

中药材超微粉碎处理及中药渣综合利用的研究进展

刘琳, 向玉洁, 王金凤, 王飞翔, 陈柏雄*

遵义医科大学生物工程学院, 广东 珠海 519090

摘要:近年来,超微粉碎技术在中药材前处理中的应用日益广泛。该技术通过将中药材粉碎至微米甚至纳米级,显著提高了其中药理学活性成分的生物利用率和溶出率,同时也为中药渣的综合利用开辟了新途径。通过系统总结不同中药材在超微粉碎处理中的研究进展,重点讨论了微米级或纳米级下不同种类活性物质溶出行为的变化,深入阐述了超微粉碎技术在中药应用中的优势与挑战。此外,还分析了当前中药渣在不同领域的处理和利用方法,特别关注其在碳材料制备、农业应用和作为饲料添加剂方面的应用。探讨超微粉碎技术在中药领域的应用潜力,并展望其对中药渣资源化利用的贡献,为中药产业的可持续发展提供参考。

关键词:超微粉碎; 中药材; 活性物质; 中药渣; 综合利用

中图分类号: R28 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2025)08-2984-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.08.031

Research progress on ultra-fine pulverization of traditional Chinese medicine materials and comprehensive utilization of Chinese medicine residue

LIU Lin, XIANG Yujie, WANG Jinfeng, WANG Feixiang, CHEN Baixiong

School of Bioengineering, Zunyi Medical University, Zhuhai 519090, China

Abstract: In recent years, ultra-fine pulverization technology has been increasingly applied in the pretreatment of traditional Chinese medicine (TCM) materials. This technology significantly enhances the bioavailability and dissolution rate of pharmacologically active ingredients by reducing the particle size of TCM materials to the micron or even nanometer scale, while also opening up new avenues for the comprehensive utilization of Chinese medicine residues. This paper systematically summarizes the research progress of various TCM materials under ultra-fine pulverization treatment, with a focus on the changes in the dissolution behavior of various kinds of active substances at the micro- and nano- scales. Delving into the advantages and challenges of ultra-fine pulverization technology in the application of TCM. Additionally, this paper reviews the current methods of processing and utilizing Chinese medicine residues across different fields, paying special attention to their applications in carbon material preparation, agricultural use, and as feed additives. This review aims to explore the potential applications of ultrafine grinding technology in the field of TCM and its contribution to the resource utilization of Chinese medicine residues, thus providing reference for the sustainable development of TCM industry.

Key words: ultra-fine pulverization; traditional Chinese medicine material; bioactive ingredient; Chinese medicine residue; comprehensive utilization

中药材是我国传统医药的瑰宝,蕴含着丰富的药用价值和深厚的文化底蕴。中医药历史悠久,在现代医疗保健体系中发挥着重要作用,其中蕴含多种具有显著生物活性的天然产物,在抗肿瘤、抗炎和调节血糖等方面表现出良好的效果^[1-2]。近年来,随着现代科学技术的进步,特别是高通量测序、分离纯化、生

物信息学及材料物理学等领域的快速发展,对中药药理学机制和活性成分的研究日益深入。如通过基因组学、蛋白质组学、代谢组学等技术,可以系统揭示中药复方的作用靶点和作用网络^[3]。然而,传统的中药材处理方法往往存在活性成分提取率低、生物利用度不高的问题。以传统水煎煮法为例,许多脂溶性成分、

收稿日期: 2024-12-23

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科平台人才[2021]1350-012号); 国家自然科学基金地区基金项目(32360787)

作者简介: 刘琳, 本科生, 生物工程专业。E-mail: 3522599340@qq.com

*通信作者: 陈柏雄, 副教授, 从事微生物基因组学与基因工程及天然产物合成代谢研究。E-mail: baixiong@zmu.edu.cn

大分子成分难以充分溶出，导致药效降低^[4]。同时，大量未被有效利用的中药渣被作为废弃物处理，不仅造成资源浪费，还可能引起环境污染问题^[5]。

超微粉碎技术作为一种新兴的材料加工方法，近年来在中药领域展现出巨大潜力（图1）。它能够将中药材粉碎至微米、亚微米甚至纳米级别，从而

显著改变其理化性质，提高生物利用度，并拓宽应用领域^[6-7]。超微粉碎技术不仅在中药领域有广泛应用，在食品、化工、材料等领域也有诸多成功案例。如在食品工业中，超微粉碎技术可用于改善食品口感、提高营养成分吸收率；在化工领域，可用于制备固体润滑材料、催化剂等^[8]。

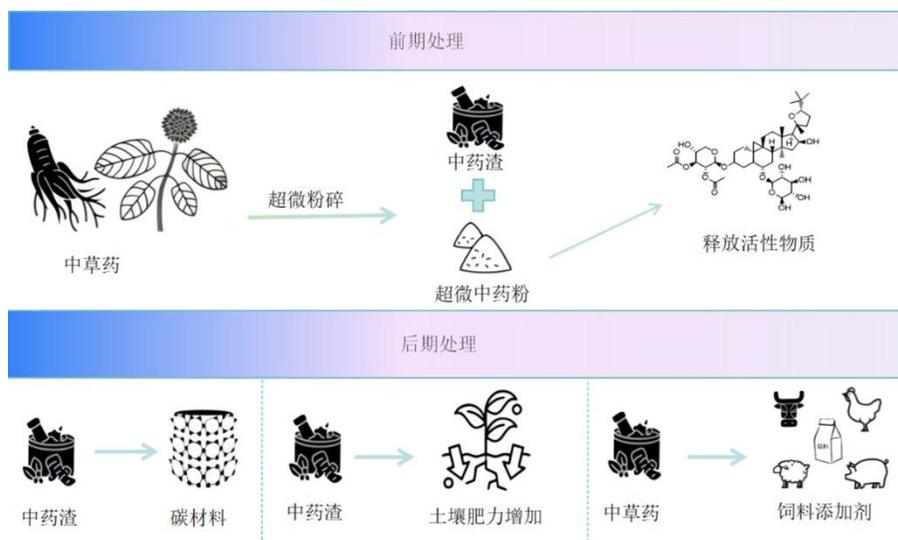


图1 中药材的超微粉碎处理及中药渣综合利用

Fig. 1 Ultra-fine pulverization treatment of traditional Chinese medicine materials and comprehensive utilization of Chinese medicine residues

1 超微粉碎技术

超微粉碎技术是一种通过机械或流体动力将固体物料粒径减小至微米（1~100 μm）、亚微米（0.1~1.0 μm）甚至纳米级（<100 nm）的高新技术^[9]，广泛用于食品、医药、化工等领域。其主要原理是利用机械力（如冲击、剪切、摩擦等）或流体动力（如高速气流）克服固体内部的凝聚力，从而实现物料的细化处理。

根据不同的粉碎方式，超微粉碎技术可分为干法和湿法2类。干法主要包括球磨法、气流粉碎法、振动磨法等，而湿法则包括胶体磨和均质机等设备。其中，球磨法^[10-11]通过研磨介质（如钢球、陶瓷球等）在高速旋转或振动下对物料进行冲击、剪切和研磨，适用于实验室小批量样品制备及工业化生产。气流粉碎法^[12]则利用高速气流带动颗粒相互碰撞或撞击靶板，具有产品纯度高、粒度分布窄的优点，但能耗较高。低温粉碎法^[13-14]则通过降低物料温度提高脆性，避免热敏性物质变性，常与球磨或振动磨联合使用。高压均质法^[15]则通过高压泵使液体或悬浮液高速通过狭窄的均质阀，产生强烈的剪切

