doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.038

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

侯 莹 崔朝经 王永怡 郝建雄 赵丹丹
（河北科技大学食品与生物学院，石家庄 050018）

摘要：干燥效率低导致的能耗高、品质劣变是浆果类热风干燥加工面临的严峻挑战。在前期基于变温控湿的热风干燥研究基础上，为提高枸杞的热风干燥品质，采用不同碱性介质浸泡法（3%Na_2CO_3，碱性电解水分别处理1、10、20 min）对枸杞进行预处理，探讨其变温控湿干燥特性、微观结构、色泽、复水率、收缩率和营养成分。结果表明：相较于对照组，碱性电解水预处理促使枸杞热风干燥速率提高，显著降低了热风干燥过程中枸杞到达干燥终点所需时间（P<0.05），碱性电解水预处理10 min，枸杞热风干燥时间最短，有效水分扩散系数为5.020×10^{-8} m^2/min；碱性电解水预处理后，表皮蜡质条带间隙变大，甚至出现条带溶解、断裂的现象；碱性电解水预处理10 min时，热风干制枸杞的色泽最接近于枸杞鲜样，复水率较高，收缩率较低，多糖质量分数、总酚含量和总黄酮含量均显著高于对照组（P<0.05），分别为9.79%、4.18 mg/g、6.42 mg/g；碱性电解水预处理后，枸杞果胶的组成发生显著变化，包含水溶性果胶、螯合性果胶和碱溶性果胶。枸杞鲜样中果胶主要为碱溶性果胶，碱性电解水预处理干燥后，螯合性果胶含量上升。综上，以碱性电解水对枸杞预处理10 min后干燥，枸杞热风干制品品质最佳。该研究为改善枸杞热风干燥提供了一种简单有效的预处理技术，同时也为其他浆果在干燥过程中的提质、增效提供了一种绿色、环保的技术方法。

关键词：枸杞；碱性电解水预处理；变温控湿热风干燥
中图分类号：TS255.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2024)S2-0371-09

Effect of Alkaline Electrolytic Water Pretreatment on Temperature- and Humidity-controlled Hot Air Drying Quality of Wolfberry

HOU Ying CUI Chaojing WANG Yongyi HAO Jianxiong ZHAO Dandan
(*College of Food Science and Biology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang* 050018, *China*)

Abstract: The high energy consumption and quality degradation caused by low drying efficiency pose significant challenges in hot-air drying processing of fruits and vegetables. To enhance the hot-air drying quality of wolfberry, pretreatment with different alkaline media soaking methods (3% Na_2CO_3 and alkaline electrolyzed water soaking for 1 min, 10 min, and 20 min, respectively, was employed. The hot-air drying characteristics, microstructure, color, rehydration ratio, shrinkage, and nutritional content of wolfberry were investigated. The results revealed that compared with the control group, alkaline electrolyzed water pretreatment significantly reduced the hot air-drying time required for wolfberries (P<0.05), with the shortest drying time observed in group treated by 10 min soaking of alkaline electrolyzed water. This group achieved a higher drying rate and an effective moisture diffusivity of 5.020×10^{-8} m^2/min. After alkaline electrolyzed water pretreatment, the gaps between the waxy stripes on the epidermis were enlarged, with some stripes even dissolving or breaking. When pretreated with alkaline electrolyzed water for 10 min, the hot-air dried wolfberry exhibited the closest color to fresh samples, coupled with superior rehydration capabilities, reduced shrinkage and significantly elevated levels of polysaccharides (9.79%), total phenols (4.18 mg/g), and total flavonoids (6.42 mg/g) compared with the control (P<0.05). Pectin composition underwent notable transformations upon alkaline electrolyzed water pretreatment and drying. While fresh wolfberry primarily contained sodium carbonate-soluble pectin (SSP), the content of chelator-soluble pectin (CSP) increased post-treatment, suggesting a reconfiguration of pectin fractions. In conclusion, pretreating wolfberries with alkaline electrolyzed water for 10 min produced the hot-air

收稿日期：2024-08-03 修回日期：2024-09-20
基金项目：国家自然科学基金项目(32101878)
作者简介：侯莹(1998—)，女，硕士生，主要从事农产品加工研究，E-mail: 18768523229@163.com
通信作者：赵丹丹(1989—)，女，副教授，主要从事果蔬加工研究，E-mail: zdd6364@126.com

dried wolfberries with best quality. The research result can not only present a straightforward and effective pretreatment strategy for improving the hot-air drying of wolfberry but also can offer a green and environmentally benign approach for enhancing the quality and efficiency of drying processes for a wide range of fruits and vegetables.

Key words: wolfberry; alkaline electrolyzed water pretreatment; temperature- and humidity-controlled hot air drying

0 引言

新鲜枸杞含水率较高,即使在低温储藏条件下,也容易受到微生物感染,因此保质期很短,一般只有7 d左右。干燥是枸杞贮藏加工的重要手段,可通过降低含水率,抑制微生物生长并减少化学反应,延长枸杞贮存期[1]。枸杞作为一类典型、特殊的浆果类物料,其表面覆盖紧密的蜡质层,主要由长链脂肪酸醛类和烃类化合物组成[2],在干燥过程中会阻碍枸杞内部水分向外迁移,故通常采用化学浸渍预处理和物理预处理去除蜡质提高干燥效率。物理预处理可以显著降低干燥时间,但是不利于枸杞维持良好的产品外观,且难以在工业中应用,相较而言化学预处理具有便捷、快速和经济等优势,受到了广泛重视。

工业中最常用的化学预处理方法是将枸杞浸泡在碱性溶液(Na_2CO_3或Na_2SO_3)中,碱液处理可以使表皮蜡质层变薄形成水分通道,减少干燥过程中水分扩散阻力,促进表皮的渗透性,提高水分有效扩散率,显著缩短干燥时间,并且枸杞最终产品颜色、复水率、多糖和总酚等营养物质含量均高于对照组[3]。但碱性溶液的使用也存在潜在的毒性风险,后续的化学废水处理也是一项极具挑战的任务[4]。因此,探索更绿色、更环保的预处理方法对提高枸杞的干燥工艺和质量至关重要。碱性电解水是通过电解稀盐溶液制备的水溶液,排放到自然环境时,会迅速恢复为普通水,具有绿色安全、价格低廉等优点[5],同时,其具备高pH值、强还原电位以及卓越的渗透能力,在食品杀菌[6]、保鲜[7]、清除农药残留[8]以及活性物质提取[9]等领域中得到了广泛的应用。

