

# 冷等离子预处理对枸杞干燥特性及品质的影响

王庆惠<sup>1</sup> 牛潇潇<sup>2</sup> 刘 佳<sup>1</sup> 崔宽波<sup>1</sup> 杨忠强<sup>1</sup> 肖红伟<sup>2</sup>

(1. 新疆维吾尔自治区农业科学院农业装备研究所, 新疆 乌鲁木齐 830091; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** [目的] 探究冷等离子预处理条件对枸杞干燥特性及品质的影响, 并确定最优工作参数。[方法] 以新鲜枸杞为原料, 在不同输送速度 (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m/min) 条件下进行冷等离子预处理, 分析对比不同预处理对枸杞干燥时间、多糖、总黄酮、总酚、DPPH 自由基清除能力、色泽以及复水比的影响。[结果] 采用冷等离子预处理能够提高枸杞干燥速度, 缩短干燥时间, 当冷等离子预处理输送速度为 1.5 m/min, 干燥后的枸杞多糖、总黄酮、总酚以及 DPPH 自由基清除能力值最高, 分别为  $(103.18 \pm 0.84)$  mg/g、 $(5.35 \pm 0.04)$  mg/g、 $(10.46 \pm 0.07)$  mg GAE/g 和  $(43.27 \pm 0.31)\%$ , 颜色与新鲜枸杞最接近, 复水比也最高。[结论] 冷等离子预处理技术可以有效缩短干燥时间, 提高枸杞干燥品质。

**关键词:** 枸杞; 冷等离子; 预处理; 干燥; 品质

## Effects of cold plasma pretreatment on drying characteristics and quality of goji berries

WANG Qinghui<sup>1</sup> NIU Xiaoxiao<sup>2</sup> LIU Jia<sup>1</sup> CUI Kuanbo<sup>1</sup> YANG Zhongqiang<sup>1</sup> XIAO Hongwei<sup>2</sup>

(1. Agricultural Equipment Institute, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang 830091, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the effects of different cold plasma pretreatment conditions on the drying characteristics and quality of goji berries and determine the optimal working parameters. [Methods] Fresh goji berries are pretreated with cold plasma under different conveying speeds (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 and 2.5 m/min). The drying time, polysaccharides, total flavonoids, total phenols, 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) scavenging capacity, color, and rehydration ratio are compared among different pretreatment groups. [Results] The cold plasma pretreatment improves the drying speed and shortens the drying time. The goji berries pretreated with cold plasma at the conveying speed of 1.5 m/min have the highest polysaccharides, total flavonoids, total phenols, and DPPH scavenging capacity, which are  $(103.18 \pm 0.84)$  mg/g,  $(5.35 \pm 0.04)$  mg/g,  $(10.46 \pm 0.07)$  mg GAE/g, and  $(43.27 \pm 0.31)\%$ , respectively, after drying. Moreover, the dried goji berries exhibit the closest color to fresh samples and the highest rehydration ratio. [Conclusion] Cold plasma pretreatment can not only effectively shorten the drying time but also improve the drying quality of goji berries.

**Keywords:** goji berry; cold plasma; pretreatment; drying; quality

枸杞为茄科枸杞属落叶灌木植物, 在中国已有 2 800 余年的历史。目前, 中国枸杞种植面积约 10 万  $\text{hm}^2$ , 产量 40 万 t, 居世界第一<sup>[1]</sup>。枸杞富含多糖、甜菜碱、类胡萝卜素等多种药性活性物质, 是一种药食同源的新时代水果<sup>[2]</sup>, 具有补血养气、护眼明目、延缓衰老等功效。

枸杞是典型的呼吸跃变型水果, 极难存放。干燥是枸杞最常用的加工方式<sup>[3]</sup>, 能有效减少因微生物感染导致的变质<sup>[4]</sup>, 提高贮存期。枸杞表面被一层由长链和超长链脂肪酸醛类和烃类等疏水性混合物组成的蜡质层包裹<sup>[5]</sup>, 严重阻碍了干燥过程中水分的迁移, 给后续干燥带来极

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区“天山创新团队计划”项目 (编号: 2023D14019); “天山英才”培养计划青年科技拔尖人才项目——青年科技创新人才培养 (编号: 2022TSYCCX0069); 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目课题子任务 (编号: 2023B02009-2-2)

**通信作者:** 肖红伟 (1981—), 男, 中国农业大学教授, 博士。E-mail: xhwcaugxy@163.com

**收稿日期:** 2025-04-10 **改回日期:** 2025-09-04

**引用格式:** 王庆惠, 牛潇潇, 刘佳, 等. 冷等离子预处理对枸杞干燥特性及品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(9): 116-121.

**Citation:** WANG Qinghui, NIU Xiaoxiao, LIU Jia, et al. Effects of cold plasma pretreatment on drying characteristics and quality of goji berries[J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 116-121.