力和撞击作用，特别适用于制备纳米乳和脂质体。振动磨法^[16]利用高频振动产生的冲击和摩擦力进行粉碎，结构简单且操作方便。超微粉碎技术能够显著改善物料的物理化学特性，包括增加比表面积、提高溶解度、增强渗透性、促进细胞破壁效应及晶型转变等。这些特性使得超微粉碎在提高药物活性成分溶出速率、改善食品品质和加工性能等方面具有重要意义^[20-22]。如根据 Noyes-Whitney 方程，溶出速率与比表面积成正比^[17]，而 Ostwald-Freundlich 方程表明粒径减小可能提高饱和溶解度^[18]。此外，纳米级颗粒更易穿透生物膜，从而提高生物利用度^[19]。对于中药材等细胞壁较厚的物料，超微粉碎还能有效破坏细胞壁，释放胞内活性成分。

影响超微粉碎效果的因素主要包括设备参数^[23]（如转速、球料比、研磨时间等）、物料性质（如硬度、韧性、含水量等）及环境条件^[24]（如温度、湿度）。如硬度高、韧性大的物料更难粉碎；高温可能导致热敏性成分降解，而高湿可能导致颗粒团聚。因此，在实际应用中需综合考虑这些因素以优化粉碎工艺。

超微粉碎技术凭借其高效性、低污染性和广泛的应用前景,已成为现代工业中不可或缺的关键技术之一。未来的发展趋势包括提升设备效率、优化工艺参数及拓展更多领域的应用。

2 超微粉碎对中药材中不同活性物质溶出的影响

2.1 对皂苷类活性物质溶出的影响

皂苷类化合物是多种中药材的主要活性成分,具有广泛的药理活性,如抗炎、降血糖、抗肿瘤、免疫调节等^[25]。

黄芪是临床常用的中药材之一,其主要活性成分是黄芪皂苷,具有降血糖、抗病毒、保护心血管系统等药理功效^[26]。柴梦音等^[27]研究发现通过低温振动粉碎机将黄芪饮片进行超微粉碎(粒径0.45~709 μm,80%以上颗粒粒径小于80 μm)后,黄芪甲苷(黄芪皂苷的主要成分之一)的含量比未粉碎的黄芪饮片提高了1.6倍。马培艳等^[28]发现纳米级黄芪粉(粒径约81.7 nm)本身并未检测到黄芪皂苷,但在制备成纳米悬浮液后,皂苷以直接溶出状态存在,且对悬浮液起到稳定作用。三七是另一种重要的含皂苷类成分的中药材,具有止血、活血化瘀、消肿止痛等功效^[29]。苏艳丽等^[30]采用HPLC法测定发现,三七粉经纳米化处理(粒径133.5 nm)后,人参皂苷Rb₁的溶出率提高了59.7%。田艳等^[31]通过球磨法将三七和西洋参粉碎至300~400 nm,发现三七中的三七皂苷R₁、人参皂苷Rg₁和人参皂苷Rb₁的累计溶出率分别比市售超微粉高出4.73%、11.01%和26.71%;西洋参中人参皂苷Re的累积溶出率比市售超微粉高出43.89%。丁苗苗等^[32]研究表明超微粉碎可以提升西洋参总皂苷的溶出度。贺建东等^[33]采用超微粉碎结合超临界流体萃取技术,考察了对丹参总皂苷提取率,相比传统提取方法提高了近1倍。综上,超微粉碎技术可显著提高黄芪、三七、西洋参、丹参等中药材中皂苷类活性物质的溶出率,从而增强其药理活性,并降低临床用药剂量。

2.2 对黄酮类活性物质溶出的影响

黄酮类化合物是广泛存在于植物界的一类天然产物,具有抗氧化、抗炎、抗病毒、抗肿瘤等活性^[34-35]。苦荞麦是一种药食两用植物,其副产物苦荞麸皮富含黄酮类化合物^[36]。郑慧等^[37]利用球磨机超微处理苦荞麸皮粗粉,得到微米级苦荞微粉(平均粒径79.78 μm),并采用超声波辅助提取,发现总黄酮溶出率比未粉碎的粗粉提高了1.31%,且较好地保留了苦荞麸皮中原有的类黄酮类成分。许青莲

等^[38]采用纳米研磨方法制备苦荞微粉(平均粒径5.39 μm),测定发现总黄酮含量高达27 g/kg,比未粉碎的粗粉提高了2 g/kg。丹参是传统活血化瘀中药,其主要脂溶性成分丹参酮II_A具有抗氧化、抗炎、保护心血管等作用^[39]。Su等^[40]对丹参进行超微粉碎,将粒径缩小至133.5 nm,采用HPLC法分离提取丹参酮II_A,发现纳米化处理将丹参酮II_A的提取量从12.77 μg/g提高到54.55 μg/g,且分子结构并未被破坏。银杏叶提取物是常用的抗氧化和改善微循环药物,其主要活性成分为银杏黄酮^[41]。石相弘等^[42]对银杏叶进行纳米粉碎(粒径100~500 nm),通过络合反应测得银杏黄酮提取率达85%~90%。Hong等^[43]研究了球磨时间对栓皮栎叶超微粉(粒径27.87 μm)中黄酮类化合物含量的影响,发现随着球磨时间延长,黄酮类化合物质量分数从9.62 mg/g提高到16.37 mg/g,推测可能与细胞破壁率提高、表面积增大有关。Wu等^[44]研究了超微粉碎对三七花粉抗氧化活性的影响。将三七花粉碎至不同粒径(M400组平均粒度最小,M60组平均粒度最大),采用比色法测定总黄酮含量,发现M400组总黄酮溶出量达到1.1 mg/g,而M60组不到0.4 mg/g。敖婧芳等^[45]将核桃青皮粉碎至41.5~446.1 μm,采用NaNO₂-Al(NO₃)₃比色法测定总黄酮含量,发现比未粉碎样品提高了19.5%。

以上研究表明,超微粉碎技术可显著提高苦荞麦、丹参、银杏叶、栓皮栎叶、三七、核桃青皮等中药材中黄酮类化合物的溶出率,这可能与其抗氧化、抗炎等药理活性增强有关。

2.3 对酚类活性物质溶出的影响

卫子颜等^[46]探究了超微粉碎对米糠多酚组成及抗氧化活性的影响。将米糠粉碎至不同粒径(粗粉208.3 μm,微粉组85.7、14.9 μm),采用HPLC法检测酚类物质。结果显示,超微粉碎后米糠游离酚和总酚含量均显著高于粗粉,微粉组总酚含量分别增加了2.30%和5.21%。然而,结合酚含量有所下降,可能是由于机械力和热效应导致结合酚与细胞壁结构成分之间的化学键部分断裂,使结合态多酚转化为游离态多酚。通过2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)[2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate, ABTS] 阳离子自由基清除能力、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼[1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical 2,2-diphenyl-1-(2,4,6-trinitrophenyl)hydrazyl, DPPH] 自由基清除能力和铁离子还原/抗氧化能力

法测定,发现微粉组的抗氧化活性显著高于粗粉,这可能与微粉中抗氧化性较强的酚酸增加有关。于欣欣等^[47]通过高压均质法将迷迭香中的迷迭香酚、鼠尾草酚和橙皮苷制备成纳米晶体(粒径分别为 452、329、387 nm),并与未处理原料进行对比。溶出度实验结果显示,3 种成分的纳米晶体比未处理原料的溶出度均有显著提高,最大溶出度达到 60%~70%。Zhao 等^[48]研究了超微粉碎对红葡萄渣粉抗氧化活性物质总多酚和总黄酮含量的影响。当葡萄渣粉粒度小于 18.83 μm 时,总多酚和总黄酮含量达到最大值,分别为 757.36 mg 和 19.46 mg 每 100 克干质量。Yang 等^[49]对超微粉碎后的白芷颗粒进行理化性质表征,发现抗氧化活性物质欧前胡素的提取率增加了 11.93%,且提取纯度达到 99.9%。上述研究表明,超微粉碎技术可显著提高米糠、迷迭香、葡萄渣、白芷等中药材或其副产物中酚类活性物质的溶出,并增强其抗氧化能力。