目前,使用碱性电解水用于枸杞干燥预处理鲜有报道。课题组前期探讨了基于升温降湿的热风干燥技术,相较于传统的恒温恒湿干燥、变温恒湿干燥能提高枸杞干燥效率和品质,优化了最佳温湿度干燥条件,并初步探讨了碱性电解水对枸杞干燥效果提升的可能性。在此基础上,本研究进一步开展碱性电解水预处理对枸杞变温控湿干燥特性的影响,并与传统碱液处理进行对比,分析碱性电解水不同处理时间对枸杞干燥动力学特性、表面蜡质结构、颜色、复水率和特征化学成分(总酚和总黄酮含量)等品质变化的影响规律,以期为工业化热风干燥果蔬的增效节能提供一定技术依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

试验所用原料为宁杞7号,由宁夏回族自治区银川市西夏区农科院枸杞研究中心提供,采摘园区成熟枸杞,表面完整无破损,大小均匀,测得湿基含水率为(78.89±0.21)%。在1~2 d内低温空运至石家庄,并将其置于(4±1) ℃的冰箱进行冷藏保存。

苯酚为分析纯,购自天津博迪化工有限公司;Folin酚、亚硝酸钠均为分析纯,购自天津永大化学试剂有限公司;硝酸铝、无水乙醇、甲醇、浓硫酸均为分析纯,购自天津大茂化学试剂厂;葡萄糖标准品、对香豆酸标准品、没食子酸标准品、芦丁标准品、香草酸标准品、表儿茶标准品均为色谱纯,购自上海源叶生物科技有限公司。

1.2 不同碱性介质预处理枸杞干制品制备

1.2.1 样品预处理

使用XY-L5-1000型电解水制备机将氯化钠溶液制备成碱性电解水(AEW)。经测定,制备AEW的pH值为11.45,有效氯质量浓度(ACC)为20 mg/L。将新鲜枸杞在碱性电解水中浸泡不同时间(1、10、20 min),分别记为AEW1 min、AEW10 min、AEW20 min;将新鲜枸杞在3% Na_2CO_3溶液中浸泡1 min,为Na_2CO_3处理组;将新鲜枸杞在清水中浸泡1 min,为未处理组。

1.2.2 变温控湿干燥

将预处理的枸杞样品(每个托盘(100±5) g)均匀单层铺在带孔的塑料托盘上,并在高低温试验箱(RGDJS-150型,上海茸隽实验仪器有限公司)中根据预试验得出的最佳干燥工艺进行变温变湿干燥(升温范围为40~65 ℃,降湿范围为60%~10%,分阶段变温、变湿按照枸杞干基含水率每降低0.75 kg/kg线性增加温度和降低相对湿度)。干燥过程中每1 h称量一次,直至其湿基含水率为13%时,结束干燥,对其结果进行干燥动力学分析。上述试验重复3次,取其平均值。

1.2.3 干燥动力学分析

(1)干燥动力曲线

枸杞干燥过程中,其干基含水率(M_t,g/g)和水分比(M_R,无量纲)计算公式为[10]

$$M_t = \frac{W_t}{W_d} \tag{1}$$

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \tag{2}$$

式中　W_t——湿物料水分质量，g

W_d——湿物料中绝对干料质量，g

M_0——初始干燥时干基含水率，g/g

M_t——测量时间t干基含水率，g/g

M_e——物料平衡干基含水率，g/g

因为相对于M_0来说，M_e可以忽略不计，所以式(2)可以简化成

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \tag{3}$$

干燥速率计算方式为

$$D_R = \frac{\Delta M_t}{T_t} \tag{4}$$

式中　ΔM_t——t个时间段内失水量，g/g

T_t——t个时间段的时间，h

(2)有效水分扩散系数D_{eff}

根据Fick第2扩散定律，计算枸杞干燥过程中的有效水分扩散系数。将$\ln M_R$作为纵坐标，时间作为横坐标进行绘图，得到的斜率为D_{eff}，计算公式为[10]

$$\ln M_R = \ln\frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4r^2}t \tag{5}$$

式中　t——枸杞干燥时间，h

r——枸杞直径，取0.007 5 m

1.3　枸杞品质测定

1.3.1　枸杞多糖含量测定

采用超声浸提法提取枸杞多糖，并根据文献[11]的方法进行修改。准确称取枸杞粉末0.2 g置于10 mL试管中，加入8 mL体积分数为80%的乙醇溶液，超声浸提2 h，4 ℃下以转速12 000 r/min离心(HC-3018型高速冷冻离心机，安徽中科中佳科学仪器有限公司)10 min得上清液，弃之，此提取过程重复两次；滤渣中再加入8 mL去离子水，超声浸提2 h，4 ℃下以转速12 000 r/min离心10 min得上清液，提取过程重复2次，合并两次上清液，并用蒸馏子水稀释定容至100 mL，作为待测液。

采用硫酸-苯酚法测定枸杞粗多糖含量：吸取1 mL待测液于具塞玻璃试管中，加入1 mL苯酚液，摇匀，然后加入5 mL硫酸，摇匀，静置冷却5 min，将其放入沸水浴中加热10 min，取出冷却至室温(20 ℃)。以水为空白对照，在490 nm处测定其吸光度。以葡萄糖为标准物质，按上述方法绘制标准曲线，其线性回归方程为：y=0.008 6x+0.162 9(R^2=0.999 5)。根据标准曲线查出多糖溶液中的葡萄糖含量，公式为

$$w = \frac{9\times10^{-5}m_1V_1}{m_2V_2} \tag{6}$$

式中　w——样品中多糖质量分数，%

m_1——从标准曲线上查得样品测定液中多糖质量，μg

m_2——样品质量，g

V_1——样品定容体积，mL

V_2——比色测定时所移取样品测定液体积，mL

1.3.2　枸杞总酚含量测定

总酚提取：称取1 g枸杞粉末，于50 mL离心管中，加入40 mL甲醇水溶液(80%)，30 ℃下超声提取30 min，冷却，随后4 ℃下以10 000 r/min转速离心10 min，收集上清液，滤渣重复提取2次，合并上清液，用80%甲醇溶液稀释并定容至100 mL。

总酚含量测定：采用Folin-Ciocalteu比色法[12]。以没食子酸为标准物质，建立线性标准曲线：y=0.004 4x+0.078 8(R^2=0.999 6)。通过标准曲线计算枸杞中的总酚含量，结果以每克干基含有相当没食子酸的毫克数表示(mg/g)。

