

直流高压电场中枸杞的干燥特性与数学模型研究

丁昌江 杨茂生

(内蒙古工业大学理学院, 呼和浩特 010051)

摘要: 以枸杞为对象,研究其在相同温度和湿度、不同强度直流高压电场下的干燥特性;检测干燥后枸杞的收缩率、复水率;测量高压电场和干燥箱干燥后枸杞内部多糖和维生素 C 含量;计算了舍伍德数、传质增强因子以及水分有效扩散系数;采用 10 种常用的薄层物料干燥数学模型和 3 个统计参数对干燥数据进行了模拟和比较。结果表明:在直流高压电场下枸杞的干燥速率明显比对照组的干燥速率大,在同一电压下枸杞的干燥速率随着干燥时间的延长逐渐减小,枸杞的干燥速率随着电压的提高而增加,单位能耗也随着电压的增加而增加。在直流高压电场下枸杞的复水率比对照组的复水率高,单因素方差分析表明,在直流高压电场下枸杞的复水率与对照组的复水率之间存在显著性差异,但收缩率之间不存在显著性差异。高压电场干燥比干燥箱干燥更好地保存了枸杞内部的营养成分。传质增强因子随着电压的增加呈线性增长关系,枸杞内部水分有效扩散系数随着电压的增加而增加。通过统计参数分析,发现所选的 10 个数学模型都可以用来描述枸杞在直流高压电场下的干燥过程,其中 Midill and Kucuk 模型最适合用来描述直流高压电场中枸杞干燥曲线的变化规律。高压电场影响枸杞表面的微观结构。这为优化直流高压电场干燥枸杞工艺,提高干燥效率和发展枸杞干燥技术提供了线索和实践指导。

关键词: 枸杞; 高压电场干燥; 干燥速率; 复水率; 数学模型

中图分类号: S375; S567.1*9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)06-0302-10

Drying Characteristics and Mathematical Models of Chinese Wolfberry in DC High Voltage Electric Field

DING Changjiang YANG Maosheng

(College of Science, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China)

Abstract: Aiming to explore the new drying technology of Chinese wolfberry, improve the quality of dried Chinese wolfberry, and find suitable mathematical model, the drying experiments were carried out for Chinese wolfberry fruits with a multiple needle-to-plate electrode at 0 kV, 22 kV, 28 kV, 34 kV, 40 kV and 45 kV at the same temperature and humidity in DC high voltage electric field. The shrinkage rate, rehydration rate, polysaccharides and vitamin C content of the dried wolfberry fruits were measured. The mass transfer enhancement factor, the effective moisture diffusion coefficient (D_{eff}) and the specific energy consumption were also calculated. Ten mathematical models were then applied to simulate drying curves based on three statistical parameters. The results showed that the drying rate of Chinese wolfberry fruits in the DC high voltage electric field was higher than that of the control. Under the same voltage, the drying rate of the Chinese wolfberry was gradually changed with the prolonging of drying time. The drying rate and specific energy consumption were increased with the increase of voltage. By ANOVA, the results showed that Chinese wolfberry fruits in the DC high voltage electric field had a significant effect on rehydration rate compared with control ($p < 0.05$), but there were no significant differences in shrinkage rate of dried Chinese wolfberry fruits ($p > 0.05$). DC high voltage electric field drying could keep more polysaccharides and vitamin C content compared with oven drying. The mass transfer enhancement factor was heightened with the increase of voltage, and the effective moisture diffusion coefficient (D_{eff}) values were increased with the increase of voltage. It was clear that all ten mathematical models could satisfactorily describe drying curves of Chinese wolfberry fruits treated by DC high voltage electric field. From the statistical result, the Midill and Kucuk model was selected as the best model to represent the

收稿日期: 2016-10-09 修回日期: 2016-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51467015)和内蒙古工业大学基金项目(ZD201311)

作者简介: 丁昌江(1978—),男,教授,博士,主要从事高压电场干燥和电磁生物效应研究,E-mail: ding9713@163.com

drying characteristics of Chinese wolfberry fruits in the DC high voltage electric field. Microstructure detection indicated that the microstructure of Chinese wolfberry fruits was changed in the DC high voltage electric field. Those results may provide some clues and practical guidance for optimizing the process of drying Chinese wolfberry fruits in DC high voltage electric field drying system, improving the drying efficiency and promoting the development of Chinese wolfberry fruits drying technology.

Key words: Chinese wolfberry fruits; high voltage electric field drying; drying rate; rehydration rate; mathematical models

引言

枸杞具有极高的药用价值和营养价值^[1-2],含有丰富的多糖、氨基酸、黄酮类化合物、矿物质等^[3]。但新鲜枸杞果实采摘后,保质期极短,收获后的鲜果必须马上进行干燥处理,且枸杞干制后的品质直接影响收购价格和当地农民的收入。我国90%以上的枸杞干燥采用传统晾晒、热风干燥等处理方法,这2种方法易造成枸杞果发霉变质、干燥效率低,有效成分损失严重,干燥品质较差,色泽不佳^[4]。真空冷冻干燥法加工的枸杞色泽鲜红、生物活性成分和营养成分保持良好,但其设备昂贵,能耗较高,不适合应用于一般枸杞干燥工艺^[5-6]。因此,探索新型枸杞干燥技术,对枸杞干燥工业发展具有实际意义。

高压电场干燥技术是近年发展起来的一项新型干燥技术^[7-14],具有干燥速度快,很好地保存物料的有效成分、能耗低等优点^[7]。CAO等^[8]研究多针板电极下高压电场干燥小麦的特性,发现在电压为10.0、7.5、5.0 kV时的干燥速率比对照组分别提高了2.1、2.0、1.7倍。CHEN等^[9]研究了单极板高压电场下干燥马铃薯片,发现在高压电场下厚度4 mm马铃薯片的干燥速率比对照组提高2.5倍,厚度8 mm的马铃薯片提高了2.1倍。DING等^[10]用高压电场干燥胡萝卜片,发现胡萝卜素比对照组提高了11.53%。HASHINA等^[11]研究了高压电场下干燥苹果片的特性,发现在高压电场干燥时,干燥速率快,物料温度恒定,不产生任何新的化合物。TAGHIAN等^[13]用高压电场干燥蘑菇,通过电子扫描显微镜观察发现高压电场干燥的蘑菇片存在明显的细胞组织坍塌,证明高压电场对物料表面结构有较大影响,进而可能对一些干燥特性和干燥品质产生一定的影响,如提高物料干燥速率以及提高物料的复水率等。许多学者对描述高压电场干燥过程的数学模型进行了初步研究^[10,14],但至今还没有发现关于直流高压电场干燥枸杞的详细报道,缺少对单一物料进行全面、细致、系统的研究。