大困难。打破枸杞表面蜡质层的包裹是干燥前预处理的主要目的,也是缩短干燥时间的有效手段。打破蜡质层常用的方法有两种:①采用化学方法,如溶液浸泡<sup>[6-7]</sup>。侯莹等<sup>[6]</sup>利用碱性电解质水对干燥前的枸杞进行浸泡,得出碱性电解质水预处理 10 min 时,枸杞热风干燥品质最佳,此时枸杞多糖质量分数(9.79%)、总酚含量(4.18 mg/g)和总黄酮含量(6.42 mg/g)均显著高于未处理组。②采用物理方法,如超声<sup>[8]</sup>、微波<sup>[9]</sup>、研磨<sup>[10]</sup>等。万芳新等<sup>[8]</sup>研究表明,超声波处理后枸杞的总黄酮、总酚以及 DPPH 自由基清除能力都得到了提高。Russo 等<sup>[10]</sup>研究表明,与未处理相比,研磨后枸杞的水分有效扩散系数提高了 3~4 倍,酚类化合物含量提高了 50% 左右,研磨有效缩短了枸杞的干燥时间。

冷等离子技术是一种新型非热非化学预处理技术,利用冷等离子束与空气中的水发生作用,在枸杞表面发生蚀刻形成微孔,改善枸杞表面的亲水性,从而加快枸杞水分蒸发的过程。目前已在葡萄<sup>[11]</sup>、红枣<sup>[12]</sup>、辣椒<sup>[13]</sup>等物料上得以应用,但冷等离子预处理对枸杞品质指标的研究鲜有报道。研究拟以枸杞为研究对象,探讨冷等离子预处理对枸杞干燥品质指标的影响,确定较优预处理工艺,以期为其工业化应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

枸杞:新杞 10 号,采自新疆博尔塔拉蒙古自治州精河县托里镇,人工挑选大小均匀、无破损、成熟度一致的新鲜枸杞置于 4℃ 恒温恒湿箱保存备用;

乙醇、氢氧化钠、浓硫酸、碳酸钠、甲醇、三氯化铝、苯酚:分析纯,西安三浦化学试剂有限公司;

福林酚、没食子酸、芦丁:上海联迈生物工程有限公司。

#### 1.1.2 主要仪器与设备

热风干燥机:实验室自制;

电子秤:YP200 型,永康市道圣工贸有限公司;

色差仪:CS-820N 型,天津市顺诺仪器科技有限公司;

高速离心机:GT10-2 型,上海珂淮仪器有限公司;

分光光度计:YP-EU04 型,山东优云谱光电科技有限公司;

恒温摇床:ZD-85 型,常州市亿能实验仪器厂;

冷等离子预处理机(见图 1):实验室自制。

### 1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 枸杞初始湿基含水率为(82.27±0.50)%。将枸杞单层均匀铺放在输送带上的料盘内。冷等离子预处理(CP)功率 800 W,喷嘴距料盘高度 25 mm,选取不同输送带速度(0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m/min)进行冷

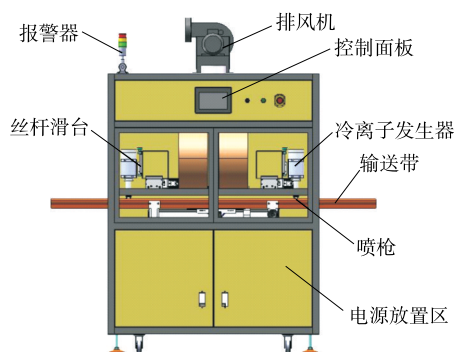


图 1 冷等离子预处理机示意图

Figure 1 Cold plasma pretreatment equipment

等离子预处理(处理速度),分别记为 CP0.5、CP1.0、CP1.5、CP2.0 和 CP2.5,未处理的记为 CP0。每盘枸杞重(600±1) g,烘干工艺为 40℃, 10 h; 50℃, 10 h; 60℃, 至结束<sup>[14]</sup>,风速为 2.0 m/s,干燥过程中每隔 2 h 称重一次,直至湿基含水率达到 13%<sup>[15]</sup>。