1.3.3　枸杞总酮含量测定

总酮提取：同总酚提取方法。

总酮含量测定：采用$NaNO_2$-Al$(NO_3)_3$-NaOH方法测定[12]。以芦丁为标准物质，建立线性标准曲线：y=0.001 3x+0.044 9(R^2=0.999 2)。通过标准曲线计算枸杞中的总酮含量，结果以每克干基含有相当芦丁的毫克数表示(mg/g)。

1.3.4　枸杞色差测定

采用全自动测色色差计(CR-400型，柯尼卡美能达公司)对枸杞颜色测定，将枸杞粉末均匀撒在样品盘中，在反射模式下测定样品的CIELAB三刺激颜色L^*、a^*、b^*值，最后计算出总色差ΔE，并重复测定3次。ΔE反映枸杞颜色的整体变化，ΔE越大表示颜色变化越明显。

1.3.5　枸杞复水率测定

枸杞复水率的测定依据文献[13]的方法并加以修改。将质量为W_1的枸杞干燥样品置于小烧杯中，加入60 mL 80 ℃的热水，随后放在80 ℃恒温水浴中，20 min后取出，将其放在干净的滤纸上，吸去表面水分，阴凉处晾置30 min，测量复水后枸杞质量W_2，并计算其复水率。计算公式为

$$Y = \frac{W_2(1-X_0)}{W_1(1-X_1)}\times100\% \tag{7}$$

式中　Y——样品复水率，%

X_0——初始湿基含水率

X_1——枸杞干湿基含水率

1.3.6　枸杞收缩率测定

枸杞收缩率采用体积置换法[14]测定，用甲醇作为介质，分别测定干燥前、后枸杞的体积，每组样品测试3次，结果取平均值。计算公式为

$$S_R = \frac{V_0 - V}{V}\times100\% \tag{8}$$

式中　S_R——体积收缩率，%

V_0——热风干燥前样品体积

V——热风干燥后样品体积

1.4　枸杞果胶含量测定

1.4.1　枸杞细胞壁物质制备

细胞壁物质制备参照文献[15]的制备方法，采用热

乙醇不溶法。取10 g枸杞用冰乙醇研磨匀浆，然后将匀浆液倒入100 mL70%热乙醇中，在82~85 ℃下磁力搅拌温和回流20 min，在4 ℃下12 000 r/min冷冻离心20 min，将沉淀分别用70%乙醇、95%乙醇、15 mL无水乙醇和丙酮洗涤至无色，35 ℃干燥至质量恒定即得到细胞壁物质(CWM)。

1.4.2 枸杞果胶组分制备

果胶组分的制备过程参考文献[16-17]的方法并加以修改。称取烘干的细胞壁物质0.1 g，加入8 mL去离子水30 ℃恒温浸提12 h后过滤得到水溶性果胶(WSP)；残渣再用8 mL的50 mmol/L CDTA和乙酸钠(pH值6.5)30 ℃恒温浸提12 h后过滤得到螯合溶质果胶(CSP)；滤渣再用8 mL的50 mmol/L Na_2CO_3(含2 mmol/L CDTA)30 ℃恒温浸提12 h后过滤得到溶于Na_2CO_3果胶(SSP)。

1.4.3 枸杞果胶组成成分测定

枸杞中的WSP、CSP和SSP含量采用分光光度法[18]，以半乳糖醛酸作为标准物质测定。

样品中WSP、CSP和SSP含量测定：吸取果胶溶液1 mL置于10 mL带塞玻璃试管中，加入6 mL浓度为12.5 mmol/L的浓硫酸-四硼酸钠溶液，立刻冰水浴降温。混匀后在沸水浴中加热5 min，取出后用冰水浴进行冷却。在加入0.1 mL的0.15%间苯基苯酚溶液，摇匀，放置15 min，以0.5%的NaOH为空白，在520 nm处测定其吸光度，以半乳糖醛酸为标准物质，按上述方法绘制标准曲线，其线性回归方程为：y=0.630 2x+0.068 9(R^2=0.998 2)。从标准曲线计算半乳糖醛酸含量。WSP、CSP和SSP的含量以每10 g鲜质量含半乳糖醛酸毫克数表示(mg/(10g))。

1.5 枸杞微观结构观察

使用扫描电子显微镜(SEM)测量新鲜、Na_2CO_3处理和碱性电解水处理的枸杞的表面微观结构。从枸杞表面取下小块(4 mm×4 mm)安装在双面胶带上，并涂上薄层金膜，在15 kV的加速电压下通过SEM观察样品微观结构。

1.6 数据统计与分析

所有试验数据测定3次，结果取平均值，以平均值±标准差表示。数据均通过SPSS软件进行单因素方差分析，利用邓肯法(P<0.05)进行差异性分析。

2 结果与讨论

2.1 不同预处理对枸杞干燥动力学特性的影响

2.1.1 干燥动力曲线

图1为热风干燥过程中，经不同碱性介质预处理的枸杞水分比随干燥时间的变化。碱性介质预处理后干燥时间显著缩短(P<0.05)，未处理组、3%Na_2CO_3溶液处理组、AEW10 min处理组的干燥时间分别为39、26.5、23.5 h，与未处理组相比，3%Na_2CO_3溶液预处理和AEW10 min预处理分别使枸杞干燥时间减少了12.5 h和15.5 h，表明碱性电解水10 min预处理可以基于变温控湿的热风干燥基础上进一步有效提高干燥效率，其效果优于3%Na_2CO_3溶液预处理。当碱性电解水处理时间延长至20 min时，枸杞的热风干燥时间为25.5 h，这表明碱性电解水处理时间过长不利于干燥效率进一步提升。综上，在一定时间范围内对枸杞进行碱性电解水预处理可以有效提高枸杞在热风干燥过程中的干燥速率，减少干燥时间。