为了探索高速、高效、节约能源的枸杞干燥技术,本文对枸杞在直流高压电场下干燥进行全面、细

致、系统的实验研究,探索枸杞干燥特征和品质,并建立枸杞干燥模型,为枸杞直流高压电场干燥的过程控制、预测及枸杞制品的工业化生产干燥工艺提供理论和实验基础。

1 材料与方法

1.1 实验装置

海信冰箱(青岛);赛多利斯 BS124S 型电子天平(德国);Sh10A 型水分快速测定仪(上海);温度计;湿度计;高压静电场干燥装置。

高压电场干燥装置如图 1 所示,主要由 YD(JZ)-1.5/50 型高压电源、KZX-1.5KVA 型控制柜(武汉)和高压电场系统组成。YD(JZ)-1.5/50 型高压电源可以输出直流高压。KZX-1.5KVA 型控制柜可以调节电压范围;直流电压为 0~70 kV。高压电场系统由 2 个极板组成:上极板为多针电极(64 cm×40 cm),针状电极用不锈钢金属丝链接,接高压电源,针长为 2 cm,针与针之间的距离在横向和纵向上都为 4 cm;下极板为不锈钢平板(84 cm×44 cm),接地,下极板与地之间接微安表,测量实验过程中电极间的电流,针尖与下极板之间的距离为 10 cm。

1.2 实验材料

枸杞鲜果购自内蒙古呼和浩特市托县枸杞种植户,从树上采摘后直接放在冰箱中 4℃ 冷藏,备用。

1.3 实验方法

在温度为(25±2)℃、相对湿度为(30±5)%、风速为 0 m/s 的实验室环境中进行实验。从冰箱中挑选成熟饱满、大小均匀的枸杞鲜果,除去叶柄,进行干燥实验前预处理。将其浸泡在 300 mL、温度为 60℃、5% 的碳酸钠溶液中,10 min 后捞出,沥干。将实验预处理好的枸杞鲜果取出一少部分放入 Sh10A 型水分快速测定仪测定初始含水率。另取相同的 2 份分别放在针-板电极直流高压电场下和实验室环境下做干燥实验。电压分别为 22、28、34、40、45 kV。每隔 1 h 用电子天平记录一次枸杞质量,然后根据含水率和干燥速率公式计算不同时间内的含水率和干燥速率。实验重复做 3 次,结果用平均值±标准方差来表示。

当地农民多采用日晒和干燥箱的干燥方式,将

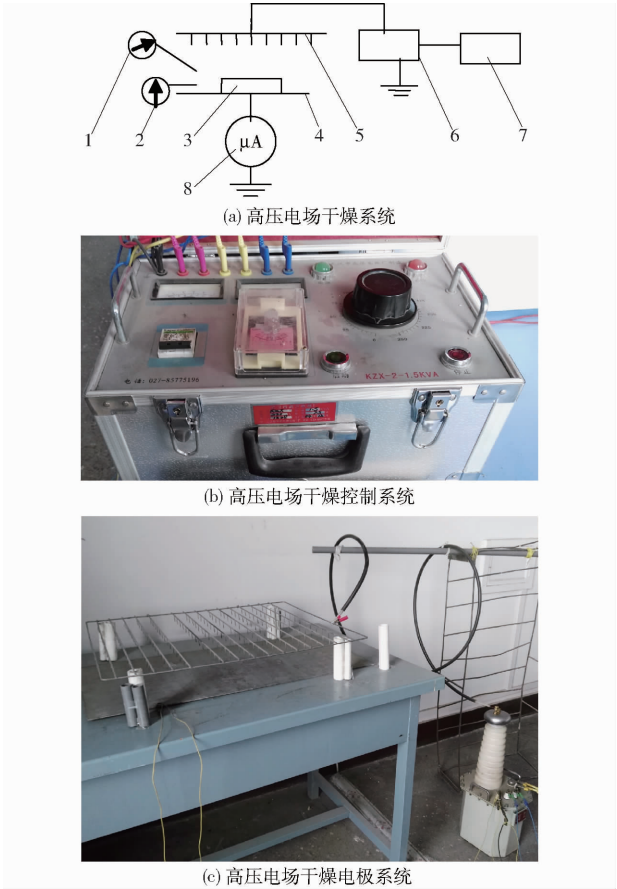


图 1 高压电场干燥装置

Fig.1 Equipment diagrams of high voltage electric field drying
1. 温度计 2. 湿度计 3. 样品 4. 接地电极 5. 电极 6. 高压电源 7. 控制柜 8. 微安表

日晒和干燥箱干燥的枸杞产品、高压电场干燥的枸杞产品拍照,进行比较。

1.4 测量项目

1.4.1 枸杞果实含水率

含水率计算公式为

$$m_g = m_0(1 - M_0) \tag{1}$$
$$M_i = \frac{m_i - m_g}{m_g} \times 100\% \tag{2}$$
$$M_R = \frac{M_i - M_e}{M_0 - M_e} \tag{3}$$

式中 m_g ——枸杞果实干质量, g
 m_0 ——枸杞果实初始质量, g
 m_i ——第 i 小时枸杞果实质量, g
 M_0 ——枸杞果实初始含水率
 M_i ——第 i 小时枸杞果实含水率
 M_e ——枸杞果实平衡含水率
 M_R ——枸杞果实水分比

1.4.2 枸杞果实的干燥速率

干燥速率计算公式为

$$D_R = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \tag{4}$$

式中 D_R ——干燥速率, h^{-1}
 M_t —— t 时刻的枸杞果实含水率
 $M_{t+\Delta t}$ —— $t + \Delta t$ 时刻的枸杞果实含水率

