

新技术及装备在中药丸剂现代制造中的应用研究

李健平

广州白云山敬修堂药业股份有限公司

摘要：丸剂作为中药传统制剂的重要剂型，占据了所有中成药品种的约1/4，是现有中成药剂型中不可或缺的一部分。为了全面提升丸剂的整体质量，减少丸剂生产过程中对人工操作的依赖，必须借助中药现代化和智能化的发展趋势，不断革新其关键工艺设备。本文主要总结了中药丸剂从粉碎、灭菌、合坨、成型到干燥过程中的关键设备及其操作流程，并对这些设备的工作原理以及新设备、新技术的应用进行了详细总结和阐述。同时，本文还展望了中药丸剂多单元联动制造模式的应用，旨在为中药丸剂全面实现多单元联动制造的研究提供参考。

关键词：中药丸剂；中药现代化；智能设备；多单元联动制造

1 引言

丸剂作为中药传统制剂的重要剂型，在中药使用类别中占比约为25%，在中药应用中占据着举足轻重的地位。中药丸剂具有显著的用药优势，主要体现在滴丸具有速效和缓释两种类型的剂型。例如，复方丹参滴丸的速效功能，相较于复方丹参片的释放效果更佳；缓释氯霉素控释眼用滴丸则具有良好的缓释作用，在中成药中应用广泛^[1]。但是，随着设备技术的快速发展，中药的传统工艺和现代化设备之间的匹配程度存在显著差异，中药产业的自动化程度明显滞后，已无法满足中药快速发展的现代化需求。中药丸剂包括蜜丸、糊丸、浓缩丸、蜡丸、水丸、水蜜丸、浓缩丸、滴丸等多种类型，其制法工艺相对复杂，一般需要定制特定设备以实现自动化，但难度较大。因此，目前中药丸剂制备的自动化水平较低，过程控制能力也未能达到中药现代化发展的要求^[2]。《工

业大数据发展指导意见（征求意见稿 2019）》中也提出了对中药现代化进程的发展建议，鼓励中药产业走向自动化、智能化，提高中药自动化生产控制水平，减少对人工经验的依赖。目前，大中型中药企业已在中药生产中投入了智能化产线，以康缘药业、天士力等为代表的中药智能化设施已初显成效^[3]。

2 丸剂的生产工艺过程及常用设备

中药丸剂包括蜜丸、糊丸、浓缩丸、蜡丸、水丸、水蜜丸、浓缩丸以及滴丸等多种类型。丸剂的制备工艺一般涉及中药饮片及其细粉或提取物与辅料的混合。《五十二病方》中对丸剂的描述为“丸者，缓也”，表明丸剂传统上被视为缓释型制剂。但是，随着科技的发展，特别是滴丸制剂工艺的出现，丸剂的功能已扩展至包括缓释和速释两

大类，其应用范围亦逐步扩大^[4]。中药丸剂的工艺流程包括原材料制备、灭菌、合坨、成型和干燥。由于流程对人工操作依赖性较高，将整个工艺流程通过智能化设备连接起来面临较大挑战。目前，大约80%的生产仍使用传统设备，导致批次间质量差异显著^[5]。通过引入现代化、智能化制造设备，可以提升中药丸剂生产的现代化水平，并全面提升产品质量。

2.1 粉碎

中药丸剂制备工艺的第一步是获取相应的中药饮片的细粉。这一步骤通过使用专门的粉碎设备对中药饮片进行粉碎来实现。粉碎的原理是通过机械力破坏中药饮片的内聚力，将大块的中草药饮片粉碎至适宜细度的原料。如果粉碎过粗，丸药将难以成型；而粉碎过细，则可能导致丸剂溶解度超出限制^[6-7]。从工艺角度考虑，蜜丸的制备过程中包含合坨步骤。若药物的粉碎粒度过细，会增加对蜂蜜水分的吸

附,导致蜜丸硬度增加,从而影响丸剂的成形性^[8]。从用药安全角度出发,过度粉碎中药材虽然能增加有效成分的溶出,但同时也会增加毒性成分和无效成分的释放,特别是对于含有毒性的药材,粉碎细度的准确性尤为重要。因此,在丸剂原料制备中,选择合适的粉碎工艺和设备是至关重要的^[9]。