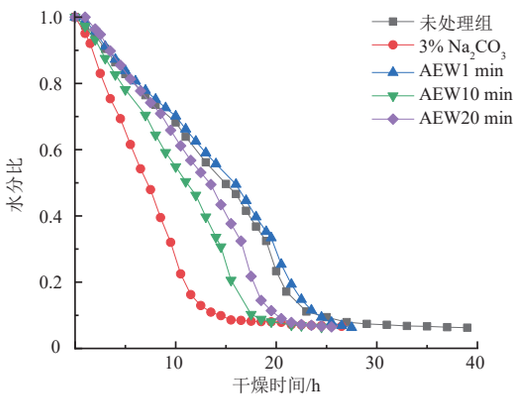


图1 不同预处理方式下枸杞水分比曲线

Fig. 1 Moisture ratio curves of wolfberry at different pretreatments

图2为热风干燥过程中，不同碱性介质预处理对枸杞干燥速率的影响。结果表明，碱性介质预处理能够提高干燥速率，在干基含水率到达0.75 g/g前，经3%Na_2CO_3溶液预处理的枸杞干燥速率最高，其次是AEW10 min和AEW20 min的处理组。干燥前期，枸杞内部自由水含量高，热质传递与水分扩散蒸发速度较快，碳酸钠和碱性电解水处理能够溶解破坏枸杞表面的长链脂肪酸烃类化合物，使蜡质层变薄，暴露水分迁移通道，从而提高干燥速率[19]。除此以外，碱性电解水通过溶解细胞壁上的化合物提高渗透性，也是促使干燥速率加快的原因之一[20]。碱性电解水浸泡1 min预处理下干燥与对照组无显著差异(P>0.05)，可能这是因为碱性电解水比较温和，浸泡时间较短，还未对枸杞造成伤害。干燥后期(干基含水率到达0.75 g/g后)，枸杞内部含水率较低，此时AEW20 min和AEW10 min处理组干燥速率较快，这可能是由于碱性电解水中含有大量小分子六元环形团簇，穿透能力极强，便于少量水分由内部迁移至表面[21]。

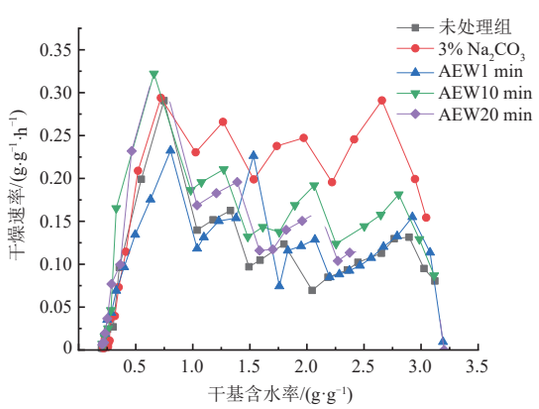


图2 不同预处理方式下枸杞干燥曲线

Fig. 2 Drying curves of wolfberry at different pretreatments

2.1.2　有效水分扩散系数

表1为不同预处理条件下枸杞热风干燥过程中有效水分扩散系数。由表1可得，碱性介质预处理后，枸杞变温控湿热风干燥过程中水分有效扩散系数显著增加，与未处理组相比，Na_2CO_3和碱性电解水预处理均能显著提高有效水分扩散系数（$P<0.05$），其中碱性电解水处理10 min有效水分扩散系数更高，表明该处理后水分扩散效率更高，此结论与枸杞变温控湿干燥动力学特性结果相互印证。

表1　不同干燥条件下枸杞的有效水分扩散系数

Tab. 1　Effective water diffusion coefficient of wolfberry under different pretreatment conditions

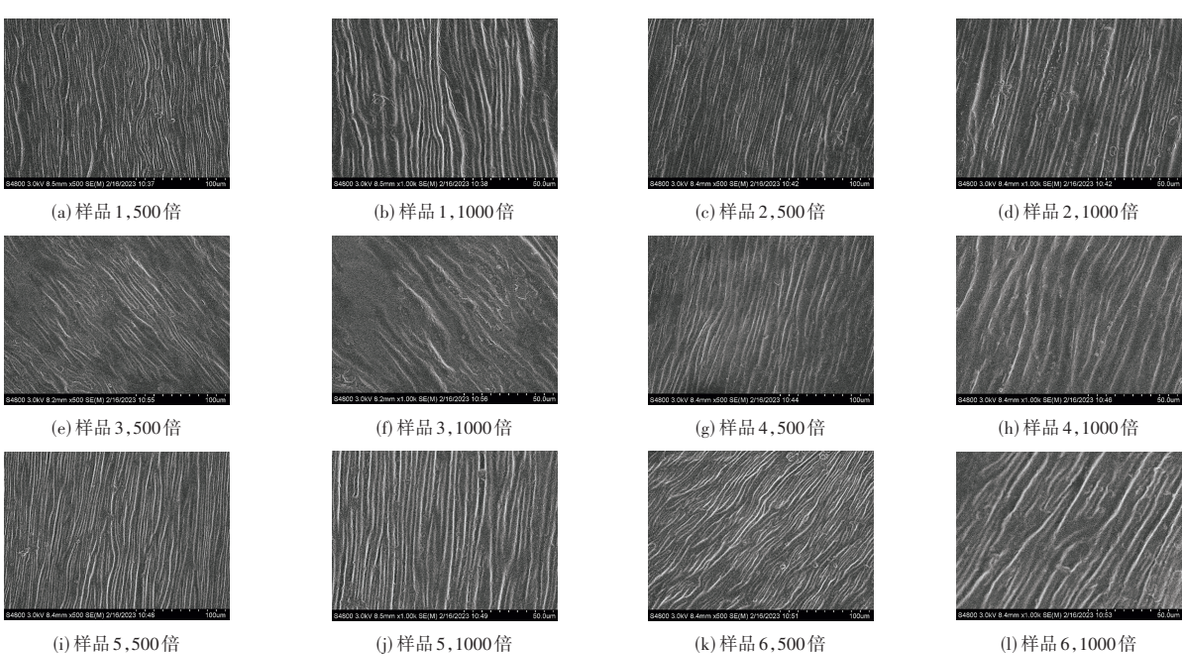
预处理方式	相关系数	拟合方程斜率	有效水分扩散系数/($m^2 \cdot min^{-1}$)
未处理组	0.937 2	−0.001 5	3.194×10^{-8}
3%Na_2CO_3	0.893 7	−0.002 1	4.792×10^{-8}
AEW1 min	0.871 6	−0.001 6	3.651×10^{-8}
AEW10 min	0.917 6	−0.002 2	5.020×10^{-8}
AEW20 min	0.905 9	−0.002 0	4.564×10^{-8}