1.4.3 复水率

为计算枸杞果实在针-板电极直流高压电场中干燥的复水率,将干燥后的枸杞放入 37℃ 的恒温水中浸泡 7 h,然后将枸杞果实捞出,用滤纸擦干表面水分后用赛多利斯 BS124S 型电子天平测量枸杞果实复水前后质量变化^[10]。枸杞复水率计算公式为

$$R_R = \frac{m_a}{m_b} \tag{5}$$

式中 m_a ——枸杞复水后质量, g
 m_b ——枸杞复水前质量, g

1.4.4 收缩率

枸杞鲜果和枸杞干果体积分别用排水法测定,收缩率计算公式为

$$S_R = \frac{V_0 - V_f}{V_0} \tag{6}$$

式中 V_0 ——枸杞鲜果体积, cm^3
 V_f ——枸杞干果体积, cm^3

1.4.5 多糖和维生素 C 含量

将枸杞分成 2 份,分别放在高压电场干燥系统和干燥箱中进行干燥,电压取 34 kV,干燥箱温度为 50℃。将高压直流电场干燥系统和干燥箱中干燥过的枸杞各取 5 g,用超声波辅助的苯酚-硫酸法测量枸杞多糖的含量;再各取 5 g,用碘滴定法测量维生素 C 的含量。

1.4.6 传质增强因子(蒸发增强因子)

传质增强因子是指直流高压电场干燥的舍伍德数与对照组的舍伍德数的比值^[15]。传质增强因子以及舍伍德数的计算公式为^[16]

$$M_{TEF} = \frac{S_{kv}}{S_0} \tag{7}$$

$$S = \frac{h_m d}{D} = \frac{\dot{m}}{A_c \Delta C} \frac{d}{D} \tag{8}$$

其中 $\Delta C = C_0 - C_\infty$ (9)

$$C = \frac{0.622 \rho P_g}{P - \varphi P_g} \tag{10}$$

式中 M_{TEF} ——传质增强因子
 S_{kv} ——直流高压电场干燥舍伍德数
 S_0 ——对照组舍伍德数
 h_m ——传质系数 $\dot{m}$ ——传质速率
 d ——针电极直径
 D ——质量扩散系数
 A_c ——电晕风下样品表面积, m^2

C ——水蒸气质量浓度
 C_0 ——样品表面水蒸气质量浓度
 C_∞ ——空气中水蒸气的质量浓度
 ΔC ——样品表面的水蒸气质量浓度与空气中水蒸气的质量浓度差值
 ρ ——空气密度
 φ ——相对湿度
 P ——大气压强
 P_g ——饱和水蒸气压强

1.4.7 水分有效扩散系数

用 Fick 第二定律计算干燥过程中的水分有效扩散系数。Fick 第二定律为

$$\frac{dM}{dt} = \nabla (D_{eff} \nabla M) \tag{11}$$

式中 M ——干基含水率 t ——时间, s
 D_{eff} ——水分有效扩散系数, m²/s

对于长时间干燥过程, $M_R < 0.6$, 方程可以表示为^[10]

$$M_R = \frac{8}{\pi^2} \exp \left(- \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) \tag{12}$$

式中 L ——枸杞鲜果层的厚度, m
两边取对数后, 式(12)可以写为

$$\ln M_R = - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t + \ln \frac{8}{\pi^2} \tag{13}$$

1.4.8 数学模型与统计参数

表 1 给出了 10 个常用于描述薄层物料干燥动力学的半经验和经验模型。非线性拟合分析用于求出每个模型的常数与参数, 统计参数包括约化卡方值 χ^2 、均方根误差 E_{RMS} 、决定系数 R^2 。用这些参数作为选取最适合描述干燥动力学方程的参考标准。 R^2 值越大, χ^2 、 E_{RMS} 值越小, 越适合描述物料干燥动力学数学模型^[10,17]。

表 1 用于模拟干燥曲线的数学模型
Tab.1 Mathematical models used to simulate drying curves

模型序号	模型名称	模型方程	文献序号
1	Lewis (Newton)	$M_R = \exp(-kt)$	[17]
2	Henderson and Pabis	$M_R = a \exp(-kt)$	[18]
3	Logarithmic	$M_R = a \exp(-kt) + b$	[19]
4	Parabolic(Polynomial)	$M_R = a + bt + ct^2$	[20]
5	Page	$M_R = \exp(-kt^n)$	[21]
6	Taghian Dinani	$M_R = a \exp \left(- \left(\frac{t-b}{c} \right)^2 \right)$	[14]
7	Wang and Singh	$M_R = 1 + at + bt^2$	[22-23]
8	Modified Page	$M_R = \exp(- (kt)^n)$	[24]
9	Midilli and Kucuk	$M_R = a \exp(-kt^n) + bt$	[25]
10	Weibull	$M_R = \exp \left(- \left(\frac{t}{b} \right)^a \right)$	[26]

1.4.9 能量消耗

在高压直流电场下干燥枸杞, 单位能耗即蒸发 1 kg 水所需要的能量, 计算公式为

$$E_{EHD} = \frac{VI}{m_0 - m_{t_i}} t_i \tag{14}$$

式中 E_{EHD} ——单位能耗
 V ——电压 I ——电流
 m_{t_i} ——枸杞含水率达到 17% 时的质量
 t_i ——干燥过程所用的时间

1.4.10 微观结构的观测

将枸杞分成 2 份, 分别放在高压电场干燥系统和环境中进行干燥, 电压取 34 kV, 环境作为对照组。用 S3400N 型扫描电子显微镜对直流高压电场和对照组枸杞干制品表面进行扫描, 观察高压电场对枸杞表面结构的影响。

1.4.11 数据统计分析

数据分析、单因素方差分析和多元回归分析采用 Excel 软件, 绘图与非线性回归分析采用 Origin 软件。用单因素方差分析计算枸杞干燥速率、含水率、复水率、收缩率、传质增强因子和水分有效扩散系数等数据的差异性。结果用平均值 ± 标准方差来表示。