2.4 对多糖类活性物质溶出的影响

多糖类化合物是许多中药材的重要活性成分,具有免疫调节、抗肿瘤、降血糖、抗病毒等生物活性^[50-51]。蔡肖等^[52]研究了超微粉碎对霍山石斛多糖和单糖含量的影响。通过球磨机将霍山石斛粉碎至不同粒径(3.06~123.85 μm),采用 HPLC 法测定单糖含量,苯酚-硫酸法测定多糖含量。结果显示,超微粉中多糖溶出含量达到 56.29%,比未粉碎的细粉增加了 20.82%。随着粉碎程度的增加,多糖溶出率提高,单糖含量也相应增加。王绥等^[53]将碱提和水提的麦麸进行超微粉碎,并研究其对多糖溶出的影响。超微粉碎后,碱提和水提麦麸多糖的粒径分别从 308.47、919.23 nm 降至 203.80、168.03 nm。采用苯酚-硫酸法测定糖类含量,发现超微粉碎将多糖含量分别从 1.34%、6.6%提高至 6.28%、15.03%。红外光谱分析显示,超微粉碎预处理对多糖官能团结构影响较小。此外,研究还发现碱提麦麸多糖的得率远高于水提,可能是因为碱液能更有效地破坏细胞壁结构。Zhang 等^[54]研究了枸杞多糖的抗氧化活性与超微粉碎的关系。将枸杞粉碎至平均粒径为 378.7 nm 的颗粒,随后分级提取枸杞多糖(LBP80、LBP75 和 LBP50),并进行 ABTS 和 DPPH 自由基清除实验。结果表明,超微粉碎处理后的样品提取的多糖相对分子质量更大,抗氧化活性更强。黄梅华等^[55]通过控制碾磨的速率,研究了普通、超微、纳米粒径的金花茶并对比其主要的功能成分茶多

糖的含量,发现 3 种不同处理方式对金花茶多糖含量并无太大影响。研究发现黄酮类成分对生物体的免疫和抗氧化方面都有良好的功效^[56],并且超微处理对其提取影响较多为正向。因此应重视现代研究中对该方向的发展。

综合以上研究,超微粉碎技术可显著提高霍山石斛、麦麸、枸杞等中药材中糖类活性物质的溶出,且在超微粉碎的基础上应根据药材性质选择不同的提取方法(如水提、碱提等),从而促进活性物质的进一步溶出。

2.5 对其他中药活性成分溶出的影响

除皂苷、黄酮、酚类、多糖类外,超微粉碎还对其他一些中药活性成分的提取和活性产生影响。Ma 等^[57]提取纳米粉碎后的六味地黄丸中的活性成分丹皮酚,发现其提取率增加了 23.5%,同时六味地黄丸在大鼠体内的吸收速度和吸收能力也显著提高。Zhao 等^[58]研究了超微粉碎对七厘散理化性质和药用性能的影响。通过测定活性物质血竭素的溶解度和大鼠体内吸收度,发现超微粉碎后的七厘散粒径减小,比表面积增大,血竭素在生物体内的溶出率和吸收率显著提高。刘帆等^[59]研究了不同粒径天麻粉(28.99~145.90 μm)中 5 种有效成分(天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷 A、巴利森苷 B、巴利森苷 C)在水、人工胃液和人工肠液中的溶出度。结果显示,在前 2 种介质中,天麻超微粉中有效成分的溶出度均优于普通粉,但在人工肠液中规律不明显。陈冰璞等^[60]以贝母素甲为指标,比较了浙贝母最细粉(平均粒径 $D_{50}=36.46 \mu\text{m}$)和普通粉(平均粒径 $D_{50}=158.65 \mu\text{m}$)在溶出度上的差异。结果显示,超微粉碎后,浙贝母粉体粒径小而均匀,比表面积显著增大,贝母素甲的提取率明显增加,质量分数从 0.46 mg/g 增加到 0.57 mg/g。最细粉在 120 min 时已完全析出,而普通粉仅有 62.7%。Huang 等^[61]利用超微粉碎技术将甜菜粒径减小至 24.94~406.33 μm ,采用传统加热方法提取果胶并测定半乳糖醛酸 D-半乳糖醛酸(D-galacturonic acid, Gla A)含量。结果显示,随着甜菜粒度减小,果胶和 Gla A 的提取率分别提高了 30%和 56%,表明超微粉碎技术更能显著提高小分子化合物的提取率。

然而,也有研究表明,超微粉碎对某些活性成分的提取增幅不显著。张福君等^[62]采用紫外-分光光度计测定灵芝中总三萜类化合物的含量,并用 HPLC 法测定了不同粒径灵芝(普通粉 M30、M50、

M80, 超微粉 M300) 中 9 种三萜类化合物的含量。结果显示, 随着灵芝粉颗粒变小, 三萜类成分总提取率逐渐增大, 最高达 $(1.09 \pm 0.10)\%$, 但相对于普通粉的提取率 $(0.75 \pm 0.90)\%$ 来说, 增幅不明显。Li 等^[63]研究了超微粉碎对暗紫贝母鳞茎理化性质的影响, 对比了细粉和 2 种超细粉 (SP-I、SP-II) 的生物碱含量。结果发现, SP-I 的生物碱含量比细粉提高了 66.7%, 但 2 种超细粉之间的生物碱含量差异不显著。邱新建等^[64]对五味子的超微粉含量进行溶出度分析, 但其结论未明确说明对溶出度是否起到明显的提升效果, 仍需进一步进行分析。

3 超微粉碎技术应用难点及面临的困境

3.1 技术应用的特殊性

大量研究表明, 超微粉碎并非粒径越小越好, 其效果存在显著的药材种类差异性和成分差异性^[65]。为实现最佳的活性物质溶出效果, 单一药材的最适粉碎粒径也可能不尽相同, 需要通过实验进行验证^[66-68]。如针对五味子^[64]、天山雪耳和山楂的超微粉碎研究发现^[69-70], 过度粉碎导致粒径过小时, 某些成分的溶出度反而降低, 这可能与超微粉碎过程中产生的高能量导致活性物质降解有关。Cao 等^[71]研究表明长时间的研磨大麦草, 也会导致黄酮类化合物的降解。

不同中药材的硬度、韧性、纤维含量等物理特性也会影响粉碎效果。如纤维含量高的药材 (如人参、黄芪等) 在粉碎过程中更容易产生团聚现象, 影响粉碎效率和均匀性^[72]。而对于一些含油量高或含糖量高的中药在研磨的时候则会出现黏附在研磨设备内壁的情况^[73]。而选择合适的预处理方法 (如冷冻干燥、微波干燥等) 可改善药材的粉碎性能^[74]。不同种类或同一药材但不同成分的情况下, 存在这不同的粉碎粒径的研究。鉴于药材种类及成分的差异性导致其最佳粉碎粒径不同, 通常需要通过系统性实验研究来确定具体药材的最优粉碎工艺。该优化过程涉及对多种影响因素 (如药材物理性质、设备参数、预处理方法等) 的综合考量与平衡, 最终结论不能基于单一因素简单判定。

