

· 研究进展 ·

枸杞子产地加工研究进展

李俊江¹, 徐志伟¹, 刘向娥², 李季文¹, 毕映燕¹, 娄丹丹³, 杜伟锋^{3*} (1. 甘肃省中医院, 兰州 730050; 2. 白银市中西医结合医院, 白银 730900; 3. 浙江中医药大学中药饮片有限公司, 杭州 311401)

摘要 目的: 为枸杞子产地加工的现代化研究提供理论依据, 为其新药开发和质量评价奠定基础。方法: 通过数据库的检索, 对近些年枸杞子产地加工过程中所涉除蜡及干燥工艺的相关文献资料进行整理与总结。结果: 枸杞子除蜡主要包括 Na_2CO_3 除蜡、碱性油酸乙酯溶液除蜡等化学除蜡法和超声除蜡、研磨除蜡等物理除蜡法; 枸杞子干燥主要包括自然晾干、热风干燥等热力干燥和微波干燥、冷冻干燥等非热力干燥。经实地调研和相关文献查阅发现, 除蜡过程与干燥过程所涉工艺存在一定差异, 且相关工艺参数缺乏统一标准。结论: 目前枸杞子的产地加工研究较为全面, 工艺研究多是对枸杞子干果营养成分及品质的影响, 目前暂未见对药理、药效影响的报道。

关键词: 枸杞子; 产地加工; 除蜡技术; 干燥技术

中图分类号: R932 文献标识码: A 文章编号: 1002-7777(2024)03-0326-007

doi:10.16153/j.1002-7777.2024.03.012

Research Progress on Origin Processing of *Lycium barbarum* L.

Li Junjiang¹, Xu Zhiwei¹, Liu Xiang'e², Li Jiwen¹, Bi Yingyan¹, Lou Dandan³, Du Weifeng^{3*} (1. Gansu Provincial Hospital of TCM, Lanzhou 730050, China; 2. Baiyin Integrated Traditional Chinese and Western Medicine Hospital, Baiyin 730900, China; 3. Zhejiang Chinese Medical University Chinese Medicine Yinpian Co., Ltd., Hangzhou 311401, China)

Abstract Objective: To provide theoretical basis for the study on the modernization of *Lycium barbarum* L. processing, and to lay a foundation for the development and quality evaluation of new drugs. **Methods:** By searching the database, the relevant literature about wax removal and drying technology in the origin processing of *Lycium barbarum* L. in recent years were sorted and summarized. **Results:** The wax removal of *Lycium barbarum* L. mainly included Na_2CO_3 dewaxing, alkaline ethyl oleate solution dewaxing and other chemical dewaxing and ultrasonic dewaxing, grinding dewaxing and other physical dewaxing. Drying of *Lycium barbarum* L. mainly included natural drying, hot air drying and other thermal drying, microwave drying, freeze drying and other non-thermal drying. Through field investigation and literature review, it was found that there were some differences between the process of wax removal and drying, and the related process parameters lacked a unified standard. **Conclusion:** At present, the study on the origin processing of *Lycium barbarum* L. is more comprehensive. Most

基金项目: 甘肃省中医药管理局项目(编号 GZKP-2022-14); 国家重点研发计划-中药饮片质量识别关键技术研究(编号 2018YFC1707001); 国家中药标准化项目(编号 ZYBZH-H-ZY-45); 国家中医药行业科研专项(编号 201507002); 中华中医药学会青年人才托举工程项目(编号 QNRC2-C12)

作者简介: 李俊江 Tel: 13830018992; E-mail: 2271442179@qq.com

通信作者: 杜伟锋 Tel: (0571) 87195915; E-mail: duweifeng200158@sohu.com

of the study on the process is the influence on the nutritional composition and quality of dried *Lycium barbarum* L.

