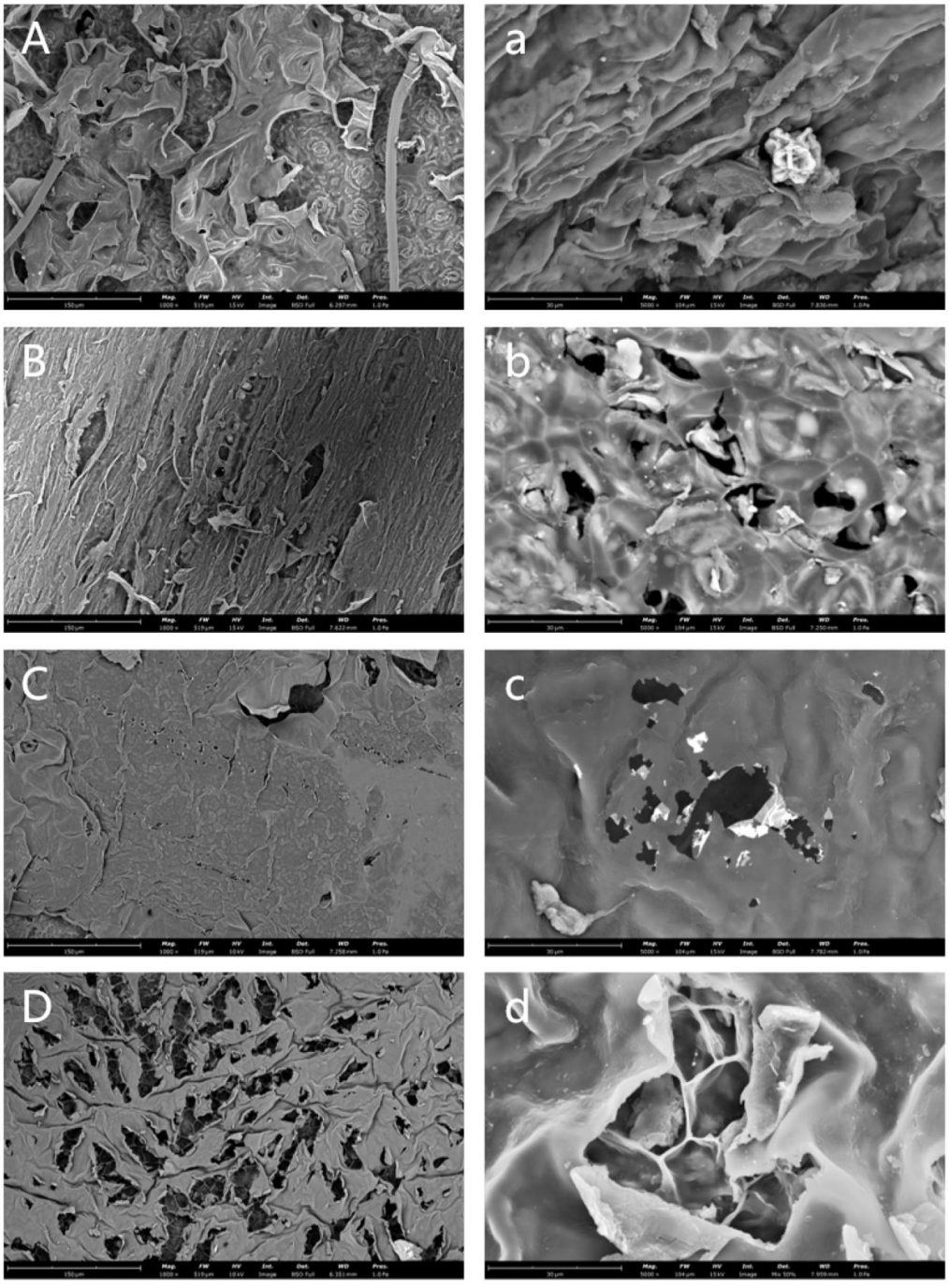

图 4 TTE（A，a）、UF（B，b）、PEF（C，c）、PEF-UF（D，d）处理后茶渣的扫描电子显微镜图像

Fig.4 Scanning electron microscopy (SEM) images of tea residue treated with TTE (A, a), UF (B, b), PEF (C, c), and PEF-UF (D, d)