2.2　不同预处理后枸杞的微观形貌特征

为了揭示不同预处理对枸杞干燥过程的作用机理，对枸杞表面进行扫描电镜观察，如图3所示，样品1、2、3、4、5、6分别为新鲜枸杞、未处理组、3%Na_2CO_3处理组、碱性电解水浸泡1、10、20 min处理组。经过扫描电镜观察，新鲜枸杞的表面蜡质层由鳞片层叠而成，形成一条紧凑而有序的线状结构，其中包含蜡质结晶碎片，如图3样品1所示。清水处理对枸杞表皮蜡质无显著影响（$P>0.05$）（图3样品2）。经过Na_2CO_3溶液处理后，枸杞表皮蜡质条带间隙变大，甚至出现条带溶解、断裂的现象，蜡质结晶减少，形成水分排出通道，如图3样品3所示。这可能由于碱性的Na_2CO_3溶液能够有效溶解枸杞表皮中的蜡质层，使其变薄或破裂，形成水通道，从而促进枸杞中水分的迁移，缩短干燥时间。碱性电解水处理1 min时对枸杞表皮蜡质无显著影响（$P>0.05$），当处理时间达到10 min时，枸杞表皮蜡质条带间隙变宽。研究表明，这可能与碱性电解水生成过程中电场诱导的氢键断裂有关，水分子中H—O—H的角度发生改变，并生成具有表面活性物质形式的羟基离子，这些离子具有表面活性特性，可以与枸杞表面的蜡质层的烷烃和卤代烷烃乳化结合，达到清除的作用[22]。

2.3　不同预处理对枸杞营养成分的影响

多糖、总酚和总黄酮是枸杞的有效活性成分，也是衡量枸杞品质优劣的重要指标。由表2可知，经过碱性介质预处理后干燥，AEW10 min的枸杞中多糖含量最高，质量分数为（9.79±0.17）%，较未处理组和3%Na_2CO_3处理组分别提高7.81%、0.84%。这是由于多糖含量与干燥温度和时间有关，碱性电解水预处理10 min后的枸杞干燥时间最短，减少了多糖的生化反应，如美拉德、焦糖化反应，降低了多糖在干燥过程中的消耗[23]。随着碱性电解水浸泡时间达到20 min，枸杞多糖含量降低，可能是由于浸泡时间过长，浸泡过程中细胞壁遭到破坏，部分多糖析出，从而导致枸杞多糖含量降低。



(a) 样品1，500倍　(b) 样品1，1000倍　(c) 样品2，500倍　(d) 样品2，1000倍

(e) 样品3，500倍　(f) 样品3，1000倍　(g) 样品4，500倍　(h) 样品4，1000倍

(i) 样品5，500倍　(j) 样品5，1000倍　(k) 样品6，500倍　(l) 样品6，1000倍

图3　不同预处理条件下枸杞显微结构

Fig. 3　Microstructure of wolfberry under different pretreatment conditions

表2 不同预处理条件下枸杞总酚、总酮和多糖含量

Tab. 2 Contents of total flavonoids, total phenols and polysaccharides in wolfberry under different pretreatment conditions

组别	多糖质量分数/%	总酚含量/(mg·g^{-1})	总酮含量/(mg·g^{-1})
枸杞鲜果	(10.69±0.18)^{a}	(2.42±0.09)^{a}	(3.03±0.07)^{a}
未处理组	(9.08±0.19)^{c}	(3.11±0.09)^{b}	(5.59±0.04)^{c}
3%Na_2CO_3	(8.95±0.21)^{c}	(4.95±0.05)^{d}	(8.24±0.08)^{e}
AEW1 min	(7.07±0.20)^{e}	(4.14±0.04)^{c}	(5.79±0.07)^{c}
AEW10 min	(9.79±0.17)^{b}	(4.18±0.05)^{c}	(6.42±0.07)^{d}
AEW20 min	(8.40±0.21)^{d}	(3.14±0.06)^{b}	(4.77±0.09)^{b}

注:同列数据不同字母表示具有显著差异(P<0.05),下同。

由表2可知,经碱性介质预处理后干燥的枸杞总酚含量高于新鲜枸杞,这可能由于新鲜枸杞中大部分酚类物质被束缚在细胞结构内,干燥过程释放了束缚在基质中的化学物质,使得酚类物质易被提取。与3%的Na_2CO_3溶液处理相比,碱性电解水预处理后的枸杞中总酚含量更高。这可能与碱性电解水对枸杞中酚类物质的氧化抑制作用有关:加热干燥过程中,单酚酶、多酚氧化酶等氧化酶活性升高,在氧气的存在下易催化单酚的羟基和邻二酚氧化为邻醌,碱性电解水中的分子氢和还原性电位可以阻止其与氧发生反应,通过阻止邻醌的生成减少酚类物质的氧化降解[24-25]。除此以外,碱性电解水浸泡10 min的预处理可使枸杞热风干燥速率提升,缩短了氧气与多酚的接触时间,从而避免了更多酚类物质发生氧化降解。当碱性电解水浸泡20 min后,热风干燥枸杞中的总酚含量下降,可能是因为处理时间过长,在碱性电解水强穿透性以及溶解性的作用下,部分酚类物质溶出,导致枸杞中多酚含量降低[26]。

根据表2所示,经碱性介质预处理干燥后的枸杞总酮含量升高。这是因为枸杞鲜果在碱性环境的胁迫条件下会合成黄酮类化合物,导致黄酮含量升高[27]。不同预处理组中,3%Na_2CO_3溶液处理组的枸杞总酮含量最高,为(8.24±0.08) mg/g,其次是AEW10 min,为(6.42±0.07) mg/g。这可能与二者的干燥速率有关。枸杞中总酮含量主要由黄酮化合物的合成以及氧化降解决定,在枸杞的热风干燥过程中,干燥速率是影响其合成量以及氧化降解程度的重要因素之一,研究表明,黄酮化合物的合成与干燥速率呈正相关[28],而随着干燥速率的升高,枸杞与氧气接触的时间缩短,黄酮化合物的氧化降解随之减少,图2中3%Na_2CO_3处理组和AEW10 min处理组的干燥速率均处于较高水平,因此,这两个处理组的枸杞干制品中黄酮含量较高。然而,由于碱性电解水具有强渗透、强溶解性,部分黄酮类物质可能会在处理过程中随水溶出,故而AEW10 min处理组中总酮含量比3%Na_2CO_3处理组低1.82 mg/g。

综上,由于碱性电解水对细胞表面蜡质的破坏,10 min碱性电解水预处理能够显著缩短枸杞的热风干燥时间,减少其中生物活性物质如多糖、多酚以及黄酮类化合物与氧的接触,同时,其具有的高还原电位一定程度上可以阻止氧化反应的发生,从而减少了多糖、多酚以及黄酮的氧化降解,有效改善了枸杞干制品的营养价值。

