中药材保质增效干燥预处理技术的研究现状、问题及对策

徐柳凤[1]，王学成[1]，易　兵[2]，刘振峰[3]，伍振峰[1]，杨　明[1]*

（1. 江西中医药大学现代中药制剂教育部重点实验室，江西南昌 330004；2. 宜春万申制药机械有限公司，江西宜春 336000；3. 江西赫柏康华制药设备有限公司，江西南昌 330096）

摘要：新鲜中药材由于含水量较高，易腐烂和变质。通过干燥降低水分含量是延长中药材保质期的常用方法。然而，中药材干燥普遍存在时间长、产品品质易受损等问题。在干燥工序前选用适当的预处理技术不仅能够缩短干燥时间，且对中药材品质的保障具有积极作用。文章介绍了不同中药材干燥预处理技术的作用机制及对中药材干燥效率和质量的影响，分析了预处理技术在中药材干燥应用中尚存在的问题，并针对不同中药材活性成分提出了选择预处理方法的建议，为中药材干燥预处理技术的应用提供参考。

关键词：中药材；预处理技术；干燥；含水量；保质；增效

中图分类号：R282.4；TQ574$^+$.5　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-8255(2024)04-0463-12

DOI：10.16522/j.cnki.cjph.2024.04.003

Research Status, Problems and Countermeasures of Drying Pretreatment Technology of Traditional Chinese Medicinal Materials for Quality Assurance and Efficiency Enhancement

XU Liufeng[1], WANG Xuecheng[1], YI Bing[2], LIU Zhenfeng[3], WU Zhenfeng[1], YANG Ming[1]*

(*1. Key Lab. of Modern Preparation of Chinese Medicine, Ministry of Education, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004; 2. Yichun Wanshen Pharmaceutical Machinery Co., Ltd., Yichun 336000; 3. Jiangxi Hebaikanghua Pharmaceutical Equipment Co., Ltd., Nanchang 330096*)

ABSTRACT: Fresh Chinese medicinal materials are prone to decay and deterioration due to their high moisture content. Reducing the moisture content through drying process is a common method to extend the shelf life of the herbal materials. However, the drying process of Chinese herbal medicines often takes a long time and causes damage to product quality. Selecting a proper pretreatment technology before drying can not only shorten drying time, but also play a positive role in ensuring the quality of Chinese medicinal materials. This review introduces the mechanism of different drying pretreatment technologies and their impacts on the drying efficiency and quality of Chinese herbal medicines, analyzes the existing problems in the application, and proposes the choices of pretreatment methods for some Chinese herbal medicines with different active ingredients. It is hoped to provide some references for the application of drying pretreatment techniques to Chinese medicinal materials.

Key Words: traditional Chinese medicinal material; pretreatment technology; drying; moisture content; quality assurance; efficiency enhancement

中药材在预防和治疗疾病方面具有独特的优势，对人类健康事业贡献巨大。优良的品质是中药材防病、治病的重要前提。干燥与中药材的质量和药用价值密切相关[1]。传统干燥方法，如风干、日光干燥和热风干燥，存在干燥效率低、活性成分易损失、易造成污染等问题；而现代干燥方法（如冷冻干燥）存在成本高和高能耗等问题[2]。干燥预处理技术不仅能有效加速中药材的干燥进程，还可改善干制品品质、降低能源消耗，在中药材干燥领域中的应用日趋广泛。

按照处理方式，干燥预处理可分为热预处理和非热预处理。传统烫漂（traditional blanching）具有成本低、易操作等优点，常作为中药材干燥的热预处理方法；但其加热温度较高，易破坏中药材活性成分。近年来，新型烫漂技术[3]如微波烫漂（microwave blanching）、红外烫漂（infrared blanching）和高湿热风冲击烫漂（high humidity hot air impingement blanching）等，在中药材干燥中越来越受欢迎。非热预处理主要包括超声、脉冲电场、冷等离子体等方法，不仅能防止热量对中药材造成不利影响，还可显著增强干燥效率、有效保护活性成分。

基于此，本文对中药材干燥预处理技术进行分类综述，并讨论其作用机制、现有应用以及未来发展，以期为预处理技术在中药材干燥领域中的应用提供理论依据和实践参考。

1　中药材干燥预处理的常用方法

1.1　热预处理

1.1.1　传统烫漂预处理

系指将新鲜中药材暴露在一定温度的热水和蒸汽中处理一段时间，使酶失活，减少褐变。中药材经过烫漂预处理后，可去除细胞中的氧气，增加药材细胞的通透性，从而加速传热、传质，缩短干燥时间并提高干燥速率[4]。文献[5]报道将松木在 80 ℃恒温下蒸汽烫漂 2 min，再进行对流干燥和红外线干燥，可缩短干燥时间。XIE 等[6]研究了热水和蒸汽烫漂预处理对天麻干燥特性的影响，观察到烫漂预处理可使天麻的中心温度高于 75 ℃，从而缩短干燥时间。烫漂预处理对中药材颜色也有很好的保护作用。例如，AHMED 等[7]报道，与未预处理的芫荽相比，芫荽叶经 80 ℃热水烫漂 3 min，叶绿素成分保留效果更好、复水率更高；ROCHA 等[8]报道经蒸汽烫漂预处理的罗勒叶表现出更好的保色性。

传统烫漂预处理成本低、易操作，但由于加热温度较高，易破坏中药材的活性成分，尤其是会加剧热敏性成分的损失。KAUSHAL 等[9]研究表明，经 98 ℃热水烫漂 3 min 后，芋叶中的抗坏血酸减少了 63.19%。为了克服传统烫漂的缺点，近年来开发了几种新颖的烫漂技术，介绍如下。

1.1.2　微波烫漂预处理

系指极性材料吸收交变电磁场能量后，通过极性分子的搅动引起介电加热，转化为热能加热中药材，达到烫漂的目的[10]。相较于传统烫漂，微波烫漂具有传热效率高、活性成分损失少等优点。王怡等[11]研究了微波烫漂时间、微波功率对百合干燥特性的影响，观察到百合的干燥时间随微波烫漂时间和微波功率的增加而减少。SINGH 等[12]对比了热水烫漂、蒸汽烫漂、微波烫漂预处理对马郁兰和迷迭香品质的影响，结果表明与另外 2 种方法相比，微波烫漂能更好地保护抗坏血酸、叶绿素的含量，维持药材原本的颜色。

由于微波烫漂是体积加热过程，加热时样品中的热量分布不均匀，会造成局部过热，从而对中药材质量产生不利影响。为提高微波烫漂的加热均匀性和传热效率，研究者开发了热风和微波相结合的中药材烫漂预处理技术。BLASCO 等[13]考察了热风微波烫漂预处理对姜黄干燥效率的影响，观察到与未处理的干姜黄相比，经过 8 min 烫漂预处理的干姜黄，其中的姜黄素含量、总酚类物质含量、抗

收稿日期：2023-10-11

基金项目：国家自然科学基金资助项目（82003952）、江西中医药大学科研基金资助项目（2022WBZR006）、中央引导地方科技发展资金项目（2022ZDD03085）