1.2.2 水分比计算 参照谢永康等<sup>[16]</sup>的方法。

1.2.3 Weibull 分布函数分析 参照张良等<sup>[17]</sup>的方法。

1.2.4 水分有效扩散系数( $D_{eff}$ )分析 参照孙佳惠等<sup>[18]</sup>的方法。

1.2.5 多糖含量测定 参照万芳新等<sup>[8]</sup>的方法。

1.2.6 总酚含量测定 参照王庆惠等<sup>[14]</sup>的方法。

1.2.7 总黄酮含量测定 参照侯莹等<sup>[6]</sup>的方法。

1.2.8 DPPH 自由基清除能力测定 参照李玲玲等<sup>[19]</sup>的方法。

1.2.9 色泽测定 参照 Jiang 等<sup>[20]</sup>的方法。

1.2.10 复水比测定 参照陈健凯<sup>[21]</sup>的方法。

### 1.3 数据处理

采用 Excel 2022 软件进行数据整理,采用 SPSS 27 软件进行方差分析,采用 Origin 2021 软件绘制图形。利用邓肯法( $P<0.05$ )进行差异性分析。每组试验重复 3 次,结果以平均值±标准差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 处理速度对枸杞干燥动力学特性的影响

2.1.1 干燥动力学 不同处理速度对枸杞干燥过程中水分比随干燥时间的变化如图 2 所示。枸杞水分比随干燥的进行逐渐下降最终趋于稳定,这主要是因为干燥初期枸杞内部水蒸气分压与介质间水蒸气分压差较大,干燥速度较快,随着干燥的进行,枸杞内部水分逐渐降低,水蒸气分压差也逐渐缩小,干燥速度变化最终趋于稳定。采用冷等离子预处理能有效缩短枸杞干燥时间,其中 CP1.5 所需干燥时间为 30 h,与未处理 CP0(干燥时间 42 h)相比,干燥时间缩短了 28.57%,但当处理速度低于 1.5 m/s 后,干燥时间开始有所增加。这可能是因为枸杞

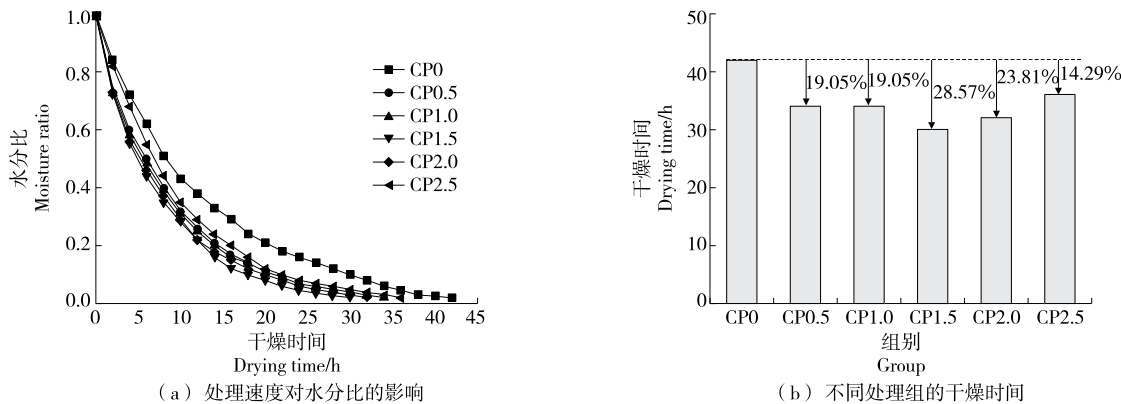


图2 处理速度对枸杞干燥特性和时间的影响

Figure 2 Effects of different processing speeds on drying characteristics and drying time of goji berries

表面覆盖的蜡质层是阻碍内部水分迁移的主要障碍,冷等离子预处理会在枸杞表面发生蚀刻作用,产生许多不规则的微孔,增加枸杞表皮细胞的通透性,促进内部水分迁移和蒸发,缩短干燥时间,但过低的处理速度会增加冷等离子预处理时间,导致枸杞细胞壁破坏和结构坍塌,阻碍内部水分迁移,延长干燥时间<sup>[22]</sup>。针对葡萄<sup>[22]</sup>、辣椒<sup>[13]</sup>以及苹果<sup>[23]</sup>的干燥研究也得到了类似的结论,即适当的冷等离子处理能有效缩短干燥时间。

**2.1.2 基于 Weibull 分布函数分析** 利用 Weibull 分布函数模拟枸杞干燥过程,结果见表 1。决定系数( $R^2$ )表示 Weibull 分布函数拟合程度,其值为 0.990 1~0.997 4,而卡方值( $\chi^2$ )是表示实际观测值与理论推断值之间的偏离程度,其值为  $1.87 \times 10^{-4}$ ~ $4.31 \times 10^{-4}$ ,模型拟合效果较好,可以利用 Weibull 分布函数模拟枸杞的干燥过程。