2.4 不同预处理对枸杞颜色的影响

枸杞色泽是评价其产品等级的基本标准之一,不同预处理干燥对枸杞色差的影响如表3所示。鲜枸杞L^*、a^*和b^*分别为54.28±0.05、26.51±0.05和21.55±0.05。结果发现,碱性介质预处理后,枸杞亮度显著提升(P<0.05),不同碱性介质预处理中,碱性电解水处理20 min后干燥的枸杞的L^*与新鲜枸杞的L^*最为接近(48.56±0.19),L^*表示明亮度,可以反映枸杞在干燥过程中发生褐变的程度,主要受到干燥时间的影响[29],碱性介质预处理后干燥时间的缩短是其明亮度改善的因素之一。所有碱性介质预处理组的a^*、b^*均高于未处理组,碱性电解水处理10 min对红度以及黄度的提升最为显著(P<0.05)。除此以外,碱性介质预处理后$\triangle E$显著降低(P<0.05),$\triangle E$即干燥后枸杞与新鲜枸杞总色差,可用于评价样品的整体颜色变化,$\triangle E$越低,说明产品的色泽越接近于鲜样[30]。碱性电解水处理10 min时,$\triangle E$最低,为9.42,表明碱性电解水处理10 min后的枸杞色泽在各处理组中最接近枸杞鲜样,这可能与干燥过程中枸杞的酶促褐变和非酶促褐变受到抑制有关。

表3 不同预处理条件下枸杞颜色变化

Tab. 3 Color changes of wolfberry under different pretreatment conditions

组别	L^*	a^*	b^*	$\triangle E$
枸杞鲜果	(54.28±0.05)^{a}	(26.51±0.05)^{a}	(21.55±0.05)^{a}	
未处理组	(41.09±0.05)^{f}	(13.90±0.05)^{f}	(12.69±0.01)^{f}	(19.01±0.01)^{a}
3%Na_2CO_3	(43.16±0.05)^{e}	(16.73±0.05)^{d}	(13.59±0.05)^{e}	(18.25±0.08)^{b}
AEW1 min	(44.15±0.03)^{d}	(15.56±0.01)^{e}	(15.12±0.04)^{d}	(16.24±0.03)^{c}
AEW10 min	(47.78±0.03)^{c}	(20.32±0.04)^{b}	(18.67±0.09)^{b}	(9.42±0.04)^{e}
AEW20 min	(48.56±0.19)^{b}	(18.53±0.06)^{c}	(18.51±0.01)^{c}	(10.28±0.07)^{d}

2.5 不同预处理对枸杞复水率、收缩率的影响

多数干燥产品通常在食用前都会进行复水[31],复水性是果蔬干制品的重要质量属性之一,可反映物料微观结构的变化以及重新吸收水分的能力[32-33]。复水率越低,说明预处理或干燥过程对物料结构造成了不可逆的破坏,干制样品损伤程度越大,复水性越差。如图4(图中不同字母表示具有显著差异(P<0.05),下同)所示,经预处理干燥后枸杞复水率都高于对照组,其中,经碱性电解水处理1 min复水率最高,为37.12%,其次为经Na_2CO_3溶液预处理,为36.96%,碱性电解水处理10 min和20 min处理后的枸杞复水率与对照组间无显著性差异(P>0.05)。这可能是因为碱性电解水浸泡时间过长会对枸杞细胞造成破坏。

热风干燥过程中,样品表面水分蒸发速度大于内部

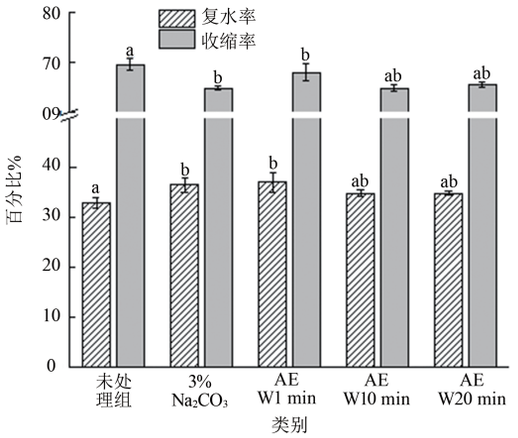


图4　不同预处理条件下的枸杞复水率、收缩率

Fig. 4　Rehydration rate and shrinkage rate of wolfberry under different pretreatment conditions

水分迁移速度，在枸杞内外形成气压差，导致枸杞外部组织向内收缩，使得样品的外观形貌发生扭曲变形，体积缩小[34]。据图4所示，经3%Na_2CO_3溶液和碱性电解水预处理后的枸杞收缩率均显著下降（P<0.05），其中碱性电解水10 min处理组的枸杞收缩率最低，保有较好的表观形貌，这可能是由于碱性电解水破坏了细胞表面的蜡质，利于内部水分向表面迁移，减小了表面水分蒸发与内部水分迁移的速度差，从而改善了枸杞热风干燥产品的扭曲形变[21]。

2.6　不同预处理对枸杞果胶含量的影响

果胶是初级细胞壁和中间膜的主要成分，主要由D-半乳糖醛酸通过α-1，4糖苷键链接形成线性聚合物，其在加工中非常敏感，降解会破坏细胞三维网状结构，降低相邻细胞间交联强度，是引起产品软化的重要原因[35-36]。如图5所示，枸杞鲜样中果胶的主要组分是SSP，经热风干燥后，WSP含量显著上升，CSP和SSP含量显著降低（P<0.05）。这一变化与此前发表的高氧大气贮藏葡萄[35]、高温处理胡萝卜[36]以及热处理山楂[37]的研究结果一致。这可能由于果胶在热处理过程中会由不溶于水的果胶向水溶性果胶转化，转化途径主要为：高温导致的β-消除解聚以及离子键的切断使CSP转化成WSP[38]；干燥过程促进半乳糖醛酸酶催化底物生成WSP[39]。

碱性电解水预处理后，热风干燥过程中枸杞的CSP、SSP含量升高，WSP含量降低，CSP为果胶主要组分，这表明碱性电解水预处理可以诱导枸杞中天然果胶结构的修饰，促进WSP向CSP、SSP的转化。WSP是一类含有弱结合力的高酯化果胶，在碱性条件下易发生去酯化反应，甲酯基的降低会进一步导致CSP含量增加，因此，碱性电解水处理后，枸杞中CSP含量升高[35-40]。此外，研究发现，由于果胶各组分WSP、CSP、SSP与细胞壁的结合方式不同：WSP通过非共价键或非离子键与其他细胞壁多糖松散结合，CSP、SSP分别通过离子键、共价键与细胞壁交联，加工过程中果胶组成的变化会显著影响枸杞干制品的组织质地[41]，因此，经碱性电解水预处理10 min变温控湿干燥后，枸杞的组织质构变化需进一步探索。