作者简介：徐柳风（2001—），女，硕士研究生，专业方向：中药制剂工艺与装备。

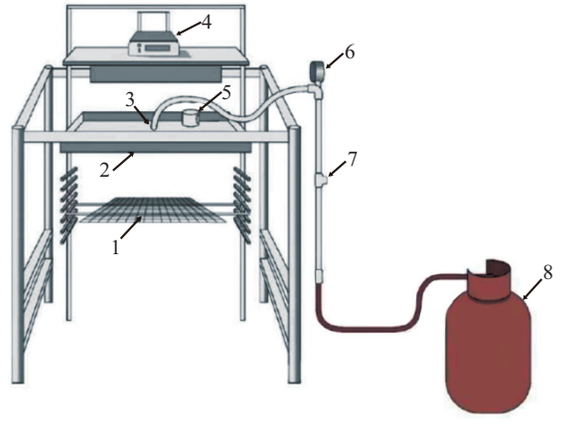
通信作者：杨　明（1962—），男，教授，博士生导师，主要从事中药新剂型与新技术的研究。

E-mail：lab215@163.com

氧化能力显著增加。

1.1.3 红外烫漂预处理

波长介于可见光和微波的电磁辐射会产生红外加热效应。由于这种效应的穿透能力低，只能对材料表面进行加热，故常用作干燥预处理[14—15]，也称为红外烫漂。常用的催化式红外烫漂装置如图 1 所示。相较于传统烫漂，红外烫漂具有能快速灭活多酚氧化酶（polyphenol oxidase，PPO）和过氧化物酶（peroxidase，POD）以及对产品无污染等优点。LUO 等[16]研究表明，经过红外烫漂的山核桃仁不仅能显著缩短干燥时间，其脂肪氧化酶（lipoxidase，LOX）和 PPO 的残留活性较低；而且，该法能更好地保留总酚类物质，显示出较低的总色差值和褐变指数。此外，也有研究将红外烫漂与传统烫漂相结合，进行中药材的干燥预处理。LI 等[17]分别采用红外联合蒸汽烫漂、蒸汽烫漂和红外烫漂预处理菊花。结果表明，经红外联合蒸汽烫漂预处理后干燥的菊花具有更好的生物活性化合物保留率和外观，以及更低的美拉德反应速率。



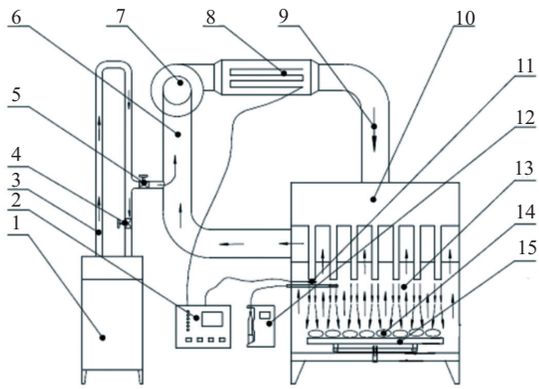
1—样品盘；2—催化式红外发生器；3—气体释放按扭；4—电子天平；5—电源接口；6—压力表；7—压力控制阀；8—液化气。

图 1 催化式红外设备示意图[18]

Fig.1 Schematic Diagram of Catalytic Infrared Equipment[18]

1.1.4 高湿热风冲击烫漂预处理

系指将高温、高湿气体通过喷嘴以一定压力直接喷射到物料表面进行加热，达到迅速烫漂的目的。高湿热风冲击烫漂设备示意图如图 2 所示；作为一种新兴的热预处理技术，它结合了过热蒸汽烫漂和冲击技术的优点，具有传热效率高、活性成分损失少、无化学残留等优点。DENG 等[19]报道，与未预处理组相比，经高湿热风冲击烫漂预处理杏的干燥时间能被显著缩短；并且经过 120 s 预处理的杏，其总酚类物质含量、总类胡萝卜素含量和抗氧化能力更高，保色性更好。此外， DAI 等[20]也报道，高湿热风冲击烫漂预处理能显著缩短干燥时间，改善干菊花头的颜色，增加其总黄酮含量；并进一步指出烫漂预处理时的湿度对总干燥时间的影响更为显著。



1—过热蒸汽发生器；2—温度风速传感器；3—蒸汽管道；4—常压阀；5—过热蒸汽截止阀；6—循环风管；7—离心风机；8—电加热；9—进风管；10—分风柜；11—温度传感器；12—湿度传感器；13—带一系列圆形喷嘴的冲击室；14—材料；15—材料托盘。

图 2 高湿热风冲击烫漂设备示意图[19]

Fig.2 Schematic Diagram of High Humidity Hot Air Impingement Blanching Equipment[19]

1.2 非热预处理

1.2.1 超声预处理

超声预处理是一种安全、简单且成本相对较低的方法，可在中药材的工业化加工中使用，其常用设备是超声波浴。根据频率，可将超声波分为 2 种类型：高强度、低频（20 ～ 100 kHz）和低强度、高频（>100 kHz）。其中，低频超声被实际应用于中药材干燥方面[21]。超声波加速中药材传热、传质的作用机制主要有 2 个方面。（1）海绵效应：当对

中药材施加超声波时，其内部结构会发生一系列压缩和膨胀，在组织结构中形成微通道，最终形成海绵结构[22]。(2) 空化效应：当超声波强度足够大时，液体分子会产生空化气泡，并且随着空化气泡的大小变化和破裂，产生强烈的微流，而微流会引起剧烈的搅动（图 3）[23—24]。

超声预处理在中药干燥中的应用受其参数和干燥温度的影响。JIANG 等[25] 研究了超声预处理时间（25、35、45 min）、频率（20、40、60 kHz）和功率（150、180、210 W）对远红外真空干燥肉苁蓉片的影响，结果表明干燥时间随着超声波预处理时间、频率和功率的增加而减少。但经过 45 min 超声预处理的肉苁蓉片干燥品，内部结构被严重破坏，有效成分含量降低。值得注意的是，随着超声时间的增加，干燥时间并不是线性减少。YUE 等[26] 研究表明，射频真空干燥党参切片前使用超声处理 20、30、40 min，所需干燥时间分别为 260、220、240 min。这可能是因为长时间的超声处理会降低党参样品的水分活度，导致水分子的极化效应降低，因此增加了射频真空干燥所需的时间。高温干燥过程中的热效应会降低超声波的空化效应，所以超声预处理主要适用于低温干燥[27]。PEI 等[28] 将藏红花在 42 kHz、0.4 W/cm^2 的超声波浴中进行超声（30 或 60 s），然后分别在 50、60、70、80 ℃下进行远红外干燥。结果表明，经过超声预处理的藏红花在 80 ℃下干燥的总干燥时间与未预处理的样品几乎相同。索浩然[29] 研究表明，铁皮石斛在热风干燥和微波干燥前应用超声处理，能增加其多糖、多酚和氨基酸的含量。

