

直触式超声真空干燥对蒲公英干燥特性和品质的影响

蔡园园^{1,2},董红敬^{1,2},邵人才³,刘峰^{1,2*}

(1. 山东中医药大学药学院 山东 济南 250355; 2. 齐鲁工业大学(山东省科学院) 山东省分析测试中心
天然产物分离提取共性技术创新与应用 山东省工程研究中心, 山东 济南 250014;
3. 宁波新芝生物科技股份有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘要:为探讨直触式超声联合真空干燥对蒲公英干燥特性和品质的影响,在不同超声功率下对蒲公英进行干燥,同时与真空冷冻干燥、阴干、热风干燥样品的色泽、黄酮含量、菊苣酸含量等指标进行对比研究。结果表明,干燥速率随超声功率和干燥温度升高而加快;Page 和 Two-term 模型拟合干燥动力学效果最好;冻干、超声功率 192 W 干燥样品色泽与鲜样最为接近;超声功率 192 W 下蒲公英复水溶液中黄酮含量显著高于其他干燥方式($p<0.05$);总黄酮和菊苣酸质量分数在超声功率 192 W 下较高,分别为 57.09、12.35 mg/g。采用熵权-灰色关联分析法进一步对 4 种干燥方式进行综合排名,超声功率 192 W 下干燥样品相关关联度最大,综合排名最高。该研究证实直触式超声真空干燥能有效的改善蒲公英的干燥特性和品质,可为食品、中药方面应用提供一定的理论和技术参考。

关键词:蒲公英;直触式超声真空干燥;干燥特性;品质

中图分类号:R283.3 文献标志码:A 文章编号:1002-4026(2026)01-0001-10

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Effects of direct-contact ultrasonic vacuum drying on the drying characteristics and quality of dandelion

CAI Yuanyuan^{1,2}, DONG Hongjing^{1,2}, SHAO Rencai³, LIU Feng^{1,2*}

(1. College of Pharmacy, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, China; 2. Shandong Engineering Research Center for Innovation and Application of General Technology for Separation of Natural Products, Shandong Analysis and Test Center, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250014, China;
3. Ningbo Xinzhi Bio-technology Co., Ningbo 315000, China)

Abstract: This study investigated the effects of direct-contact ultrasonic vacuum drying on the drying characteristics and quality of dandelion. Dandelion samples were dried under different ultrasonic power levels and compared with samples processed via vacuum freeze-drying, shade drying, and hot-air drying in terms of color, flavonoid content, and cichoric

收稿日期:2025-03-26 修回日期:2025-04-16

基金项目:中国中医科学院科技创新工程项目(CI2021B013),济南市“新高校 20 条”资助项目(202228020),山东省科技型中小企业创新能力提升项目(2022TSGC1199)

作者简介:蔡园园(2001—),硕士研究生,研究方向为中药产后加工及质量控制。E-mail: 15839936245@163.com

* 通信作者,刘峰(1981—),博士,副教授,硕士生导师,从事天然产物高值化利用、采后加工和质量控制等研究。E-mail: liufeng8109@qlu.edu.cn

acid content. Results showed that the drying rate increased with increasing ultrasonic power and drying temperature. The Page and Two-term models provided the best fit for the drying kinetics. The color of samples dried via direct-contact ultrasonic vacuum drying at 192 W was closest to that of fresh samples among all considered methods. At 192 W, the flavonoid content in the solution after rehydration was significantly higher than that obtained using other drying methods ($p < 0.05$). In addition, total flavonoid and cichoric acid contents at 192 W were 57.09 and 12.35 mg/g, respectively. Furthermore, comprehensive evaluation using the entropy weight-grey relational analysis method showed that the samples dried at 192 W exhibited the highest correlation degree and ranked first overall among all drying methods. This study confirms that direct-contact ultrasonic vacuum drying can effectively improve the drying characteristics and quality of dandelion, providing references for applications in food and traditional Chinese medicine.

Key words : dandelion; direct-contact ultrasonic vacuum drying; drying characteristics; quality

蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)为菊科多年生草本植物,性味苦、甘、寒,具有清热解毒、消肿散结、利尿通淋的功效。研究表明,蒲公英主要含黄酮类、酚酸类、萜类等多种有效成分,发挥抑菌、抗病毒、抗氧化等药理作用^[1-2]。鲜蒲公英含水量大,在长期储运过程中容易霉变腐败。干燥可以降低植物的水分活度,抑制微生物的生长,从而延长保存期限。然而,干燥是一个复杂的传热传质过程,在脱水过程中,往往会改变物料的内部结构,进而影响其色泽、风味和营养价值^[3],因此,选择合适的干燥方法对保存蒲公英的药用价值具有至关重要的作用。蒲公英传统的干燥方法有阴干、晒干和烘干。阴干和晒干成本低,但干燥周期长,受环境因素影响大。热风干燥可以规避上述缺点,但存在热利用率低、能耗高、产品质量差的缺点。