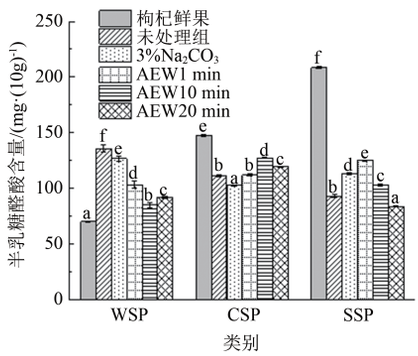


图5　不同预处理条件下的枸杞果胶不同组分含量

Fig. 5　Contents of different components of wolfberry pectin under different pretreatment conditions

3　结论

（1）与未处理组以及3%Na_2CO_3溶液预处理相比，碱性电解水预处理能够显著加快枸杞干燥速度，缩短干燥时间，其中碱性电解水处理10 min时，枸杞到达干燥终点所需时间最短，为23.5 h。

（2）通过扫描电镜观察枸杞表面，发现3%Na_2CO_3溶液预处理组和电解水预处理均能显著改变枸杞表面蜡质结构。

（3）碱性电解水浸泡10 min后进行变温控湿热风干燥，此时枸杞多糖质量分数、总酚含量和总酮含量较高，分别为9.79%、4.18 mg/g和6.42 mg/g；颜色也与新鲜枸杞最为接近。结果表明，与3%Na_2CO_3溶液预处理相比，碱性电解水浸泡10 min处理组中的枸杞营养成分含量更高，色泽良好，其营养价值以及感官品质得到了显著改善。

（4）碱性电解水预处理作为一种绿色环保的预处理方法，基于其具有的高pH值、高还原电位以及强穿透性，有效减少了枸杞的干燥时间，改善了枸杞干制品的感官品质及营养价值，在提高浆果类干燥效率、改善干制品品质以及有效保留生物活性物质上显示出巨大的应用潜力。

参　考　文　献

[1]　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: 581 - 591.

[2]　AGATA K. Microstructural and histochemical characteristics of *Lycium barbarum* L. fruits used in folk herbal medicine and as functional

food[J]. Protoplasma, 2018, 255(6): 1839 - 1854.
[3] ZHAO D D, WEI J, HAO J X, et al. Effect of sodium carbonate solution pretreatment on drying kinetics, antioxidant capacity changes, and final quality of wolfberry (*Lycium barbarum*) during drying[J]. LWT, 2018, 99: 254 - 261.
[4] XIE L, ZHENG Z A, MUJUMDAR S A, et al. Pulsed vacuum drying (PVD) of wolfberry: drying kinetics and quality attributes[J]. Drying Technology, 2018, 36(12): 1501 - 1514.
[5] 李玉锋, 王敬敬, 檀利军, 等.碱性电解水在食品领域中的应用[J].中国食品学报, 2023, 23(12): 421 - 432.
LI Yufeng, WANG Jingjing, TAN Lijun, et al. Research progress on properties of basic electrolyzed water and its application in food[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(12): 421 - 432.(in Chinese)
[6] AMPIAW R E, YAQUB M, LEE W. Electrolyzed water as a disinfectant: a systematic review of factors affecting the production and efficiency of hypochlorous acid[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 43(1): 102228.
[7] HAO J X, LI H Y, WAN Y F, et al. Combined effect of acidic electrolyzed water (AcEW) and alkaline electrolyzed water (AlEW) on the microbial reduction of fresh-cut cilantro[J]. Food Control, 2015, 50: 699 - 704.
[8] HAN Y T, LE S, AN Q S, et al. Removal of six pesticide residues in cowpea with alkaline electrolyzed water[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(8): 2333 - 2338.
[9] LI Y F, ZHENG Q H, LIU G, et al. Effects of ultrasound-assisted basic electrolyzed water (BEW) extraction on structural and functional properties of Antarctic krill (*Euphausia superba*) proteins[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 71: 105364.
[10] ZHAO D D, AN K J, DING S H, et al. Two-stage intermittent microwave coupled with hot-air drying of carrot slices: drying kinetics and physical quality[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(8): 2308 - 2318.
[11] 包晓芮. 枸杞热风干燥和真空远红外干燥工艺的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.
BAO Xiaorui. Studies on drying of *Lycium barbarum* in hot air and vacuum far-infrared environment[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015.(in Chinese)
[12] 赵丹丹. 枸杞加工特性及热泵干燥系统理论分析与应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
ZHAO Dandan. Research on processing characteristics of wolfberry and theory analysis and application of heat pump drying system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016.(in Chinese)
[13] WANG H C, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Comparison of three new drying methods for drying characteristics and quality of shiitake *mushroom* (*Lentinus edodes*)[J]. Drying Technology,2014, 32(15): 1791 - 1802.
[14] 任广跃, 朱乐雯, 段续, 等.苹果丁冷冻-热风联合干燥体积收缩机制[J].农业工程学报, 2024, 40(2): 63 - 71.
REN Guangyue, ZHU Lewen, DUAN Xu, et al. Volume shrinkage mechanism for combined vacuum freeze drying-hot air drying of diced apples[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(2): 63 - 71.(in Chinese)
[15] 徐昊. 枸杞不同生长期壁多糖变化的相关蛋白作用机制研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
XU Hao. Study on mechanism of related protein action in changes of cell wall polysaccharides during Chinese wolfberry (*Lycium barbarum*) fruit development[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2019.(in Chinese)
[16] FISHMAN M L, LEVAJ B, GILLESPIE D T, et al. Changes in the physico-chemical properties of peach fruit pectin during on-tree ripening and storage[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1993, 118(3): 221.
[17] BRUMMELL D A, VALERIANO D C, CRISOSTO C H, et al. Cell wall metabolism during maturation, ripening and senescence of peach fruit[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(405): 2029 - 2039.
[18] 侯竞涵. 芍药花茎表型变化与细胞壁成分关系研究[D]. 北京: 北京林业大学,2022.
HOU Jinghan. The relationship between stem phenotype changes and cell wall components of *Paeonia lactiflora* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.(in Chinese)
[19] 王晓雨. 枸杞的促干护色方法及其机理的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
WANG Xiaoyu. Study on the method of promoting dryness and color protection of wolfberry and its mechanism[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.(in Chinese)
[20] 苗雨欣, 刘旭, 宁慧娟, 等. 碱性电解水提取灵芝子实体多糖的工艺优化[J].中国食用菌, 2020, 39(11): 62 - 67,74.
MIAO Yuxin, LIU Xu, NING Huijuan, et al. Optimization of alkaline electrolyzed water extraction process of *Ganoderma lucidum* polysaccharides by response surface methodology[J]. Edible Fungi of China, 2020, 39(11): 62 - 67,74.(in Chinese)
[21] HENRY M, CHAMBRON J. Physico-chemical, biological and therapeutic characteristics of electrolyzed reduced alkaline water (ERAW)[J]. Water, 2013, 5(4): 2094 - 2115.
[22] 韩江学. 一种用微电水除去枸杞鲜果果蜡的方法: 201811438556. 3[P]. 2019 - 04 - 09.
[23] 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 Jiankai. 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.(in Chinese)
[24] SHIRAHATA S, KABAYAMA S, NAKANO M, et al. Electrolyzed-reduced water scavenges active oxygen species and protects DNA from oxidative damage[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 1997, 234(1): 269 - 274.
[25] ZHAO L, ZHAO M Y, PHEY C P, et al. Efficacy of low concentration acidic electrolyzed water and levulinic acid combination on fresh organic lettuce (*Lactuca sativa* Var. *Crispa* L.) and its antimicrobial mechanism[J]. Food Control, 2019, 101: 241 - 250.
[26] LI Z H, ZHOU B, LI X T, et al. Effect of alkaline electrolyzed water on physicochemical and structural properties of apricot protein isolate[J]. Food Science and Biotechnology, 2019, 28(1): 15 - 23.
[27] 周泽宇. 紫花苜蓿响应盐和碱胁迫的代谢组学分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2022.