超声波空化现象是通过液体介质传播的压力造成气泡变化而引起的。因此，空化效应在很大程度上受到周围液体介质物理化学特性的影响。超声预处理时选用的液体介质包括水、乙醇等多种溶剂。选用乙醇时，能够溶解细胞壁和细胞膜上的化合物，如多酚、脂质或蛋白质，导致细胞壁的厚度降低，加快失水进程。并且，乙醇比水具有更低的沸点和表面张力，当与中药材表面的水分混合后，会增加马兰戈尼效应，加速传热和传质的过程。REN 等[30] 研究了乙醇超声处理、水超声处理、乙醇处理和水处理对促进红外干燥姜片的影响，观察到在乙醇介质中进行超声预处理的姜片，干燥效率、硬度、总酚含量和总黄酮含量最高。

1.2.2　渗透脱水（osmotic dehydration）预处理

渗透脱水是将样品浸入高渗溶液中发生水和溶质的交换，通过渗透压使中药材中的水分进入到渗透溶液中（失水），而渗透溶液中的溶质通过细胞膜进入中药材内部（固体增加）。失水量（WL/%）、固体增加量（SG/%），以及二者之间的差异［即质量减少量（WR/%）］，是评价渗透脱水预处理的重要参数，可按照文献[31—32] 方法来计算。

常见的渗透剂有氯化钠、葡萄糖、果糖、蔗糖及其组合等，在中药材干燥中常用的渗透剂是氯化钠。在渗透脱水的初始阶段，水分损失和固体增加速率较快；后期由于渗透溶液和样品之间浓度梯度的降低，水分损失和固体增加的速率减慢。渗透液的溶度、温度会影响水分流失和固体增加速率。

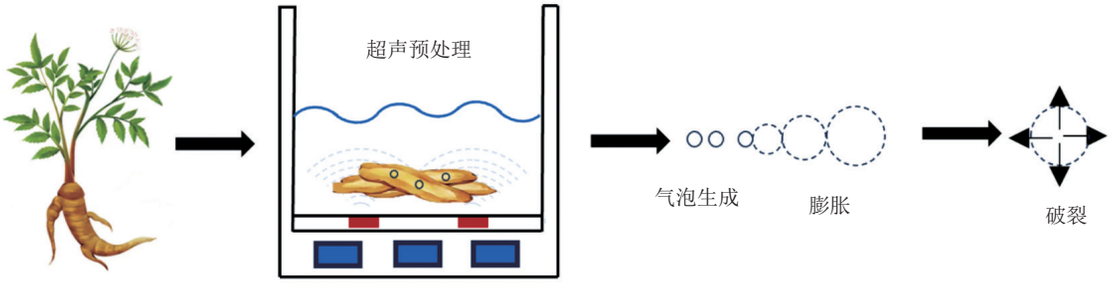


图 3　超声波对药材的空化效应[24]

Fig.3　The Cavitation Effect of Ultrasound on Herbal Materials[24]

PAVKOV 等[33]研究表明，水分流失和固体增加速率会随着渗透溶液浓度和温度的升高而增加。浓度的增加会增大渗透液和样品之间的渗透压；温度的升高会降低渗透溶液黏度，从而减少样品表面传质速率的外部阻力。但是，渗透溶液温度的升高会对活性成分造成不利影响。SARKAR 等[34]研究表明，椰子胚乳的维生素 C、抗氧化活性、多酚和颜色等特性会随着渗透溶液温度的升高而降低。

渗透脱水作为干燥的预处理步骤，可通过使酶失活和改变组织结构来提高干燥速率和中药材质量。OSAE 等[24]研究表明，在姜干燥前应用渗透脱水预处理技术可提高干燥速率并保护姜的质量。他们还观察到渗透脱水预处理可提高 POD 和 PPO 的失活率。薄荷在 95 ℃的条件下，在焦亚硫酸钾溶液中进行 1 min 的渗透脱水预处理后，能减少褐变和颜色变化程度，更好地保护叶绿素[35]。PROSAPIO 等[36]研究了渗透脱水预处理对烘箱和冷冻干燥的影响，以草莓为例，应用渗透脱水预处理能显著缩短干燥时间并保护草莓中的生物活性物质和营养特性。由于渗透压是传质的唯一驱动力，渗透脱水预处理是一个相对低效且耗时的过程。因此，近年来开发出了其他辅助技术与渗透脱水相结合的方法，能增强传热和传质效应并保护活性成分。LI 等[37]研究表明，经超声渗透脱水预处理山药的失水率及固体增加率较高，干制品的色差值及硬度较低，复水率较高且其主要的酚类物质含量较高、抗氧化能力较强。

1.2.3 脉冲电场（pulsed electric field）预处理

脉冲电场是指对样品施加极短时间的高压电脉冲的一种新型非热加工技术。目前还没有关于其破坏过程潜在机制的明确证据，广为接受的理论是 ZIMMERMAN 等[38]提出的电穿孔机制，即细胞膜的两侧存在不同的电荷，能形成跨膜电位，而施加电场会诱导膜两侧电荷密度逐渐变大，导致跨膜电位增加、膜两侧压力变大，使细胞膜变薄；当所施加的电压超过一定值时，细胞膜被挤压破裂，从而形成孔隙。根据所施加电场强度的不同，可将电穿孔分为可逆和不可逆 2 种，如图 4 所示。当所施加的电场强度小于临界电场强度时，细胞膜内外在外加电场的作用下会形成电位差，细胞膜还能保持完整状态；但当施加电场强度大于临界电场强度时，细胞膜会产生可逆性的电穿孔；当所施加电场远大于临界电场时，细胞膜上发生不可逆电穿孔，即使去除外加电场，细胞仍不能恢复原有状态[39]。

脉冲电场的细胞透化作用可加速热量和水分传递速率，提高干燥效率。脉冲电场作为预处理技术已被应用于不同的干燥方法，如热风干燥、对流干燥、真空干燥和冷冻干燥等。THAMKAEW 等[41]研究表明，脉冲电场处理的细胞电穿孔可加速罗勒叶的干燥；TELFSER 等[42]报道，经脉冲电场预处理的罗勒叶采用对流干燥、真空干燥和冷冻干燥所需的干燥时间分别缩短了 57%、33%和 25%。OSTERMEIER 等[43]观

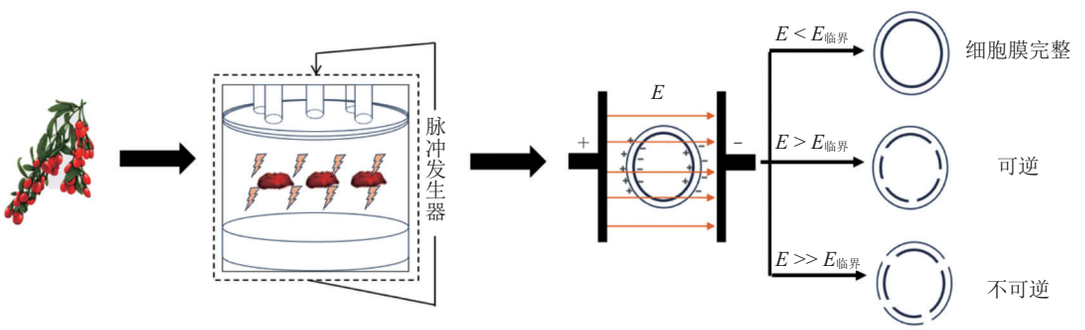


图 4 中药材在脉冲电场预处理作用下细胞膜发生可逆和不可逆电穿孔的示意图[39—40]