2.1.1 粉碎工艺及对应的设备使用情况

中药材成分复杂,其粉碎过程因成分差异而表现出不同的特性。例如,熟地、枸杞、山茱萸等粘性较强的药材,在粉碎时一般选用混合粉碎方法。对于没药、阿胶等树脂类饮片,则倾向于使用低温粉碎技术。非粘性物料则采用常规粉碎方法,以达到指定的细度的要求^[10]。不同的粉碎技术需要配合相应的粉碎设备,目前生产中常用的粉碎技术包括干法粉碎、低温粉碎和超微粉碎,相应的设备一般包括万能粉碎机、低温粉碎机和超微粉碎机。

2.1.1.1 干法粉碎常用设备

在进行中药饮片的干法粉碎过程中,必须确保材料充分干燥以实现有效的粉碎。如果材料的水分含量未能达到粉碎所需的标准,则必须先进行适当的干燥处理,之后方可进行粉碎。中药饮片是否适合采用干法粉碎,不仅取决于其水分含量,还与饮片本身的特性紧密相关。不同特性的饮片需要选择不同的粉碎方式,例如单独粉碎或混合粉碎等^[11]。干法粉碎设备通常采用机械冲击式粉碎原理,即通过水平或垂直轴高速旋转的回转子对物料进行敲击或撞击。在转子与物料、物料与物料之间的相互作用下,物料被破碎至所需的细度。干法粉碎以其设备运行稳定、可连续粉碎、粉碎比大的特点,适用于各种中药饮片的粉碎。这种方法特别适用于中等硬度或更硬的药材。常见的干法粉碎设备包括万能粉碎机^[12],该设备配备活动

齿盘和固定齿盘,物料在两个齿盘之间运动,通过物料间的相互撞击和与齿盘的摩擦,最终实现物料的粉碎并达到所需的细度。符合细度要求的物料经过相应目数的筛网进入物料收集部分,而不符合细度要求的物料则继续被粉碎,直至满足标准。根据不同的细度要求,可以安装不同目数的筛网。目前市场上的万能粉碎机经过不断改进,已经克服了以往设备内壁粗糙、易积粉的问题,满足 GMP 生产需求,并已经广泛应用于药品、食品、化工等领域^[13]。新型设备的研发和应用也取得了一定的进展,游义富^[14]等人研究了一种中药冲压研磨机,该设备通过冲压研磨技术实现了药材的粉碎,目标是获得粒径更小的中药材细粉。与传统的万能粉碎设备相比,冲压研磨机具有将饮片粉碎至更小粒径的优势。

2.1.1.2 低温粉碎常用设备

对于中药饮片,在常温下进行粉碎对饮片的质量要求较高,导致许多药材无法进行常温粉碎,从而限制了其使用范围。因此,开发适用于非常温粉碎饮片设备变得至关重要。近年来,设备制造商为了在低温条件下实现饮片的粉碎效果,研发了低温粉碎设备,并将冷冻技术等应用于粉碎机械中,逐步实现了粉碎过程中的实时降温。或者,通过快速将待粉碎物料降温至脆化温度或低于脆化温度,以实现对饮片的有效粉碎。这种粉碎方式已被中药企业广泛应用于饮片的粉碎过程中^[15]。低温粉碎技术的优势不仅在于解决了部分中药饮片无法在常温下粉碎的难题,更重要的是它在粉碎过程中确保了产品的质量。许多中药企业购置了低温粉碎设备,用于粉碎树脂类药材,这不仅满足了对粉碎细度的要求,还缩短了生产时间并提高了收率。市场上常见的低温粉碎设备能够将粉碎温度降至 $< 10^{\circ}\text{C}$,满足

了大多数饮片的低温粉碎需求。粉碎后的物料粒度可达到 $100 \sim 1000$ 目,与干法粉碎机相比,显著减少了人员停机的频率,确保了产品质量的同时,生产效率也得到了显著提升^[16]。

2.1.1.3 新型粉碎设备

虽然万能粉碎和低温粉碎能够满足大部分中药饮片粉碎的细度要求,但对那些细度要求更为严格的饮片,超微粉碎技术^[17]出现之前并没有得到充分解决。自从超微粉碎技术应用于中药领域,它实现了将中药饮片粉碎至细胞水平,达到纳米级或微米级。与万能粉碎和低温粉碎相比,超微粉碎技术的主要优势在于能将粉碎粒径从 $75\text{ }\mu\text{m}$ 提高至 $<48\text{ }\mu\text{m}$,显著提高了药物有效成分的释放,很大程度上提高了药物有效成分的溶出度,改善效果显著。