2 实验结果与讨论

2.1 干燥方法对枸杞产品的影响

图 2 是当地农民日晒、干燥箱干燥和高压电场干燥的枸杞产品照片。进行比较发现高压电场干燥的枸杞产品比日晒和干燥箱干燥的颜色鲜红, 干燥均匀。

2.2 不同直流电压下枸杞干燥速率

干燥速率是衡量一种干燥技术的重要指标,



图 2 不同干燥方法得到的枸杞产品

Fig.2 Effects of drying methods on wolfberry products

图 3 是干燥速率随枸杞干基含水率变化的曲线图。由图可见,在直流高压电场下枸杞的干燥速率明显大于对照组,而且随着电压的增加枸杞的干燥速率也随着增加,前 5 h 电压为 45、40、34、28、22 kV 下的干燥速率分别是对照组的 2.79、2.40、2.05、1.77、1.58 倍。同时干燥速率随干基含水率的减小而下降,当枸杞在直流高压电场干燥下含水率下降到一定程度时,干燥速率开始低于对照组的干燥速率。在 45 kV 电压下干燥时当干基含水率下降到低于 37%,对照的干基含水率下降到低于 114% 时,干燥速率与对照组相比开始减小;在 40 kV 电压下干燥时当干基含水率下降到低于 20%,对照的干基含水率下降到低于 76% 时,干燥速率与对照组相比开始减小。

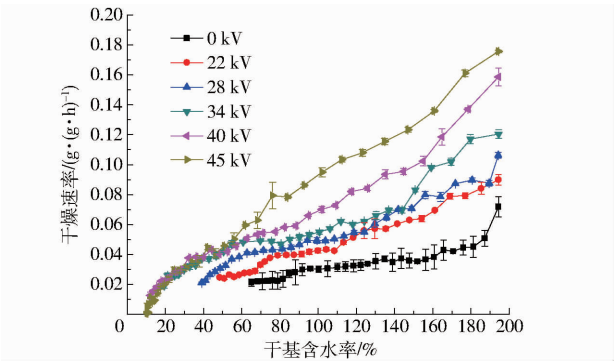


图 3 不同直流电压下枸杞干燥速率的变化曲线
Fig.3 Variation curves of drying rate of Chinese wolfberry treated at different direct voltages

2.3 不同直流电压下枸杞水分比

图 4 是水分比随时间的变化曲线。由图 4 可知,直流高压电场干燥下的水分比曲线均位于对照组曲线的下方,并且电压高的曲线均位于电压低的曲线下方。也就是说,在直流高压电场干燥下,枸杞鲜果水分蒸发比对照组要快,并且电压越高水分蒸发越快。单因素方差分析显示 45 kV 和 40 kV 电压处理与对照组之间存在极显著差异 ($p < 0.01$), 34 kV 电压处理与对照组之间存在显著差异 ($p < 0.01$), 28 kV 和 22 kV 电压处理与对照组之间存在

显著差异 ($p < 0.05$), 45 kV 与 40 kV 和 34 kV 电压处理与对照组之间不存在显著差异 ($p > 0.05$), 45 kV 与 28 kV 和 22 kV 电压处理与对照组之间存在极显著差异 ($p < 0.01$)。

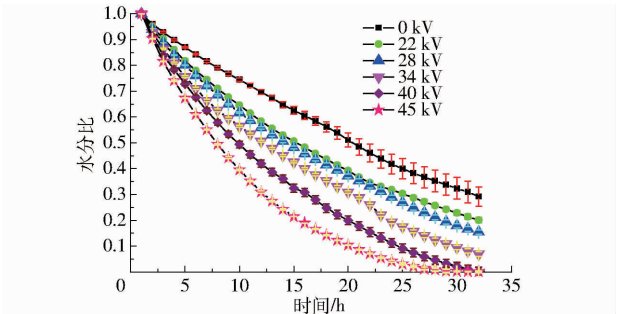


图 4 不同直流电压下枸杞水分比的变化曲线
Fig.4 Variation curves of moisture ratio of Chinese wolfberry treated at different direct voltages

2.4 不同电压下复水率

复水是指干制品吸收水分后复原的过程,复水性也反映了干燥产品的品质,复水率越高,说明干燥对产品的结构组织破坏程度越小,干制品的品质越好^[27]。图 5 为在针-板电极不同直流电压下复水率的变化规律,对照组的复水率最低,为 0.857。在直流电压 45、40、34、28、22 kV 下的复水率分别是对照组复水率的 1.71、1.72、1.72、1.64、1.59 倍。单因素方差分析表明,在直流电压 45、40、34、28、22 kV 下的复水率与对照组存在显著性差异,但是直流高压电场下干燥的复水率之间不存在显著性差异 ($p > 0.05$)。TAGHIAN 等^[13]在研究高压电场干燥蘑菇的过程中发现在高压电场中干燥的蘑菇有很高的复水率,并随着电压的增加而增加。TAGHIAN 等^[13]认为在高压电场作用下,物料形成多空结构,这种结构导致物料有较高的复水率。

2.5 不同电压下收缩率

由图 6 可见,在针-板电极下直流电压为 45、40、34、28、22、0 kV 时收缩率分别为 0.672 76、0.701 75、0.761 48、0.720 23、0.691 04、0.735 81。单因素方差分析显示,高压电场干燥的收缩率和对

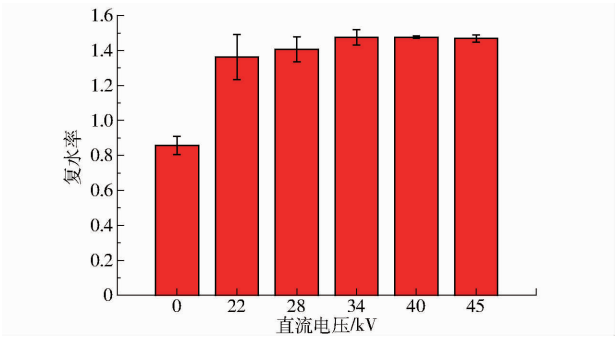


图 5 不同直流电压对复水率的影响

Fig.5 Effect of different voltages on rehydration rate of dried Chinese wolfberry fruits