Fig.4 Schematic Diagram of Reversible and Irreversible Electroporation of Chinese Herbal Medicines under Pulsed Electric Field Pretreatment[39—40]

察到，经脉冲电场（1.07 kV/cm，4 kJ/kg）预处理的洋葱在 45 ℃下的干燥时间缩短了 30%，而在 75 ℃的干燥温度下干燥时间仅缩短了 6.4%。这表明温度的影响比脉冲电场引起的细胞崩解更为显著。

脉冲电场可在没有热能的情况下改变组织结构，延缓热敏性成分在干燥过程中的降解，从而保护其活性成分。RAHAMAN 等[44]研究了脉冲电场处理对李子干燥动力学性质和颜色的影响。结果表明，脉冲电场预处理能增加其干燥速率、缩短干燥时间、提高产品亮度。有研究[45]显示，在枸杞干燥中应用脉冲电场预处理，有利于酚类化合物的保留并增强其抗氧化能力。由于电穿孔会导致细胞内物质的释放，使用脉冲电场预处理的样品在干燥后通常能更好地保持其颜色，但这也取决于样品的结构和干燥条件。例如，干燥胡萝卜时，与未预处理的胡萝卜相比，在对流干燥前应用脉冲电场预处理胡萝卜的色彩亮度反而降低[46]。然而，当应用真空干燥时，经脉冲电场预处理的胡萝卜的颜色变化与未处理胡萝卜相比不显著，可能与干燥温度有关[47]。

1.2.4 冷等离子体（cold plasma）预处理

等离子体是由电子、光子、离子和未电离的中性粒子组成的电离气体混合物。它是固态、液态、气态之外的第四态。根据温度，可将等离子体分为热等离子体和冷等离子体[48]。常用的等离子干燥技术是冷等离子射流[49]。冷等离子体作为一种新兴的非热预处理技术，具有提高干燥效率、降低干燥能耗、提高干燥产品质量等优点[50]。

冷等离子体作用时会产生各种电子和离子，这些电子和离子可破坏细胞壁聚合物和氢原子之间的非共价连接[51]，导致细胞壁硬度降低，产生细胞内间隙和空腔，缩短干燥时间。ZHOU 等[52]通过显微结构和超微结构分析观察到，经冷等离子体预处理的枸杞表皮具有许多不规则的蚀刻微孔。这些微孔可降低蜡质层对内部水迁移的阻力，有利于水分的蒸发。TABIBIAN 等[53]研究了冷等离子体预处理时间（15、30、45、60 s）对藏红花热风干燥的影响，结果表明，经冷等离子体预处理 60 s 的藏红花，干燥时间缩短了 39.52%，并且干燥时间会随着冷等离子体预处理时间的增加而减少。但长时间的冷等离子体预处理可能会导致细胞结构塌陷，从而增加对水传输的阻力，并延长干燥时间。BAO 等[54]通过显微结构分析观察到，冷等离子体预处理通过在枣表面蚀刻空腔，促进了干燥过程中水分的转移，从而提高干燥速率。并且在优化的冷等离子体预处理条件下，与对照品相比，经过 15 s 冷等离子体预处理的干枣片中酚类化合物含量增加了 13.85%；在干燥温度为 50 ℃时，与对照品相比，经过 30 s 冷等离子体预处理的干枣片中原花青素含量增加了 53.81%；而经过 60 s 冷等离子体预处理的干枣片中黄酮类化合物含量增加了 33.89%；在干燥温度为 50 ℃和 60 ℃的条件下，经过 30 s 的冷等离子体预处理的干枣片抗氧化能力相较于对照品增加了 0.35%～36.85%。但是，关于冷等离子体预处理保护中药材中活性成分的作用机制还没有明确的理论证明。BAO 等[54]推测冷等离子体预处理会导致细胞收缩和变形，可以减缓多酚的分解，从而保护酚类物质。TABIBIAN 等[53]认为冷等离子体预处理会损伤细胞膜，从而促进酚类物质的提取。DU 等[48]则推测冷等离子体可通过缩短干燥时间而减少热风干燥时酚类、黄酮类物质的损失。

表 1 汇总了传统烫漂、微波烫漂、红外烫漂、高湿热风冲击烫漂、超声、渗透脱水、脉冲电场和冷等离子体等预处理方法对中药材干燥效率和质量的影响。

2 干燥预处理技术的重要意义

2.1 改善组织结构和加速干燥

预处理技术可通过改善中药材组织结构，加快水分蒸发，从而加速干燥。例如，新鲜枸杞外表面蜡质层的存在严重阻碍了干燥过程中内部水分向外迁移的过程，造成枸杞干燥困难[67]。预处理技术可破坏枸杞表皮的蜡质层，从而有效地加快干燥速度。ZHANG 等[68]研究表明，将新鲜枸杞在沸水中浸泡 3 min 后，干燥时间可明显缩短。这是由于烫漂能使枸杞表面的蜡质层结构发生严重破坏，使枸杞细胞结构松弛和塌陷，有利于水分从细胞内向外迁移。对一些肉质药材如垂柳、马齿苋等，茎叶

表 1 预处理对中药材干燥性能和质量的影响

Tab.1 Effect of Pretreatment on Drying Performance and Quality of Chinese Medicinal Materials

预处理方法	预处理条件	干燥方法	结果
烫漂	热水温度 85 ～ 98 ℃，时间 15 s	热泵干燥	能更好地保护活性成分穿心莲内脂[55]
烫漂	温度 110 ℃，时间 150 s	空气冲击干燥	总黄酮含量最高提高 21.6%[17]
烫漂	温度 100 ℃，时间 5 min	远红外干燥	硬度和营养成分含量适中，色泽白皙[56]
烫漂	热水温度 85 ℃，时间 1 min	微波冷冻干燥	复水率较高，开孔率较高[57]
超声	时间 10 min	热风干燥	总耗能降低 17.3%[58]
超声	频率 28 kHz，功率 70 W，时间 15 min	热风 - 微波干燥	较高的复水率[59]
超声	功率 600 W，时间 15 min	冷冻干燥	干燥时间缩短 40%[60]
超声	频率 40 kHz，功率 210 W，时间 35 min	远红外真空干燥	更好地保护活性成分[25]
超声	频率 42 kHz，功率 360 W，时间 30 s	远红外干燥	抗氧化能力和黄酮含量较高[28]
超声	功率 250 W，时间 5 min	远红外干燥	较小的色差[30]
超声	频率 20 kHz，时间 10 min	微波真空干燥	干燥时间缩短 31.25%[61]
超声	频率 28 kHz，功率 70 W，时间 10 min	热风 - 微波干燥	较小的色差[62]
渗透脱水	渗透剂为糖浆，温度 35 ℃，时间 180 min	风干	更好地保护质量[34]
渗透脱水	渗透剂为甘油、麦芽糖糊精、抗坏血酸和氯化钠，温度 55 ℃，时间 60 min	风干	改善质地，干燥时间缩短 120 min[63]
脉冲电场	电场强度 1.25 kV/cm，脉冲个数为 50	微波真空干燥	更好地保护生物活性成分[64]
脉冲电场	电场强度 0.6 kV/cm，脉冲个数为 65，宽度 150 μs，时间 760 μs	冷冻干燥	干燥时间缩短 25%[42]
脉冲电场	电场强度 1.07 kV/cm，脉冲个数为 56，宽度 40 μs	热风干燥	丙酮酸含量提高 14.5%，复水率提高 47%[43]
脉冲电场	电场强度 0.9 kV/cm，脉冲个数为 1 000，宽度 20 μs	热风干燥	干燥时间缩短 28%[65] 黄度显著降低
冷等离子体	频率 20 kHz，流量 3 L/min，功率 750 W，时间 60 s	热风干燥	较高的复水率，干燥时间缩短 50%[52]
冷等离子体	功率 1 000 W，时间 60 s	热风干燥	能耗降低 52%，干燥时间缩短 54.05%[53]
冷等离子体	频率 40 kHz，流量 135 L/min，功率 650 W，时间 60 s	热风干燥	活性成分含量提高[54]
冷等离子体	频率 0.1 kHz，时间 50 μs	自然干燥	干燥时间缩短 19.5%[66]