超声波作为一种典型的非热处理技术,在干燥过程中可产生机械效应、空化效应和热效应,从而加速干燥过程,降低能耗,提高脱水食品的品质^[4-5]。超声波在干燥中的应用有三种不同的模式,包括超声预处理、气介式超声和直触式超声^[6]。王学成等^[7]指出气介式超声和直触式超声相比于超声预处理,超声波可直接作用于物料,降低超声损耗。直触式超声可以克服空气对声能的高衰减以及气介式超声应用中出现的物料与空气之间的声阻抗不匹配问题,使接触式超声更有效^[8-9]。在实际应用中,通常将直触式超声结合到其他干燥仪器中^[7,10]。曾雅^[11]将直触式超声和远红外辐射技术联合应用于猕猴桃干燥,结果表明,超声功率的增大不仅可以加速干燥过程,同时伴随着干制品多酚和维生素C等活性成分含量增加。孙畅莹等^[12]以梨片为实验材料,研究直触式超声对热风干燥的强化作用,发现在适当的温度下,随着超声功率的增大,梨片中总酚、总黄酮含量均增大。Feng等^[13]采用直触式超声远红外联合干燥技术干制姜片,结果表明,与单一的远红外干燥相比,直触式超声远红外联合干燥缩短了干燥时间,减少了生姜挥发性成分的损失,显著提高了生姜的抗氧化活性。

本实验以蒲公英为原料,研究了直触式超声真空干燥对蒲公英干燥特性的影响,同时选择同批次的部分鲜样进行阴干、烘干和冻干。记录直触式超声真空干燥(96 W、144 W、192 W、240 W)和热风干燥(40 ℃、50 ℃、60 ℃、70 ℃)过程中样品的重量变化,分析水分变化规律并进行模型拟合,测定不同干燥方法下蒲公英色泽、黄酮含量、菊苣酸含量等指标,最后采用熵权-灰色关联度分析法相结合的质量评价模型进行综合分析。

1 材料和方法

1.1 材料和试剂

新鲜蒲公英采购自济南市莱芜区,洗净,晾晒至表面无水分,置4 ℃冰箱中冷藏保存备用。

无水乙醇,分析级,购于天津市富宇精细化工有限公司;甲醇,色谱级,购于天津市康科德科技有限公司;0.1%甲酸,购于天津市科密欧化学试剂有限公司;亚硝酸钠、硝酸铝,均购于天津大茂化学试剂有限公司;氢氧化钠,购于北京益利精细化学品有限公司;菊苣酸标准品,纯度 $\geq 98\%$,购于成都德思特生物技术有限公司;芦丁标准品,纯度 $\geq 98\%$,购于上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器和设备

DHG-9070A 电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;CSB-240G 超声波干燥机,宁波新芝生物科技股

份有限公司;LC-85DLC 防腐隔膜真空泵,上海力辰邦西仪器科技有限公司;AL104-IC 电子分析天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;KQ-250E 超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;NH310 色差仪,深圳 3NH 科技有限公司;Spark 型多功能酶标仪(瑞士 Tecan 公司);Waters E2695 液相色谱仪,沃特世科技(上海)有限公司。

1.3 干燥参数的测定

1.3.1 干基含水率的测定

根据食品安全国家标准(GB 5009.3—2016)^[14],在 105 ℃下,将样品烘至恒重,通过式(1)计算干燥过程中的干基含水率

$$W_t = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100\%。 \quad (1)$$

式中: W_t 为蒲公英样品 t 时间点的干基含水率,%; M_t 为 t 时间点蒲公英样品的质量,g; M_0 为蒲公英样品干物质的质量。

1.3.2 干燥速率的测定

蒲公英干燥过程中干燥速率(drying rate, D_R)按式(2)计算:

$$D_R = \frac{W_{t+\Delta t} - W_t}{\Delta t}, \quad (2)$$

式中: D_R 为蒲公英干燥速率,g/(g·min); t 为任意干燥时刻; W_t 为 t 时间点蒲公英的干基含水率,%; Δt 为干燥时间差。

1.4 干燥动力学模型

为了研究蒲公英在直触式超声真空干燥过程中的水分变化规律,选取了 5 种常用的干燥动力学模型对实验数据进行拟合。模型方程如表 1 所示。选择决定系数(R^2)、均方根误差(δ_{RMSE})和卡方值(χ^2)作为拟合结果的指数评价,计算如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_{R,\text{exp},i} - M_{R,\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{M_{R,\text{exp},i}} - M_{R,\text{pre},i})^2}, \quad (3)$$

$$\delta_{\text{RMSE}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{R,\text{pre},i} - M_{R,\text{exp},i})^2 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{R,\text{pre},i} - M_{R,\text{exp},i})^2}{N - n}, \quad (5)$$

其中, $M_{R,\text{exp},i}$ 是模型预测的第 i 个水分比, $M_{R,\text{pre},i}$ 是从干燥实验获得的第 i 个水分比的值, M_R 是实验水分比的平均值, N 是观测的数量,并且 n 是常数的数量。