Keywords: *Lycium barbarum* L.; origin processing; dewaxing technology; drying technology

枸杞子是茄科植物宁夏枸杞 *Lycium barbarum* L. 的干燥成熟果实, 味甘、性平, 归肝、肾经, 可滋补肝肾、益精明目, 常用以治疗虚劳精亏、腰酸背痛、眩晕耳鸣、内热消渴、血虚萎黄、目眩不明等病。新鲜枸杞子在储存及运输时常因挤压、碰撞而发黑、变质, 严重影响其药用价值及临床疗效; 为此, 人们常对刚采收的新鲜枸杞子进行产地加工, 即对枸杞子进行除蜡及干燥, 以减少药效成分流失, 加速其内部水分挥发, 保证枸杞子长期储存和长距离运输。

调查发现, 枸杞子的干燥方法及除蜡工艺种类繁多, 干燥与除蜡效果差异较大, 使得产地加工后枸杞子质量参差不齐。为了有效保证枸杞子质量, 笔者查阅相关文献, 对近年来枸杞子除蜡、干燥等产地加工工序相关研究进行综述, 以期对枸杞子产地加工的进一步研究提供理论支持, 为规范化、系统化枸杞子产地加工工艺提供思路。

1 枸杞子除蜡

成熟枸杞子鲜果的含水量及多糖含量均较高, 常温放置极易腐败变质^[1]; 为保证品质、延长其货架期, 常进行干燥处理。枸杞子果实表皮具有厚度超0.1 mm的蜡质, 保水性强^[2], 对干燥效率影响极大。为了缩短干燥时间、提高制干效率, 人们常在干燥前对枸杞子鲜果进行除蜡, 其方法主要包括化学除蜡和物理除蜡两大类。

1.1 化学除蜡

化学除蜡是指用除蜡剂等化学试剂溶解枸杞果皮角质层外蜡质层, 使角质层细胞间出现间隙, 易于鲜果内部水分排除, 提高制干效率^[3]。文献研究发现, 目前枸杞子的除蜡剂主要包括 Na_2CO_3 等传统碱性除蜡剂及其他新型除蜡剂, 各类除蜡剂的除蜡效果、对枸杞子中化合物的影响、除蜡剂使用的难易度及相关残留等均存在明显差异。

1.1.1 Na_2CO_3 除蜡剂

Na_2CO_3 是一种较常用的除蜡剂, 研究表明, 以一定浓度的 Na_2CO_3 溶液淋洗或浸泡枸杞鲜果, 可显著提升其干燥效率, 并使其保持良好的品质^[4-5]。部分学者还认为, 以一定浓度 Na_2CO_3 溶液作为除蜡

剂处理枸杞子鲜果, 不仅可以显著减少干燥时间, 同时对枸杞子中的各类化学成分还有不同程度的提升。Zhao等^[4]的研究证实, 使用 Na_2CO_3 对枸杞进行预处理可减少总干燥时间的22%~28%, 同时枸杞子中的总酚、总黄酮和类胡萝卜素含量均有升高。吴励萍等^[6]研究发现, 经 Na_2CO_3 溶液处理的枸杞子, 其单寡糖及核苷氨基酸类成分含量下降, 但总多糖、总酚、总黄酮含量升高, 这可能与碱性条件下各类氧化酶结构被破坏, 导致其不可逆失活有关, 即使用 Na_2CO_3 作为除蜡剂有利于总多糖、总酚和总黄酮类物质的积累; 研究同时证明, 经除蜡剂处理后的枸杞子, 其色素类成分含量变化不大, 这表明碱性环境不影响色素类成分的稳定性^[7]。王晓雨等^[8]的研究也认为将枸杞子鲜果以1.1% Na_2CO_3 和0.6%柠檬酸在30 ℃条件下联合浸泡10 min, 50 ℃低温干燥42 h后, 可使枸杞子含水量降至12.41%, 相比未经处理的干燥速度提高42%, 且处理后枸杞子干中总类胡萝卜素、总酚和总黄酮含量显著高于未处理品; 课题组同时还发现, 除蜡剂 Na_2CO_3 与护色剂柠檬酸复合使用, 利于护色剂的渗入, 进而可以使处理后枸杞子干的色差值达到11.09, 满足外观品质要求。