ZHOU Zeyu. Metabolomics analysis of *Medicago sativa* L. in response tosaline and alkali stress[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2022.(in Chinese)

[28] 李朋亮. 枸杞干制中黄酮类化合物变化规律及其抗氧化活性研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2014.
LI Pengliang. Study onvarying patterns of flavonoids of *Lycium barbarum* L. during drying and its antioxidant activities [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2014.(in Chinese)

[29] 李宁宁. 热风干制过程中枸杞褐变反应研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016.
LI Ningning. Research on *Lycium barbarum* browning reaction in hot air drying processing[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)

[30] 张雨, 韩延超, 刘瑞玲, 等. FIRD-HPD方式对蓝莓干燥特性及品质的影响[J].中国食品学报, 2024, 24(6): 237 - 247.
ZHANG Yu, HAN Yanchao, LIU Ruiling, et al. Effect of FIRD-HPD method on drying characteristics and quality of blueberry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(6): 237 - 247.(in Chinese)

[31] DENG L, YANG X, MUJUMDAR S A, et al. Red pepper (*Capsicum annuum* L.) drying: effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant capacity, and microstructure[J]. Drying Technology, 2018, 36(8): 893 - 907.

[32] 仇徐亮,冯蕾,聂梅梅,等.超声预处理对荠菜微波干燥品质的影响[J].农业工程学报, 2024, 40(6): 155 - 167.

[33] XIAO H W, GAO Z J, HAI L, et al. Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes[J]. Journal of Food Process Engineering, 2010, 33(5): 899 - 918.

[34] 谭宏渊, 凌玉钊, 黄丽琪, 等.不同预处理对热风干燥山药片品质特性及微观结构的影响 [J].食品工业科技, 2023, 44(20): 43 - 52.

[35] SILA D N, BUGGENHOUT S V, DUVETTER T, et al. Pectins in processed fruits and vegetables: part II —structure-function relationships[J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2010, 8(2): 86 - 104.

[36] XIAO M, YI J Y, BI J F, et al. Modification of cell wall polysaccharides during drying process affects texture properties of apple chips [J]. Journal of Food Quality, 2018, 2018: 1 - 11.

[37] DENG Y, WU Y, LI Y F. Changes in firmness, cell wall composition and cell wall hydrolases of grapes stored in high oxygen atmospheres [J]. Food Research International, 2005, 38(7): 769 - 776.

[38] ROECK A D, SILA D N, DUVETTER T, et al. Effect of high pressure/high temperature processing on cell wall pectic substances in relation to firmness of carrot tissue[J]. Food Chemistry, 2008, 107(3): 1225 - 1235.

[39] ZHOU M, BI J F, LYU J, et al. Structural conversion of pectin fractions during heat processing in relation to the ability of inhibiting lipid digestion: a case study of hawthorn pectin[J]. Food hydrocolloids, 2021, 117(6): 106721.

[40] SILA D N, DOUNGLA E, SMOUT C, et al. Pectin fraction interconversions: lnsight into understanding texture evolution of thermally processed carrots[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(22): 8471 - 8479.

[41] LIU Y X, ZHANG W D, YANG W T, et al. The effects of drying temperature on the kinetics, color, structure, and pectin composition of *Zizyphus jujuba* Mill. Cv. Junzao[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(11): e15942.

(上接第309页)

[26] CHEN T, GUESTRIN C. XGBoost: a scalable tree boosting system[C]//Proceedings of the 22nd Acm Sigkdd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2016:785 - 794.

[27] KE G, MENG Q, FINLEY T, et al. LightGBM: a highly efficient gradient boosting decision tree[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2017,30:3146 - 3154.

[28] PROKHORENKOVA L, GUSEV G, VOROBEY A, et al. CatBoost: unbiased boosting with categorical features[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2018,31:6639 - 6649.

[29] BIAU G. Analysis of a random forests model[J]. Journal of Machine Learning Research, 2012,13:1063 - 1095.

[30] LUO J, FENG Y, WU X, et al. ForestSubtype: a cancer subtype identifying approach based on high-dimensional genomic data and a parallel random forest[J]. BMC Bioinformatics, 2023,24(1):289.

[31] WANG Y, CAI D, CHEN L, et al. A downscaling methodology for extracting photovoltaic plants with remote sensing data: from feature optimized random forest to improved HRNet[J]. Remote Sensing, 2023,15(20):4931.

[32] WANG Z, BI Y, LU G, et al. Monitoring forest diversity under moso bamboo invasion: a random forest approach[J]. Forests, 2024, 15(2):318.

[33] 韩丁, 马子寅, 王俊林, 等. 基于粒子群算法的超材料吸波体传感器逆设计[J]. 中国激光, 2022,49(17):168 - 175.
HAN Ding, MA Ziyin, WANG Junlin, et al. Inverse design of metamaterial absorber sensor based on particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(17): 168 - 175.(in Chinese)

[34] COBO A, LLORENTE I, LUNA L, et al. A decision support system for fish farming using particle swarm optimization[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,161:121 - 130.