注：放大倍数为左列 1 000 倍，右列 5 000 倍。

4.2 与微波联用

微波（Microwave，MW）辅助提取是指利用电磁波使物料内部极性分子（如水分子）产生高频振动，从而在分子层面实现快速均匀加热，有效促进目标成分的溶出。Nandhu 等[85]通过研究 PEF 与 MW 联用对菠萝蜜果胶提取的影响，发现 PEF-MW 提取技术能够显著提高了果胶纯度（表现为灰分、蛋白质和水分含量降低），并增强了产品的储存稳定性。同时，能耗方面，PEF-MW 方法的能耗仅为 0.0964 kWh，显著低于传统热提取 0.1916 kWh，然而，PEF-MW 提取的果胶凝胶性能相对较弱，其酯化度为 68.43%，低于传统方法的 78.45%。相较于其他物理场协同技术，MW 与 PEF 联用辅助提取技术的研究相对匮乏，推测可能因为 MW 的热效应具有较强的不确定性，其加热过程较难精确控制；其次，MW 与物料的相互作用机制复杂，涉及介电加热、分子极化和热传导等多种物理过程，目前的研究对 MW 能够对物料产生的效应机理仍缺乏系统认知。

4.3 与酶解法联用

酶解法是基于生物酶特异性作用的提取技术，其通过选择性降解细胞壁或细胞膜中的特定成分，促进目标功能性成分的高效释放。近年研究发现，PEF 与酶处理（Enzymatic Treatment，ET）联用能显著提升提取效率[48,86,87]。张佩琳[64]研究了 PEF 协同纤维素酶提取柚皮果胶的工艺优化，并与传统酸热法、单一 PEF 法和单一 ET 法进行了对比，其中 PEF-ET 协同处理后柚皮果胶的得率显著提高、其总糖含量、总酚含量及抗氧化活性均达到最优水平。Steinbruch 等[88]的研究表明，在藻类蛋白提取中采用 PEF-ET 协同技术可显著提升产物质量。经该技术处理的提取物表现出优异的抗氧化性能，其 ABTS 自由基清除效率为牛血清蛋白的 11 倍。研究推测这种增强效应可能源于多酚和硫酸化多糖的完整保留。实验数据显示，PEF 处理促使细胞内容物释放，表现为电导率明显上升。此外，PEF-ET 技术使灰分提取率从 71.6%提高至 78.4%。Ferreira-Santos 等[89]研究了 OH 和 ET 及其组合对钝顶螺旋藻细胞破壁和生物化合物提取的影响，发现 OH-ET 联合处理不仅能有效促进螺旋藻细胞壁的解体和破裂，更显著提高了细胞内化合物（藻胆蛋白）的选择性和回收率。现有研究表明，电场与酶解法的联用在生物活性成分提取中表现出协同效应，其作为一种高效、可持续的提取方法，具有广阔的应用前景。

5 总结

本文从电场辅助功能性成分提取原理、提取影响因素、不同物质提取应用以及电场与其他技术联用这四个方面综述了电场技术在功能性物质提取方面的应用现状。从作用机制来看，电场影响的细胞膜电穿孔效应和分子传质传热效率为目前主要的理论基础。在实际应用方面，已有研究表明电场辅助生物活性物质的提取在提高提取率、降低致敏性、保护热敏性物质等方面表现出独特的优势。此外，电场辅助与其他技术的联用进一步拓展了其应用范围。然而，目前该技术的广泛应用仍受到工艺优化、设备成本高、作用机制调控难等因素的限制。未来，电场在功能性成分提取应用领域的研究应朝着深入揭示作用机制、降低设备成本、优化工艺参数以及加强与其他技术联用的协同效应研究等方向发展。

参考文献

[1] 滕一涤,周琳,杨柳燕,等.西红花功能性成分分析、提取及产品开发研究进展[J].应用技术学报,2023,23(4):396-402.

[2] 刘芳,任启飞,马菁华,等.玫瑰主要功能性成分提取及纯化技术研究进展[J].农业与技术,2021,41(6):25-29.

[3] 温文俊,梁贵强,邓力川,等.岭南特色水果副产物中活性成分的提取技术及综合利用研究进展[J].现代食品科技,2022,38(12):402-409.

[4] 李晓娟,钟梨,彭开锋,等.脉冲电场强化生姜姜酚提取及工艺优化[J].现代食品科技,2024,40(9):270-277.