表 1 五种常见的干燥动力学模型

Table 1 Five common drying-kinetics models

模型	方程	参数
Newton	$M_R = \exp(-kt)$	k
Page	$M_R = \exp(-kt^n)$	k, n
Two-term	$M_R = a \cdot \exp(-k_0 t) + b \cdot \exp(-k_1 t)$	k_0, k_1, a, b
Wang and Singh	$M_R = 1 + at + bt^2$	a, b
Logarithmic	$M_R = a \cdot \exp(-kt) + c$	a, k, c

注: M_R 是实验水分比的平均值, t 为时间。

1.5 品质指标的测定

1.5.1 色泽

使用 NH310 便携式色差仪测定蒲公英的颜色。总颜色变化(ΔE)计算如下:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}, \quad (6)$$

式中, $\Delta L^* = L - L^*$, $\Delta a^* = a - a^*$, $\Delta b^* = b - b^*$; ΔE 代表样品的总色差; L^* 、 a^* 和 b^* 分别代表鲜蒲公英的亮度、红绿和黄蓝值; L 、 a 和 b 分别代表干品的亮度、红绿和黄蓝值。

1.5.2 总黄酮含量测定

蒲公英总黄酮的提取:采用 $\text{NaNO}_2\text{-Al}(\text{NO}_3)_3\text{-NaOH}$ 方法测定总黄酮含量^[15]。精密称取蒲公英粉末 0.25 g,置于比色管中;按料液比 1:100(g/mL)加入 60%乙醇,超声 2 h,超声温度 25 ℃;过滤,收集滤液,定容至 25 mL。

总黄酮含量测定:取样品 200 μL ,加入 60%乙醇 300 μL ,摇匀;加入 5%的 NaNO_2 溶液 50 μL ,摇匀后静置 6 min;加入 50 μL 10% $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$,摇匀后静置 6 min;再加入 4% NaOH 溶液 400 μL ,摇匀后静置 10 min,使用酶标仪,在 510 nm 处测定吸光度值。以芦丁对照品,按上述操作,得到总黄酮含量的标准曲线。溶液浓度为横坐标 x ,吸光度为纵坐标 y ,绘制标准曲线,回归方程为: $y = 7.3419x - 0.0258$, $R^2 = 0.9982$ 。

复水溶液中总黄酮含量测定:为了探讨不同干燥方式对蒲公英在热水中有效成分溶出情况的影响,取蒲公英复水后的溶液,对其黄酮含量进行测定,测定方法同上。

1.5.3 菊苣酸含量测定

制备 2 mg/mL 的菊苣酸标准品母液,梯度稀释。以甲醇为流动相 A,以 0.1%甲酸溶液为流动相 B,梯度洗脱程序如下:0~7 min,13%~20% A;7~18 min,20%~30% A;18~28 min,30%~41% A;28~35 min,41%~45% A。流速 1 mL/min,进样体积 10 μL 。样品用 80%甲醇按料液比 1:40(g/mL)超声提取,过 0.22 μm 滤膜,按上述条件进样。以菊苣酸的质量浓度为横坐标 x ,液相样品峰面积为纵坐标 y 绘制标准曲线,回归方程为: $y = 41191x - 412764$, $R^2 = 0.9940$ 。

1.6 熵权-灰色关联度分析法

采用熵权-灰色关联度法对不同干燥方式下蒲公英干制品的质量进行评价。参考杨鑫岬等^[16]的方法,构建矩阵,计算各指标得信息熵和权重,进一步采用灰色关联分析法,结合权重结果,计算得出最优参考序列关联度 $r_{i(s)}$ 与最差参考序列关联度 $r_{i(t)}$,求出相对关联度,对各干燥方式进行综合评分和排序。

2 结果与分析

2.1 干燥特性分析

2.1.1 超声功率对蒲公英干燥特性的影响

在直触式超声真空干燥条件下,不同超声功率对蒲公英干燥特性的影响如图 1 所示,超声功率越大,平均干燥速率越快,所需的干燥时间越短。当超声功率为 96 W、144 W、192 W 和 240 W 时,蒲公英的干燥平衡时间分别为 660、540、420、360 min。与 96 W 相比,其他超声功率下的干燥时间分别缩短了 18%、36% 和 45%,表明较高的超声功率对缩短脱水时间有显著的正效应。这是因为超声产生的能量可直接传递至样品内部,引起高频分子间振动。这种机械效应可以削弱分子间的内聚力,增强水分子内部的湍流,提高水分子的流动性,进而加速水分子的扩散和迁移^[17]。随着超声波功率的增大,结合水的分子间作用力减弱,内部化学键断裂,细胞内的部分结合水转化为流动性更好的自由水,因此功率越高,超声波的强化效果越明显^[18]。同时,超声波会在样品内部产生空化效应,形成大量的微泡,微泡在周期性的膨胀-压缩脉动下,产生微射流和新的微孔通道,打破固有的扩散边界层,增强水分子的活性,并促进水从内部向表面迁移^[19]。

