助干剂在中药浸膏干燥中的应用

高 欢[1]，万 琴[1]，李远辉[1,2,3]*，杨 明[1,2]，齐娅汝[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. 创新药物与高效节能降耗制药设备国家重点实验室，江西南昌 330004；3. 广东省新黄埔中医药联合创新研究院，广东广州 510030）

摘要：中药浸膏的干燥是制备现代中药固体制剂的重要工序之一。但是，中药浸膏的干燥效率低、能耗高、浸膏粉吸湿性强、流动性差，以及喷雾干燥粘壁等问题较为突出，长期困扰着中药制药行业。添加助干剂是解决以上问题的有效途径，在中药浸膏干燥中有着重要的应用。该文章通过文献调研分析，综述了助干剂在中药浸膏干燥中的作用与主要应用，总结分析了助干剂的助干机制，以期为提高中药浸膏的干燥效率、改善中药浸膏品质提供参考。

关键词：助干剂；中药浸膏；干燥效率；品质；助干机制

中图分类号：R282.4；TQ574^{+}.5　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-8255(2024)04-0475-07

DOI：10.16522/j.cnki.cjph.2024.04.004

Application of Drying Aids in the Drying of Traditional Chinese Medicine Extracts

GAO Huan[1], WAN Qin[1], LI Yuanhui[1,2,3]*, YANG Ming[1,2], QI Yaru[1]*

(*1. Key Lab. of Modern Preparation of Chinese Medicine, Ministry of Education, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004; 2. State Key Lab. of Innovative Drug and Efficient Energy-Saving Pharmaceutical Equipment, Nanchang 330004; 3. Guangdong Xin-Huangpu Joint Innovation Institute of Chinese Medicine, Guangzhou 510030*)

ABSTRACT: One of the crucial steps in preparing a contemporary solid traditional Chinese medicine formulation is drying of the traditional Chinese medicine extracts. However, the drying efficiency of traditional Chinese medicine extract is low, the energy consumption is high, the extract powder has high hygroscopicity and poor fluidity, and prominent problems such as spray drying wall sticking, have plagued the traditional Chinese medicine pharmaceutical industry for a long time. The addition of drying aids is an effective way to solve the above problems and has important applications in the drying of traditional Chinese medicine extracts. This article analyzes and summarizes the role and main applications of drying aids in the drying of traditional Chinese medicine extracts through literature research, and summarizes the drying mechanism of drying aids, in order to provide a reference for improving the drying efficiency and quality of traditional Chinese medicine extracts.

Key Words: drying aid; traditional Chinese medicine extracts; drying efficiency; quality; drying aid mechanism

中药干浸膏由中药材经提取、浓缩、干燥等工序制备而成，是制备中药制剂的重要中间体，其质量的优劣会直接影响制剂的品质及疗效。由于低分子糖、有机酸、黏液质类等成分的存在[1]，中药浸膏往往具有黏性大、透气性差等特性[2]，其干燥效率低，干燥所得浸膏粉吸湿性强、易黏结、成型性差，以及喷雾干燥粘壁等问题十分普遍，已成为困扰中药制药行业的共性难题。

为解决此类问题，常用的方法是加入助干剂[3]。

收稿日期：2023-06-02

基金项目：国家自然科学基金项目(82260768)、江西省主要学科学术和技术带头人培养计划-青年人才项目(20225BCJ23002)、江西中医药大学博士科研启动基金项目(2021BSZR003)、江西省研究生创新专项资金项目(YC2023-S759)

作者简介：高 欢(1997—)，男，硕士研究生，专业方向：中药药剂学。

通信作者：李远辉(1989—)，男，副教授，硕士研究生导师，从事中药制药新技术与新工艺研究。

E-mail：20181016@jxutcm.edu.cn

齐娅汝(1991—)，女，硕士，从事中药制药新技术与新工艺研究。

E-mail：qyyr1203@163.com

助干剂又称干燥助剂，是一类有助于提高中药浸膏干燥效率、提升干膏粉品质、便于干燥过程顺利进行的物质的总称，包括一些表面活性剂、抗结剂、流动剂、赋形剂等[4]。本文通过阐述助干剂的作用、论述助干剂的应用现状、分析总结助干剂的助干机制，以期为提高中药浸膏的干燥效率、改善中药浸膏品质提供思路与方法。