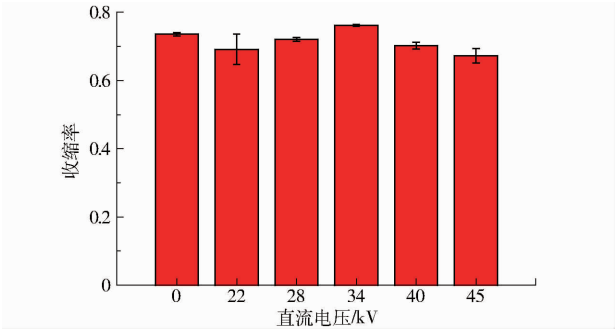


图 6 不同直流电压对收缩率的影响

Fig.6 Effect of different voltages on shrinkage rate of dried Chinese wolfberry fruits

照组没有显著性差异。ESEHAGHBEYGI 等^[12]研究高压电场和微波干燥香蕉时得到了与本实验类似的结果,发现在 6、8、10 kV/cm 高压电场下干燥香蕉,其收缩率不存在显著性差异。说明收缩率与物料本身的性质有关。

2.6 直流高压电场对枸杞内部多糖和维生素 C 含量的影响

枸杞多糖是枸杞果肉的最有效成分之一,是枸杞调节免疫、延缓衰老的主要活性成分。维生素 C 是人体所必需的一类营养元素。多糖和维生素 C 的保存状况可以作为枸杞营养成分评价指标。表 2 为直流高压电场和干燥箱干燥后枸杞内部多糖和维生素 C 含量(质量比)。由表 2 可知,高压直流电场对枸杞多糖和维生素 C 的含量均比干燥箱的高,更能保留枸杞有效成分,高压直流电场下枸杞多糖和维生素 C 含量分别比干燥箱提高 11.93% 和 1.7%。枸杞多糖和维生素 C 含量容易受到温度的影响,高

表 2 直流高压电场和干燥箱干燥后枸杞内部的多糖和维生素 C 含量

Tab.2 Contents of polysaccharides and vitamin C of dried Chinese wolfberry fruits

参数	直流电场	干燥箱
枸杞多糖含量/(g·(100 g) ⁻¹)	9.470	8.324
维生素 C 含量/(mg·(100 g) ⁻¹)	35.1	34.5

压电场干燥过程中物料温度不升高,不会破坏枸杞的营养成分,进而提高干制品的品质。

2.7 不同直流电压下传质增强因子分析

枸杞鲜果在针-板电极不同直流电压下的传质增强因子变化见图 7。由图 7 可见,传质增强因子随着电压的升高而增强,并呈线性增长关系。单因素方差分析表明,在电压为 22、28、34、40、45 kV 下的传质增强因子之间差异极显著($p < 0.01$),这说明在针-板电极直流电场干燥枸杞的过程中,水分蒸发效果随着电压的增加效果也越来越显著。LAI 等^[16]在研究利用线板电极和针板电极下高压电场增强水分蒸发的实验时同样发现传质增强因子随着电压的增长呈线性增长。

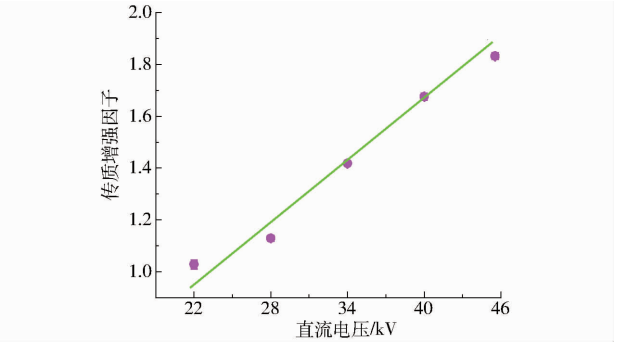


图 7 不同直流电压下枸杞鲜果的传质增强因子比较

Fig.7 Comparison of mass transfer enhancement factor under different voltages

本实验中高电压使针极板的针尖端放电,将与针尖端带电性相反的离子“吹”向每个针尖下方的物料,产生离子风。当离子风作用在潮湿物料表面时,带电离子与水分子发生碰撞,使得水分子动能增加,水分蒸发加快,从而物料附近的空气浓度变低,扰乱空气饱和度,起到干燥效果。随着高电压的升高,尖端放电加强,空气中的离子数增加,风量加大,这样加速了物料表面水分子的运动,不断产生的离子风使物料表面空气的湿度降低,加大了物料表面空气湿度梯度,使水分子更加有利于从物料表面脱离出来,进而提高传质增强因子。所以电压越高,传质增强因子也越大。

2.8 水分有效扩散系数分析

在针-板电极,0、22、28、34、40、45 kV 电压下,枸杞内部的水分有效扩散系数(D_{eff})分别为 2.91×10^{-10} 、 3.83×10^{-10} 、 4.48×10^{-10} 、 5.98×10^{-10} 、 7.35×10^{-10} 、 $9.90 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。可以看出,在针-板电极直流电场作用下,枸杞内部的水分有效扩散系数明显高于对照组,且随着电压的升高而升高。说明在干燥过程中直流高压电场对枸杞内部水分迁移起到了一定作用。单因素方差分析表明,在

22、28、34 kV 时枸杞内部的水分有效扩散系数与对照组差异显著($p < 0.05$),在 40 kV 和 45 kV 时枸杞内部的水分有效扩散系数与对照组差异极显著($p < 0.01$)。DING 等^[10]在研究电流体动力学干燥胡萝卜片的过程中,也发现在电流体动力学干燥过程中的胡萝卜片内部水分有效扩散系数(D_{eff})高于对照组,且电压对其有很大影响。说明高压电场能够影响物料内部的有效扩散系数,从而提高物料的干燥速率。

在枸杞细胞内水主要是以由氢键缔合成的分子团和自由水分子的形式存在,水分子团的这种构造是一种动态结合,即 $(H_2O)_n \rightleftharpoons mH_2O + (H_2O)_{n-m}$,不断有水分子加入某个水分子团,又有水分子离开,处于动态平衡过程^[28]。当在高压直流电场作用下这种平衡状态会被打破,使分子团变成单个的水分子,减小单个水集团的体积,使水分更容易扩散出细胞外,从而加快干燥速度。另一方面高压电场会影响细胞的跨膜电位,从而改变细胞跨膜电压,进而对细胞膜产生破坏效果^[29-30],加大枸杞内部细胞的破坏率,可以提高水分向细胞外扩散。干燥过程中,高压电场从这 2 方面对枸杞内部进行作用,进而提高枸杞内部的水分有效扩散系数。