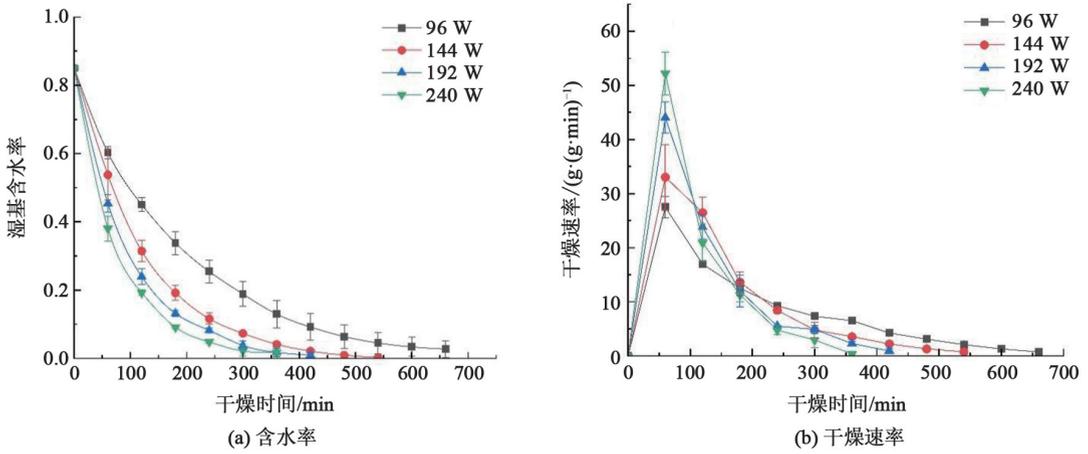


图 1 直触式超声功率对蒲公英干燥特性的影响

Fig.1 Effects of direct-contact ultrasonic power on the drying characteristics of dandelion

2.1.2 烘干温度对蒲公英干燥特性的影响

图 2 显示了烘干温度对蒲公英干燥特性的影响。将干燥温度从 40 °C 提高到 70 °C,干燥速率加快,干燥时间缩短(图 2a),因为传热和传质系数随温度升高而升高,导致更高的水分梯度。这些现象也在处理薄层干燥的其他研究中报道^[20]。在干燥速率曲线(图 2b)上可以观察到两个不同的干燥阶段。干燥的初始时期的特点是在干燥速率达到最大值时快速的水分去除,这一阶段的快速干燥源于样品中高含量的自由水;随着干燥的继续,干燥前沿向内扩散,并且多孔结构内部的结合水部分转化为自由水并需要迁移到样品的表面,因此,干燥速率降低,直到其达到平衡含水量。此外,作为水分迁移背后的驱动力,样品和周围空气之间的蒸汽压梯度随着水分含量的降低而降低,导致干燥速率降低^[21]。

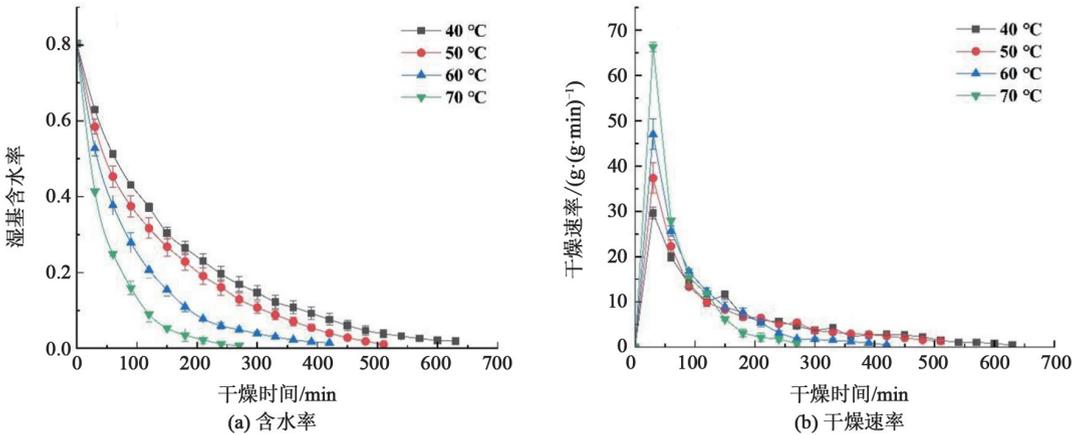


图 2 烘干温度对蒲公英干燥特性的影响

Fig.2 Effects of drying temperature on the drying characteristics of dandelion

2.1.3 干燥动力学模型

使用 Origin 对 5 个常用数学模型进行非线性拟合,得到各模型的常数项、 R^2 、均方根误差 δ_{RMSE} 和 χ^2 ,见表 2。不同模型对干燥过程的拟合结果 R^2 越接近 1, δ_{RMSE} 和 χ^2 越接近 0,模型预测效果越好。可以看出,在所选的 5 个干燥动力学模型中,Page、Two-term 模型的决定系数 R^2 范围为 0.997 7~0.999 9, δ_{RMSE} 范围为 $3.84 \times 10^{-3} \sim 1.49 \times 10^{-2}$, χ^2 范围为 $1.58 \times 10^{-5} \sim 2.46 \times 10^{-4}$ 。说明这两个模型都能很好地模拟蒲公英的直触式超声真空干燥过程。其中,Page 模型参数 k 可用于比较不同条件之间的干燥动力学, k 值越高,干燥速率越高,样品停留时间越短^[22]。由表 2 我们可以看到直触式超声真空干燥数据通过 Page 模型拟合,所得 k 值分别为 0.005 9、0.006 3、0.011 3、0.018 5,相对于 96 W,其他超声功率下 k 值分别增加了 6.80%、91.50%、213.60%,热风干燥也有相似的规律。