尺度参数( $\alpha$ )表示干燥过程的速率常数,其值约为干燥过程完成 63% 所用的时间<sup>[17]</sup>。 $\alpha$  值与干燥条件、物料品种、干燥方式等因素有关。由表 1 可知,当处理速度从 0.5 m/s 增加到 2.5 m/s 时, $\alpha$  值先由 1 285.24 min 降低到 1 134.02 min,再升高到 1 360.81 min,利用冷等离子处理后干燥的枸杞  $\alpha$  值均低于未处理的,说明  $\alpha$  与预处理条件相

关。 $\alpha$  值越小,干燥时间越短,冷等离子预处理有助于缩短枸杞干燥时间,提高干燥速率,这与图 2 的表述一致。

形状参数( $\beta$ )一般与物料干燥过程的水分迁移机理有关。由表 1 可知,未经预处理的枸杞干燥加工后, $\beta$  值为 1.21,枸杞在干燥前期存在延滞阶段,当处理速度由 0.5 m/s 增加到 2.5 m/s 时, $\beta$  值变化趋势为:处理速度由 0.5 m/s 增加到 1.0 m/s 时, $\beta$  值为 0.63~0.65,而当处理速度由 1.0 m/s 增加到 2.5 m/s 时, $\beta$  值为 0.65~0.87。一般而言,冷等离子预处理会打破枸杞表面蜡质层,加快干燥速率,但过度处理还会造成细胞壁破坏和结构坍塌<sup>[13]</sup>,从而影响干燥速率。在干燥过程中,物料内部组织结构会发生明显变化,进而影响  $\beta$  的变化,但是,如果  $\beta$  变化差异很小,则认为预处理对物料状态参数影响较小,对干燥过程的影响也较小<sup>[17]</sup>。

**2.1.3 枸杞  $D_{\text{eff}}$  的计算** 利用 Weibull 分布函数计算  $D_{\text{eff}}$  不受干燥过程的限制,可很好地描述干燥过程中内部水分迁移速率的快慢<sup>[24]</sup>。不同干燥条件下枸杞的  $D_{\text{eff}}$  见表 1。 $D_{\text{eff}}$  变化范围为  $2.06 \times 10^{-10}$ ~ $2.88 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s,与未处理相比,冷等离子预处理后枸杞干燥过程中的  $D_{\text{eff}}$  明显增加,其中 CP1.5 的  $D_{\text{eff}}$  系数最高,表明该处理后水分迁移驱动力最大,水分扩散效率更高,此结论与枸杞干燥特性结果相互印证。

**2.2 处理速度对枸杞品质指标的影响**

**2.2.1 对多糖的影响** 由表 2 可知,鲜果多糖含量最高,为  $(113.27 \pm 2.11)$  mg/g,干燥后多糖含量显著降低( $P < 0.05$ )。这可能是由于高温会使多糖中的糖苷键断裂,分解成小分子单糖或寡糖,糖类还会与氨基酸在高温下发生美拉德反应,生成类黑精等产物,导致糖类减少,此外,干燥过程中,随着枸杞鲜果内部水分的蒸发,部分水溶性多糖还可能随水分迁移至表面并流失<sup>[21]</sup>。与 CP0 相比,冷等离子预处理可以减少多糖的损耗,其中 CP1.5 枸杞中多糖含量最高,为  $(103.18 \pm 0.84)$  mg/g,比 CP0 提高了

表 1 Weibull 分布函数模拟结果及水分有效扩散系数  
Table 1 Weibull model simulation result of the drying of goji berries and effective moisture diffusion coefficients

| 组别    | $\alpha/\text{min}$ | $\beta$ | $R^2$   | $\chi^2$              | $D_{\text{eff}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ |
|-------|---------------------|---------|---------|-----------------------|---------------------------------------------------|
| CP0   | 1 587.68            | 1.21    | 0.990 1 | $4.31 \times 10^{-4}$ | $2.06 \times 10^{-10}$                            |
| CP0.5 | 1 285.24            | 0.63    | 0.991 2 | $3.05 \times 10^{-4}$ | $2.54 \times 10^{-10}$                            |
| CP1.0 | 1 285.27            | 0.65    | 0.993 8 | $3.27 \times 10^{-4}$ | $2.58 \times 10^{-10}$                            |
| CP1.5 | 1 134.02            | 0.74    | 0.997 4 | $1.87 \times 10^{-4}$ | $2.88 \times 10^{-10}$                            |
| CP2.0 | 1 209.65            | 0.81    | 0.992 7 | $2.57 \times 10^{-4}$ | $2.70 \times 10^{-10}$                            |
| CP2.5 | 1 360.81            | 0.87    | 0.995 6 | $3.18 \times 10^{-4}$ | $2.40 \times 10^{-10}$                            |