1　助干剂的作用

1.1　改善浸膏粉的吸湿性

中药浸膏组分复杂，大多含有糖类、鞣质、小分子生物碱等极性分子，加之浸膏粉的比表面积大、表面能高、孔隙率大等，导致其临界相对湿度较低、吸湿性较强。吸湿后主要表现为粉体吸收空气中的水分并产生结块、黏连的现象[5]。对于吸湿问题，可通过添加助干剂以显著降低中药浸膏的吸湿性。孙道开等[6]将8种助干剂，即甘露醇、乳糖、β-环糊精、糊精、可溶性淀粉、麦芽糊精DE11-14、阿拉伯胶、交联聚维酮CL-SF，分别添加至中药牛膝的水提液中，再进行喷雾干燥制备浸膏粉体，以探究不同辅料牛膝浸膏粉体表面特征与吸湿性的相关性。结果显示，随着助干剂的加入，喷雾干燥所得浸膏粉体的吸湿性与空白组相比有了非常大的改善，其中以交联聚维酮CL-SF效果较佳。赵樱霞等[7]以中药茯苓提取物为模型药物，通过在茯苓流浸膏中添加微晶纤维素和预胶化淀粉，采用减压、常压、喷雾干燥的方式分别制备空间结构不同的粉体。结果显示，加入辅料后，辅料包裹在浸膏粒子表面，阻碍了水分子向内扩散的通道，有效降低了浸膏粉体的吸湿性。李国玉等[8]选择糊精及微晶纤维素作为固肾止遗双子颗粒干浸膏粉的辅料，结果显示，当糊精与微晶纤维素比例为2∶1时，干膏粉与其混合所得固肾止遗颗粒的吸湿性较低、流动性强、成型率高。

1.2　改善喷雾干燥效果

喷雾干燥因具有成本低、操作简单、干燥效率高、制备产品稳定性好等优点，是目前中药浸膏的常用的干燥方法之一，但也存在干膏收率低、雾化效果差、粘壁等问题。根据文献[1,9—10]调研，添加助干剂可帮助解决这些问题，改善喷雾干燥效果。刘青梅等[9]以杨梅提取物为原料，以麦芽糊精为助干剂，采用喷雾干燥来探究助干剂对产品稳定性与品质的影响。结果显示，相较于未加助干剂时的杨梅提取物喷雾干燥，添加15%的麦芽糊精后，喷干粉的收率提高，细粉的产生显著减少，且所得粉体品质较优。秦永[10]在平卧菊三七汁中添加麦芽糊精后进行喷雾干燥，结果显示在添加30%的麦芽糊精时，喷干过程中所形成的雾滴均匀，且粉末收率较高。段晓颖等[1]通过研究辅料对顿咳颗粒喷雾干燥工艺的影响及优选，认为微粉硅胶、麦芽糊精和糊精3种辅料能显著提高中药浸膏的软化点，对顿咳颗粒得粉率的提高效果显著，是解决顿咳颗粒生产过程防粘壁的理想辅料。

1.3　保护挥发性成分

喷雾干燥能够瞬间完成中药浓缩液干燥，减少物料受热，故有助于保护浸膏中的化学成分。但是，挥发油的稳定性较差，直接喷雾干燥易因挥发和氧化而损失，通常采用适宜的助干剂在喷雾干燥过程中形成包合物以改善其稳定性。助干剂中的壳聚糖是较为新颖的选择之一。蔡鑫君等[11]选用壳聚糖为载体，采用喷雾干燥制备川芎嗪壳聚糖微球。结果显示，以壳聚糖为载体制备的微球表面圆润、包封率较高，且体外释放具有良好的缓释特性。DIMA等[12]采用喷雾干燥法研究了香菜精油在壳聚糖、海藻酸盐、壳聚糖/海藻酸盐、壳聚糖/菊粉中的包埋效果，结果显示，这4种材料均能有效包封香菜精油，保证其有效成分不易损失，且制备的香菜精油微囊具有耐pH和温度变化的特性，并能实现香菜精油的缓慢释放。