2.2 灭菌

在中药丸剂生产中,使用中药原粉直接入药时,会面临微生物污染的问题。由于中药材生长环境的限制,即使经过清洗和干燥等处理,中药材仍然可能含有较高水平的微生物^[18]。中药丸剂的微生物控制不仅和饮片原粉入药有关,还与丸剂的生产工艺有一定的相关性。在丸剂生产过程中,会使用蜂蜜等成分,导致中间产品含糖量高,而过长的生产时间和存储时间也会增加微生物风险。因此,在丸剂生产中进行必要的灭菌操作以保证丸剂质量是至关重要的。

灭菌操作包括高温、辐射等多种方式。无论采用哪种灭菌方式,最终目标都是确保产品质量,保证灭菌处理后的丸药在安全性、有效性、质量稳定性方面无显著影响。中药饮片灭菌的方向和原则是在不影响药效的前提下实现灭菌效果。因此,在进行灭菌研究时,会开发相应的指纹图谱、特征图谱等检查手段,通过对比不同灭菌条件下饮片有效成分的变化,制

定相应的灭菌工艺。目前,企业中常用于控制中药饮片卫生的方法包括干热灭菌、湿法灭菌、辐照灭菌、微波灭菌等。

2.2.1 干热灭菌的设备现状

干热灭菌通过高温杀灭微生物的原理来达到灭菌效果。典型的干热灭菌设备由预热区、灭菌区和冷却区组成^[19]。在使用干热灭菌设备对中药饮片进行灭菌的过程中,关键阶段在于高温处理阶段。此阶段通过高温引发细胞成分的非特异性氧化反应,导致细胞成分破坏,核糖核酸受损,以及细胞膜损伤,最终致使细胞死亡。高温灭菌的优势在于它对微生物的有效杀灭能力,但由于温度可高达120℃以上,对于热敏感成分的保护成为必须考虑的问题。许多企业在采用干热灭菌时,由于温度限制,发现许多产品无法达到预期的灭菌效果,例如甘草中的甘草酸和甘草酸铵等。因此,开发适用于热敏性饮片的灭菌设备显得尤为关键。

干热灭菌的效果不仅取决于灭菌温度,还受到物料在灭菌设备中放置方式的影响。高艳红^[20]等人在使用干热灭菌设备对黄芪药材进行灭菌效果研究时,考察了药材在灭菌柜中的摆放方式和灭菌温度。通过对比分析发现,当物料厚度为19 mm,灭菌温度设定为113℃、灭菌时间为5.1 h的时候,可以有效地达到预期的灭菌效果。

2.2.2 湿热灭菌的设备现状

在中药企业中,脉动灭菌柜是常用的药材湿热灭菌设备。该设备主要通过流通蒸汽作为介质对药材进行灭菌。流通蒸汽的特点是潜热大、穿透力强,能够使蛋白质变性或凝固,从而有效杀灭微生物。尽管流通蒸汽灭菌方式相比干热灭菌能降低温度,但其改善效果并不总是理想,多数情况下仍需设定约105℃的温度以确保微生物被有效杀灭。孙艳^[21]的研究采用湿热灭菌工艺对桔梗生药粉进行灭菌,

发现最佳灭菌条件为灭菌温度103℃,干燥温度76℃,灭菌时间35 min。

2.2.3 辐照灭菌的设备现状

辐照灭菌技术^[22]可以解决湿热灭菌和干热灭菌中温度对药材中有效成分可能产生的负面影响。该技术使用电离辐射(主要是指60Co- γ 射线),对病原体细胞核进行作用,使其断裂和破坏,从而实现灭菌目的。对于热敏感的中药材而言,辐照灭菌具有显著的吸引力,因为它不仅可以保护有效成分不被破坏,还能确保达到彻底的灭菌效果。此外,辐照灭菌的另外一个优势是射线穿透力强,即使在包装完好的情况下也能实现灭菌。毛腾霄^[23]等人采用60Co- γ 射线辐照灭菌对牡丹进行灭菌研究,结果显示牡丹皮的灭菌效果显著,且有效成分未受影响。尽管辐照灭菌具有诸多优点,但在中药企业中的应用仍然较少,这与当前对药品安全风险意识的增强密切相关。药品安全不仅涉及药品本身的安全性,还应考虑工艺过程中可能带来的安全风险。辐照后药品中可能残留的射线对身体的潜在伤害是难以预测的,因此许多企业正致力于探索新的技术和方法,以实现热敏性药材的安全灭菌。