表2 处理速度对枸杞干燥营养成分及清除 DPPH 自由基能力的影响<sup>†</sup>

Table 2 Effect of processing speed on the nutrients and DPPH scavenging capacity of dried goji berries

| 组别    | 多糖/<br>(mg·g <sup>-1</sup> ) | 总酚/<br>(mg GAE·g <sup>-1</sup> ) | 总黄酮/<br>(mg·g <sup>-1</sup> ) | DPPH 自由基<br>清除能力/%       |
|-------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 鲜果    | 113.27±2.11 <sup>a</sup>     | 6.47±0.14 <sup>d</sup>           | 3.17±0.09 <sup>d</sup>        | 28.64±0.56 <sup>d</sup>  |
| CP0   | 91.87±1.17 <sup>d</sup>      | 8.95±0.08 <sup>e</sup>           | 4.30±0.07 <sup>c</sup>        | 33.75±0.18 <sup>c</sup>  |
| CP0.5 | 95.81±1.03 <sup>cd</sup>     | 9.55±0.10 <sup>b</sup>           | 5.14±0.05 <sup>b</sup>        | 38.60±0.22 <sup>b</sup>  |
| CP1.0 | 97.27±0.97 <sup>c</sup>      | 9.78±0.08 <sup>b</sup>           | 5.21±0.04 <sup>a</sup>        | 40.19±0.27 <sup>b</sup>  |
| CP1.5 | 103.18±0.84 <sup>b</sup>     | 10.46±0.07 <sup>a</sup>          | 5.35±0.04 <sup>a</sup>        | 43.27±0.31 <sup>a</sup>  |
| CP2.0 | 100.24±0.91 <sup>b</sup>     | 10.05±0.08 <sup>a</sup>          | 5.24±0.05 <sup>a</sup>        | 41.67±0.24 <sup>ab</sup> |
| CP2.5 | 94.02±0.86 <sup>d</sup>      | 9.45±0.06 <sup>b</sup>           | 5.03±0.03 <sup>b</sup>        | 39.54±0.24 <sup>b</sup>  |

† 同列字母不同表示具有显著性差异( $P<0.05$ )。

12.31%。这是因为在同样的干燥温度条件下,CP1.5干燥时间最短,减少了多糖发生水解、焦糖化和美拉德等生化反应,降低了多糖在干燥过程中的损耗。

2.2.2 对总酚的影响 由表2可知,经冷等离子预处理再干燥的枸杞总酚含量显著高于新鲜枸杞( $P<0.05$ ),这是因为新鲜枸杞中大部分酚类物质被束缚在细胞结构内,而干燥过程可将束缚在基质中的化学物质得以释放,枸杞中的酚类物质更容易被提取出来<sup>[6]</sup>。从表2还可以看出,随着处理速度的减慢,总酚含量呈先增加后降低的趋势,与未处理相比,CP1.5总酚含量为(10.46±0.07) mg GAE/g,比CP0提高了16.87%。这是因为多酚化合物通常储存于细胞壁和液泡内,冷等离子预处理在枸杞表面形成微孔,破坏枸杞细胞结构,使总酚更容易提取;同时,冷等离子能抑制多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(PDO)等氧化酶的活性,通过减少酶活性,阻止单酚中的羟基和邻二酚氧化成邻醌,使得处理后的样品中含有更多的多酚含量<sup>[25]</sup>。但过低的处理速度会延长干燥时间,导致部分酚类化合物降解,总酚含量逐步降低。

干燥前进行冷等离子预处理能提高物料内总酚含量,前期有过相关报道。如Miraei等<sup>[26]</sup>在研究灯笼果干燥时发现,与未处理相比,干燥前进行冷等离子预处理的灯笼果中总酚含量增加了52.31%;Bao等<sup>[27]</sup>在研究冬枣时发现,干燥前进行冷等离子预处理的冬枣中总酚含量提高了12%;Bai等<sup>[25]</sup>在研究豌豆时发现,干燥前进行冷等离子预处理豌豆中总酚含量提高了24.06%。

2.2.3 对总黄酮的影响 由表2可知,冷等离子预处理可以显著提高枸杞中总黄酮含量( $P<0.05$ ),随着处理速度的减慢,枸杞中总黄酮含量先增加后降低,在CP1.5时,枸杞中总黄酮含量为(5.35±0.04) mg/g,达到最高,这与干燥速率相关。在同样的干燥温度条件下,枸杞中总黄酮含量主要是由黄酮类化合物的合成及氧化降解决定,干