[5] CHAIYANA W, SIRITHUNYALUG J, SOMWONGIN S, et al. Enhancement of the Antioxidant, Anti-Tyrosinase, and Anti-Hyaluronidase Activity of Morus alba L. Leaf Extract by Pulsed Electric Field Extraction [J]. Molecules, 2020, 25(9): 2212.

[6] BANSAL V, SHARMA A, GHANSHYAM C, et al. Optimization and characterization of pulsed electric field parameters for extraction of quercetin and ellagic acid in emblica officinalis juice [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2014, 8(3): 225-233.

[7] BAI Y, LI C, ZHAO J, et al. A high yield method of extracting alkaloid from aconitum coreanum by pulsed electric field [J]. Chromatographia, 2013, 76(11-12): 635-642.

[8] 李永莲.脉冲电场辅助提取葵花籽油的品质及稳定性研究[D].扬州:扬州大学,2022.

[9] CHENGHAO H, NA Y, YAMEI J, et al. Application of induced electric field for inner heating of kiwifruit juice and its analysis [J]. Journal of Food Engineering, 2021, 306: 110609.

[10] 戴新赫,贺颖,赵立,等.弱电场中油菜籽蛋白提取优化及结构测定[J].中国食品添加剂,2024,35(1):71-76.

[11] 陈梦元,王文秀,朱远韧,等.桃胶多糖高压脉冲电场法的提取及表征[J].武汉轻工大学学报,2024,43(6):9-18.

[12] XUE D, FARID M M. Pulsed electric field extraction of valuable compounds from white button mushroom (Agaricus bisporus) [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2015, 29: 178-186.

[13] 张敏,曲梦婷,赵蕾,等.电场技术在果蔬汁加工中的研究进展[J].农产品加工,2024,9:90-94,98.

[14] LOPEZ-ALONSO B, POLAJZER T, REBERSEK M, et al. Study on effect of electroporation combining high-and low-frequency harmonics [J]. Bioelectrochemistry, 2025, 165: 108971.

[15] 王宇杰.脉冲电场协同超声波提取绿茶茶多酚及制备速溶茶粉研究[D].广州:华南理工大学,2022.

[16] LEONG Y K, YANG F-C, CHANG J-S. Extraction of polysaccharides from edible mushrooms: Emerging technologies and recent advances [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 251: 117006.

[17] KOTNIK T, REMS L, TAREK M, et al. Membrane Electroporation and Electropermeabilization: Mechanisms and Models [J]. Annu Rev Biophys, 2019, 48: 63-91.

[18] RANJHA M M A N, KANWAL R, SHAFIQUE B, et al. A Critical Review on Pulsed Electric Field: A Novel Technology for the Extraction of Phytoconstituents [J]. Molecules, 2021, 26(16): 4893.

[19] 周黎贞.脉冲电场处理对金桔细胞壁结构影响及其应用研究[D].广州:华南理工大学,2020.

[20] DAVARDOOSTMANESH M, AHMADZADEH H, SAMIEE S. Microalgae strain separation using electrophoresis [J]. Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts, 2025, 85: 103843.

[21] REN Y, LI Q, ZHANG C, et al. Implications for structural and digestive properties of broad bean protein modified by pulsed electric field [J]. Journal of Food Engineering, 2025, 391: 112444.

[22] GAO W, LIU J, ZHANG P, et al. Physicochemical, structural and functional properties of pomelo peel pectin extracted by combination of pulsed electric field and cellulase hydrolysis [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278: 134469.

[23] 周亚军,贺琴,吴都峰,等.高压脉冲电场辅助提取河蚌多糖工艺优化[J].农业机械学报,2014,45(S1):236-240+235.

[24] 张宏毅.电化学强化的菌藻-MBR 污水处理效能及膜污染控制机制[D].保定:河北大学,2024.

[25] LI Q, SONG T, YU Y, et al. Electric fields and transglutaminase in preparing adzuki bean protein emulsion gel for plant-based steamed egg custard [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 98: 103871.

[26] NALIYADHARA N, KUMAR A, GIRISA S, et al. Pulsed electric field (PEF): Avant-garde extraction escalation technology in food industry [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 122: 238-255.

[27] ZHANG S, SUN L, JU H, et al. Research advances and application of pulsed electric field on proteins and peptides in food [J]. Food Research International, 2021, 139: 109914.