3.2 药材中不同活性成分本身的理化性质

不同理化性质 (如溶解性、渗透性、挥发性、热稳定性等) 会显著影响超微粉碎对活性物质溶出的效果。根据生物药剂学分类系统 (biopharmaceutics classification system, BCS), 药物可分为 4 类^[75]: I 类: 高溶解性、高渗透性; II 类:

低溶解性、高渗透性; III 类: 高溶解性、低渗透性; IV 类: 低溶解性、低渗透性。对于 I 类药物, 由于其本身溶解度和渗透性均较高, 超微粉碎对其生物利用度的改善可能有限。而对于 II 类药物, 由于其溶解度是限制吸收的主要因素, 超微粉碎通过增加比表面积和提高溶解度, 可显著提高其生物利用度。对于 III 类和 IV 类药物, 情况较为复杂, 需要综合考虑溶解度、渗透性、首过效应等因素^[76]。

李书迪等^[77]研究发现, 经过超微技术处理后的七味广枣, 在体外实验中丁香酚 (BCS II 类) 的溶出率始终高于普通粉, 而原儿茶酸和没食子酸 (BCS II 类) 的累积溶出率在一段时间后与普通粉趋于一致。超微粉碎后, 丁香酚在大鼠体内的平均滞留时间延长, 酚酸类成分的吸收率虽有所增加, 但口服生物利用度未发生明显变化。这表明超微粉碎对不同 BCS 分类的药物成分的影响存在差异。冯晶晶等^[78]研究显示, 在不同粉碎方法下, 沙棘茶粉的总膳食纤维和黄酮含量有显著差异。干法超微粉碎使茶多酚含量略有增加, 而湿法超微粉碎导致茶多酚含量显著降低, 这可能与湿法粉碎过程中粉碎强度过大, 破坏多酚结构有关。陈培源等^[79]研究了肉苁蓉普通粉和超微粉的主要功能性成分体外溶出率, 发现虽然超微粉中的毛蕊花糖苷和松果菊苷溶出率显著提高, 但总黄酮溶出率却低于普通粉, 推测可能是由于总黄酮中某些成分流失造成的。黄梅华等^[55]通过不同碾磨速率得到不同粒径的金花茶茶花粉, 测定其功能成分皂苷的溶出量差异。结果显示, 超微粉的皂苷溶出量最大, 纳米粉次之, 溶出率与粒径大小并非呈线性关系。可能与粉体的比表面积、细胞破碎程度、颗粒之间的空隙率等因素有关。

这些研究表明, 中药材中不同活性成分的理化性质存在差异, 其溶出行为受超微粉碎的影响也不同。因此, 在进行超微粉碎处理时, 需要充分考虑药材的特性和目标成分的理化性质, 选择合适的粉碎方法和工艺参数。

3.3 活性物质不够稳定

此外, 活性物质本身的稳定性也是限制超微粉碎效果的一个关键因素。由于超微粉碎过程中产生的高能量和高剪切力, 及粉体比表面积的增大, 可能导致一些活性成分发生降解、氧化、异构化等化学变化, 从而降低其含量和生物活性。Zaiter 等^[80]和 Peng 等^[81]分别对绿茶进行不同程度的超微粉碎研究, 发现当粒径较小时, 儿茶素和茶多酚的含量

反而下降，这可能与这些成分易被氧化降解有关。张雪等^[82]研究了不同研磨时间对小米和怀山药中功能性成分含量的影响。结果发现，小米中的胡萝卜素含量随着粉碎时间的延长，先缓慢增加后显著降低，这可能与胡萝卜素中不稳定的共轭双键结构在球磨过程中受到破坏或氧化有关。而怀山药中的多糖含量则随着粉碎时间的延长而持续升高。张娥珍等^[83]对铁皮石斛的研究发现，纳米粉的多糖含量显著高于超微粉，且多糖含量随时间变化不大。这表明不同活性成分对超微粉碎的耐受性不同。

为减少超微粉碎过程中活性成分的损失，可采取以下措施。(1) 低温粉碎：在低温（如液氮）条件下进行粉碎，可有效降低化学反应速率，减少氧化降解；(2) 惰性气体保护：在惰性气体（如氮气、氩气）氛围中进行粉碎，可避免氧化；(3) 添加抗氧化剂：在粉碎前或粉碎过程中添加适量抗氧化剂（如维生素 C、维生素 E 等），可保护易氧化成分；(4)

选择合适的粉碎方法和参数：避免过度粉碎，控制粉碎时间、转速等。

4 超微处理后中药渣的综合利用

中药渣是中药材经过提取、分离等加工过程后剩余的固体残渣。传统上，中药渣多被当作废弃物处理，不仅造成资源浪费，还可能污染环境。随着人们对环境保护和资源循环利用意识的提高，中药渣的综合利用日益受到重视。超微粉碎技术在中药渣的综合利用中发挥着重要作用，通过将中药渣粉碎至微米或纳米级，可显著提高其比表面积和反应活性，促进其中残留活性成分的释放和利用，并改善其物理化学性质，拓宽其应用范围。

4.1 碳材料制备

粉碎后的中药渣富含有机物，是制备生物炭的良好原料^[84]。生物炭具有比表面积大、孔隙结构发达、表面官能团丰富等特点，可用作吸附剂、催化剂载体、土壤改良剂、能源材料等^[85]（表 1）。

表 1 中药渣在碳材料方面的综合利用

Table 1 Comprehensive utilization of Chinese medicine residues in carbon materials

前驱体	制备方法	条件	结果	应用	文献
粉碎后的中药渣	制备成 TCMR-BC	转速 120 r·min ⁻¹ 摇床反应	表面聚集物增多，粗糙	废水处理	86
五倍子药渣	制备活性炭	水蒸气流量 2.7 mL·min ⁻¹	碘吸附值 1 003 mg·g ⁻¹	吸附剂	87
黄芪药渣	不同温度厌氧氛围下制备生物炭	吸附 pH 值为 4	700 °C 热解活性炭，对抗生素吸附能力最高	抗菌药物吸附	88
磨碎的中药渣	厌氧炭化，300 和 500 °C 控制温度	与对照比较	土壤中 Cu 的各形态、含量显著变化	土壤修复	89
土茯苓药渣	硫酸亚铁溶液浸泡后制备多孔炭材料	炭材料与乙炔黑和聚四氟乙烯按 8 : 1 : 1 混合	可再生能源利用，减少化石燃料依赖	超级电容器	90
花生壳和中药渣	不同热解温度下制备生物炭	加热速率 10 °C·min ⁻¹ ，氮气 体积流量 500 mL·min ⁻¹	提高铅污染土壤 pH 值，降低植物有效性铅含量，促进印度芥菜生长	土壤修复	91
黄药子药渣	NaCl/KCl 活化法制备微孔炭材料 (DBL-800-AC)	碳化温度 800 °C	比表面积和孔容提高，优异的氯霉素吸附性能，吸附量可达 900 mg·g ⁻¹	氯霉素吸附	92
中药废渣	KOH 活化 Ni(NO ₃) ₂ 造孔，尿素氮源，高温预碳化-活化法	高于未掺杂的生物质炭材料	氮掺杂提高比表面积和孔径，形成三维多孔结构，比电容 405 F·g ⁻¹	电化学性能	93

张威龙等^[86]将粉碎后的中药渣制备成 TCMR-BC，发现其表面存在大量聚集物，变得更加粗糙，可用于吸附去除废水中的活性蓝 19 染料。郑照强等^[87]以五倍子药渣为原料，通过水蒸气活化法制备活性炭，其碘吸附值高达 1 003 mg/g，可作为优良的吸附剂。何文泽等^[88]以黄芪中药渣为原料，在厌氧氛围下、不同温度下制备生物炭，发现 700 °C 热解制备的活性炭对抗菌药物的吸附能力最强。谢青霞等^[89]研究了中药渣生物炭对污染土壤中 Cu 的修