燥速率是影响其合成量以及氧化降解的关键因素之一,研究<sup>[6]</sup>表明,黄酮类化合物的合成与干燥速率呈正相关,随着干燥速率的增加,减少了枸杞与氧气接触时间,降低了枸杞中黄酮类化合物的降解。Subrahmanyam等<sup>[23]</sup>采用冷等离子预处理再干燥苹果时还发现,苹果中总黄酮含量的变化不仅与干燥速率相关,还与冷等离子处理造成的细胞结构损伤程度相关。

2.2.4 对DPPH自由基清除能力的影响 由表2可知,与未处理相比,冷等离子预处理再干燥可以显著增加枸杞DPPH自由基清除能力( $P<0.05$ )。同时,随着处理速度的减慢,枸杞DPPH自由基清除能力呈先增加后降低的变化趋势,在CP1.5时DPPH自由基清除能力为(43.27±0.31)%。这主要是因为冷等离子处理枸杞可引起枸杞细胞壁或膜的局部破裂,促进抗氧化剂的释放,使其更容易用于抗氧化反应,同时,冷等离子预处理还可缩短干燥时间,减少抗氧化化合物的热降解,但过低的处理速度导致干燥时间增加,枸杞中的抗氧化成分如多酚和维生素C容易被氧化降解,导致DPPH自由基清除能力降低。

2.2.5 对颜色的影响 由表3可知,干燥后枸杞的颜色与新果样品相比都有所恶化,鲜果、未处理组与处理组的明亮度( $L^*$ )、红绿值( $a^*$ )和黄蓝值( $b^*$ )之间都有显著性差异( $P<0.05$ )。与未处理相比,经冷等离子预处理的枸杞总色差值( $\Delta E$ )显著降低,其中在CP1.5条件下的枸杞 $\Delta E$ 值最小,最接近鲜果色泽。这可能是因为冷等离子预处理不仅能抑制PPO和PDO的活性,减轻酶促褐变的反应<sup>[25]</sup>,还可以缩短干燥时间,减少干燥过程中暴露在高温和氧气中的时间。而Zhang等<sup>[13]</sup>在研究冷等离子预处理对辣椒干燥过程中颜色的变化时得出,冷等离子预处理对物料颜色的变化还与物料外果皮厚度相关,厚皮材料对冷等离子预处理的耐受性较强,干燥后颜色不会发生变化,而薄皮物料,颜色则会发生恶化。

2.2.6 对复水比的影响 由表3可知,经冷等离子预处理干燥后枸杞复水比均高于未处理组,其中CP1.5组复水比最高,为2.55±0.11。这可能是因为冷等离子对枸杞表皮具有蚀刻作用,形成了微孔,干枸杞在复水过程中更容易吸收水分,此外,冷等离子预处理还能在枸杞表面引入羟基、羧基、氨基等极性官能团,这些官能团能增强枸杞表面亲水性,进一步增加枸杞表面与水分子之间的亲和力,改善复水性<sup>[28]</sup>。但过低的处理速度会增加预处理时间,造成细胞壁破坏和结构坍塌,阻碍水分渗透,因此复水比随处理速度的降低呈先增加后降低的趋势。

### 3 结论

与未处理相比,采用冷等离子预处理能够提高枸杞干燥速度,缩短干燥时间,其中输送带速度为1.5 m/min所需干燥时间为30 h。通过计算 $R^2$ 和 $\chi^2$ 值,得出Weibull分

表 3 处理速度对枸杞色泽及复水比的影响<sup>†</sup>

Table 3 Effects of processing speed on the color changes and rehydration rate of goji berries

| 组别    | <i>L</i> <sup>*</sup>    | <i>a</i> <sup>*</sup>   | <i>b</i> <sup>*</sup>   | Δ <i>E</i>              | 复水比                     |
|-------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 鲜果    | 40.61±1.21 <sup>a</sup>  | 38.77±0.53 <sup>c</sup> | 26.49±0.89 <sup>c</sup> |                         |                         |
| CP0   | 25.76±0.83 <sup>d</sup>  | 46.65±1.01 <sup>a</sup> | 35.78±0.57 <sup>a</sup> | 19.21±0.59 <sup>a</sup> | 2.19±0.05 <sup>b</sup>  |
| CP0.5 | 29.52±1.03 <sup>c</sup>  | 42.85±0.87 <sup>b</sup> | 32.87±0.65 <sup>b</sup> | 13.43±0.55 <sup>b</sup> | 2.35±0.07 <sup>ab</sup> |
| CP1.0 | 30.65±0.97 <sup>bc</sup> | 42.57±0.56 <sup>b</sup> | 32.68±0.72 <sup>b</sup> | 12.33±0.47 <sup>b</sup> | 2.37±0.08 <sup>a</sup>  |
| CP1.5 | 32.07±0.84 <sup>b</sup>  | 41.28±0.64 <sup>b</sup> | 31.05±0.67 <sup>b</sup> | 10.00±0.44 <sup>c</sup> | 2.55±0.11 <sup>a</sup>  |
| CP2.0 | 31.85±0.91 <sup>b</sup>  | 41.76±0.72 <sup>b</sup> | 31.56±0.83 <sup>b</sup> | 10.55±0.51 <sup>c</sup> | 2.48±0.09 <sup>a</sup>  |
| CP2.5 | 28.16±0.86 <sup>c</sup>  | 43.33±0.75 <sup>b</sup> | 33.12±0.61 <sup>b</sup> | 14.82±0.62 <sup>b</sup> | 2.28±0.07 <sup>b</sup>  |