2.9 数学模型

由表 3 可知,所选的 10 个模型的决定系数(R^2)均在 0.97 以上,而且决定系数(R^2)相差不大,这表明以上模型都可以用来描述枸杞在高压电场下的干燥特征。Lewis 模型 R^2 在 0.972 83 ~ 0.993 34 之间变化,在所有模型中其 R^2 最小,并且 E_{RMS} 和 χ^2 分别在 0.028 188 ~ 0.051 853、0.000 812 ~ 0.002 766 之间变化,均值最大,因此,Lewis 模型拟合效果最差。而 Midill and Kucuk 模型 R^2 在 0.998 07 ~ 0.999 88 之间变化,在所有模型中其 R^2 最大,最接近 1,并且 E_{RMS} 和 χ^2 分别在 0.002 744 ~ 0.011 932、0.000 08 ~ 0.001 59 之间变化,均值最小,因此, Midill and Kucuk 模型拟合效果最好。图 8 反映了水分比的实验数据与 Midill and Kucuk 模型的预测数据之间的比较。由图可知,水分比的实验数据所绘制成的曲线与由 Midill and Kucuk 模型的预测数据所绘制成的曲线形成一条非常接近斜率为 1 的直线,进一步证明 Midill and Kucuk 模型非常适合针-板电极和直

流高压电压条件干燥曲线的拟合。

2.10 能量消耗

在针-板电极,直流电压为 22、28、34、40、45 kV 下干燥枸杞使其含水率均达到 17% 时,单位能耗和干燥总平均时间的变化规律见图 9。由图 9 可知,随着电压的增加,单位能耗也增加,即电压越高其干燥速率也越大,但是电压越高所需要的能量也越多,能耗与电压之间的关系是增函数,但不是线性关系。在 45 kV 下干燥枸杞的能量消耗明显比其他电压的能量消耗多。干燥总平均时间随着电压的增加而下降。TAGHIAN 等^[31]在用高压电场和热风组合系统干燥蘑菇片时,也发现单位能耗随着电压的增加而增加。由图 9 还可以发现,干燥时间和单位能耗有交点,说明在直流高压电场干燥枸杞过程中,以单位能耗和干燥时间为目标进行优化,电压参数取值应该在这个交点附近,即在 35 kV 与 36 kV 之间效率较高。

2.11 微观结构

由图 10 可以看出,高压电场对枸杞表面微观结构具有一定的影响。可以看到对照组组织结构紧密且规整,而高压电场干燥后的枸杞表面规整度受到破坏,且有个别的小孔洞;呈现出不规则结构,孔洞较小且少。微观结构观测印证了高压电场干燥确实能够改变枸杞表面的微观结构,进而影响枸杞的干燥速度和品质。

3 结论

- (1)在直流高压电场下枸杞的干燥速率明显大于对照组,而且干燥速率随着电压的增加而增加,说明直流高压电场对枸杞的干燥效果有明显提高,但是随着电压的增加,单位能耗也增加。
- (2)直流高压电场下干燥的枸杞,复水率明显高于对照组,且复水率与电压呈增函数关系。高压电场对枸杞的收缩率影响不大,单因素方差分析显示没有显著性差异。相比于干燥箱,高压电场对枸杞多糖和维生素 C 有更好的保存,提高干制品的品质。传质增强因子随着电压的增长呈线性增长关系。枸杞鲜果的水分有效扩散系数明显高于对照组,且随着电压的升高而升高。高压电场能够影响枸杞表面的微观结构。

表 3 水分比和时间的统计分析结果									
Tab. 3 Results of statistical analyses on modeling of moisture ratio and drying time									
模型	电压/kV	k	n	a	b	c	E_{RMS}	R^2	χ^2
Lewis	22	0.047 5					0.028 188	0.993 34	0.000 812
	28	0.052 9					0.031 942	0.986 43	0.001 042
	34	0.064 0					0.045 495	0.972 83	0.002 126
	40	0.077 9					0.051 853	0.972 89	0.002 766
	45	0.097 4					0.048 106	0.973 29	0.002 389
Henderson and Pabis	22	0.052 2		1.072 8			0.016 879	0.995 96	0.000 298
	28	0.057 2		1.078 5			0.022 443	0.993 15	0.000 526
	34	0.070 1		1.095 4			0.037 669	0.981 76	0.001 496
	40	0.089 3		1.131 7			0.037 804	0.982 82	0.001 513
	45	0.113 4		1.159 0			0.024 240	0.992 77	0.000 631
Logarithmic	22	0.041 7		1.139 2	−0.103 39		0.004 543	0.999 70	0.000 022
	28	0.043 9		1.149 9	−0.117 50		0.007 586	0.999 20	0.000 061
	34	0.044 1		1.247 4	−0.228 45		0.013 429	0.997 62	0.000 195
	40	0.060 6		1.222 8	−0.170 38		0.007 272	0.999 35	0.000 058
	45	0.090 0		1.196 9	−0.093 02		0.003 576	0.999 84	0.000 014
Parabolic	22			0.996 6	−0.037 54	0.000 38	0.014 304	0.997 03	0.000 219
	28			0.992 0	−0.039 69	0.000 42	0.012 441	0.997 85	0.000 165
	34			0.987 3	−0.045 51	0.000 52	0.016 720	0.996 39	0.000 303
	40			1.000 9	−0.056 62	0.000 80	0.015 652	0.997 17	0.000 249
	45			1.029 3	−0.075 91	0.001 43	0.015 111	0.996 29	0.000 325
Page	22	0.029 5	1.160 5				0.017 059	0.998 22	0.000 131
	28	0.030 1	1.184 8				0.011 187	0.997 28	0.000 209
	34	0.031 6	1.224 7				0.014 199	0.989 98	0.000 821
	40	0.035 1	1.301 0				0.027 916	0.992 34	0.000 675
	45	0.045 9	1.307 9				0.025 242	0.997 81	0.000 684
Taghian Dinani	22			4.662 2	−71.092 2	57.797 0	0.000 857	0.998 93	0.000 079
	28			2.636 7	−44.875 9	45.882 1	0.010 321	0.998 52	0.000 114
	34			1.533 4	−20.309 1	30.757 3	0.022 368	0.993 39	0.000 542
	40			1.595 1	−16.664 6	24.803 8	0.020 763	0.994 66	0.000 470
	45			2.562 1	−21.527 5	23.038 8	0.008 809	0.999 01	0.000 087
Wang and Singh	22			−0.037 8	0.000 387		0.014 344	0.997 08	0.000 215
	28			−0.040 3	0.000 432		0.012 563	0.997 81	0.000 165
	34			−0.046 8	0.000 552		0.017 008	0.996 28	0.000 305
	40			−0.056 5	0.000 794		0.015 113	0.997 25	0.000 242
	45			−0.071 9	0.001 320		0.019 316	0.995 41	0.000 401
Modified Page	22	0.047 94	1.160 5				0.011 187	0.998 22	0.000 131
	28	0.051 98	1.184 8				0.014 998	0.997 28	0.000 209
	34	0.062 28	1.244 7				0.027 916	0.989 98	0.000 821
	40	0.076 12	1.301 1				0.025 242	0.992 34	0.000 675
	45	0.094 83	1.307 9				0.013 335	0.997 81	0.000 191
Midill and Kucuk	22	0.054 10	0.936 8	1.058 4	−0.001 98		0.002 744	0.999 88	0.000 008
	28	0.049 25	0.992 8	1.038 6	−0.001 78		0.007 815	0.999 13	0.000 067
	34	0.079 92	0.842 8	1.077 8	−0.005 23		0.011 932	0.998 07	0.000 159
	40	0.073 67	0.978 1	1.067 6	−0.003 61		0.007 393	0.999 30	0.000 061
	45	0.081 50	1.072 1	1.080 3	−0.001 94		0.003 294	0.999 86	0.000 013
Weibull	22			1.160 5	20.859 25		0.011 187	0.998 22	0.000 131
	28			1.184 8	19.238 48		0.014 150	0.997 28	0.000 209
	34			1.244 7	16.055 51		0.027 916	0.989 98	0.000 821
	40			1.301 1	13.137 04		0.025 242	0.992 34	0.000 675
	45			1.307 9	10.545 18		0.013 335	0.997 81	0.000 191