复作用。结果表明，添加中药渣生物炭可显著改变土壤中 Cu 的形态分布，降低其生物有效性。张庆武等^[90]利用土茯苓药渣制备多孔炭材料，该材料在超级电容器方面具有潜在应用价值，有助于推动可再生能源的利用。刘国成^[91]以花生壳和中药渣为原料制备生物炭，研究其对铅的吸附行为及对铅污染土壤的修复效果。结果表明，生物炭可有效吸附铅，提高土壤 pH 值，降低植物可利用态铅含量。吴媛颖等^[92]以黄药子药渣为前驱体，通过 NaCl/KCl 活

化法制备微孔碳材料, 该材料对氯霉素具有优异的吸附性能。孟瑶等^[93]以中药废渣为前驱体, 采用高温预碳化-活化法制备氮掺杂生物质碳材料, 该材料具有优异的电化学性能。

4.2 农业应用

中药渣含有丰富的有机质和多种营养元素(如氮、磷、钾及微量元素), 是良好的土壤改良剂和有机肥原料^[94]。超微粉碎可进一步提高中药渣在农业应用中的效果。

郝永娟等^[95]应用中药渣发酵物处理土壤, 实验表明, 中药渣处理后的土壤出苗虽晚于某些土壤添加剂, 但早于木屑废料等对照组, 且叶绿素含量与其他处理组有显著差异, 表明其具有一定的防病促生长作用。李朝文等^[96]利用中药渣制备生物有机肥, 并将其用于烤烟栽培。结果表明增施中药渣生物有机肥可显著提高烤烟的产量和品质, 改善烟叶的香气和口感。周林山等^[97]以黄芪药渣为原料制备生物有机肥, 并将其用于油菜种植。结果表明黄芪药渣有机肥对油菜生长无显著负面影响, 且可提高菜籽油的品质。王锐丽等^[98]以中药渣和麦麸为基质, 进行无柄灵芝固态发酵, 发现漆酶酶活显著提高, 表明中药渣可用于培育食用菌, 实现资源的高效利用。张媛媛^[99]研究了5种常见中药渣(丹参、黄柏、黄芪、苦参、甘草)在土壤中的腐解速率、对土壤理化性质的影响及对小麦生长的影响。结果表明, 不同种类中药渣的腐解速率和对土壤及小麦生长的影响存在差异, 其中黄芪残渣腐解最快, 黄柏残渣腐解最慢; 5种药渣均能提高土壤含水量; 甘草残渣对小麦幼苗前期生长有抑制作用, 但延长翻埋时间可缓解; 黄柏、苦参和丹参残渣小剂量添加对小麦幼苗生长有促进作用; 丹参残渣不同剂量添加均有促进作用; 黄芪残渣适量添加可显著促进小麦幼苗株高; 黄芪残渣与枯草芽孢杆菌复配对小麦幼苗生长有协同增效作用。陈亮等^[100]以中药渣为主, 加入金针菇渣和牛粪等, 制备成药渣复合基质, 并将其用于设施西瓜栽培。结果表明, 药渣复合基质可有效改善土壤环境, 避免连作障碍, 提高西瓜产量和品质, 减少化肥农药的使用。常义军等^[101]将中药渣与生土按不同比例混合, 并施用无机肥, 种植玉米。结果表明中药渣可显著提高土壤有机质含量, 使土壤更疏松, 增加土壤速效养分含量, 促进玉米根系生长和养分吸收, 提高产量和含糖量。

除了直接用作土壤改良剂和有机肥外, 中药渣在农业中还可用于制备(1)植物生长调节剂: 中药渣中可能含有一些具有植物生长调节作用的物质, 如黄酮类、多糖类等。通过提取和分离这些物质, 可制备天然的植物生长调节剂^[102]。(2)生物农药: 一些中药材具有杀虫、抑菌、抗病毒等作用, 其药渣中可能残留这些活性成分。通过提取和分离, 或直接将药渣发酵处理, 可制备生物农药^[103]。(3)植物源生物刺激素: 药渣中残留的生物活性物质可作为植物源生物刺激素, 促进植物生长、提高抗逆性^[104]。(4)土壤重金属钝化材料: 将中药渣制作成生物炭之后可降低土壤重金属的生物可给性^[105]。

4.3 作为饲料添加剂

中药渣中通常含有一定量的粗蛋白、粗纤维、多糖、微量元素等营养成分, 以及一些具有药理活性的物质(如黄酮类、皂苷类等), 可作为饲料添加剂用于畜禽养殖^[106]。超微粉碎可提高中药渣作为饲料添加剂的效果。

张瑞等^[107]以人参、黄芪、五味子药渣作为饲料添加剂喂养白羽野鸭。结果表明, 添加人参和黄芪药渣可显著提高白羽野鸭的体质量, 而五味子药渣无显著影响。郭立鹏^[108]在肉鸡饲料中添加灵芝药渣, 发现可改善肉鸡的肉质品质, 提高其体内抗病抗菌代谢物的含量, 但对肉鸡的生产性能无显著影响。Man等^[109]以中药渣为基础发酵饲料养殖水产, 发现发酵后的中药渣中多环芳烃含量低于未发酵的中药渣, 且饲养鱼的多环芳烃危险指数较低, 表明中药渣发酵后作为鱼饲料添加剂具有较高的安全性。王尚荣^[110]将主要成分为黄芪、当归、丹参、党参等的中药渣制成粉末, 添加到奶牛饲料中。结果表明, 添加适量中药渣可显著提高奶牛的产奶量, 但不同添加量之间的差异不显著。吴华等^[111]将黄芪药渣粉碎后添加到放牧肉鸡饲料中, 发现可改善肉鸡的肉质品质(如系水力、水分含量等), 但不影响肉鸡体内的pH值和脂肪含量。王莹等^[112]通过微生物发酵中草药渣和中草药牛至渣, 分别实现了迷迭香酸、总多酚等活性成分的富集和饲料营养成分的增加, 及制备出环保、绿色的发酵饲料。朱彤等^[113]采用中药渣发酵后晒干、粉碎, 以2.5%的比例添加到猪饲料中。结果表明, 添加发酵中药渣可降低猪的日均排粪量, 减少环境污染。张瑞等^[114]将甘草残渣和关苍术茎叶粉碎后, 以不同比例添加到番鸭基础饲料中。结果表明, 适量添加可显著提高

番鸭的生产性能、免疫器官生长和血清蛋白含量。龙勇^[15]筛选出具有开发潜力的食用菌菌渣和中药渣,并将其用于黑山羊饲养。结果表明,不同比例的食用菌菌渣和中药渣可提高黑山羊的采食行为、反刍行为、生长性能、养分消化率等,降低饲养成本,提高经济效益。

然而,将中药渣用作饲料添加剂时,需要注意以下问题。(1)安全性:一些中药材具有一定的不良反应,其药渣中可能残留有毒成分。因此,需要对中药渣进行安全性评估,确保其不含有毒有害物质,或有毒有害物质的含量低于安全限量^[16]。可通过检测中药渣中的重金属、农药残留、真菌毒素等有害物质,及进行动物毒理学实验等方法来评估其安全性。(2)适口性:一些中药渣具有苦味或其他不良气味,可能影响饲料的适口性。可通过发酵、包被等方法改善其适口性。(3)添加量:不同种类、不同生长阶段的畜禽对中药渣的耐受性不同,需要根据具体情况确定适宜的添加量。(4)营养均衡:应考虑中药渣的添加是否影响营养物质的消化与利用^[17]。