1.4　提高干燥效率

中药浸膏干燥普遍存在干燥效率低、干燥时间长、能耗高、干膏品质不佳的问题。添加助干剂可有效解决这些问题，提高干燥效率。韩丽等[13]采用液相分散法向白芷提取液中加入少量微粉硅胶后，无论采用冷冻干燥还是真空干燥，均能提高提取物的干燥速率、粉末流动性和提取物中欧前胡素的含量。王晓林等[14]以双果颗粒剂浸膏为原料，以微晶纤维素为助干剂，比较了不同干燥方式下所需干燥时间、产品性状、总黄酮含量及原花青素的含量。

结果显示，浸膏在加入微晶纤维素后，于60 ℃真空干燥所需时间较短，产品性状较优，总黄酮含量及原花青素的含量较高。根据文献[15]，冻干产物通常呈多孔结构，当干燥温度高于样品玻璃化转变温度(T_g)时，多孔结构会被破坏，发生结构塌陷。因此，通常需加入高T_g的辅料，如麦芽糊精和海藻糖等，提高体系的T_g，进而提高冷冻干燥效率。

2 助干剂的应用现状

2.1 助干剂在喷雾干燥中的应用

目前，喷雾干燥是中药浸膏常用的干燥方式之一。它是将物料提取液在雾化器中迅速雾化成极细的雾滴，并在干燥介质中蒸发多余水分形成干粉的技术，其优点在于干燥效率高且所得粉末均匀，含水量低，然而也存在粘壁、吸湿、结块、细粉过多等问题[16]。因此选择适合的助干剂，可以在喷雾干燥时事半功倍。在助干剂中常见的有麦芽糊精、β-环糊精、阿拉伯胶等，其中较常用的是麦芽糊精。这些常见助干剂的种类及作用如表1所示[17]。赵巧丽等[18]使用麦芽糊精作为助干剂，采用喷雾干燥制备豆乳粉，其分散性、润湿性、堆积密度和溶解度比不添加助干剂所得喷干粉更佳。徐思宁等[19]在秦七风湿方提取液中分别添加适量淀粉、糊精、麦芽糊精为助干剂进行喷雾干燥，结果显示麦芽糊精能显著降低浸膏粉的吸湿性、减轻粘壁现象并提高浸膏粉收率。除麦芽糊精之外，阿拉伯胶作为助干剂的效果也是很好的，因为其具有良好的乳化性，且成分中含有少量蛋白质，此外，其在水溶液中表现出高溶解度和低黏度，有利于喷雾干燥过程[20]。

表1 常见助干剂种类及作用

Tab.1 Types and Functions of Common Drying Aids

助干剂的种类	作用
麦芽糊精	降低物料吸湿性、防粘壁、提高干燥效率、改善粉体结构、提高粉体流动性
β-环糊精	包埋作用、改善浸膏雾化效果、保护物料有效成分、防粘壁、降低物料吸湿性
阿拉伯胶	提高物料溶解性[23]、保护物料有效成分、降低物料吸湿性
可溶性淀粉	降低物料吸湿性、提高粉体流动性、防粘壁
微晶纤维素	降低物料吸湿性、提高粉体流动性、防粘壁、防结块、抑制冰晶生长[24]

相较于单一助干剂的使用，目前许多研究者都更青睐复合助干剂的使用，且效果比单一助干剂更佳。如FERNANDES等[21]就在糖类混合物*Lippia sidoides*提取物的喷雾干燥微胶囊化试验中证明了阿拉伯树胶和麦芽糊精的混合物要比单独使用它们更有效。徐文雅等[22]以新鲜山药为原料，使用麦芽糊精、β-环糊精和阿拉伯胶复合助干剂辅以喷雾干燥，以集粉率和水分含量为标准，探究助干剂对喷雾干燥的影响。结果显示，当麦芽糊精、β-环糊精和阿拉伯胶添加量分别为50.0%、10.0%和1.0%时，形成的复合助干剂对山药的喷雾干燥的效果较好，山药粉集粉率高达36.25%，水分含量为5.49%。