表2 不同干燥条件下蒲公英的干燥动力学模型拟合结果

Table 2 Fitting results of drying-kinetics models for dandelion under different drying conditions

模型及参数		直触式超声真空干燥				热风干燥			
		96 W	144 W	192 W	240 W	40 ℃	50 ℃	60 ℃	70 ℃
Newton	k	0.005 2	0.008 1	0.010 4	0.012 7	0.006 2	0.007 5	0.011 7	0.019 5
	χ^2	0.000 1	0.000 2	0.000 0	0.000 1	0.000 7	0.001 3	0.000 5	0.000 5
	R^2	0.999 0	0.998 3	0.999 7	0.999 1	0.990 7	0.982 2	0.994 7	0.995 7
	δ_{RMSE}	0.009 2	0.012 9	0.005 5	0.009 8	0.025 5	0.035 2	0.021 3	0.021 2
Page	k	0.005 9	0.006 3	0.011 3	0.018 5	0.013 1	0.019 9	0.021 3	0.035 2
	n	0.979 0	1.085 0	0.982 5	0.920 5	0.856 0	0.807 9	0.871 6	0.859 2
	χ^2	0.000 1	0.000 1	0.000 0	0.000 0	0.000 1	0.000 2	0.000 0	0.000 1
	R^2	0.999 1	0.999 4	0.999 8	0.999 9	0.999 3	0.997 7	0.999 7	0.999 5
	δ_{RMSE}	0.009 2	0.007 9	0.005 4	0.004 4	0.007 0	0.012 7	0.005 4	0.007 2
Logarithmic	a	0.005 1	0.007 9	0.010 4	0.013 2	0.006 7	0.008 1	0.012 8	0.021 3
	k	0.996 2	1.022 1	0.997 4	0.984 4	0.925 8	0.909 4	0.946 9	0.958 8
	c	-0.007 2	-0.013 2	0.001 6	0.013 1	0.043 5	0.047 2	0.038 2	0.033 4
	χ^2	0.000 1	0.000 2	0.000 0	0.000 1	0.000 3	0.000 7	0.000 2	0.000 4
	R^2	0.999 2	0.998 9	0.999 7	0.999 6	0.996 7	0.991 6	0.997 9	0.997 8
	δ_{RMSE}	0.009 3	0.011 7	0.006 4	0.008 3	0.016 3	0.026 1	0.015 2	0.018 4
Wang and Singh	a	-0.003 7	-0.005 1	-0.006 5	-0.007 7	-0.004 7	-0.005 6	-0.008 7	-0.013 6
	b	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	χ^2	0.002 4	0.004 6	0.005 9	0.007 3	0.003 2	0.005 0	0.003 4	0.005 0
	R^2	0.976 9	0.963 0	0.957 3	0.951 9	0.956 0	0.932 8	0.963 1	0.964 2
	δ_{RMSE}	0.046 8	0.064 1	0.071 7	0.079 2	0.055 4	0.068 4	0.056 3	0.067 1
Two-term	k_0	0.005 2	0.008 2	0.018 9	0.011 2	0.005 2	0.006 0	0.010 1	0.016 6
	k_1	0.005 2	0.008 2	0.010 0	0.011 6	0.031 9	0.046 7	0.062 9	2.650 0
	a	0.495 8	0.506 2	0.083 9	0.101 6	0.842 3	0.804 4	0.859 1	0.847 2
	b	0.495 8	0.506 6	0.916 4	0.898 4	0.158 0	0.196 4	0.141 0	0.152 8
	χ^2	0.000 1	0.000 2	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 1	0.000 0	0.000 0
	R^2	0.999 1	0.998 5	0.999 8	0.999 9	0.999 6	0.999 2	0.999 9	0.999 9
	δ_{RMSE}	0.010 3	0.014 9	0.006 5	0.005 1	0.005 5	0.008 5	0.003 8	0.005 6

2.2 干燥品质分析

2.2.1 不同干燥方式对蒲公英色泽的影响

色泽是评价干燥产品最重要的质量参数之一,也是影响消费者对产品接受度的关键因素。表3列出了不同干燥方式下蒲公英颜色参数变化。从表3中可以看出,在不同干燥条件下,干燥蒲公英的黄度(b^*)均小于新鲜蒲公英的,说明干燥处理对蒲公英的黄度值有影响。随着超声功率和烘干温度的升高,样品的红度(a^*)增加,并且最终产品的颜色变深(L^*)。这可能与干燥过程中美拉德反应有关,有文献表明,温度升高会加快美拉德反应速率,造成更多有色物质的产生^[23]。同时,超声波作用会使细胞间隙增大,形成更多的微孔,损伤材料表面,增加与超声波介质接触的有效面积,导致颜色发生变化^[24]。观察 ΔE ,我们发现冻干与鲜