5 结语

超微粉碎技术在中药材活性成分提取和中药渣综合利用中具有显著优势。通过将中药材粉碎至微米或纳米级,可显著提高其中活性物质的溶出率和生物利用度,从而增强药效、降低用药剂量。然而,超微粉碎并非适用于所有中药材和所有活性成分,其效果受药材性质、活性成分理化性质、粉碎方法和工艺参数等因素的影响。因此,需要根据具体情况选择合适的超微粉碎技术和工艺参数,并进行充分的实验验证。对粉碎后中药渣的进一步应用也是未来中药发展的一大重要研究方向,其中需要考量安全性、是否具有生物毒性等问题。中药渣的综合利用是实现中药产业可持续发展的重要途径。超微粉碎可显著提高中药渣在碳材料制备、农业应用和作为饲料添加剂等方面的应用效果。然而,中药渣的综合利用仍面临一些挑战,如安全性评估、工艺优化、标准化生产等。未来,需要加强中药渣综合利用的基础研究和应用研究,开发更多高效、环保、经济的中药渣综合利用技术,推动中药产业的绿色发展。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] Wang J C, Zhu Y G, Wu L, *et al.* Progress in

pharmacological sciences in China [J]. *Mol Pharmacol*, 2017, 92(3): 188-192.

- [2] 韩笑,王梦斐,蒲位凌,等. 中药活性成分通过调节 m6A 甲基化修饰抗肿瘤的研究进展 [J]. *中草药*, 2024, 55(6): 2123-2130.
- [3] 张改君,苗静,郭丽颖,等. 多组学联用在中药作用机制研究中的应用 [J]. *中草药*, 2021, 52(10): 3112-3120.
- [4] 张玲. 中药煎药机与传统煎药方法的效果对比分析 [J]. *临床医药文献电子杂志*, 2019, 6(77): 167.
- [5] 陈士林,魏建和,韩建萍,等. 中药农业与中药资源可持续发展 [J]. *世界科学技术—中医药现代化*, 2007, 9(4): 1-7.
- [6] 苗旭辉,唐其,谢宇,等. 超微粉碎技术在中药领域中的研究概况 [J]. *中国民族民间医药*, 2015, 24(3): 36-38.
- [7] Gao W J, Chen F, Wang X, *et al.* Recent advances in processing food powders by using superfine grinding techniques: A review [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2020, 19(4): 2222-2255.
- [8] 杨蕾,贾艳菊,刘敬科,等. 超微粉碎技术对粮食产品营养物质及特定生理功能影响的研究进展 [J]. *食品与机械*, 2023, 39(12): 200-207.
- [9] Chen T, Zhang M, Bhandari B, *et al.* Micronization and nanosizing of particles for an enhanced quality of food: A review [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2018, 58(6): 993-1001.
- [10] 龚莉. 基于球磨法的超细石英粉体分形研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [11] 周浩. 双质体振动磨动力学建模及超微粉碎参数优化研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [12] 张军,刘建国,王宾. 粉体加工中气流粉碎技术的研究进展 [J]. *现代矿业*, 2020, 36(11): 96-102.
- [13] 陈力. 低温振动粉碎制备微米中药技术 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.
- [14] Singh S S, Ghodki B M, Goswami T K. Effect of grinding methods on powder quality of king chilli [J]. *J Food Meas Charact*, 2018, 12(3): 1686-1694.
- [15] 李加兴,李忠海,刘飞,等. 超微细处理技术在功能性油脂加工中的应用 [J]. *中国油脂*, 2010, 35(4): 14-17.
- [16] 高远. 双变激振振动磨运动特性分析及性能参数优化研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [17] Noyes A A, Whitney W R. The rate of solution of solid substances in their own solutions [J]. *J Am Chem Soc*, 1897, 19(12): 930-934.
- [18] Lu S, Yu P P, He J H, *et al.* Enhanced dissolution and oral bioavailability of lurasidone hydrochloride nanosuspensions prepared by antisolvent precipitation-ultrasonication method [J]. *RSC Adv*, 2016, 6(54): 49052-49059.
- [19] 吴帅聪,秦超,韩晓鹏,等. 药物纳米晶的制备及其口服转运机制研究进展 [J]. *药学进展*, 2023, 47(4): 303-

- 311.
- [20] 郭颖梅. 灵芝孢子破壁、多糖和谷胱甘肽提取、多糖分离纯化及活性研究 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2023.
- [21] Hancock B C, Parks M. What is the true solubility advantage for amorphous pharmaceuticals? [J]. *Pharm Res*, 2000, 17(4): 397-404.
- [22] 郑振秋. 糖胰康颗粒的制备工艺与质量标准研究 [D]. 济南: 山东中医药大学, 2015.
- [23] 王姗姗. 通脉大生片的工艺优化及稳定性的初步研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2019.
- [24] 项瑞, 王玉蓉, 杨连威, 等. 超微粉碎过程温度对羌活有效成分影响的考察 [J]. 北京中医药大学学报, 2010, 33(2): 123-126.
- [25] 马园园, 王静, 罗琼, 等. 黄芪总皂苷药理作用研究进展 [J]. 辽宁中医药大学学报, 2020, 22(7): 153-157.
- [26] 邵长鑫, 林欢欢, 靳晓杰, 等. 黄芪的炮制历史沿革及现代研究进展 [J]. 中草药, 2023, 54(15): 5057-5074.
- [27] 柴梦音, 寇卜心, 豆双双, 等. 黄芪超微粉抗急性肝损伤、抗疲劳作用及黄芪甲苷含量的变化 [J]. 现代中医药, 2022, 42(5): 26-32.
- [28] 马培艳, 傅正义, 苏艳丽. 纳米黄芪粉的显微结构和有效成分溶出的研究 [J]. 中草药, 2005, 36(8): 1162-1164.
- [29] 韦春冕, 赵艳丽, 李丹丹, 等. 三七“辨状论质”及其品质成因研究进展 [J]. 中草药, 2024, 55(17): 6026-6039.
- [30] 苏艳丽, 傅正义, 马培艳, 等. 纳米化对三七中有效成分溶出的影响 [J]. 中草药, 2007, 38(2): 202-204.
- [31] 田艳, 申越, 赵翔, 等. 三七及西洋参纳米粉中皂苷类成分溶出行为研究 [J]. 山东农业科学, 2020, 52(4): 62-67.
- [32] 丁苗苗, 杨凯伦, 王东亮, 等. 超微粉碎对西洋参中人参皂苷体外溶出的影响研究 [J]. 天津中医药大学学报, 2016, 35(5): 327-331.
- [33] 贺建东, 付廷明, 郭立玮. 丹参脂溶性成分的湿式超微粉碎提取 [J]. 时珍国医国药, 2008, 19(11): 2689-2690.
- [34] 王欢. 竹柏黄酮类化合物的提取、分离纯化及抗氧化活性研究 [D]. 吉首: 吉首大学, 2017.
- [35] 苏圆圆, 王雪艳, 李成林, 等. 中药中黄酮类化合物的药理药效研究进展 [J]. 中兽医医药杂志, 2023, 42(6): 42-46.
- [36] 药雅俊, 柳雪姣, 裴妙荣, 等. 苦荞降血糖降血脂药效机制研究进展 [J]. 山西中医, 2020, 36(2): 59-62.
- [37] 郑慧, 王敏, 于智峰, 等. 超微粉碎对苦荞麸功能特性的影响 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 258-262.
- [38] 许青莲, 岳天义, 张萍, 等. 超微粉碎对苦荞物化性质的影响 [J]. 包装工程, 2020, 41(11): 25-32.
- [39] 谢晓燕. 丹参酮 II_A 磺酸钠在海水淹溺性肺水肿中的作用及其机制 [D]. 西安: 第四军医大学, 2011.
- [40] Su Y L, Fu Z Y, Ma P Y, *et al.* Effect of ultrafine grinding on dissolving-out quantity of tanshinone II_A from *Radix Salvia miltiorrhiza* [J]. *J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed*, 2009, 24(6): 973-976.
- [41] 哈建利. 银杏叶提取物药理作用的生理基础及其临床应用 [J]. 湖北职业技术学院学报, 2024, 27(3): 102-106.
- [42] 石相弘, 石雷. 银杏叶纳米加工技术开发与应用 [J]. 现代农业科技, 2009(23): 359-360.
- [43] Hong S J, Das P R, Eun J B. Effects of superfine grinding using ball-milling on the physical properties, chemical composition, and antioxidant properties of *Quercus salicina* (Blume) leaf powders [J]. *J Sci Food Agric*, 2021, 101(8): 3123-3131.
- [44] Wu Z G, Ameer K, Jiang G H. Effects of superfine grinding on the physicochemical properties and antioxidant activities of Sanchi (*Panax notoginseng*) flower powders [J]. *J Food Sci Technol*, 2021, 58(1): 62-73.
- [45] 敖婧芳, 沈荷玉, 王军, 等. 不同粒径对核桃青皮粉物理特性及功能特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(13): 91-98.
- [46] 卫子颜, 谢勇, 王朦朦, 等. 超微粉碎对米糠多酚的组成及抗氧化活性的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(14): 138-144.
- [47] 于欣欣, 刘涛. 迷迭香提取物纳米晶体制备研究 [J]. 中国调味品, 2020, 45(2): 104-106.
- [48] Zhao X Y, Zhu H T, Zhang G X, *et al.* Effect of superfine grinding on the physicochemical properties and antioxidant activity of red grape pomace powders [J]. *Powder Technol*, 2015, 286: 838-844.
- [49] Yang L W, Sun P, Gai G S, *et al.* Physicochemical characterization of Baizhi Particles by ultrafine pulverization [J]. *Int J Miner Metall Mater*, 2011, 18(2): 247-251.
- [50] 张江涛, 谢欣序, 崔亚茹, 等. 中药多糖治疗化疗性骨髓抑制的药理作用研究进展 [J]. 中华中医药学刊, 2024, 42(4): 158-164.
- [51] Zhang J X, Wen C T, Zhang H H, *et al.* Review of isolation, structural properties, chain conformation, and bioactivities of *Psyllium* polysaccharides [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 139: 409-420.
- [52] 蔡肖, 刘军玲, 邢丽花, 等. 霍山石斛超微粉物理特性及石斛多糖中单糖分析 [J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(10): 143-152.
- [53] 王缓, 王乐姣, 岳陈林瑞, 等. 超微粉碎预处理对碱提和水提麦麸多糖理化特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 19-27.
- [54] Zhang M, Wang F, Liu R, *et al.* Effects of superfine