2.2.4 新型灭菌设备

高温瞬时灭菌技术的推出,实现了对热敏性药材进行有效灭菌的需求。该技术具有灭菌时间短、灭菌效率高、能耗低的优势,在中药企业中已展现出显著的应用效果^[24],如济川药业等。在对热敏性中药材进行高温瞬时灭菌的过程中,温度可瞬时高至200℃以上,且与高温接触的时间一般不超过10 s。微生物体内的水分会迅速沸腾并爆裂,从而实现灭菌。因为高温瞬时灭菌不存在异物残留问题,并且能够确保有效的灭菌效果,研究显示,在理想的灭菌条件下,药材受热时间仅需0.2 s即可瞬间杀灭微生物。

2.3 合坨及影响合坨的主要因素、现代设备的应用

对于塑制法生产的丸剂(蜜丸、糊丸、蜡丸、浓缩丸、水蜜丸)来讲,合坨是一个关键工序。若合坨工艺控制不当,将严重影响丸剂的稳定性。传统上,合坨工艺依赖于人工操作的经验,缺乏能够指导工艺并确保批次间一致性的表征性参数^[25]。在现代研究中,一些企业采用旋转流变仪对合坨工艺中的蜜量和炼蜜黏度进行监测和表征,这在一定程度上起到了指导作用。李瑶瑶^[26]等人通过采集和统计多批次原辅料属性数据,对黏度、含水量以及混合工艺温度等关键参数进行了分析和确定,其结果有助于实现工艺的稳定性 and 产品质量的批次间一致性。

2.4 成型及其主要影响因素、现代设备的应用

丸剂一般以圆形为主,其成型方法主要有挤压和滚压两种。无论是采用哪种方法,目标都是确保丸剂的大小一致、表面圆润光滑、质地滋润细腻、色泽均匀。这些标准的达成不仅与成型工艺相关,更与挤压或滚压前物料的特性有关。研究显示,药粉的粒度是影响丸粒成型的关键因素;药粉过粗会导致丸条塑性差,过细则会影响成型效果。为了更好地解决成型问题,必须对成型前的物料进行严格的质量控制,保证物料批间质量的一致性至关重要。近红外光谱技术在质量控制方面展现了显著优势。田莹^[27]等人以银杏叶滴丸料液的混合过程为研究对象,建立了一种银杏叶滴丸料液混合过程的近红外光谱技术在线监测方法,确保了丸剂质量的一致性,并降低了成型工艺因批间生产调整而产生的难度。

2.5 干燥及其主要影响因素、现代设备的应用

丸剂生产的最后阶段是干燥,目

的是去除丸剂中的水分,保证丸剂在存储期间的质量稳定。丸剂干燥过程中的工艺参数对丸剂质量有显著影响,必须综合考虑存储条件和干燥参数,如温度、时间等,以确保水分被有效去除,同时不损害丸剂的内在质量和外观。目前,药企常用的干燥方法包括鼓风干燥、真空干燥、微波干燥等,这些方法虽然使用的介质不同,但共同的目标是在不影响产品质量的前提下,有效去除水分^[28]。现代干燥设备已经能够实现精确的温度控制。耿智化^[29]等人采用控温控湿技术研究了热风干燥工艺在沙棘干燥中的应用,结果显示设备的控温能力出色,能有效保证干燥后沙棘的品质。智能化制造模式通过在设备端集成相应的软件控制系统,实现实时调节。研究表明,数值模拟可有效缩短丸剂干燥的研发周期,并在降低成本,提高效率以及产品批间质量控制方面具有显著优势。

3 中药丸剂多单元联动制造模式

中医药战略发展在十几年前就已经被提出,旨在推动中药行业设备智能化的快速发展,促进中药企业的转型升级。截至目前,多数大中型中药企业都已开展了相应的智能化、数字化、网络化等研究,受限于设备技术及资金的限制,全联动的智能制造在实力较强的中药企业应用较多,而多数企业仍旧应用模块化的自动化技术。传统的丸剂生产设备多为拼接式、间断式的生产模式,这种模式在成本控制和产品质量控制方面不利于达到理想的效果,因为该类型的模式对人员的依赖性较强,产品存在多次转运,且工艺参数难以在批次间统一。因此,现代化生产模式的发展对丸剂的质量和生成本控制起到了重要的作用。