此外, 宋慧慧等^[9]研究认为, 碱性 Na_2CO_3 溶液可溶解枸杞子果实表面蜡质层中的长链脂肪酸烃类化合物, 造成相关化学键断裂、蜡质层变薄, 并形成水分排出通道, 进而加速枸杞子果实内部水分排出、缩短干燥时间; 由于除蜡过度易使枸杞子内部成分迁移至表面影响品质, 且 Na_2CO_3 会一定程度影响人体对矿物质的吸收, 故研究建议枸杞子干燥时, Na_2CO_3 溶液的质量分数应为2%。刘伟东等^[10]的研究还发现, 枸杞子鲜果干燥前, 经脱蜡可杀灭其表面65.24%的微生物。

上述研究表明, Na_2CO_3 等弱碱类除蜡剂是目前使用较为广泛、评价度较好、毒副作用较少的一类除蜡剂, 具有较好的应用及推广价值。但使用碱性除蜡剂, 会导致枸杞子干果皱缩变形以及外果皮除蜡剂残留^[3], 影响其外观与口感。因此, 以 Na_2CO_3 为除蜡剂开展枸杞子产地加工还有待深入、细致地

进一步研究。

1.1.2 新型除蜡剂

碱性油酸乙酯溶液 (Alkaline Ethyl Oleate, AEEO) 是一种广泛应用于蓝莓、红枣、樱桃等的除蜡剂, 其可水解果蔬表皮蜡质, 使干燥时内部水分扩散阻力降低, 一定程度保护和提升样品中营养成分含量及抗氧化能力^[11]。采用AEEO处理枸杞子鲜果时发现, 处理时间越久, 鲜果干燥时间越短, 平均干燥速率越大, 这可能与浸泡时样品蜡质层被溶解, 外表皮微孔数量增多, 细胞通透性提升有关; 但是, 经AEEO处理的样品在干燥后期干燥速率明显降低, 这可能与干燥后期样品中结合水比例变大有关; 长时间AEEO处理, 易导致干果中总黄酮含量呈现先上升后下降趋势, 可能与枸杞子表皮细胞通透性增加、黄酮类成分保护作用下降有关; 此外, 长时间AEEO处理还易导致样品表皮细胞结构被过度破坏, 造成样品复水后无法维持初始状态^[12]。

马洁等^[13]研究发现, 正己烷对枸杞子青果期、色变期、成熟期果皮蜡质层均有明显溶解作用, 可使覆盖于枸杞子表皮的蜡质层几乎完全去除, 未去除的蜡质层经溶剂刺激积聚成大小不等的颗粒, 便于样品内部水分经未被蜡质覆盖部位扩散。研究人员将枸杞子鲜果浸入5倍量甘油溶液 (60%) 中进行渗透处理; 结果显示, 经渗透处理的枸杞子鲜果干燥速率显著加快, 干燥前后果皮颜色、总酚含量及抗氧化能力接近^[14]。

微电水是经过微电水发生器电解后的一种清洁过滤软化水, 具有显著的强碱性 (pH值为7.0~13.8) 和还原能力, 对人体无毒、无害, 且不含异味物质。尚伟军等^[15]发现, 微电水也具有脱除枸杞子鲜果表面蜡质及杀菌的作用, 相比传统 Na_2CO_3 脱蜡、杀菌, 微电水处理具有制干操作方便、干果表面干净、口感纯正无碱苦味、成本低、无污染等优点, 但是残果率较高; 若将微电水的pH值调至11.5, 并结合1%食用碱液处理3 min, 可有效克服纯微电水处理过程中存在的各种不足。

1.2 物理除蜡

物理除蜡, 是指运用物理方法及技术所产生的各类型机械力, 破坏枸杞子果皮角质层外蜡质层, 使其鲜果内部水分易于排除, 进而促进干燥。

目前常见的物理除蜡技术包括超声除蜡、研磨除蜡、冷冻离子体除蜡等。

1.2.1 超声除蜡

超声 (Ultrasonic, US) 处理作为果蔬加工过程中常用的预处理方式, 可产生空化及机械效应, 改变物料内部与表面组织结构, 增加细胞孔隙, 减少水分迁移阻力^[16]。

NI等^[17]在功率200 W、温度35 °C条件下, 超声预处理枸杞子鲜果20 min; 结果显示, 该方法对枸杞干果表面微观结构改变显著, 且相较对照组, 超声预处理结合电流体干燥技术可显著提升干燥速率, 缩短干燥时间, 同时显著提升干品复水率。