<sup>†</sup> 同列字母不同表示具有显著性差异( $P<0.05$ )。

布函数能够很好地模拟枸杞干燥过程,经冷等离子预处理后枸杞干燥过程中的水分有效扩散系数明显增加。选用输送带速度为 1.5 m/min 冷离子预处理后干燥,此时枸杞多糖、总黄酮、总酚和 DPPH 自由基清除能力值最高,分别为 (103.18±0.84) mg/g、(5.35±0.04) mg/g、(10.46±0.07) mg GAE/g 和 (43.27±0.31)%,颜色与新鲜枸杞最接近,复水比最高。因此,可以采用冷等离子方法进行枸杞干燥前的预处理,但对于冷等离子预处理枸杞干燥工艺的能耗及成本等问题还需进一步研究探讨。

参考文献

[1] 刘玉闯,刘嘉辉,赵健,等.枸杞机械化采收相关理论与装备研究进展[J].林业科学,2025,61(5): 222-232.

LIU Y C, LIU J H, ZHAO J, et al. Research progress of theory and equipment related to mechanized harvesting of *Lycium barbarum*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(5): 222-232.

[2] 张琦,朱绚绚,熊佳丽,等.枸杞营养功能特性及其产品开发现状[J].食品与发酵工业,2024,50(15): 398-408.

ZHANG Q, ZHU X X, XIONG J L, et al. Research progress of functional properties of wolfberry and development of its products[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(15): 398-408.

[3] 宗学文,宋增全,刘登科,等.工业化枸杞常温真空干燥的工艺试验对比[J].现代食品科技,2025,41(3): 243-250.

ZONG X W, SONG Z Q, LIU D K, et al. Experimental comparison of industrial processes for vacuum drying of wolfberry at room temperature[J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(3): 243-250.

[4] 白顺琴.枸杞射频真空联合干燥技术研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2024: 2-4.

BAI S Q. Radio frequency-vacuum drying technology for wolfberries[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2024: 2-4.

[5] 周旋,黄婷,白雅楠,等.响应面法优化枸杞热风干燥脱蜡工艺[J].江西农业学报,2024,36(6): 67-73.

ZHOU X, HUANG T, BAI Y N, et al. Optimization of hot air

drying dewaxing process of *Lycium barbarum* by response surface method[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2024, 36(6): 67-73.

[6] 侯莹,崔朝经,王永怡,等.不同碱性电解水预处理条件下枸杞变温控湿干燥特性研究[J].农业机械学报,2024,55(Suppl 2): 371-379.

HOU Y, CUI C J, WANG Y Y, et al. Effect of alkaline electrolytic water pretreatment on temperature-and humidity-controlled hot air drying quality of wolfberry[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Suppl 2): 371-379.

[7] 张军.酸性电解水预处理枸杞的真空脉动干燥热质传递规律及品质特性研究[D].银川:宁夏大学,2024: 55-65.

ZHANG J. Study on heat and mass transfer law and quality characteristics of pulsation vacuum drying of wolfberries pretreated with acidic electrolytic water[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2024: 55-65.

[8] 万芳新,李武强,罗燕,等.超声预处理对枸杞远红外真空干燥特性及品质的影响[J].中草药,2020,51(18): 4 654-4 663.

WAN F X, LI W Q, LUO Y, et al. Effects of ultrasonic pretreatment on far infrared vacuum drying properties and quality of *Lycium barbarum*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2020, 51(18): 4 654-4 663.

[9] 王兆凯,任广跃,段续,等.预处理与干燥方式对枸杞干燥特性及品质影响的研究进展[J].食品与发酵工业,2023,49(19): 367-375.

WANG Z K, REN G Y, DUAN X, et al. Research progress on influence of pretreatment and drying methods on drying characteristics and quality of goji[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(19): 367-375.

[10] 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.