2.2 助干剂在冷冻干燥中的应用

冷冻干燥也称冷冻升华干燥或真空冷冻干燥，是利用冰晶升华原理，先将物料低温冷冻，当温度到共晶点以下时，再在真空环境下进行加热处理，将冰晶水分子升华的过程[25]。冷冻干燥技术能够较好地维持中药的性状与气味，并且能避免热敏性组分的破坏，但存在能耗高、效率低、成本较高等问题。李冠楠等[26]在桑叶提取物中添加适量的麦芽糊精，并进行真空冷冻干燥，结果显示其干燥速率加快，所得冻干呈疏松、多孔、海绵状，且不会发生结构坍缩的现象。

2.3 助干剂在微波干燥中的应用

微波干燥是一种利用微波辐射实现对物料干燥的技术，具有干燥效率高、物料受热均匀、能耗较低等优点，广泛应用于中药浸膏或是枣粉、果蔬粉的干燥[27]。但由于一些中药浸膏黏性较大，易黏结成块而难以干制，助干剂的加入，能够较为显著地改善此类情况[28]。杨芙莲等[29]以红枣汁为原料，以大豆分离蛋白、麦芽糊精、β-环糊精、可溶性淀粉为助干剂对其进行微波干燥。结果显示，在大豆分离蛋白、麦芽糊精、β-环糊精、可溶性淀粉的添加量分别为原料含量的25%、10%、3%、2%时，集粉率、红枣粉感官评价与品质显著提高。高建德等[30]分别添加滑石粉和微晶纤维素对板蓝根提取物进行微波干燥，结果显示二者都对板蓝根提取物粉

体流动性影响较为显著，并且在一定程度上降低了浸膏粉体的吸湿性。

2.4 助干剂在微波真空干燥中的应用

微波真空干燥技术是一种利用微波辐射和真空干燥相结合的干燥方法，可以在低温、低压下快速蒸发物料中的水分，从而实现对物料的干燥。该技术主要包括微波加热、真空干燥、微波加热与真空干燥联合等过程，具有干燥速度快、能耗低、品质好、营养成分保留等优点，广泛应用于食品及中药浸膏的干燥[31]。将助干剂应用在此技术中，对于低T_g的物料及溶解性、分散性较差的物料同样适用。张凯江[32]采用麦芽糊精为助干剂，对平菇提取液进行微波真空干燥，结果显示，随着麦芽糊精添加量的增加，干燥所需时间逐渐缩短，且在添加量为5%时，干燥时间较短。孔晓雪等[33]以麦芽糊精作为赋形剂，对金针菇提取液进行微波真空干燥，结果显示，麦芽糊精能够很好地改善金针菇粉的成型性，在麦芽糊精添加量为7%时，产品得粉率最大，且所得金针菇粉具有良好的流动性与溶解性。

3 助干剂的助干机制

3.1 提高体系的T_g

T_g定义为一种无定型体系从较高黏性的玻璃态向较低黏性的橡胶态转变的温度[34]。大多中药浸膏的糖类、有机酸等低分子量成分含量较高，T_g较低，喷雾干燥过程中易发生粘壁，导致收率下降，可通过添加一些高分子量辅料作为助干剂加以解决[35]。有研究[36]表明，随着麦芽糊精添加量的增加，粉末的粒径逐渐减小，且使得粉末处于玻璃态，物料与助干剂混合体系的T_g也逐渐提高。这些系统的玻璃化转变特性在很大程度上取决于水分含量和其他成分，添加麦芽糖糊精会增加总固体含量并减少蒸发的水量[37—38]。刘慧等[39]通过研究不同葡萄糖当量值(DE值)的麦芽糊精对五味子喷雾干燥的影响，结果显示，在加入麦芽糊精后，五味子喷雾干燥得粉率增加，且喷干粉的含水率降低，T_g升高，流动性增加，T_g值随DE值的减小而增大，DE越小，所得喷干粉就越稳定。HUSSAIN等[40]以阿拉伯胶、明胶和麦芽糖糊精为包封壁材，采用冷冻干燥法对多药配方(PHF)提取物进行微囊化处理，结果显示，这些大分子壁材能显著提高PHF提取物的T_g，进而加快干燥速率及微囊化进程。