资料^[18]显示, 以10%植物油、1% NaOH、4%乙醇、 Na_2CO_3 制备的1:100 ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$) 除蜡剂溶液, 浸泡枸杞子鲜果1 min后, 可有效破坏其果皮外表蜡质结构, 使果皮外表角质层出现2~3 μm 缝隙, 加快鲜果内部水分排出, 提升制干效率; 浸泡同时超声1 min, 可使鲜果外皮角质层裂隙增大, 表明超声能够显著增强除蜡剂对枸杞子鲜果表皮蜡质层的溶解。

1.2.2 研磨除蜡

Russo等^[19]运用砂纸 (23.6 μm) 滚筒, 以 $10 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速旋转枸杞子鲜果10 min, 处理后的枸杞子中水分有效扩散系数可提高3~4倍, 显著缩短干燥时间; 研磨处理可使枸杞子干果中酚类化合物含量提高约50%, 进而显著提升干果抗氧化性; 但是该技术同样易引起产品的残品率上升。

1.2.3 冷等离子体除蜡

Zhou等^[20]在等离子体设备中对枸杞子鲜果进行预处理, 经15、30、45、60 s预处理后样品蜡质层均出现不同程度溶解; 研究结果还表明, 预处理一定时间可缩短干燥时间50%, 提高干果复水率7%~16%, 降低 ΔE 18%~27%。但目前冷等离子技术需要较高的前期资金投入, 还无法在枸杞子产地加工过程中大面积推广。

2 枸杞子干燥

由于枸杞子中鲜果糖、水含量均较高, 且采收多集中于雨多、炎热的夏秋两季, 不及时干燥, 极易产生霉变、黑果等质变现象; 故干燥也是枸杞子产地加工过程中保证药材品质的关键技术之一。目前, 常见的干燥技术主要分为热力干燥和非热干

燥两大类。

2.1 热力干燥

热力干燥,是利用热能从物料中脱除少量水的过程;按干燥方式,又可分为直接向物料传递热量以达干燥目的的直接干燥,以及通过传热的器壁传递热量进而干燥的间接干燥。具体包括:自然晾干、热风干燥、热泵干燥等。

2.1.1 自然晾干

自然晾干可将物料水分降低至某一特定水平,以保障相关物料的长时间安全储存^[21],是目前人类已知的最古老的物料干燥方法之一;水分减少可使物料重量减轻,体积缩小,降低物料包装、储存及运输成本。

实地调研发现,药农将成熟枸杞子鲜果除蜡后,均匀平铺,置阳光下晾晒,保证产品质量相对稳定,降低产地加工成本。但是自然晾干易受天气影响,且干燥温度上限低,加热过程缓慢,干燥时间长,干燥过程不可控;面对大规模现代工业生产,自然晾干及其相关单一联合技术已很难满足实际需要,而系统化联合干燥技术才是未来枸杞子干燥的研究重点。

2.1.2 热风干燥

热风干燥指借助鼓风设备,向密闭环境鼓入热空气,气化物料水分,干燥物料的方法^[22];其热量经物料表面梯度扩散至内部,因传热机制不同,其作用机理相对复杂^[23]。

胡云峰等^[24]认为,热风干燥枸杞子时温度越高、达到安全水分值的时间越短,但是高温会影响枸杞子干果色泽、气味、口感等。Batu等^[25]证明,当温度由50℃升至70℃时,干燥时间缩减至原来1/3;但是70℃易弱化枸杞子干果中维生素C/B₆与ΔE活性。赵丹丹等^[26]发现,枸杞子热风干燥时水分流失呈现非恒速运动,干燥前期流失速度呈线性递增,中后期先匀速后迅速降低。

热风干燥比自然晾干更快速、安全,且能保障枸杞子药效成分生物活性,避免微生物污染等^[27]。但是,在有氧、高温环境中长时间暴露,易造成干果体积密度下降、个体收缩严重、复水能力降低^[28-29]。随着科学技术的创新、发展,既能保证物料品质、提高整体加工效率,又能缩短加工时间、降低能耗的新型联合干燥技术不断涌现;结合热风干燥和新型干燥技术的新颖干燥方式,将成为枸杞