内含水量较高，用沸水烫漂可促进水分蒸发，有利于后续干燥[69]；对一些难以去皮的根茎类药材，如桔梗、牡丹皮等，放入沸水中烫漂几分钟不仅有利于去皮，也便于干燥[70]。

渗透脱水、超声、脉冲电场、冷等离子体等预处理技术可通过不同的作用机制改变中药材组织结构，加速水分蒸发。渗透脱水因渗透压导致中药材失水；超声波的空化作用和海绵效应可在中药材组织结构中产生微通道；脉冲电场的电穿孔作用可使中药材内部细胞产生孔隙；冷等离子体可在中药材表面进行蚀刻。

2.2 保护活性成分并提升质量

在中药材干燥中应用预处理技术可通过缩短干燥时间和使酶失活来保护活性成分。AN 等[71] 研究表明，与未烫漂的刺五加相比，经过烫漂预处理的刺五加，总酚类、总黄酮类以及总花青素的含量均增加，抗氧化能力也有明显提升。刺五加中 PPO 和 POD 的活性随烫漂时间的延长逐渐降低，在经过 8 min 的烫漂后，PPO 和 POD 会完全失活；而 PPO 和 POD 会使中药材在干燥过程中发生组织褐变，还可能影响其他质量属性，如抗氧化能力和生物活性化合物含量。与未经处理的刺五加相比，烫漂 2 ～ 8 min 还可使干燥时间缩短 36.80%～ 57.89%。此外，在热水中烫漂还有助于减少中药材的毒性成分，如乌头中的剧毒成分乌头类双酯型生物碱在水煮后会水解，毒性可降为原来的 1/14 000 ～ 1/12 000[72]。

预处理技术也可通过对细胞作用，增强传质过程，从而保护活性成分。ROSTAMI 等[73] 研究表明，与优化条件下红外干燥的紫锥菊根相比，增加超声预处理（40 ℃、3 kHz 和 60 min），总黄酮含量可增加到 44.07%。超声波能使细胞壁附近的成孔气泡破裂，从而增强传质过程，保护黄酮类有效成分。在 NERI 等[74] 的研究中，应用脉冲电场预处理的

藏红花在经过热风干燥后，酚类化合物含量和抗氧化能力均有所提高。推测是由于脉冲电场处理破坏了藏红花的柱头细胞，从而提高了细胞内物质的可提取性。

2.3 降低干燥能耗，节能环保

由于当今不可再生资源的日渐枯竭和国内能源消耗的不断加大，节能减排是一种必然的趋势。热风干燥、微波干燥、冷冻干燥等常用的中药材干燥方法都是高耗能的加工过程，而干燥预处理技术有望降低能耗，有利于环保。TABIBIAN 等[53]研究了预处理对藏红花热风干燥的影响，观察到冷等离子体预处理使热风干燥的能耗降低了 52%。同样，TAO 等[58]研究了超声预处理对桑叶热风干燥的影响，观察到与对照品相比，总能耗节约了 17.3%。预处理技术的应用使中药材的干燥加工程序更加低碳环保，与绿色可持续发展观念相符合。

3 针对不同成分中药材的干燥预处理方法选择对策

预处理在提高中药材干燥效率和质量方面具有良好的效果，但中药材种类繁多，找到相适应的预处理方法才可对中药材干燥起积极作用。因此，本项总结了当前学者对中药材干燥预处理技术的研究，针对中药材不同的有效成分提出相适应的预处理技术，从而优化整个干燥过程。

3.1 挥发油

挥发油主要来源于芳香性中药，根据所含具体成分的不同，功效也不同。挥发油是一类热敏性成分，当预处理技术的加热温度较高时易被破坏，从而加剧损失。XU 等[75]研究表明，经烫漂预处理的牡丹花，挥发性成分和含量会减少。所以在干燥含挥发油成分的中药材时，更宜选择非热预处理方法。在短时间内应用超声、脉冲电场、冷等离子体等预处理技术可对挥发油的保留起到积极作用。根据 PEI 等[28]的报道，经 30 s 超声预处理的藏红花在 50 ℃远红外干燥后，藏红花中的挥发性成分（藏红醛、4- 二烯甲醛等）含量较高。但长时间或高强度地应用超声、脉冲电场、冷等离子体等预处理技术时，会破坏中药材的细胞组织，不利于保护挥发油成分。这是因为挥发油主要存在于植物的腺毛、油室、油管、分泌细胞或树脂道等各种组织和器官中，破坏这些组织的完整性，会加剧干燥过程中挥发油成分的损失[76]。

3.2 酚类成分

大部分的酚羟基具有亲水性和抗氧化性。而传统烫漂需要将中药材暴露在高温环境中，一直处于高温环境不利于酚类物质的保留；并且，应用热水烫漂技术时，中药材细胞内的部分酚类物质会发生溶解，形成的废水会污染环境。新型烫漂预处理技术对酚类物质的破坏相对较小；非热预处理技术由于不涉及热量，且在加速中药材干燥方面作用良好，都是较适宜的选择。例如，有研究[63]表明，枸杞在 55 ℃，含有甘油、麦芽糖糊精、抗坏血酸和氯化钠组合物的高渗溶液中处理 60 min 后干燥，所得干药材的总酚含量和抗氧化能力均会提高。

3.3 黄酮类成分

黄酮类成分不溶于水，具有抗炎和抗氧化等药理作用；但暴露在高温环境时会发生水解、氧化等反应。因此，在干燥含黄酮类成分的中药材时，相较于传统的烫漂技术，更宜选择新型烫漂技术。并且，新型烫漂技术中的微波烫漂穿透能力较强，可打破中药材细胞内部高聚物间的共价键，加快黄酮类化合物的释放和提取[77]。DENG 等[78]研究了预处理技术对龙眼肉干理化性质的影响，观察到与未预处理的龙眼肉干相比，经微波烫漂的龙眼肉干中总黄酮含量增加。采用非热预处理方法，如超声、渗透脱水、脉冲电场和冷等离子体对中药材进行处理时的温度较低，不易破坏黄酮类成分，适宜应用。