样的色差最小,其次是超声功率为 192 W 的样品。直触式超声真空干燥条件下,随着超声功率的增大, ΔE 先减小后增加,这与仇徐亮等^[25]研究结果相一致;热风干燥条件下,40 °C 与 50 °C 之间无显著性差异,整体上, ΔE 随着温度的升高而增大。

表 3 不同干燥条件下蒲公英的色泽变化

Table 3 Color changes of dandelion under different drying conditions

干燥方式	颜色深度 L^*	红度 a^*	黄度 b^*	色差 ΔE
鲜样	57.70±1.08 ^b	-5.82±1.17 ^e	24.53±0.40 ^a	—
冻干	57.81±0.27 ^b	-6.31±0.33 ^e	24.35±0.10 ^a	0.61±0.29 ^g
阴干	61.44±0.46 ^a	-5.01±0.31 ^d	19.21±0.46 ^d	6.57±0.51 ^d
40 °C	61.60±0.93 ^a	-7.35±0.61 ^f	18.07±0.17 ^e	7.75±0.41 ^c
50 °C	56.22±0.02 ^c	-3.88±0.03 ^c	17.46±0.41 ^{ef}	7.48±0.39 ^c
60 °C	54.01±0.32 ^c	-2.69±0.19 ^b	16.88±0.65 ^{fg}	9.06±0.56 ^b
70 °C	52.08±0.50 ^d	-0.11±0.04 ^a	16.47±0.28 ^f	11.37±0.20 ^a
超声 96 W	62.46±0.53 ^a	-7.14±0.10 ^f	17.18±0.53 ^{fg}	8.88±0.30 ^b
超声 144 W	57.17±0.17 ^b	-3.94±0.08 ^c	20.64±0.51 ^c	4.36±0.41 ^e
超声 192 W	57.96±0.16 ^b	-3.57±0.15 ^c	22.86±0.44 ^b	2.83±0.19 ^f
超声 240 W	55.56±0.13 ^c	-3.47±0.15 ^c	20.77±0.47 ^c	4.93±0.28 ^c

注:不同小写字母表示差异显著性($p<0.05$)。

2.2.2 不同干燥方式对蒲公英有效成分含量的影响

不同干燥方式对蒲公英总黄酮含量的影响见表 4。阴干条件下,总黄酮质量分数最高,为 66.23 mg/g;冻干次之;热风干燥中,随着温度的升高,黄酮含量显著降低,这与马致静等^[26]研究结果相一致。可能是因为温度升高,加剧了细胞的破坏程度,细胞内容物流出,从而加快黄酮类化合物的降解速度^[27];在直触式超声真空条件下,总黄酮含量随这超声功率的增大先增加后降低,在 192 W 下最大,可能是因为在一定范围内,随着超声波作用的增大,物料的干燥时间缩短,减少了黄酮类化合物的氧化分解。随着超声功率的继续增加,总黄酮含量呈下降趋势,可能是由于超声波作用本身会产生热效应,随着超声波功率的增加,样品的温度也在升高^[28]。此外,较大的超声功率对细胞壁造成机械损伤,这导致氧化酶和过氧化物酶从细胞基质中部分泄漏,导致黄酮类化合物降解加快^[29]。菊苣酸作为蒲公英的指标性成分,药典中规定不得少于 0.45%。表 4 中,各干燥方式下菊苣酸的含量均符合药典要求,同总黄酮含量一样,菊苣酸在阴干条件下含量最高,热风干燥下,随温度升高,含量降低。

蒲公英复水后的溶液中总黄酮质量分数测定结果显示,超声功率 96 W、144 W、192 W 干燥条件下,复水溶液中总黄酮含量显著高于其他干燥方式,说明超声干燥样品中黄酮类物质溶出速度较快。

表 4 不同干燥条件下蒲公英中主要功能成分的变化

Table 4 Changes in target components of dandelion under different drying conditions

单位:mg/g

干燥方式	$w_{\text{总黄酮}}$	$w_{\text{复水溶液总黄酮}}$	$w_{\text{菊苣酸}}$
冻干	62.78±0.88 ^b	4.69±0.78 ^b	14.13±0.06 ^b
阴干	66.23±2.95 ^a	4.02±0.72 ^{bc}	14.49±0.17 ^a
40 °C	61.99±1.16 ^b	4.16±0.86 ^{bc}	14.00±0.25 ^b
50 °C	58.90±0.51 ^c	3.81±0.31 ^{bcd}	12.30±0.12 ^d

表4(续)

干燥方式	$w_{\text{总黄酮}}$	$w_{\text{复水溶液总黄酮}}$	$w_{\text{菊苣酸}}$
60 °C	39.81±0.44 ^g	3.56±0.54 ^{cd}	8.74±0.14 ^g
70 °C	34.15±0.65 ^h	2.96±0.54 ^d	6.94±0.12 ^h
超声 96 W	52.41±1.60 ^f	5.81±0.48 ^a	12.82±0.07 ^e
超声 144 W	54.07±0.20 ^{ef}	5.92±1.24 ^a	10.18±0.21 ^e
超声 192 W	57.09±1.89 ^{cd}	6.14±1.36 ^a	12.35±0.15 ^d
超声 240 W	55.56±0.42 ^{de}	4.04±0.45 ^{bc}	9.55±0.26 ^f