子产业化发展的新突破。

2.1.3 热泵干燥

热泵干燥指借助密闭循环体系将以特殊干燥系统吸收的低温热源热量传入干燥室,控制温度、减少湿空气比例干燥物料的方法^[30]。物料干燥时,热泵系统能有效控制干燥器进口气体条件,回收潜热气体再利用,提升热利用率^[31]。

经查询可知,枸杞子干燥直接利用传统热泵技术的研究报道较少;在生产实践中,也常开展多种热泵联合干燥技术。胡灯运等^[32]开发了主要由太阳能集热器和空气源热泵机组组成的新型太阳能-空气源热泵联合干燥系统,研究表明:使用上述系统每干燥50 kg鲜枸杞子,较采用单一热泵干燥可节约电能2.9 kW·h,且干燥成品品质优异。利用枸杞子热风干燥失水规律,Zhao等^[33]开发出新型热泵干燥系统,对比同批次燃煤干燥室制品,经该系统干燥的枸杞子中枸杞总酚、总胡萝卜素、总黄酮及自由基清除率均显著提高,且生产成本下降19%。

文献^[34]报道,热泵干燥系统可更好地控制干燥条件,显著提高产品质量,有效降低能源消耗,有利于易褐变浆果加工干燥。为了扩大枸杞子加工产业中热泵干燥技术的应用范围,设计、建造更具成本竞争力和环境适应性的热泵干燥设备是关键。

2.2 非热干燥

非热干燥,是指在无外部热源直接或间接供热的条件下,实现物料干燥的一类干燥方式;主要包括微波干燥、冷冻干燥等。

2.2.1 微波干燥

微波干燥技术因干燥速度快、干燥过程数字化程度高及干燥产品品质好等特点,越来越受到食品、药品等加工领域青睐^[35];其通过微波高频电场使物料内部水分形成蒸汽,制造压力梯度,借助物料中心与表面间的快速传质输出水分,进而实现物料干燥。因此,微波干燥可显著减少常规干燥过程中出现的物料收缩现象^[36]。

资料显示,作为一种区别于传统干燥技术的新颖加工方式,微波干燥技术在枸杞子干燥过程中的应用范围更广、工效更高。马林强等^[37]的研究结果表明,一定条件下,相比自然晾干,微波干燥加工枸杞子耗时更短,产品品质更优。刘军等^[38]运用

星点响应面设计优选枸杞子真空微波干燥最佳工艺,实验考察了微波功率、装载量、真空度等影响干果品质的因素,结合多元回归模型,得到枸杞子真空微波干燥最佳工艺:真空度70 kPa、功率质量比1:1条件下干燥300 g枸杞子鲜果。

随着微波干燥技术更加深入地应用,技术自身的不足逐渐显现;微波干燥腔内不均匀的电场,易导致物料因局部高温而变质;微波功率过大易引起干燥物料急速膨胀,导致产品品质下降。近年来,更多研究人员采用微波干燥结合其他干燥技术的联合干燥法,开展相关物料的干燥实验^[38];同时,运用微波脉冲方式,最大限度地提高干燥效率^[39]。由此可知,运用微波干燥结合其他先进干燥方式,将为枸杞子类浆果干燥新方法的开发提供思路。

2.2.2 冷冻干燥

冷冻干燥是21世纪快速发展起来的一种新型高效脱水方法,其利用冰晶升华原理,在高度真空环境下,将已冻结物料中的水分不经过融化过程直接升华为蒸汽,故冷冻干燥也称为冷冻升华干燥。

相比其他干燥方法,冷冻干燥的优势在于:使原始新鲜物料的形状、色泽及气味得以最大限度地保留,物料中的生物活性成分得以保护,营养成分流失得以避免,适用于热敏性物料干燥^[40]。物料经冷冻干燥后,再水化程度高、速度快^[41],水分含量低,易于保存、运输^[42]。