3.1 多单元联动制造过程关键技术

建立丸剂的多单元联动制造的前

提是对丸剂的生产工艺流程有明确的分析,并对现有设备及拟定使用的设备有清晰的认知。通过分析构建过程控制的关键参数、关键质量指标,通过数值化技术实现过程参数和质量结果的可视化,清晰直观地了解丸剂生产过程及可能出现的异常情况,及时有效地进行干预和解决。未来的设备将基于丸剂生产过程存在的问题,以技术革新为前提,不断突破丸剂制造过程中的技术瓶颈,推动中药丸剂生产设备的快速升级^[30]。

3.2 多单元联动制造设备实施方式实现中药丸剂的智能生产

企业若想实现智能生产,一般是基于现有设备进行考量,通过升级和智能化改造现有设备来实现联动生产。当然,也有企业选择专门定制智能化生产线以实现产品的智能制造。北京同仁堂就是基于现有设备进行技术改造的典型例子,它联动了多种创新技术,建成了国内领先的从药品混粉到丸剂成型的一整套联动设备。这不仅避免了粉尘飞扬导致的环境污染问题,还极大地提高了生产效率。新建生产线的企业也不在少数,它们通常以中药提取为主,通过搭建传感器技术和检测技术,实现中药提取的精准化控制。臧振中^[31]等人研发了一种中药连续制造方法及其系统设备,应用了在线监测技术及传感技术,通过输送支路将药液从提取罐输送到缓存罐,为后续加工提供药液,实现了连续不停机的工作,为多单元联动制造提供了指导意义。

3.3 多单元联动制造面临的挑战

多单元联动制造在中药企业中的发展受到两方面的制约。一方面,开发设备的人员缺乏中药生产的基础知识,对中药生产工艺过程的难点以及与设备匹配程度的风险把控不够精准。另一方面,中药工艺研究人员在设备原理及制造设计方面无法提供更佳的

建议。因此,若要实现多单元联动制造在中药企业中的快速发展,就需要药学、工程、计算机等多个领域的研究人员的支持与配合。未来,在中药智能设备的升级过程中,应不断革新现有技术,推陈出新,推动中药制药设备全面朝向自动化、智能化方向发展,培养交叉复合型学科人才,致力于全面实现中药丸剂多单元联动制造模式,推动中医药领域的高质量发展。

4 结语

本文对中药丸剂生产制造的常用设备和新型设备进行了汇总分析,总结了粉碎、灭菌、合坨、成型、干燥等关键工艺单元目前存在的问题以及技术上的不足。同时,阐述了最新工艺技术在丸剂生产过程中的应用前景,并展望了中药丸剂多单元联动制造模式的发展前景,为中药智能制造提供了更明确的发展方向。

参考文献:

- [1] 刘立伟,董毅智,李玉坤,等.传统丸剂历史沿革,科学内涵及丸剂二次开发的发展构想[J].北京中医药大学学报,2022(045-006).
- [2] 秦凤元.基于3D打印技术制备中药大蜜丸的可行性研究[D].北京中医药大学,2023.
- [3] 薛爱乐,田文秀,李文杰,等.含热不稳定成分的中药临方浓缩水丸制备工艺选择研究[J].中国中药杂志,2024,49(3): 618-624.
- [4] 姜淑君,邹欣,董慧,等.黄连丸剂,黄连汤剂及效应物小檗碱对2型糖尿病大鼠糖脂代谢的影响[J].中医药导报,2023,29(11): 11-17.
- [5] 王翔,王学成,朱雯婷,等.新技术及装备在中药丸剂现代制造中的应用与展望[J].中国中药杂志,2024(7).
- [6] 雷成康,高琳,司马磊,等.不同

前处理过程的紫苏子配方颗粒生产工艺比较[J]. 中国现代应用药学, 2022.