3.2 形成包合物

适量的β-环糊精能够提高集粉率，其原因在于β-环糊精具有立体筒状手性疏水性空腔，而在空洞内部结构中有C1、C4、C5形成的疏水区，空洞外侧上端由C6伯羟基构成，下端则由亲水性的C2、C3构成。因此，在其疏水性空腔内可包合各类有机化合物，如低分子糖、有机酸等，从而形成稳定络合物，降低混合体系的黏性，提高了干燥效率及集粉率[41]。唐辉等[42]研究了助干剂对真空冷冻干燥岗稔果粉品质的影响，结果显示，由于β-环糊精的亲水基团分布在外部，可以将大部分水分吸附在外侧，因此水分也易被升华，提高干燥速率，也因其包埋作用，能够对花色苷起保护作用，防止氧化。此外，在本研究“**1.3**”项下中所提及的壳聚糖，其助干机制是壳聚糖分子间氢键使分子链交联，呈3D网络状结构，因此其成膜性较好，且在中性及碱性环境中，结构中的氨基基团呈非离子状，可保证内部包合药物的稳定性[43]。

3.3 形成隔湿层

微粉硅胶、硬脂酸镁等水不溶性辅料，加入物料中进行干燥可使粉体周围形成隔湿层，防止吸湿，因而可减少粘壁现象的出现[39]。但是由于其常受到添加量的限制，所以干燥效果较差，而气相二氧化硅的使用能够大幅降低常用助干剂的用量。蒋艳荣等[44]以气相二氧化硅为助干剂，对馨月舒水提液进行喷雾干燥，结果显示，在喷雾干燥中，气相二氧化硅附在粉体表面形成隔湿层，减少粘壁现象，显著改善了流动性，获得了较多且质量较优的馨月舒粉末。其助干机制在于其表面存在着大量的羟基，可与气相二氧化硅形成氢键，在液态体系中则会形成二氧化硅网络状结构，能够将粉末颗粒稳定其中，因此降低粉末之间的粘连，提高粉末的流动性[45]。

3.4 降低物料的表面张力

相较于上述常用到的助干剂，近年来关于蛋白质类物质作为助干剂的报道也越来越多。蛋白质中

的乳清蛋白因具有良好的乳化性与成膜性，广受食品和医疗行业青睐。AL-MAQTARI等[46]以阿拉伯胶与乳清蛋白、酪蛋白酸钠、大豆蛋白作为壁材对*Pulicaria jaubertii*（PJ）提取物进行冷冻干燥，结果显示，阿拉伯胶与乳清蛋白混合制成的壁材与PJ提取物冷冻干燥的微囊粉得率较高，并且显著提高了PJ提取物的T_g及其微囊粉稳定性。SUHAG等[47]使用浓缩乳清蛋白（占进料溶液固体的26%～34%），与麦芽糊精和阿拉伯胶相比，表现出更高的粉末回收率、更低的堆积密度、更低的内聚指数以及良好的流动性。而乳清蛋白作为助干剂的机制就在于蛋白质是表面活性成分，可优先迁移到空气与水的界面，并降低溶液的表面张力，形成一层非常薄的富含蛋白质的薄膜。这层薄膜可能具有相对较高的T_g，可以保持玻璃状态，以克服颗粒与颗粒之间和颗粒与壁之间的黏性，提高得粉率[48]。

3.5 改善浸膏孔隙结构

在实践中通常采用固体辅料+稠浸膏、药材粉末+稠浸膏的干燥方式，有助于形成多孔结构，起到助干剂的作用，且有助于水分扩散而提高干燥效率。ZHOU等[49]以葛根提取物为原料，并以碳酸氢铵为辅料进行喷雾干燥，制备多孔葛根颗粒，结果显示，碳酸氢铵可以在50 ℃以上直接气化，在与提取物混合喷干的过程中，能够使所得粉体形成多孔结构，加速内部溶剂的蒸发，提高干燥效率。李金枝等[50]采用碳酸氢铵为致孔剂，对金荞麦提取物进行喷雾干燥，结果显示，金荞麦提取物与碳酸氢铵喷雾共处理与原料药相比，孔隙率提升。这是因为碳酸氢铵的蒸发加速了粉体粒子孔隙的形成，进而提高了水分的蒸发的速率，使得干燥时间缩短。