3.4 生物碱类成分

生物碱类成分是指来源于植物的碱性含氮有机化合物，是中药材的一类重要有效成分，具有显著的生物活性[79]。一些生物碱具有较高的结构稳定性；一些生物碱则易受温度的影响，高温加热时会发生水解等反应，不适宜采用传统烫漂预处理。当含水溶性生物碱成分时，若采用渗透脱水预处理方法，这些生物碱会溶于渗透溶液，加剧损失；当含脂溶性生物碱成分时，则会溶于乙醇等有机溶剂，超声处理也会加剧损失。新型烫漂、脉冲电场、冷

等离子体等预处理技术较适用于含生物碱类成分的中药材干燥中。

3.5 糖类成分

中药材的糖类成分在高温加热时，一部分会溶胀、分裂形成糊状溶液，继而形成阻挡层，附着在细胞上阻碍中药材干燥时水分的流出，降低中药材干燥速度。AI 等[80]研究了高湿热风冲击烫漂对肉苁蓉干燥的影响，观察到经高湿热风冲击烫漂预处理的肉苁蓉比未预处理的肉苁蓉需要更长的干燥时间，这是由于肉苁蓉经预处理后，淀粉糊化并形成了阻挡层，黏附在细胞表面，阻碍细胞内的水分向外迁移。虽然提高加热温度可以破坏中药材的细胞，加速细胞内的水分流出，但中药材的活性成分也会流出，对药材品质造成不利的影响。故当干燥含糖类成分的中药材时，更适宜采用低温作用的预处理方法。

3.6 皂苷类

皂苷是苷元为三萜或螺旋甾烷类化合物的一类糖苷，具有多种生物活性。在中药材干燥过程中，皂苷类成分损失主要是由于酶破坏和高温降解[81]，而微波烫漂和红外烫漂在短时间内可快速升温，有效使酶灭活，从而保护皂苷类成分。传统烫漂则易使皂苷类成分发生降解，影响药用价值。非热预处理技术因对中药材的作用温度低，在干燥含皂苷类成分的药材时较为适宜。

4 总结与展望

干燥预处理技术在提高干燥效率、生产高质量中药材方面有良好的应用前景，可以通过不同的作用机制改善中药材的组织结构，从而加速传热和传质，并增强活性成分的保留。传统烫漂、红外烫漂、微波烫漂、超声波浴和渗透脱水在中药材干燥中是较为成熟的预处理技术，操作简单且设备成本较低，适用于工业化生产。

新兴的预处理技术如高湿热风冲击烫漂预处理、脉冲电场预处理、冷等离子体预处理在中药材干燥中的应用研究仍较少，更需要去阐明中药材的干燥动力学和活性成分之间的影响机制。此外，这些新兴预处理技术因为设备、成本和工艺问题，还只停留在实验室研究阶段，尚未开展工业化应用，需要对相应设备进行改造。预处理技术在中药材干燥中的应用符合“双碳政策”，顺应绿色可持续发展、节能减排等新型社会发展道路。

参考文献：

[1] 刘 磊, 杨大宇, 张晓燕, 等. 中药材产地加工研究现状及现代研究特点探讨 [J]. 时珍国医国药, 2021, **32**(12): 2956-2958.

[2] 侯演林, 陈胜慧子, 蒲云峰, 等. 真空冷冻干燥及预处理方法应用研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2023, **44**(23): 203-208.

[3] XIAO H W, PAN Z, DENG L Z, *et al*. Recent developments and trends in thermal blanching—a comprehensive review [J]. *Inf Process Agric*, 2017, **4**(2): 101-127.

[4] SLEDZ M, WIKTOR A, RYBAK K, *et al*. The impact of ultrasound and steam blanching pre-treatments on the drying kinetics, energy consumption and selected properties of parsley leaves [J]. *Appl Acoustics*, 2016, **103**: 148-156.

[5] ABBASPOUR-GILANDEH Y, KAVEH M, FATEMI H, *et al*. Effect of pretreatments on convective and infrared drying kinetics, energy consumption and quality of terebinth [J]. *Appl Sci*, 2021, **11**(16): 7672.

[6] XIE Y K, LI X Y, CHEN C, *et al*. Effects of steam and water blanching on drying characteristics, water distribution, microstructure, and bioactive components of *Gastrodia elata* [J]. *Plants*, 2023, **12**(6): 1372.

[7] AHMED J, SHIVHARE U S, SINGH G. Drying characteristics and product quality of coriander leaves [J]. *Food Bioprod Process*, 2001, **79**(2): 103-106.

[8] ROCHA T, LEBERT A, MARTY-AUDOUIN C. Effect of pretreatments and drying conditions on drying rate and colour retention of basil (*Ocimum basilicum*) [J]. *Food Sci Technol*, 1993, **26**(5): 456-463.

[9] KAUSHAL M, SHARMA K D, ATTRI S. Effect of blanching on nutritional quality of dehydrated colocasia, *Colocasia esculenta* Schott leaves [J]. *Indian J Nat Prod Resour*, 2013, **4**(2): 161-164.

[10] BASSEY E J, CHENG J H, SUN D W. Novel nonthermal and thermal pretreatments for enhancing drying performance and improving quality of fruits and vegetables [J]. *Trends Food Sci Tech*, 2021, **112**: 137-148.

[11] 王 怡, 董继先, 王 栋, 等. 微波烫漂预处理下百合

热风干燥特性及动力学模拟［J］. 食品工业科技 , 2021, **42**(3): 186-190.

［12］ SINGH M, RAGHAVAN B, ABRAHAM K O. Processing of marjoram (*Majorana hortensis* Moench.) and rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.). Effect of blanching methods on quality［J］. *Food*, 1996, **40**(5): 264-266.

［13］ BLASCO M, GARCÍA-PÉREZ J V, BON J, *et al*. Effect of blanching and air flow rate on turmeric drying［J］. *Food Sci Technol Int*, 2006, **12**(4): 315-323.

［14］ ABOUD S A, ALTEMIMI A B, RS AL-HIIPHY A, *et al*. A comprehensive review on infrared heating applications in food processing［J］. *Molecules*, 2019, **24**(22): 4125.

［15］ NALAWADE S A, SINHA A, HEBBAR H U. Infrared based dry blanching and hybrid drying of bitter gourd slices: process efficiency evaluation［J］. *J Food Process Eng*, 2018, **41**(4): e12672.

［16］ LUO S Z, SUN Y, YUAN X, *et al*. Infrared radiation blanching-inhibited browning and extended shelf life of pecan kernels［J］. *J Food Sci*, 2023, **88**(4): 1566-1579.

［17］ LI Y H, WU Z F, WANG X C, *et al*. Effects of combined infrared and steam blanching on enzyme inactivation and product quality of *Chrysanthemum indicum* L. flower［J］. *J Food Process* Preserv, 2019, **43**(10): e14119.

［18］ 郭修宇. 催化式红外烫漂同步干燥胡萝卜片表面成壳机制研究［D］. 镇江 : 江苏大学硕士学位论文 , 2023.

［19］ DENG L Z, PAN Z, MUJUMDAR A S, *et al*. High-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) enhances drying quality of apricots by inactivating the enzymes, reducing drying time and altering cellular structure［J］. *Food Control*, 2019, **96**: 104-111.