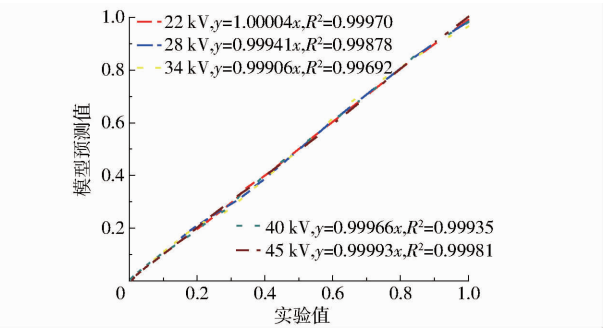


图8 实验水分比数据与 Midill and Kucuk 模型预测数据比较

Fig.8 Comparison of experimental moisture ratio with predicted value of Chinese wolfberry fruit samples from Midill and Kucuk model

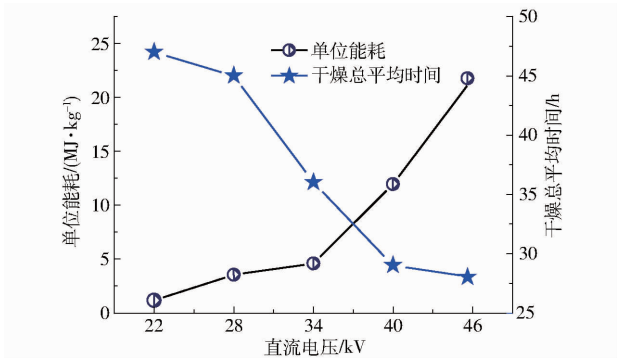


图9 不同直流电压下的能量消耗和干燥总平均时间

Fig.9 Specific energy consumption and total drying time under different voltages

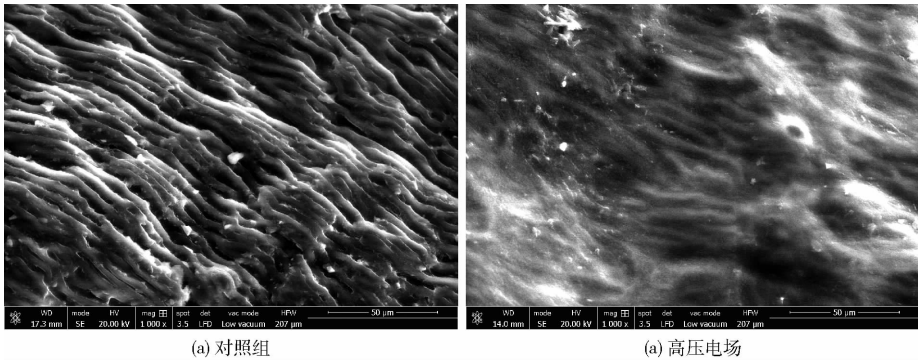


图10 高压电场对枸杞表面微观结构的影响

Fig.10 Effect of high electric field on microstructures of Chinese wolfberry fruit samples

(3)用10个模型对高压电场干燥枸杞的数据进行拟合,发现这些模型均能用来描述高压电场干燥曲线的变化规律。其中 Midill and Kucuk 模型最适合描述高压电场干燥曲线的变化规律。

参 考 文 献

1 张俊华,张翼,李明宁. 夏枸杞园土壤线虫和微生物群落多样性研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):161-170. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160924&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.024.

ZHANG Junhua, ZHANG Yi, LI Mingning. Soil nematode and microbial community diversity in *Lycium barbarum* L. orchard[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 161-170. (in Chinese)

2 张体彬,展小云,康跃虎,等. 浅层填沙滴灌种植枸杞改良龟裂碱土重度盐碱荒地研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(10):139-149. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161019&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.019.