[11] HUANG C C, WU J S, WU J S, et al. Effect of novel atmospheric-pressure jet pretreatment on the drying kinetics and quality of white grapes[J]. Journal of the Science of Food

- and Agriculture, 2019, 99(11): 5 102-5 111.
- [12] BAO T, HAO X, SHISHIR M R I, et al. Cold plasma: an emerging pretreatment technology for the drying of jujube slices[J]. Food Chemistry, 2021, 337: 127783.
- [13] ZHANG X L, ZHONG C S, MUJUMDAR A S, et al. Cold plasma pretreatment enhances drying kinetics and quality attributes of chili pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 241: 51-57.
- [14] 王庆惠, 罗燕, 杨莉玲, 等. 不同干燥条件对枸杞热风干燥特性和品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 202-210.
- WANG Q H, LUO Y, YANG L L, et al. Effects of drying conditions on hot-air drying characteristics and quality of goji berries[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 202-210.
- [15] 魏娟, 王尔杰, 蔚明强, 等. 基于响应面法的枸杞低温真空干燥工艺优化[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(9): 138-145.
- WEI J, WANG E J, YU M Q, et al. Optimization of goji berries low-temperature vacuum drying process using response surface methodology[J]. China Food Additives, 2024, 35(9): 138-145.
- [16] 谢永康, 王茜, 巨浩羽, 等. 5种干燥方式对花生干燥特性及品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 197-203.
- XIE Y K, WANG X, JU H Y, et al. Effects of five drying methods on the drying characteristics and quality of peanuts [J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 197-203.
- [17] 张良, 牛坡, 赖于树, 等. 干燥条件对西兰花干燥特性及理化性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(6): 257-263.
- ZHANG G, NIU P, LAI Y S, et al. Effects of drying conditions on drying characteristics and physicochemical properties of broccoli[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(6): 257-263.
- [18] 孙佳惠, 窦志英, 汤世缘, 等. 基于Weibull分布函数模型及多指标分析探究不同干燥方法对酒苋蓉的影响[J]. 中草药, 2024, 55(21): 7 266-7 278.
- SUN J H, DOU Z Y, TANG S Y, et al. Effects of different drying methods on wine-steamed cistanche deserticola based on Weibull function model and multi-index analysis[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2024, 55(21): 7 266-7 278.
- [19] 李玲玲, 袁航, 叶子, 等. 促干剂对热风条件下西梅品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(11): 238-244.
- LI L L, YUAN H, YE Z, et al. Effect of desiccant on the quality of *Prunus domestica* L. under hot air condition[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(11): 238-244.
- [20] JIANG D L, WANG Q H, HUANG C, et al. Effect of various different pretreatment methods on infrared combined hot air impingement drying behavior and physicochemical properties of strawberry slices[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101299.
- [21] 陈健凯. 不同干燥方法对杏鲍菇结构及品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(23): 221-228.
- CHEN J K. Effects of different drying methods on the structure and quality of *Pleurotus eryngii*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(23): 221-228.
- [22] 杨海彬. 葡萄冷离子促干预处理装置设计与试验[D]. 北京: 中国农业大学, 2024: 44-53.
- YANG H B. Design and experiment of grape cold plasma-promoting intervention treatment equipment[D]. Beijing: China Agricultural University, 2024: 44-53.
- [23] SUBRAHMANYAM K, GUL K, PARIDALA S, et al. Effect of cold plasma pretreatment on drying kinetics and quality attributes of apple slices in Refractance window drying[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 92: 103594.
- [24] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 阶段降湿对山药热风干燥特性和品质的影响[J]. 中草药, 2021, 52(21): 6 518-6 527.
- JU H Y, ZHAO S H, ZHAO H Y, et al. Influence of step-down relative humidity on drying characteristic and quality of hot air drying of *Dioscoreae rhizoma slices*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2021, 52(21): 6 518-6 527.
- [25] BAI J W, LI D D, ABULAITI R, et al. Cold plasma as a novel pretreatment to improve the drying kinetics and quality of green peas[J]. Foods, 2025, 14(1): 84.
- [26] MIRAEI ASHTIANI S H, RAFIEE M, MOHEBI MORAD M, et al. Impact of gliding arc plasma pretreatment on drying efficiency and physicochemical properties of grape[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 63: 102381.
- [27] BAO T, HAO X, SHISHIR M R I, et al. Green alternative methods for pretreatment of whole jujube before the drying process[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102: 1 030-1 039.
- [28] ZHIANMANESH M, GILMOUR A, BILEK M M M, et al. Plasma surface functionalization: a comprehensive review of advances in the quest for bioinstructive materials and interfaces [J]. Applied Physics Reviews, 2023, 10(2): 021301.