- grinding on physicochemical and antioxidant properties of *Lycium barbarum* polysaccharides [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2014, 58(2): 594-601.
- [55] 黄梅华, 吴儒华, 何全光, 等. 不同粒径金花茶茶花粉体物理特性 [J]. 食品科学, 2018, 39(3): 76-82.
- [56] Zhao M M, Yang B, Wang J S, *et al.* Immunomodulatory and anticancer activities of flavonoids extracted from *Litchi* (*Litchi chinensis* Sonn) pericarp [J]. *Int Immunopharmacol*, 2007, 7(2): 162-166.
- [57] Ma P Y, Fu Z Y, Su Y L, *et al.* Modification of physicochemical and medicinal characterization of Liuweidihuang Particles by ultrafine grinding [J]. *Powder Technol*, 2009, 191(1/2): 194-199.
- [58] Zhao G W, Liang X L, Wang C L, *et al.* Effect of superfine pulverization on physicochemical and medicinal properties of Qili Powder [J]. *Rev Bras De Farmacogn*, 2014, 24(5): 584-590.
- [59] 刘帆, 陈亭亭, 陈艳, 等. 不同粒径天麻粉中有效成分的体外溶出度比较 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2019, 25(9): 124-129.
- [60] 陈冰璞, 艾国, 黄正明. 粒径对浙贝母粉体溶出度和药效学的影响 [J]. 中华中医药学刊, 2014, 32(8): 1999-2001.
- [61] Huang X, Li D, Wang L J. Effect of particle size of sugar beet pulp on the extraction and property of pectin [J]. *J Food Eng*, 2018, 218: 44-49.
- [62] 张福君, 瞿晶田, 王强. 超微粉碎技术对灵芝中三萜类成分溶出的影响 [J]. 中国药房, 2018, 29(5): 599-602.
- [63] Li C X, Liu Y Y, Feng H S, *et al.* Effect of superfine grinding on the physicochemical properties of bulbs of *Fritillaria unibracteata* Hsiao *et* K. C. Hsia powder [J]. *Food Sci Nutr*, 2019, 7(11): 3527-3537.
- [64] 邱新建, 贺凤成, 张则平, 等. 五味子超微粉的含量及溶出度测定 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2013, 19(2): 58-61.
- [65] 李蕊汐, 王闯, 刘燕, 等. 超微粉碎技术在中药制备领域的应用与研究进展 [J]. 中国医药工业杂志, 2024, 55(2): 187-195.
- [66] 叶惠珍. 超微粉碎对中药方剂药效的影响 [J]. 医药导报, 2011, 30(7): 891-895.
- [67] 陈勇军. 中药破壁粉碎技术与破壁粉粒的发展前景 [A] // 2009 年传统医药国际科技大会论文集 [C]. 广州: 传统医药国际科技大会暨博览会, 2009: 71-75.
- [68] 蒋且英, 曾荣贵, 赵国巍, 等. 中药粉体改性技术与改性设备研究进展 [J]. 中草药, 2017, 48(8): 1677-1681.
- [69] 喻文丽, 李佩琪, 秦新政, 等. 不同粉碎工艺对天山雪耳营养成分溶出率及化学成分的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(18): 122-127.
- [70] Zhao Y Y, Wu X, Wang Y J, *et al.* Comparing physicochemical properties of hawthorn superfine and fine powders [J]. *J Food Process Preserv*, 2017, 41(2): e12834.
- [71] Cao X H, Zhang M, Mujumdar A S, *et al.* Effect of nano-scale powder processing on physicochemical and nutritional properties of barley grass [J]. *Powder Technol*, 2018, 336: 161-167.
- [72] 吕耀博. 野山参超微粉的抗疲劳作用及其机制 [D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [73] 聂梅梅, 肖亚冬, 李大婧, 等. 超微粉碎对怀山药粉抗氧化和体外消化性的影响 [J]. 江苏农业科学, 2020, 48(21): 224-228.
- [74] 岳建芝. 超微化秸秆粉体物性微观结构及光合生物产氢实验研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2011.
- [75] Macheras P, Iliadis A, Melagraki G. A reaction limited *in vivo* dissolution model for the study of drug absorption: Towards a new paradigm for the biopharmaceutic classification of drugs [J]. *Eur J Pharm Sci*, 2018, 117: 98-106.
- [76] Dahan A, Miller J M, Amidon G L. Prediction of solubility and permeability class membership: Provisional BCS classification of the world's top oral drugs [J]. *AAPS J*, 2009, 11(4): 740-746.
- [77] 李书迪, 张一凡, 齐和日玛, 等. 超微粉碎对七味广枣散体外溶出度及大鼠体内药动学的影响 [J]. 中南药学, 2023, 21(1): 37-43.
- [78] 冯晶晶, 郭建峰, 马心茹, 等. 超微粉碎对沙棘茶粉颗粒结构及理化特性的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(7): 198-204.
- [79] 陈培源, 戴益刚, 夏冬梅, 等. 超微粉碎技术对三种药材粉碎效果及主要功能性成分溶出率的影响 [J]. 湖北农业科学, 2016, 55(8): 2039-2044.
- [80] Zaiter A, Becker L, Karam M C, *et al.* Effect of particle size on antioxidant activity and catechin content of green tea powders [J]. *J Food Sci Technol*, 2016, 53(4): 2025-2032.
- [81] Peng P, Wang L L, Shu G W, *et al.* Nutrition and aroma challenges of green tea product as affected by emerging superfine grinding and traditional extraction [J]. *Food Sci Nutr*, 2020, 8(8): 4565-4572.
- [82] 张雪, 陈复生, 邹建, 等. 超微粉碎对小米、怀山药物化性质及功能成分影响的研究 [J]. 食品科技, 2019, 44(6): 176-182.
- [83] 张娥珍, 黄梅华, 辛明, 等. 铁皮石斛纳米粉与超微粉的物理特性和体外抗氧化活性比较研究 [J]. 热带作物学报, 2015, 36(12): 2184-2191.
- [84] 张秀娟, 邝振英. 中药渣类生物质热化学转化综合利用研究进展 [J]. 科技创新导报, 2021, 18(19): 38-42.