作为典型的非热干燥技术,冷冻干燥相较常见的热干燥方法可以更好地保证物料的生物活性及外观形态。李强等^[43]通过研究发现,枸杞子经真空冷冻干燥后,其色泽较热风干燥更接近鲜果,表皮皱缩程度及物料收缩率均较低,枸杞多糖、Vc等活性成分含量较高。此外,冻干枸杞子口感清脆,再水化后极易恢复至鲜果状态^[44]。

综上所述,借助冷冻干燥技术,枸杞子工业产业发展势必出现新的机遇。新机遇总伴随着新挑战,例如:枸杞子鲜果经冷冻干燥后脆性增强,一定程度上提高了产品贮藏、运输的成本,同时也使上述过程中产品的损耗增加;此外,冷冻干燥技术高成本、高耗能问题同样限制其在枸杞子加工业中的进一步推广。因此,发展更多、更好的廉价且低能耗新型冷冻干燥设备,是将冷冻干燥技术潜在优势更好地服务于枸杞子加工产业发展的关键。

2.2.3 其他非热干燥

为了进一步提高产品品质、节约能耗,越来越多的新型非热干燥技术被枸杞子干燥过程所运用。例如脉冲真空干燥技术,因物料处于低压甚至真空环境,水分蒸发沸点低,物料氧化褐变发生率显著降低,使产品品质得以保证;研究^[45]表明,脉冲真空干燥耗时短,所得干果色泽鲜亮、多糖含量和复水率高。红外干燥是近年来应用较为广泛的新型热力干燥技术,较之其他技术,红外干燥在干燥速度、过程控制和污染防范等方面优势明显。相关研究^[46]也证实,得益于高传热系数,真空远红外干燥耗时大幅减少,但真空的干燥环境、较低的干燥温度却能保证产品品质优于热风干燥等其他干燥方式。电流体动力干燥技术是近期应用于枸杞子干燥的一种新型非热干燥技术,具有干燥耗时短、耗能低,对物料中活性成分破坏小等优势^[5]。新型干燥技术的逐步推广应用,加速了枸杞子产业的高质量发展,为其加工带来新的商机。

3 结论

作为一种典型的药食两用中药材,枸杞子因其丰富的营养成分、独特的药理作用,越来越受到传统医药领域和医疗保健领域的关注。但是,受限于自身浆果类果实的特性,人们通常将枸杞子产地加工后进行贮存、运输及应用,因此产地加工成为限制枸杞子产业发展的关键。

目前关于枸杞子产地加工研究多集中于食品领域,且以鲜果干燥的方法、设备及干燥前后营养成分变化为主要研究方向,对产地加工过程中除蜡工序及除蜡、干燥联合的研究报道较少。枸杞子因其特殊的组织结构,表皮最外层具有一层特殊的蜡质,在采取常规干燥时通常需要先进行除蜡处理,因此除蜡一定程度上制约枸杞子干燥,可视为其产地加工工序关键中的关键。

此外,作为中医临床使用较为广泛的中药材,有关枸杞子产地加工前后药理、药效作用差异方面的研究报道较少;少数涉及药效活性成分的报道,也多集中于多糖、黄酮等药效学有效部位,缺乏具体药效学成分研究。

综上所述,枸杞子产地加工今后一段时间的研究重点应主要集中于产地加工对枸杞子药理、药效的影响以及除蜡工序对其质量影响等方面,深入研究产地加工前后枸杞子药效学、代谢学的未知成

分及其组成,进一步探索产地加工影响枸杞子药理功效的作用机理。

参考文献:

- [1] 万芳新,罗燕,李武强,等.不同预处理方式对枸杞子远红外干燥特性和品质的影响[J].中草药,2020,51(16):5-8.
- [2] 袁惠君,高泽,王娟娟,等.扁果枸杞表皮蜡质合成相关基因LbCER1的RNAi载体构建[J].食品与发酵工业,2020,46(10):14-18.
- [3] 马奇虎,郭雨桐,唐辉,等.不同干燥方式枸杞干果微观结构与营养成分对比分析[J].农产品加工,2022(9):72-74,78.
- [4] Zhao DD, Wei J, Hao JX, et al. Effect of Sodium Carbonate Solution Pretreatment on Drying Kinetics, Antioxidant Capacity Changes, and Final Quality of Wolfberry (*Lycium barbarum* L.) during Drying[J]. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, 2019, 99(3):254-261.
- [5] Ni JB, Ding CJ, Zhang YM, et al. Impact of Different Pretreatment Methods on Drying Characteristics and Microstructure of Goji Berry under Electrohydrodynamic (EHD) Drying Process[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 61: 102318.
- [6] 吴励萍,卢有媛,李海洋,等.不同干燥方法对枸杞子药材多类型功效成分的影响及其分析评价[J].中草药,2022,53(7):2125-2136.
- [7] 冯小叶,周慧,李琴,等.玫瑰花渣废水回收所得色素的稳定性研究[J].食品研究与开发,2021,42(2):73-78.
- [8] 王晓雨,任贵平,程竹林,等.响应面法优化枸杞无硫促干护色工艺及其对品质的影响[J].食品工业科技,2022,43(19):246-255.
- [9] 宋慧慧,陈芹芹,毕金峰,等.干燥方式及碱液处理对鲜枸杞干燥特性和品质的影响[J].食品科学,2018,39(15):197-206.
- [10] 刘伟东,顾欣,郭君钰,等.微波热风联合干燥工艺对枸杞品质和表面微生物的影响[J].农业工程学报,2019,35(20):296-302.
- [11] 刘启玲,王庆卫,崔胜文.不同预处理方式对红枣热风-微波联合干燥品质特性及抗氧化活性的影响[J].食品研究与开发,2020,41(24):124-130.
- [12] 王兆凯,任广跃,段续,等.碱性油酸乙酯+超声预处理对枸杞热泵干燥特性的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(5):230-236.
- [13] 马洁,胡永超,岳艺彤,等.宁夏枸杞果皮蜡质微形态及蜡质组分研究[J].西北植物学报,2022,42(4):0589-0599.
- [14] Dermesonlouglou E, Chalkia A, Taoukis P. Application of Osmotic Dehydration to Improve the Quality of Dried Goji Berry[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 232: 36-43.
- [15] 尚伟军,张旭,李淑娟,等.微电水处理枸杞鲜果脱蜡制干效果对比研究[J].食品科学,2023(9):157.
- [16] Sun YN, Zhang M, Mujumdar A. Berry Drying: Mechanism, Pretreatment, Drying Technology, Nutrient Preservation, and Mathematical Models[J]. Food Engineering Reviews, 2019, 11(2):61-77.
- [17] Ni JB, Ding CJ, Zhang YM, et al. Influence of Ultrasonic Pretreatment on Electrohydrodynamic Drying Process of Goji Berry[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(8):e14600.
- [18] 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.
- [19] Russo P, Adiletta G, Di Matteo M, et al. The Effect of Abrasive Pretreatment on the Drying Kinetics and Phenolic Compounds in Goji Berries (*Lycium barbarum* L.)[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(12):e14933.
- [20] Zhou YH, Vidyanthi SK, Zhong CS, et al. Cold Plasma Enhances Drying and Color, Rehydration Ratio and Polyphenols of Wolfberry via Microstructure and Ultrastructure Alteration[J]. Lwt-Food Science and Technology, 2020, 134: 110173.
- [21] Chaijan M, Panpipat W, Nisoa M. Chemical Deterioration and Discoloration of Semi-dried Tilapia Processed by Sun Drying and Microwave Drying[J]. Drying Technology, 2017, 35(5):642-649.
- [22] 于斌,朱文学,白喜婷,等.茯苓浸膏超声强化干燥工艺优化[J].食品研究与开发,2018,39(19):74-79.
- [23] Onwude DI, Hashim N, Chen G. Recent Advances of Novel Thermal Combined Hot Air Drying of Agricultural Crops[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 57: 132-145.
- [24] 胡云峰,位锦锦,李宁宁,等.不同热风干燥温度对