[28] SURANO B, LEIVA G, MARSHALL G, et al. Pulsed electric fields using a multiple needle chamber to improve bioactive compounds extraction from unprocessed Opuntia ficus-indica fruits [J]. Journal of Food Engineering, 2022, 317: 110864.

[29] KOTNIK T, KRAMAR P, PUCIHAR G, et al. Cell membrane electroporation- Part 1: The phenomenon [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2012, 28(5): 14-23.

[30] LIU Z-W, ZENG X-A, SUN D-W, et al. Synergistic effect of thermal and pulsed electric field (PEF) treatment on the permeability of soya PC and DPPC vesicles [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 153: 124-131.

[31] MARTíNEZ J M, DELSO C, ÁLVAREZ I, et al. Pulsed electric field-assisted extraction of valuable compounds from microorganisms [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(2): 530-552.

[32] BARBA F J, PARNIAKOV O, PEREIRA S A, et al. Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry [J]. Food Research International, 2015, 77: 773-798.

[33] BOCKER R, SILVA E K. Pulsed electric field assisted extraction of natural food pigments and colorings from plant matrices [J]. Food Chemistry: X, 2022, 15: 100398.

[34] MAR Ń-SÁNCHEZ J, BERZOSA A, ÁLVAREZ I, et al. Pulsed Electric Fields Effects on Proteins: Extraction, Structural Modification,

and Enhancing Enzymatic Activity [J]. Bioelectricity, 2024, 6(3): 154-166.

[35] REMS L, VIANO M, KASIMOVA M A, et al. The contribution of lipid peroxidation to membrane permeability in electropermeabilization: A molecular dynamics study [J]. Bioelectrochemistry, 2019, 125: 46-57.

[36] KARA S, CHORMEY D S, SAYGıLAR A, et al. Arsenic speciation in rice samples for trace level determination by high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Food Chemistry, 2021, 356(15): 129706.

[37] AJČEVIĆ M, ISCRA K, FURLANIS G, et al. Cerebral hypoperfusion in post-COVID-19 cognitively impaired subjects revealed by arterial spin labeling MRI [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 5808.

[38] TABASSUM N, AHMED S, ALI M A. Chitooligosaccharides and their structural-functional effect on hydrogels: A review [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 261: 117882.

[39] MPAKOS D, CHATZIMITAKOS T, ATHANASIADIS V, et al. Optimization of Pulsed Electric Field-Based Extraction of Bioactive Compounds fromCannabis sativaLeaves [J]. Analytica, 2024, 5(1): 90-106.

[40] EL KANTAR S, BOUSSETTA N, LEBOVKA N, et al. Pulsed electric field treatment of citrus fruits: Improvement of juice and polyphenols extraction [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 46: 153-161.

[41] BOUSSETTA N, SOICHI E, LANOISELL éJ-L, et al. Valorization of oilseed residues: Extraction of polyphenols from flaxseed hulls by pulsed electric fields [J]. Industrial Crops & Products, 2014, 52: 347-353.

[42] CARULLO D, CARPENTIERI S, FERRARI G, et al. Influence of mechanical comminution of raw materials and PEF treatment on the aqueous extraction of phenolic compounds from artichoke wastes [J]. Journal of Food Engineering, 2024, 369: 111939.

[43] QUIJADA E J, WON M P, MUNIZAGA G T, et al. Polyphenol Extraction of Green Tea Through Pulsed Electric Field: Yield Improvement and Environmental Assessment [J]. Food and Bioprocess Technology, 2023, 17(9): 2718-2734.

[44] TAN M J, LI Y, ZHAO S Q, et al. Synergistic ultrasound pulsed electric field extraction of litchi peel polyphenols and determination of their properties [J]. International journal of biological macromolecules, 2024, 260(Pt 2): 129613.

[45] KUMARI B, TIWARI B K, WALSH D, et al. Impact of pulsed electric field pre-treatment on nutritional and polyphenolic contents and bioactivities of light and dark brewer's spent grains [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 54: 200-210.

[46] JESUS M S, BALLESTEROS L F, PEREIRA R N, et al. Ohmic heating polyphenolic extracts from vine pruning residue with enhanced biological activity [J]. Food Chemistry, 2020, 316: 126298.

[47] COKGEZME O F, ICIER F. Frequency and wave type effects on extractability of oleuropein from olive leaves by moderate electric field assisted extraction [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 77: 102985.