- [85] Qian R, Yu K R, Chen N Y, *et al.* Adsorptive immobilization of cadmium and lead using unmodified and modified biochar: A review of the advances, synthesis, efficiency and mechanisms [J]. *Chemosphere*, 2025, 370: 143988.
- [86] 张威龙, 张南, 帖靖玺. 中药渣生物炭对水中活性蓝19的吸附去除 [J]. *供水技术*, 2021, 15(6): 29-35.
- [87] 郑照强, 夏洪应, 彭金辉, 等. 响应曲面法优化废弃五倍子药渣制取活性炭的研究 [J]. *环境污染与防治*, 2013, 35(3): 5-9.
- [88] 何文泽, 何乐林, 李文红, 等. 中药渣生物炭对磺胺甲基嘧啶的吸附及机理研究 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(11): 3376-3382.
- [89] 谢青霞, 丁园. 中药渣生物炭对污染土壤中 Cu 的修复 [J]. *江西科学*, 2018, 36(3): 476-479.
- [90] 张庆武, 沈鑫, 胡梦杭, 等. 土茯苓药渣制备超级电容器电极材料研究 [J]. *甘肃科技*, 2022, 38(23): 52-56.
- [91] 刘国成. 生物炭对水体和土壤环境中重金属铅的固持 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [92] 吴媛颖, 周丹, 李海霞, 等. 基于黄药子药渣制备微孔碳材料及其吸附氟霉素的研究 [J]. *化学研究与应用*, 2023, 35(1): 161-167.
- [93] 孟瑶, 严冬, 许珂, 等. 氮掺杂中药废渣生物质碳材料电容性能研究 [J]. *电子元件与材料*, 2023, 42(4): 418-425.
- [94] 冀妍丽, 王玉霞, 郭龙, 等. 中药渣有机肥对作物生长、土壤化学性状及酶活性的 Meta 分析 [J]. *北方园艺*, 2024(4): 57-65.
- [95] 郝永娟, 刘春艳, 王勇, 等. 生物土壤添加剂及中药渣的防病促长作用研究 [A] // 粮食安全与植保科技创新会议论文集 [C]. 武汉: 中国植物保护学会, 2009: 1015.
- [96] 李朝文, 李响, 陈学卷, 等. 增施中药渣生物有机肥对烤烟生长、养分吸收及品质的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(3): 114-120.
- [97] 周林山, 李伟东, 郑立军, 等. 黄芪药渣生物有机肥在油菜上的肥效试验 [J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(12): 159-161.
- [98] 王锐丽, 吴燕, 陈颀辉, 等. 灵芝固态发酵中药渣产漆酶及其对偶氮染料的脱色 [J]. *信阳师范学院学报: 自然科学版*, 2023, 36(4): 580-587.
- [99] 张媛媛. 五种中药残渣对土壤及小麦生长的影响 [D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
- [100] 陈亮, 栾倩倩, 蔺毅, 等. 中药渣复合基质对设施西瓜生长及果实产量品质的影响 [J]. *福建农业学报*, 2021, 36(12): 1422-1430.
- [101] 常义军, 唐懋华, 成维东, 等. 中药渣改土效果试验研究 [J]. *现代农业科技*, 2010(5): 255-256.
- [102] 韩丰竹, 姜琳, 李永德, 等. 大黄提取物对小麦种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. *种子科技*, 2016, 34(7): 105-106.
- [103] 赵君微. 中草药提取物抑菌作用和中草药渣发酵物饲喂奶牛牛的效果研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [104] Colla G, Nardi S, Cardarelli M, *et al.* Protein hydrolysates as biostimulants in horticulture [J]. *Sci Hort*, 2015, 196: 28-38.
- [105] Park J H, Choppala G K, Bolan N S, *et al.* Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals [J]. *Plant Soil*, 2011, 348(1): 439-451.
- [106] 桂干北, 张华琦, 毛同辉, 等. 药渣在畜牧养殖中的应用 [J]. *养殖与饲料*, 2018, 17(8): 53-55.
- [107] 张瑞, 赵景辉, 王英平, 等. 人参、黄芪(残渣)、五味子(残渣)等对白羽野鸭生产性能和免疫性能的影响 [J]. *中兽医医药杂志*, 2011, 30(3): 48-51.
- [108] 郭立鹏. 灵芝渣对肉鸡生长性能、肉质品质、肠道微生物和肉质代谢组学的影响 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2023.
- [109] Man Y B, Mo W Y, Zhang F, *et al.* Health risk assessments based on polycyclic aromatic hydrocarbons in freshwater fish cultured using food waste-based diets [J]. *Environ Pollut*, 2020, 256: 113380.
- [110] 王尚荣. 中药渣饲喂杂交奶牛试验 [J]. *中国奶牛*, 2007(1): 14-15.
- [111] 吴华, 张辉, 杨玉芳. 饲料中添加黄芪药渣对肉鸡生产性能的影响 [J]. *青海大学学报: 自然科学版*, 2009, 27(4): 65-68.
- [112] 王莹, 刘晨曦, 王新炎, 等. 牛至渣饲料发酵过程中迷迭香酸等活性成分的变化规律研究 [J]. *中国饲料*, 2024(15): 123-130.
- [113] 朱彤, 王亚犁, 何继武, 等. 发酵中药渣添加饲料对不同猪群粪污减排效果的影响 [J]. *中国畜禽种业*, 2021, 17(11): 64-65.
- [114] 张瑞, 赵景辉, 王英平, 等. 甘草残渣、关苍术茎叶对番鸭生产性能和免疫性能的影响 [J]. *特产研究*, 2011, 33(3): 19-21.
- [115] 龙勇. 食用菌菌渣和中药渣黑山羊高效饲料化利用研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [116] 贺宇. 生血宝合剂药渣饲料添加剂抗氧化应激功能研究 [D]. 咸阳: 陕西中医药大学, 2023.
- [117] 张相鑫, 陈进超, 孙佳静. 中药药渣作为畜禽饲料或饲料添加剂的研究进展 [J]. *饲料工业*, 2017, 38(22): 57-60.