注:不同小写字母表示差异显著性($p<0.05$)。

2.3 基于熵权-灰色关联度分析法对不同干燥方式蒲公英质量的评价

以干燥时长、 ΔE 值、总黄酮、复水溶液总黄酮、菊苣酸为指标,建立了评价不同干燥方式下蒲公英干制品质量的灰色模型数据集(表5)。每组样品以5项指标为一个评价单元,按照熵权法计算各评价指标的信息熵和权重(表6)。根据关联系数和权重,计算干燥后各样品的最优关联度和最差关联度,求出相对关联度^[30]。相对关联度越大,产品质量越优。表7中可以看出,采用超声功率192 W干燥方式下样品的相对关联度最大,产品综合质量最好。

表5 样品相关指标测定结果

Table 5 Measurement results for relevant sample indicators

指标	冻干	阴干	60 °C	超声 192 W
干燥时长/h	10	72	7	7
ΔE	0.61±0.29	6.57±0.51	9.06±0.56	2.83±0.19
$w_{\text{总黄酮}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	62.78±0.88	66.23±2.95	39.81±0.44	57.09±1.89
$w_{\text{复水溶液总黄酮}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	4.69±0.78	4.02±0.72	3.56±0.54	6.14±1.36
$w_{\text{菊苣酸}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	16.82±0.17	18.35±0.23	9.02±0.29	15.04±0.15

表6 蒲公英不同干燥条件下指标的信息熵和权重

Table 6 Information entropy and indicator weights of dandelion under different drying conditions

指标	信息熵 e_j	权重 ω_j
干燥时长	0.130 4	0.445 0
ΔE	0.707 3	0.149 8
$w_{\text{总黄酮}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	0.781 9	0.111 6
$w_{\text{复水溶液总黄酮}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	0.644 9	0.181 7
$w_{\text{菊苣酸}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	0.781 3	0.111 9

表7 蒲公英不同干燥条件下相对关联度及排序

Table 7 Relative correlation degree and ranking of dandelion under different drying conditions

干燥条件	最优关联度	最差关联度	相对关联度(r_i)	排序
超声	0.933 9	0.530 2	0.637 9	1
192 W	0.915 3	0.538 1	0.629 8	2
冻干 60 °C	0.797 7	0.703 3	0.531 4	3
阴干	0.585 3	0.881 6	0.399 0	4

3 结论

本文研究了直触式真空干燥蒲公英失水动力学过程,并通过将其与真空冷冻干燥、阴干、热风干燥技术对比,分析它们在干燥特性、色差、总黄酮、菊苣酸含量方面的差异。结果表明,直触式真空干燥过程较符合 Page、Two-term 模型;超声功率 192 W 的干燥样品,色泽优于热风干燥和阴干,复水溶液中黄酮含量显著高于其他干燥方式;随着直触式超声真空干燥功率的增大,样品中总黄酮含量先增大后减小;熵权-灰色关联度分析结果表明,超声功率 192 W 下的产品综合质量评分最高,表明直触式超声真空干燥能有效的改善蒲公英的干燥特性和品质,可为该干燥方式在中药和食品加工方面的应用提供一定的数据支撑。

参考文献:

- [1] 张含, 李文静, 林宇, 等. UPLC 法测定蒲公英不同用药部位中 3 种活性成分含量[J]. 中国野生植物资源, 2024, 43(11): 51-56. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9690.2024.11.007.
- [2] 高朋, 赵敏, 马致静, 等. 不同干燥方法对蒲公英叶总酚含量及抗氧化能力的影响[J]. 现代食品, 2023, 29(19): 157-159. DOI: 10.16736/j.cnki.cn41-1434/ts.2023.19.037.
- [3] ZANG Z P, ZHANG Q, HUANG X P, et al. Effect of ultrasonic combined with vacuum far-infrared on the drying characteristics and physicochemical quality of *Angelica sinensis* [J]. Food and Bioprocess Technology, 2023, 16(11): 2455-2470. DOI: 10.1007/s11947-023-03076-3.
- [4] HUANG D, MEN K Y, LI D P, et al. Application of ultrasound technology in the drying of food products [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 63: 104950. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.104950.
- [5] FAN K, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Application of airborne ultrasound in the convective drying of fruits and vegetables: A review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 39: 47-57. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.001.
- [6] 王学成, 伍振峰, 徐诗军, 等. 超声强化干燥技术与设备及其在中药领域应用的研究进展 [J]. 中国医药工业杂志, 2022, 53(4): 446-453. DOI: 10.16522/j.cnki.cjph.2022.04.003.
- [7] MAGALHÃES M L, CARTAXO S J M, GALLÃO M I, et al. Drying intensification combining ultrasound pre-treatment and ultrasound-assisted air drying [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 215: 72-77. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2017.07.027.
- [8] CAO Y, TAO Y, ZHU X H, et al. Effect of microwave and air-borne ultrasound-assisted air drying on drying kinetics and phytochemical properties of broccoli floret [J]. Drying Technology, 2020, 38(13): 1733-1748. DOI: 10.1080/07373937.2019.1662437.
- [9] TAO Y, ZHANG J L, JIANG S R, et al. Contacting ultrasound enhanced hot-air convective drying of garlic slices: Mass transfer modeling and quality evaluation [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 235: 79-88. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2018.04.028.
- [10] ZHANG Y W, ABATZOGLOU N. Review: Fundamentals, applications and potentials of ultrasound-assisted drying [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2020, 154: 21-46. DOI: 10.1016/j.cherd.2019.11.025.
- [11] 曾雅. 猕猴桃超声-远红外辐射干燥特性及生物活性成分研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2020. DOI: 10.27115/d.cnki.glygc.2020.000143.
- [12] 孙畅莹, 刘云宏, 曾雅, 等. 直触式超声强化热风干燥梨片的干燥特性 [J]. 食品与机械, 2018, 34(9): 37-42. DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2018.09.008.
- [13] FENG Z, ZHANG M, GUO L, et al. Effect of direct-contact ultrasonic and far infrared combined drying on the drying characteristics and quality of ginger [J]. Processes, 2024, 12(1): 98. DOI: 10.3390/pr12010098.
- [14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [15] 葛莉, 姚园园, 康天兰, 等. 不同收获期贯叶连翘花中抗氧化能力、主要活性物质变化及挥发性组分分离鉴定 [J]. 草业学报, 2017, 26(9): 66-74. DOI: 10.11686/cyxb2016484.