［20］ DAI J W, WANG J, YANG S L, *et al*. High humidity air-impingement blanching (HHAIB) improves drying characteristics and quality of ground-cover chrysanthemum heads［J］. *Int J Food Eng*, 2020, **16**(12): 20200121.

［21］ HUANG D, MEN K, LI D, *et al*. Application of ultrasound technology in the drying of food products［J］. *Ultrason Sonochem*, 2020, **63**: 104950.

［22］ KENTISH S, ASHOKKUMAR M. The physical and chemical effects of ultrasound［M］// Ultrasound technologies for food and bioprocessing. New York: Springer New York, 2010: 1-12.

［23］ WITROWA-RAJCHERT D, WIKTOR A, SLEDZ M, *et al*. Selected emerging technologies to enhance the drying process: a review［J］. *Drying Technol*, 2014, **32**(11): 1386-1396.

［24］ OSAE R, ZHOU C, XU B, *et al*. Effects of ultrasound, osmotic dehydration, and osmosonication pretreatments on bioactive compounds, chemical characterization, enzyme inactivation, color, and antioxidant activity of dried ginger slices［J］. *J Food Biochem*, 2019, **43**(5): e12832.

［25］ JIANG C, WAN F, ZANG Z, *et al*. Effect of an ultrasound pre-treatment on the characteristics and quality of far-infrared vacuum drying with cistanche slices［J］. *Foods*, 2022, **11**(6): 866.

［26］ YUE Y, ZANG Z, WAN F, *et al*. Effect of ultrasonic pretreatment on radio frequency vacuum drying characteristics and quality of codonopsis pilosula slices［J］. *Agriculture*, 2022, **13**(1): 72.

［27］ PANDISELVAM R, AYDAR A Y, KUTLU N, *et al*. Individual and interactive effect of ultrasound pre-treatment on drying kinetics and biochemical qualities of food: a critical review［J］. *Ultrason Sonochem*, 2022, **1**: 106261.

［28］ PEI Y, LI Z, XU W, *et al*. Effects of ultrasound pretreatment followed by far-infrared drying on physicochemical properties, antioxidant activity and aroma compounds of saffron (*Crocus sativus* L.)［J］. *Food Biosci*, 2021, **42**: 101186.

［29］ 索浩然. 超声波预处理对铁皮石斛干燥特性及品质的影响［D］. 芜湖 : 安徽工程大学硕士学位论文 , 2021.

［30］ REN M, REN Z, CHEN L, *et al*. Comparison of ultrasound and ethanol pretreatments before catalytic infrared drying on physicochemical properties, drying, and contamination of Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe)［J］. *Food Chem*, 2022, **386**: 132759.

［31］ PÉREZ-SANTAESCOLÁSTICA C, CARBALLO J, FULLADOSA E, *et al*. Application of temperature and ultrasound as corrective measures to decrease the adhesiveness in dry-cured ham. Influence on free amino acid and volatile compound profile［J］. *Food Rev Int*, 2018, **114**: 140-150.

［32］ HAMEDI F, MOHEBBI M, SHAHIDI F, *et al*. Ultrasound-assisted osmotic treatment of model food impregnated with pomegranate peel phenolic compounds: mass transfer, texture, and phenolic evaluations［J］. *Food Bioprocess Technol*, 2018, **11**: 1061-1074.

［33］ PAVKOV I, RADOJČIN M, STAMENKOVIĆ Z, *et al*. Effects of osmotic dehydration on the hot air drying of apricot halves: drying kinetics, mass transfer, and shrinkage

[J]. *Processes*, 2021, **9**(2): 202.

[34] SARKAR A, AHMED T, ALAM M, *et al*. Influences of osmotic dehydration on drying behavior and product quality of coconut(*Cocos nucifera*)[J]. *Asian Food Sci J*, 2020, **15**(3): 21-30.

[35] CHAUHAN N, SINGH B R, SINGH G R, *et al*. Effect of drying conditions on ascorbic acid of dried mint leaves[J]. *Ann Hortic*, 2016, **9**(1): 73-76.

[36] PROSAPIO V, NORTON I. Influence of osmotic dehydration pre-treatment on oven drying and freeze drying performance[J]. *LWT*, 2017, **80**: 401-408.

[37] LI L, ZHANG M, WANG W. Ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment before pulsed fluidized bed microwave freeze-drying(PFBMFD) of Chinese yam[J]. *Food Biosci*, 2020, **35**: 100548.

[38] ZIMMERMANN U, NEIL G. Electromanipulation of cells[M]. [S.l.]: CRC Press, 1996: 106.

[39] ARSHAD R N, ABDUL-MALEK Z, ROOBAB U, *et al*. Pulsed electric field: a potential alternative towards a sustainable food processing[J]. *Trends Food Sci Tech*, 2021, **111**: 43-54.

[40] LIU Z, ESVELD E, VINCKEN J P, *et al*. Pulsed electric field as an alternative pre-treatment for drying to enhance polyphenol extraction from fresh tea leaves[J]. *Food Bioprocess Technol*, 2019, **12**: 183-192.

[41] THAMKAEW G, GALINDO F G. Influence of pulsed and moderate electric field protocols on the reversible permeabilization and drying of Thai basil leaves[J]. *Innovative Food Sci Emerg Technol*, 2020, **64**: 102430.

[42] TELFSER A, GALINDO F G. Effect of reversible permeabilization in combination with different drying methods on the structure and sensorial quality of dried basil(*Ocimum basilicum* L.) leaves[J]. *LWT*, 2019, **99**: 148-155.

[43] OSTERMEIER R, PARNIAKOV O, TÖPFL S, *et al*. Applicability of pulsed electric field(PEF) pre-treatment for a convective two-step drying process[J]. *Foods*, 2020, **9**(4): 512.

[44] RAHAMAN A, SIDDEEG A, MANZOOR M F, *et al*. Impact of pulsed electric field treatment on drying kinetics, mass transfer, colour parameters and microstructure of plum[J]. *J Food Sci Tech*, 2019, **56**: 2670-2678.

[45] DERMESONLOUOGLOU E, CHALKIA A, DIMOPOULOS G, *et al*. Combined effect of pulsed electric field and osmotic dehydration pre-treatments on mass transfer and quality of air dried goji berry[J]. *Innovative Food Sci Emerging Technol*, 2018, **49**: 106-115.

[46] AMAMI E, KHEZAMI L, VOROBIEV E, *et al*. Effect of pulsed electric field and osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of carrot tissue[J]. *Drying Technol*, 2008, **26**(2): 231-238.

[47] LIU C, PIROZZI A, FERRARI G, *et al*. Effects of pulsed electric fields on vacuum drying and quality characteristics of dried carrot[J]. *Food Bioprocess Technol*, 2020, **13**: 45-52.

[48] DU Y, YANG F, YU H, *et al*. Improving food drying performance by cold plasma pretreatment: a systematic review[J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2022, **21**(5): 4402-4421.

[49] ESUA O J, CHENG J H, SUN D W. Functionalization of water as a nonthermal approach for ensuring safety and quality of meat and seafood products[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2021, **61**(3): 431-449.

[50] CHEN G, DONG S, ZHAO S, *et al*. Improving functional properties of zein film via compositing with chitosan and cold plasma treatment[J]. *Ind Crops Prod*, 2019, **129**: 318-326.