3.6 改变浸膏的水分状态

中药稠浸膏通常自由水占比较低，而不易流动水、结合水的占比较高，需要的干燥活化能较高，不利于干燥去除。可加入助干剂（亲水性），通过与稠浸膏中的水分竞争性结合，提高自由水占比、降低结合水占比，从而提高干燥效率。但目前，在干燥、食品等领域，此类的相关文献资料较少，可借鉴其他领域的相关技术进行应用，如在污泥脱水研究中，常使用表面活性剂，如十六烷基三甲基溴化铵（CTAB）、十二烷基苯磺酸钠（BS-12）、十二烷基硫酸钠（SDS）等来进行污泥脱水。因为表面活性剂的特殊亲水基与疏水基，可降低固/液或液/液界面的表面张力，促进结合水转化为自由水[51]。HONG等[52]添加十二烷基二甲基苄基氯化铵（DDBAC）进行污泥脱水，结果显示，随着DDBAC添加量的增加，污泥中的结合水含量逐渐降低，自由水含量逐渐增加。

4 总结与展望

中药浸膏的干燥，是中药固体制剂成型加工的关键环节之一，助干剂的使用与产品产率和品质息息相关。助干剂的种类选择及使用量的多少，又是浸膏干燥过程中较为关键的步骤之一。助干剂的种类较多，常用的有麦芽糊精、β-环糊精、可溶性淀粉、阿拉伯胶等。它们各有优、缺点，应根据中药浸膏的性质选择适宜的助干剂。助干剂添加量过少，会导致出现干燥不完全、粘壁、以及吸湿等现象；添加量过多则会导致浸膏粉质量变化，以及复水性及集粉率下降。因此，除了了解并掌握中药浸膏的性质以及干燥工艺的特点外，也要熟悉助干剂的特性与助干机制。这对于合理选择、使用助干剂，改善干燥效果、提升浸膏品质有很大的帮助。

目前，关于中药浸膏的药效影响评估的研究资料较多，但在其中添加的助干剂对于药效是否有影响、如何影响还尚待研究。在未来的研究中，需加强助干剂对药效的影响评估。随着科技的不断发展，干燥技术与设备的开发也在不断地创新进步，但同时，在绿色、环保、健康的基本要求下，对于中药浸膏的品质要求也越来越严格，选用或开发添加量少、且不影响药物体内过程或提高药物有效性与安全性的助干剂，也是未来值得关注的。

参考文献：

[1] 段晓颖, 彭 云, 刘晓龙, 等. 辅料对顿咳颗粒喷雾干燥工艺的影响及优选[J]. 中华中医药杂志, 2019, **34**(7): 3228-3231.

[2] 詹娟娟, 伍振峰, 尚 悦, 等. 中药浸膏干燥工艺现状及存

在的问题分析[J]. 中草药, 2017, **48**(12): 2365-2370.

[3] 李远辉, 伍振峰, 杨　明, 等. 制备工艺对中药浸膏物理性质影响的研究现状[J]. 中国医药工业杂志, 2016, **47**(9): 1143-1150.

[4] SAMBORSKA K. Powdered honey-drying methods and parameters, types of carriers and drying aids, physicochemical properties and storage stability [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2019, **88**: 133-142.

[5] 修宇航, 韩子璇, 张　强, 等. 中药浸膏粉的吸湿性分析及防潮措施[J]. 广州化工, 2022, **50**(23): 21-23.

[6] 孙道开, 范益芹. 添加不同辅料牛膝浸膏粉体表面特征与吸湿性的相关性[J]. 中成药, 2018, **40**(2): 326-330.

[7] 赵樱霞, 熊志伟, 胡晓欣, 等. 基于中药提取物粒子空间构造性质与吸湿性关联的抗吸湿技术研究[J]. 中国中药杂志, 2021, **46**(23): 6020-6027.

[8] 李国玉, 梁昊都, 管　彤, 等. 固肾止遗双子颗粒的制备工艺研究[J]. 中南药学, 2023, **21**(3): 700-705.

[9] 刘青梅, 孙金才, 杨性民, 等. 杨梅汁速溶固体饮料的加工工艺研究[J]. 食品工业科技, 2005, (4): 111-113.

[10] 秦　永. 平卧菊三七二聚绿原酸的提取纯化、消化和代谢及其固体饮料开发[D]. 南昌: 南昌大学硕士学位论文, 2017.

[11] 蔡鑫君, 程巧鸳, 赵　宁, 等. 喷雾干燥法制备川芎嗪壳聚糖微球的研究[J]. 中草药, 2008, **39**(5): 679-682.