- [7] 刘立伟.《十便良方》丸剂特色研究[D]. 中国中医科学院, 2023.
- [8] 冯欣, 徐冰, 杜菁, 等.蜜丸合坨过程物理特性参数表征方法研究[J]. 世界科学技术: 中医药现代化, 2015(1): 6.DOI: 10.11842/wst.2015.01.050.
- [9] 顾春艳.探究中药细胞级粉碎技术在药剂中的应用价值[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)医药卫生, 2023.
- [10] 岳彩黎.中药材粉碎分散技术研究进展[J]. 中国粉体工业, 2021, 000(004): P.22-25.
- [11] 于成.玉米乙醇生产工艺中的几种干法粉碎技术方案分析[J]. 酿酒, 2021, 48(4): 5.DOI: 10.3969/j.issn.1002-8110.2021.04.032.
- [12] 耐驰.最新干法工艺-突破了传统干法粉碎无法企及的细度极限[J]. 佛山陶瓷, 2014(4): 2.DOI: CNKI: SUN: FSTC.0.2014-04-016.
- [13] 黄一洪, 唐璟瑶, 袁建敏.2种实验室用粉碎机粉碎玉米对其水分测定的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2022, 58(12): 3.
- [14] 游义富, 吴泳达, 雷发荣, 等.一种中药冲压研磨机的设计与研究[J]. 广西农业机械化, 2016(5): 3.DOI: CNKI: SUN: GXNH.0.2016-05-016.
- [15] 李宝磊, 余腾斐, 李言郡, 等.真空冷冻干燥技术在食品和中药行业的应用[J]. 饮料工业, 2019, 22(6): 4.DOI: CNKI: SUN: RYLG.0.2019-06-022.
- [16] 姜巍. 冷冻粉碎技术的特点及在食品工业中的应用[J]. 现代化农业, 2016(11): 2.DOI: CNKI: SUN: XDHY.0.2016-11-019.

- [17] 罗刚, 陈立庭, 周晶. 超微粉碎技术在中药研究中的应用[J]. 现代药物与临床, 2011.DOI: CNKI: SUN: GWZW.0.2011-02-009.
- [18] 徐莲英, 侯世祥. 中药制药工艺技术解析[J]. 人民卫生出版社, 2003.
- [19] 周建华, 赵春晖, 赵春燕. 干热灭菌及其在制药工业中的应用[J]. 安徽医药, 2004, 8(4): 2.DOI: 10.3969/j.issn.1009-6469.2004.04.045.
- [20] 高艳红, 曹玲, 崔琳琳, 等. 黄芪饮片不同灭菌方式考察及最佳灭菌工艺研究[J]. 中国药师, 2024, 27(07): 1134-1141.
- [21] 孙艳, 刘源慧, 郭田甜, 等. 桔梗生药粉湿热灭菌工艺优化及不同灭菌方法对其质量的影响[J]. 中成药, 2024, 46(02): 418-423.
- [22] 姜替, 于敏, 焦连庆, 等. 多维度评价电子束辐照灭菌对白花蛇舌草质量的影响[J]. 核农学报, 2024, 38(10): 1922-1929.
- [23] 毛腾霄, 黄春燕, 伍欣然, 等. 60Co- γ 射线辐照灭菌对牡丹皮质量影响的多元评价研究[J]. 核农学报, 2024, 38(04): 685-692.
- [24] 李俊莹, 许倩, 秦绍刚, 等. 高温瞬时灭菌对开心散有效成分含量及微生物学指标的影响[J]. 中国现代中药, 2024, 26(1): 168-175.
- [25] 彭丽琪, 姚昆鹏, 蔡虎志, 等. 基于网络药理学和分子对接的通络化浊丸治疗高脂血症作用机制研究[J]. 亚太传统医药, 2023,19(11): 185-194.
- [26] 李瑶瑶, 张凯旋, 熊皓舒, 等. 基于质量源于设计的复方丹参滴丸混合工艺前馈控制方法研究[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(11): 2816-2823.DOI: 10.19540/j.cnki.

cjcmm.20210125.301.

- [27] 田莹, 赵洁, 瞿海斌. 基于近红外光谱技术的银杏叶滴丸熔融物料混合过程监测方法的开发[J]. 中草药, 2023, 54(13): 4137-4143.DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2023.13.007.
- [28] 黄纪民, 王漆兰, 邱展鸿, 等. 干燥方式对黄精片干燥特性和微观结构的影响[J]. 广西科学院学报, 2023, 39(4): 445-451.
- [29] 耿智化, 李孟卿, 朱丽春, 等. 基于控温控湿的沙棘红外联合热风干燥均匀性与工艺[J]. 农业工程学报, 2024, 40(6): 120.DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202306120.
- [30] 李孟卿, 张小强, 朱丽春, 等. 基于数值模拟的红枣片不同干燥方式热质传递仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(6): 50.DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307126.
- [31] 顾海鸥, 王志斌, 张朝华, 等. 中药丸剂生产自动化, 智能化关键技术研究与应用[J]. 创新世界周刊, 2023(4): 69-72.