[51] ZHANG B, TAN C, ZOU F, *et al*. Impacts of cold plasma technology on sensory, nutritional and safety quality of food: a review[J]. *Foods*, 2022, **11**(18): 2818.

[52] ZHOU Y H, VIDYARTHI S K, ZHONG C S, *et al*. Cold plasma enhances drying and color, rehydration ratio and polyphenols of wolfberry via microstructure and ultrastructure alteration[J]. *LWT*, 2020, **134**: 110173.

[53] TABIBIAN S A, LABBAFI M, ASKARI G H, *et al*. Effect of gliding arc discharge plasma pretreatment on drying kinetic, energy consumption and physico-chemical properties of saffron (*Crocus sativus* L.)[J]. *J Food Eng*, 2020, **270**: 109766.

[54] BAO T, HAO X, SHISHIR M R I, *et al*. Cold plasma: an emerging pretreatment technology for the drying of jujube slices[J]. *Food Chem*, 2021, **337**: 127783.

[55] TUMMANICHANONT C, PHOUNGCHANDANG S, SRZEDNICKI G. Effects of pretreatment and drying methods on drying characteristics and quality attributes of *Andrographis paniculate*[J]. *J Food Process Preserv*, 2017, **41**(6): e13310.

[56] HUANG D, YANG P, QIN Y, *et al*. Infrared drying characteristics and quality variations of lily bulbs under blanching pretreatment[J]. *J Therm Sci Eng Appl*, 2022, **14**(9): 91005.

[57] WANG H, DUAN X, ZHAO L, *et al*. Effects of different pretreatments on the pore structure of Chinese yam during microwave freeze drying[J]. *Int J Agric Biol Eng*, 2020,

13(4): 232-237.

[58] TAO Y, WANG P, WANG Y, *et al*. Power ultrasound as a pretreatment to convective drying of mulberry (*Morus alba* L.) leaves: impact on drying kinetics and selected quality properties [J]. *Ultrason Sonochem*, 2016, **31**: 310-318.

[59] KAVEH M, NOWACKA M, KHALIFE E, *et al*. Hawthorn drying: an exploration of ultrasound treatment and microwave-hot air drying [J]. *Processes*, 2023, **11**(4): 978.

[60] GONG Y, LI J, LI J, *et al*. Effect of ultrasound-assisted freeze-dried on microstructure, bioactive substances, and antioxidant activity of Flos Sophorae Immaturus [J]. *Food Biosci*, 2022, **49**: 101913.

[61] ZHAO Y, WANG W, ZHENG B, *et al*. Mathematical modeling and influence of ultrasonic pretreatment on microwave vacuum drying kinetics of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seeds [J]. *Drying Technol*, 2017, **35**(5): 553-563.

[62] ABBASPOUR-GILANDEH Y, KAVEH M, JAHANBAKHSHI A. The effect of microwave and convective dryer with ultrasound pre-treatment on drying and quality properties of walnut kernel [J]. *J Food Process Preserv*, 2019, **43**(11): e14178.

[63] DERMESONLOUOGLOU E, CHALKIA A, TAOUKIS P. Application of osmotic dehydration to improve the quality of dried goji berry [J]. *J Food Eng*, 2018, **232**: 36-43.

[64] 欧阳华峰. 高压脉冲电场预处理对淮山微波真空干燥的影响 [D]. 长沙 : 湖南农业大学硕士学位论文 , 2022.

[65] ALAM M D R, LYNG J G, FRONTUTO D, *et al*. Effect of pulsed electric field pretreatment on drying kinetics, color, and texture of parsnip and carrot [J]. *J Food Sci*, 2018, **83**(8): 2159-2166.

[66] KHUDYAKOV D A, SHORSTKII I A, ULYANENKO E E, *et al*. Influences of cold atmospheric plasma pretreatment on drying kinetics, structural, fractional and chemical characteristics of tobacco leaves [J]. *Drying Technol*, 2022, **40**(15): 3285-3291.

[67] 蒋　兰 , 杨　毅. 超声对枸杞表皮蜡质的影响 [J]. 食品工业 , 2018, **39**(12): 201-203.

[68] ZHANG Q, WAN F, YUE Y, *et al*. Study on ultrasonic far-infrared radiation drying and quality characteristics of wolfberry (*Lycium barbarum* L.) under different pretreatments [J]. *Molecules*, 2023, **28**(4): 1732.

[69] 李宁宁 , 李丝雨 , 刘国秀 , 等. 基于道地属性的中药材产地初加工规范标准构建探讨 [J]. 中国现代中药 , 2022, **24**(4): 559-563.

[70] 熊艺芬. 中药材产地加工与炮制一体化技术分析 [J]. 科技创新与应用 , 2021, (5): 140-142.

[71] AN N, ZHAO S, LI D, *et al*. Hot-air flow rolling dry-blanching pretreatment improves the drying quality of acanthopanax sessiliflorus by increasing the drying rate and inactivating enzymes [J]. *Foods*, 2022, **11**(20): 3186.

[72] 何　佳 , 金　艳 , 赵玉洋 , 等. 有毒中草药炮制减毒方法研究进展 [J]. 中国药物警戒 , 2023, **20**(9): 1064-1070.

[73] ROSTAMI G Z, SHARIFIAN F, RAHIMI A, *et al*. Influence of high wave sound pretreatment on drying quality parameters of Echinacea root with infrared drying [J]. *J Sci Food Agric*, 2022, **102**(5): 2153-2164.

[74] 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 Sci Emerging Technol*, 2021, **67**: 102592.

[75] XU H, WU M, ZHANG X, *et al*. Application of blanching pretreatment in herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall.) flower processing: improved drying efficiency, enriched volatile profile and increased phytochemical content [J]. *IInd Crops Prod*, 2022, **188**: 115663.

[76] THAMKAEW G, SJÖHOLM I, GALINDO F G. A review of drying methods for improving the quality of dried herbs [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2021, **61**(11): 1763-1786.

[77] 范天慈 , 窦志英 , 李　捷 , 等. 不同干燥方式对中药成分影响的研究进展 [J]. 中国现代中药 , 2021, **23**(11): 2017-2024.

[78] DENG Y, LAI C, ZHANG Y, *et al*. Effects of pretreatment methods on the physicochemical properties of dried longan (*Dimocarpus longan* Lour.) pulps [J]. *J Food Sci*, 2023, **1**: 12-19.

[79] 曹依敏 , 周　恒 , 兰　岚 , 等. 超高效液相色谱 - 四极杆 / 静电场轨道阱高分辨质谱法快速测定 3 种含生物碱类中药材中 193 种农药残留 [J]. 农药学学报 , 2022, **24**(4): 859-871.

[80] AI Z, LIN Y, XIE Y, *et al*. Effect of high-humidity hot air impingement steaming on *Cistanche deserticola* slices: drying characteristics, weight loss, microstructure, color, and active components [J]. *Front Nutr*, 2022, **9**: 824822.

[81] 喻　芬 , 万　娜 , 李远辉 , 等. 中药材干燥过程中的理化性质变化规律与机制分析 [J]. 中草药 , 2021, **52**(7): 2144-2153.