[12] DIMA C, PATRASCU L, CANTARAGIU A, *et al*. The kinetics of the swelling process and the release mechanisms of *Coriandrum sativum* L. essential oil from chitosan/alginate/inulin microcapsules [J]. *Food Chem*, 2016, **195**: 39-48.

[13] 韩　丽, 张定堃, 林俊芝, 等. 适宜中药特性的粉体改性技术方法研究[J]. 中草药, 2013, **44**(23): 3253-3259.

[14] 王晓林, 戴鹏莹, 钟方丽, 等. 双果颗粒剂的提取工艺及定量分析[J]. 食品工业, 2020, **41**(7): 65-69.

[15] 曹秋芳, 饶小勇, 张　尧, 等. 玻璃化转变现象在药剂学中的应用研究进展[J]. 药学学报, 2021, **56**(5): 1301-1313.

[16] 张　芳, 韩　丽, 张定堃, 等. 乳糖微粉研磨改性降低白芷提取物吸湿性的工艺筛选及机制探究[J]. 中国实验方剂学杂志, 2015, **21**(3): 6-9.

[17] 郑　唯, 朱　丹, 牛广财, 等. 助干剂对毛酸浆喷雾干燥粉集粉率及性质的影响[J]. 食品工业, 2018, **39**(8): 144-147.

[18] 赵巧丽, 王　丽, 廖振林, 等. 低抗营养因子豆乳粉的喷雾干燥工艺研究[J]. 现代食品科技, 2017, **33**(12): 184-190.

[19] 徐思宁, 唐志书, 刘红波, 等. 基于QbD理念建立秦七风湿方提取液喷雾干燥工艺及其浸膏粉理化性质[J]. 中成药, 2021, **43**(1): 168-173.

[20] FRASCARELI E C, SILVA V M, TONON R V, *et al*. Effect of process conditions on the microencapsulation of coffee oil by spray drying [J]. *Food Bioprod Process*, 2012, **90**(3): 413-424.

[21] FERNANDES L P, CANDIDO R C, OLIVEIRA W P. Spray drying microencapsulation of *Lippia sidoides* extracts in carbohydrate blends [J]. *Food Bioprod Process*, 2012, **90**(3): 425-432.

[22] 徐文雅, 于倩楠, 张　凡, 等. 助干剂对山药喷雾干燥工艺的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, **43**(12): 96-101.

[23] 于倩楠. 山药粉喷雾干燥加工关键技术研究[D]. 河北: 河北农业大学硕士学位论文, 2018.

[24] 陈珍珍, 刘爱国, 李晓敏, 等. 微晶纤维素的特性及其在食品工业中的应用[J]. 食品工业科技, 2014, **35**(4): 380-383.

[25] 刘松雨, 黄勤挽, 吴纯洁, 等. 冷冻干燥技术在中药领域的研究进展[J]. 中草药, 2022, **53**(3): 930-936.

[26] 李冠楠, 夏雪娟, 赵欢欢, 等. 桑叶提取物泡腾片制备工艺及其抗氧化活性研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, **37**(4): 132-137.

[27] 韩　旭, 董京磊, 宫俊杰, 等. 果蔬干燥技术的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2020, **26**(9): 37-40.

[28] ADHIKARI B, HOWES T, BHANDARI B R, *et al*. Effect of addition of maltodextrin on drying kinetics and stickiness of sugar and acid-rich foods during convective drying: experiments and modelling [J]. *J Food Eng*, 2004, **62**(1): 53-68.

[29] 杨芙莲, 聂小伟. 微波干燥红枣粉助干剂的研究[J]. 食品科技, 2010, **35**(12): 116-120.

[30] 高建德, 刘　雄, 余　琰, 等. 基于不同干燥方式板蓝根浸提物粉体性质对比研究[J]. 中药材, 2014, **37**(3): 512-514.

[31] 李盼盼, 胡钦锴, 张　敏. 微波真空干燥技术研究进展[J]. 食品安全导刊, 2022, (20): 175-177.

[32] 张凯江. 平菇水溶性多糖提取与不溶性膳食纤维制备及膨化工艺的研究[D]. 南京: 南京农业大学硕士学位论文, 2013.