- [16] 杨鑫岬, 刘宁, 吴金伟, 等. 基于熵权-灰色关联分析法对不同产地猫爪草的质量评价[J]. 中南农业科技, 2024(7): 91-93. DOI: 10.3969/j.issn.1007-273X.2024.07.022.
- [17] WANG X L, FENG Y B, ZHOU C S, et al. Effect of vacuum and ethanol pretreatment on infrared-hot air drying of scallion (*Allium fistulosum*) [J]. Food Chemistry, 2019, 295: 432-440. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.05.145.
- [18] ZHANG Z M, YU J Z, CHENG P, et al. Effect of different process parameters and ultrasonic treatment during solid osmotic dehydration of jasmine for extraction of flavoured syrup on the mass transfer kinetics and quality attributes [J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 15(5): 1055-1072. DOI: 10.1007/s11947-022-02787-3.
- [19] 刘云宏, 孙畅莹, 曾雅. 直触式超声功率对梨片超声强化热风干燥水分迁移的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 284-292. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.036.
- [20] 刘涛, 周舟, 王清, 等. 大别山板栗片热泵干燥特性及动力学模型分析[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(7): 35-43. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6221.2024.07.006.
- [21] 唐小闲, 蔡明君, 韦珍珍, 等. 低场核磁共振技术分析杏鲍菇在热风-微波联合干燥过程中的水分变化[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(8): 90-94. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9578.2023.08.019.
- [22] MOSQUEDA M R P, TABIL L G, CHRISTENSEN C. Effect of drying conditions and level of condensed distillers solubles on protein quality of wheat distillers dried grain with solubles [J]. Drying Technology, 2013, 31(7): 811-824. DOI: 10.1080/07373937.2013.765446.
- [23] MALVANDI A, NICOLE COLEMAN D, LOOR J J, et al. A novel sub-pilot-scale direct-contact ultrasonic dehydration technology for sustainable production of distillers dried grains (DDG) [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 85: 105982. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.105982.
- [24] DENG L-Z, PAN Z L, 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. DOI: 10.1016/j.foodcont.2018.09.008.
- [25] 仇徐亮, 冯蕾, 聂梅梅, 等. 超声预处理对芥菜微波干燥品质的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(6): 155-167.
- [26] 马致静, 车寒梅, 柳文军, 等. 蒲公英不同干燥条件下总黄酮含量及抗氧化活性研究[J]. 现代农业科技, 2024(3): 141-143. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5739.2024.03.032.
- [27] ZHANG Q, WAN F X, ZANG Z P, et al. Effect of ultrasonic far-infrared synergistic drying on the characteristics and qualities of wolfberry (*Lycium barbarum* L.) [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 89: 106134. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.106134.
- [28] SHANG J W, ZHANG Q, WANG T X, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on the far-infrared drying process and quality characteristics of licorice [J]. Foods, 2023, 12(12): 2414. DOI: 10.3390/foods12122414.
- [29] LIU Y H, ZENG Y, GUO L G, et al. Drying process and quality characteristics of contact ultrasound reinforced heat pump drying on kiwifruit slices [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(10): e14162. DOI: 10.1111/jfpp.14162.
- [30] 井亚江, 黄建萍, 王七龙, 等. 基于熵权 TOPSIS 法和灰色关联度分析筛选桔梗最佳采收期[J]. 中国现代应用药学, 2024, 41(9): 1229-1237. DOI: 10.13748/j.cnki.issn1007-7693.20231105.