[48] 王文渊,张芸兰,唐鹏程,等.高压脉冲电场协同酶法提取秋葵果胶的研究[J].中国食品添加剂,2022,33(5):23-29.

[49] 戴临雪.紫花山柰粗多糖的脉冲电场提取及其对糖尿病小鼠的影响[D].广州:华南理工大学,2021.

[50] 刘航,冯立强,刘兴江.高压脉冲电场和传统热水法提取海带多糖的比较研究[J].现代化工,2016,36(7):75-78.

[51] YANG N, JIN Y, ZHOU Y, et al. Physicochemical characterization of pectin extracted from mandarin peels using novel electromagnetic heat [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 262: 130212.

[52] KATSIMICHAS A, LIMNAIOS A, DIMITRAKOPOULOS K, et al. Pulsed Electric Fields assisted extraction of proteins and phycocyanin from Arthrospira platensis biomass: A kinetic study [J]. Food and Bioproducts Processing, 2024, 147: 304-314.

[53] KÄFERBÖCK A, SMETANA S, DE VOS R, et al. Sustainable extraction of valuable components from Spirulina assisted by pulsed electric fields technology [J]. Algal Research, 2020, 48: 101914.

[54] POLIKOVSKY M, FERNAND F, SACK M, et al. Towards marine biorefineries: Selective proteins extractions from marine macroalgae Ulva with pulsed electric fields [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 37: 194-200.

[55] CHITTAPUN S, JONJAROEN V, KHUMRANGSEE K, et al. C-phycocyanin extraction from two freshwater cyanobacteria by freeze thaw and pulsed electric field techniques to improve extraction efficiency and purity [J]. Algal Research, 2020, 46: 101789.

[56] MIRANDA C G, RODRIGUES R M, PEREIRA R N, et al. Influence of ohmic heating on lentil protein structure and protein-pectin interactions [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 87: 103413.

[57] MART ŃEZ J M, GOJKOVIC Z, FERRO L, et al. Use of pulsed electric field permeabilization to extract astaxanthin from the Nordic microalga *Haematococcus pluvialis* [J]. Bioresour Technol, 2019, 289: 121694.

[58] PATARO G, CARULLO D, BAKAR SIDDIQUE M A, et al. Improved extractability of carotenoids from tomato peels as side benefits of

PEF treatment of tomato fruit for more energy-efficient steam-assisted peeling [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 233: 65-73.

[59] NERI L, GIANCATERINO M, ROCCHI R, et al. Pulsed electric fields (PEF) as hot air drying pre-treatment: Effect on quality and functional properties of saffron (*Crocus sativus* L.) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 67: 102592.

[60] PATARO G, CARULLO D, FALCONE M, et al. Recovery of lycopene from industrially derived tomato processing by-products by pulsed electric fields-assisted extraction [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 63: 102369.

[61] AHMAD SHIEKH K, ODUNAYO OLATUNDE O, ZHANG B, et al. Pulsed electric field assisted process for extraction of bioactive compounds from custard apple (*Annona squamosa*) leaves [J]. Food Chemistry, 2021, 359: 129976.

[62] FERREIRA-SANTOS P, NOBRE C, RODRIGUES R M, et al. Extraction of phenolic compounds from grape pomace using ohmic heating: Chemical composition, bioactivity and bioaccessibility [J]. Food Chemistry, 2024, 436: 137780.

[63] 吴昕如.脉冲电场联合超声提取豆渣中水溶性多糖及其功能性质的研究[D].广州:华南理工大学,2022.

[64] 张佩琳.脉冲电场协同纤维素酶提取柚皮果胶的研究[D].广州:华南理工大学,2020.

[65] WANG M, ZHOU J, CASTAGNINI J M, et al. Pulsed electric field (PEF) recovery of biomolecules from Chlorella: Extract efficiency, nutrient relative value, and algae morphology analysis [J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134615.

[66] GEORGE N, ANASTASIA T E, FOTINI D, et al. Pulsed Electric Field Extraction of α and β-Acids From Pellets of Humulus lupulus (Hop) [J]. Frontiers in bioengineering and biotechnology, 2020, 8: 297.

[67] ZHOU Y, HE Q, ZHOU D. Optimization Extraction of Protein from Mussel by High-Intensity Pulsed Electric Fields [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(3): 12961- 12968.