ZHANG Tibin, ZHAN Xiaoyun, KANG Yuehu, et al. Amelioration of high saline-sodic wasteland of takyric solonetz by cropping *Lycium barbarum* L. with drip irrigation and shallow sand-filled niches[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 139-149. (in Chinese)

3 贾韶千,吴彩娥,李艳霞. 枸杞中黄酮类化合物的超声波强化提取[J]. 农业机械学报,2009,40(5):130-134.

JIA Shaoqian, WU Caie, LI Yanxia. Flavonoids ultrasonic extraction from *Lycium barbarum* L. [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(5):130-134. (in Chinese)

4 吴海华,韩清华,杨炳南,等. 枸杞热风微波真空组合干燥试验[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):178-181.

WU Haihua, HAN Qinghua, YANG Bingnan, et al. Experiment on combining hot air and microwave vacuum to dry lycium[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 178-181. (in Chinese)

5 赵丹丹,彭郁,李莱,等. 枸杞热泵干燥室系统设计与应用[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):359-365. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s055&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.055.

ZHAO Dandan, PENG Yu, LI Mo, et al. Design and application of wolfberry heat pump drying system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 359-365. (in Chinese)

6 吴中华,李文丽,赵丽娟,等. 枸杞分段式变温热风干燥特性及干燥品质[J]. 农业工程学报,2015,31(11):287-293.

- WU Zhonghua, LI Wenli, ZHAO Lijuan, et al. Drying characteristics and product quality of *Lycium barbarum* under stages-varying temperatures drying process[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 287–293. (in Chinese)
- 7 DING Changjiang, LU Jun, SONG Zhiqing, et al. The drying efficiency of electrohydrodynamic (EHD) systems based on the drying characteristics of cooked beef and mathematical modeling[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014, 46: 455–461
- 8 CAO W, NISHIYAMA Y, KOIDE S. Electrohydrodynamic drying characteristics of wheat using high voltage electrostatic field[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 62(3): 209–213.
- 9 CHEN Y, BARTHAKUR N N, AMOLD N P. Electrohydrodynamic (EHD) drying of potato slabs [J]. Journal of Food Engineering, 1994, 23(1): 107–119.
- 10 DING Changjiang, LU Jun, SONG Zhiqing. Electrohydrodynamic drying of carrot slices[J]. Plos One, 2015, 4: e0124077.
- 11 HASHINA F, BAJGAI T, ISOBE S, et al. Electrohydrodynamic (EHD) drying of apple slices[J]. Drying Technology, 1999, 17(3): 479–495.
- 12 ESEHAGHBEYGI A, PIMAZARI K, SADEGHI M. Quality assessment of electrohydrodynamic and microwave dehydrated banana slices[J]. LWT—Food Science and Technology, 2014, 55(2): 565–571.
- 13 TAGHIAN D S, HAVET M. Effect of voltage and air flow velocity of combined convective electrohydrodynamic drying system on the physical properties of mushroom slices[J]. Industrial Crops and Products, 2015, 70: 417–426.
- 14 TAGHIAN D S, HAMDAMI N, SHAHEDI M, et al. Mathematical modeling of hot air/electrohydrodynamic (EHD) drying kinetics of mushroom slices[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 86: 70–80.
- 15 HEIDARINEJAD G, BABAEI R. Numerical investigation of electro hydrodynamics (EHD) enhanced water evaporation using large eddy simulation turbulent model [J]. Journal of Electrostatics, 2015, 77: 76–87.
- 16 LAI F, HUANG M, WONG D. EHD-enhanced water evaporation[J]. Drying Technology, 2004, 22(3): 597–608.
- 17 BRUCE D. Exposed-layer barley drying: three models fitted to new data up to 150°C [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1985, 32(4): 337–347.
- 18 LIU X, QIU Z, WANG L, et al. Mathematical modeling for thin layer vacuum belt drying of *Panax notoginseng* extract[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(4): 928–932.
- 19 SHAHHOSEINI R, GHORBANI H, KARIMI S, et al. Qualitative and quantitative changes in the essential oil of lemon verbena (*Lippia citriodora*) as affected by drying condition[J]. Drying Technology, 2013, 31(9): 1020–1028.
- 20 BAI Y, LI X, SUN Y, et al. Thin layer electrohydrodynamic (EHD) drying and mathematical modeling of fish[J]. International Journal of Applied Electromagnetic and Mechanics, 2011, 36(3): 217–228.
- 21 DOYMAZ İ. Drying kinetics of white mulberry[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(3): 341–346.
- 22 WANG C, SINGH P. A single layer drying equation for rough rice[C]. ASAE Paper 78–3001, 1978.
- 23 KALETA A, GOMICKI K. Some remarks on evaluation of drying models of red beet particles [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(12): 2967–2978.
- 24 AKPINAR E, BICER Y. Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(6): 1367–1375.
- 25 MIDILLI A, KUCUK H, YAPAR Z. A new model for single-layer drying[J]. Drying Technology, 2002, 20(7): 1503–1513.
- 26 PUENTE-DIAZ L, AH-HEN K, VEGA-GALVEZ A, et al. Combined infrared-convective drying of murta (*Ugni molinae* Turcz) berries: kinetic modeling and quality assessment[J]. Drying Technology, 2013, 31(3): 329–338.
- 27 XIAO H W, BAI J W, XIE L, et al. Thin-layer air impingement drying enhances drying rate of American ginseng (*Panax quinquefolium* L.) slices with quality attributes considered[J]. Food and Bioproducts Processing, 2015, 94(2): 581–591.
- 28 丁昌江, 梁运章. 高压电场干燥胡萝卜的试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 220–222.
DING Changjiang, LIANG Yunzhang. Experimental study on high voltage electric field drying carrot[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(4): 220–222. (in Chinese)
- 29 WIKTOR A, IWANINK M, SLEDZ M, et al. Drying kinetics apple tissue treated by pulsed electric field [J]. Drying Technology, 2013, 31(1): 112–119.
- 30 LEOVKA N I, SHYNKARYK N V, VOROBIEV E. Pulsed electric field enhanced drying of potato tissue[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(2): 606–613.
- 31 TAGHIAN D S, HAVET M. The influence of voltage and air flow velocity of combined convective-electrohydrodynamic drying system on the kinetics and energy consumption of mushroom slices[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 95: 203–211.