- 枸杞干燥特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43 (1): 130-134.
- [25] Batu HS, Kadakal C. Drying Characteristics and Degradation Kinetics in Some Parameters of Goji Berry (*Lycium barbarum* L.) Fruit During Hot Air Drying[J]. Italian Journal of Food Science, 2021, 33 (1): 16-28.
- [26] 赵丹丹, 陈冬, 彭郁, 等. 枸杞热风干燥过程动力学模型及品质分析[J]. 中国食品学报, 2018, 18 (3): 114-124.
- [27] 于蒙杰, 张学军, 牟国良, 等. 我国热风干燥技术的应用研究进展[J]. 农业科技与装备, 2013 (8): 14-16.
- [28] 楚倩倩, 任广跃, 段续, 等. 不同预处理方式对热风干燥黄花菜褐变及干燥特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44 (7): 81-88.
- [29] Azam SMR, Zhang M, Law CL, et al. Effects of Drying Methods on Quality Attributes of Peach (*Prunus Persica*) Leather[J]. Drying Technology, 2019, 37 (3): 341-351.
- [30] 任广跃, 刘军雷, 刘文超, 等. 香椿芽热泵式冷风干燥模型及干燥品质[J]. 食品科学, 2016, 37 (23): 13-19.
- [31] Sarkar J, Bhattacharyya S, Gopal MR. Transcritical CO₂ Heat Pump Dryer: Part 1. Mathematical Model and Simulation[J]. Drying Technology, 2006, 24 (12): 1583-1591.
- [32] 胡灯运, 何伟, 张世超, 等. 太阳能-空气源热泵联合干燥系统设计及干燥枸杞的实验研究[J]. 新能源进展, 2018, 6 (2): 83-99.
- [33] 赵丹丹, 彭郁, 李茉, 等. 枸杞热泵干燥室系统设计与应用[S]. 农业机械学报, 2016, 47: 359-365, 373.
- [34] 宋慧慧, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 干燥方式及碱液处理对鲜枸杞干燥特性和品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39 (15): 197-206.
- [35] Chandrasekaran S, Ramanathan S, Basak T. Microwave Food Processing-A Review[J]. Food Research International, 2013, 52 (1): 243-261.
- [36] Zhang M, Tang J, Mujumdar A, et al. Trends in Microwave-related Drying of Fruits and Vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17 (10): 524-534.
- [37] 马林强, 慕松, 李明滨, 等. 枸杞的微波干燥特性及其对品质的影响[J]. 农机化研究, 2015, 37 (5): 208-211.
- [38] 刘军, 段月, 张喜康, 等. 模糊数学评价结合响应面法优化枸杞真空微波干燥工艺[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45 (15): 127-135.
- [39] 王鹤, 慕松, 吴俊, 等. 基于Weibull分布函数的枸杞微波干燥过程模拟及应用[J]. 现代食品科技, 2018, 34 (1): 141-147.
- [40] Berk Z. Freeze Drying (lyophilization) and Freeze Concentration[J]. Food Process Engineering and Technology, 2018, 2: 567-581.
- [41] Liu Y, Zhang ZY, Hu LD. High Efficient Freeze-drying Technology in Food Industry[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62 (12): 3370-3388.
- [42] Duan X, Liu W, Ren GY, et al. Comparative Study on the Effects and Efficiencies of Three Sublimation Drying Methods for Mushrooms[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8 (1): 91-97.
- [43] 李强, 唐虎利. 枸杞子冷冻干燥和热风干燥的品质比较[J]. 安徽农业科学, 2010, 38 (26): 14779-14780.
- [44] Donno D, Mellano MG, Raimondo E, et al. Influence of Applied Drying Methods on Phytochemical Composition in Fresh and Dried Goji Fruits by HPLC Fingerprint[J]. European Food Research and Technology, 2016, 242 (11): 1961-1974.
- [45] Xie L, Mujumdar AS, Zhang Q, et al. Pulsed Vacuum Drying of Wolfberry: Effects of Infrared Radiation Heating and Electronic Panel Contact Heating Methods on Drying Kinetics, Color Profile, and Volatile Compounds[J]. Drying Technology, 2017, 35 (11): 1312-1326.
- [46] 赵丽娟, 王丹丹, 李建国, 等. 枸杞真空远红外干燥特性及品质[J]. 天津科技大学学报, 2017, 32 (5): 17-22.

(收稿日期 2023年11月9日 编辑 郑丽娥)