[68] YANG C, LI X, DENG Y, et al. Effects of high voltage pulsed electric field on structural properties and immune reactivity of arginine kinase in Fenneropenaeus chinensis [J]. Food Chemistry, 2024, 449: 139304.

[69] LIU Y, BERRADA H, CASTAGNINI J M, et al. Supercritical fluid extraction prior pulsed electric fields to improve high-added-value compounds recovery from salmon side streams: Evaluation of protein, bioactive peptides and minerals [J]. Food Chemistry, 2025, 467: 142283.

[70] ARTIGAS-HERNâNDEZ D, BERZOSA A, AGUILAR-MACHADO D, et al. Using eutectic solvents for extracting astaxanthin from dry biomass of *Xanthophyllomyces dendrorhous* pretreated by pulsed electric fields [J]. Separation and Purification Technology, 2023, 324: 124496.

[71] DIMOPOULOS G, STEFANOU N, ANDREOU V, et al. Effect of pulsed electric fields on the production of yeast extract by autolysis [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 48: 287-295.

[72] LU Z, XUAN W, HONGGE W, et al. Electric field as extracellular enzyme activator promotes conversion of lignocellulose to humic acid in composting process [J]. Bioresource Technology, 2024, 391(PA): 129948.

[73] 刘瑾,赵华,张朝正.电场辅助筛选技术快速筛选窖泥中的产酸菌[J].酿酒,2023,50(1):126-130.

[74] 牛德宝.脉冲电场杀灭醋酸菌及钝化其关键产酸酶机制研究[D].广州:华南理工大学,2020.

[75] 鲁文杰.烷烃污染土壤的电动--微生物修复和微生物分布特征[D].北京:中国科学院大学,2019.

[76] STRAESSNER R, NIKOLAUSZ M, SILVE A, et al. Holistic exploitation of pulsed electric field (PEF)-treated and lipid extracted microalgae Auxenochlorella protothecoides, utilizing anaerobic digestion (AD) [J]. Algal Research, 2023, 69: 102950.

[77] RICóS-MUñOZ N, RIVAS SOLER A, CASTAGNINI J M, et al. Improvement of the probiotic growth-stimulating capacity of microalgae extracts by pulsed electric fields treatment [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 83: 103256.

[78] 曾敏.超声波辅助提取夏枯草多酚的研究前景[J].云南化工,2018,45(3):3-4.

[79] 杨日福,耿琳琳,范晓丹.超声协同静电场提取黄花菜中总黄酮的研究[J].声学技术,2017,36(1):32-37.

[80] 吴港城,黄笑宇,李建科,等.一种超声波和中强度电场联用处理提高橄榄果渣中多酚提取率的方法:中国,CN116271951A[P].2021-06-23.

[81] 卢燕回,陈泽鹏.一种高压脉冲电场结合微波、超声波提取烟草废料中绿原酸的方法:中国,CN109111364B[P].2021-06-22.

[82] 刘丹,孙大文,曾新安,等.一种超声协同脉冲电场提取葡萄皮渣多酚的方法:中国,CN103224538B[P].2016-01-20.

[83] 何毅,刘志伟,李明,等.一种脉冲电场强化超声辅助提取红曲色素工艺方法:中国,CN110527318A[P].2019-12-03.

[84] 杨日福,丘泰球,范晓丹,等.超声协同静电场提取植物有效成分的方法:中国,CN101732361B[P].2011-12-07.

[85] LAL A M N, PRINCE M V, KOTHAKOTA A, et al. Pulsed electric field combined with microwave-assisted extraction of pectin

polysaccharide from jackfruit waste [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 74: 102844.

[86] 周亚军,李圣桡,王淑杰,等.高压脉冲电场协同酶法辅助提取玫瑰精油工艺优化[J].食品科学,2020,41(6):270-277.

[87] 吴红艳,彭呈军,邓后勤.高压脉冲电场辅助水酶法提取杜仲叶中不可萃取多酚[J].食品工业科技,2020,41(6):167-171.

[88] STEINBRUCH E, WISE J, LEVKOV K, et al. Enzymatic cell wall degradation combined with pulsed electric fields increases yields of water-soluble-protein extraction from the green marine macroalga Ulva sp [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 84: 103231.

[89] FERREIRA-SANTOS P, MIRANDA S M, BELO I, et al. Sequential multi-stage extraction of biocompounds from Spirulina platensis: Combined effect of ohmic heating and enzymatic treatment [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 71: 102707.