[33] 孔晓雪, 安辛欣, 赵立艳, 等. 金针菇速溶粉的制备及体外抗氧化作用[J]. 食品工业科技, 2011, **32**(6): 267-269.

[34] 鄢　寒, 黄月英, 沈一唯, 等. 无定型固体分散体载体及

制备技术研究进展[J]. 中国新药杂志, 2017, **26**(4): 427-432.

[35] MARYAM M, ANNAMALAI M, AMANAT A. The effect of protein drying aids on the quantity and quality of spray dried sugar-rich powders: a systematic review [J]. *Drying Technol*, 2022, **40**(6): 1068-1082.

[36] 饶小勇, 刘 慧, 张 尧, 等. 基于玻璃化转变温度分析辅料用量与进风温度对五味子喷干粉性质的影响[J]. 中华中医药杂志, 2019, **34**(2): 801-806.

[37] QUEK S Y, CHOK N K, SWEDLUND P. The physico-chemical properties of spray-dried watermelon powders [J]. *Chem Eng Process*, 2007, **46**(5): 386-392.

[38] SRITHAM E, GUNASEKARAN S. Thermal evaluation of sucrose-maltodextrin-sodium citrate bioglass: glass transition temperature [J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, **60**: 589-597.

[39] 刘 慧, 罗晓健, 何 雁, 等. 不同DE值麦芽糊精对五味子喷雾干燥粉性质的影响[J]. 中国中药杂志, 2016, **41**(16): 3016-3021.

[40] HUSSAIN S A, HAMEED A, NAZIR Y, *et al*. Microencapsulation and the characterization of polyherbal formulation (PHF) rich in natural polyphenolic compounds [J]. *Nutrients*, 2018, **10**(7): 843.

[41] 张梦柯. 环糊精包合及大分子修饰对其包埋释放行为的影响研究[D]. 无锡: 江南大学博士学位论文, 2019.

[42] 唐 辉, 郭红辉, 钟瑞敏, 等. 助干剂对真空冷冻干燥岗稔果粉品质的影响[J]. 南方农业学报, 2017, **48**(6): 1068-1073.

[43] 石 洁, 王雪嵘, 徐朝阳. 食品包装用壳聚糖薄膜的研究进展[J]. 包装工程, 2022, **43**(3): 42-50.

[44] 蒋艳荣, 张振海, 刘 丹, 等. 正交试验优选馨月舒胶囊气相二氧化硅辅助喷雾干燥工艺[J]. 中华中医药杂志, 2013, **28**(8): 2393-2396.

[45] 师立功, 孙英才. 聚酯/TGIC粉末涂料的贮存稳定性与性能退化[J]. 涂料工业, 2021, **51**(3): 46-50.

[46] AL-MAQTARI Q A, MOHAMMED J K, MAHDI A A, *et al*. Physicochemical properties, microstructure, and storage stability of *Pulicaria jaubertii* extract microencapsulated with different protein biopolymers and gum arabic as wall materials [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, **187**: 939-954.

[47] SUHAG Y, NANDA V. Evaluation of different carrier agents with respect to physico-chemical, functional and morphological characteristics of spray dried nutritionally rich honey powder [J]. *J Food Process Preserv*, 2016, **40**(6): 1429-1437.

[48] FANG Z, BHANDARI B. Comparing the efficiency of protein and maltodextrin on spray drying of bayberry juice [J]. *Food Res Int*, 2012, **48**(2): 478-483.

[49] ZHOU M, WANG Y, WU F, *et al*. Development on porous particles of *Pueraria lobatae Radix* for improving its compactibility and dissolution [J]. *RSC Adv*, 2018, **8**(43): 24250-24260.

[50] 李金枝, 罗 毓, 阮洪生, 等. 金荞麦多孔粉体的压片性能改善及机制研究[J]. 中国中药杂志, 2020, **45**(22): 5518-5524.

[51] 周 涛, 李云东, 戴取秀, 等. Fenton技术改善污泥脱水性能的研究综述[J]. 云南化工, 2021, **48**(10): 11-17.

[52] HONG C, Si Y, XING Y, *et al*. Effect of surfactant on bound water content and extracellular polymers substances distribution in sludge [J]. *RSC Adv*, 2015, **5**(3): 22339-23383.