DOI:10.13652/j.issn.1003－5788.2017.02.009

热风干燥过程中小白杏色泽的变化及其动力学研究

Kinetics of colour change of white apricot in XinJiang during hot-air drying

闫圣坤　　李忠新　　王庆惠　　孙俪娜

YAN Sheng-kun　LI Zhong-xin　WANG Qing-hui　SUN Li-nai

（新疆农业科学院农业机械化研究所，新疆 乌鲁木齐　830091）

（*Agricultural Mechanization Institute, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang* 830091, *China*）

摘要：为降低小白杏因干燥引起的褐变，保证产品干燥后色泽良好，同时为小白杏干燥设备选型及工艺确定提供理论依据，选择热风干燥的方式，以新疆小白杏为原料，以亮度值（L）、红绿值（a）、黄蓝值（b）、总色差（$\triangle E$）和褐变指数（BI）为考察指标，研究了热风干燥温度（40，50，60 ℃）和风速（2，3，4 m/s）对新疆小白杏色泽的影响，并在该基础上建立新疆小白杏热风干燥色泽变化动力学模型，有效预测、调节杏褐变程度。结果表明：小白杏在不同风速、不同干燥温度条件下均发生了较为明显的颜色变化，不同热风干燥温度对干燥时间和干燥后杏干色泽均有显著影响，而不同干燥风速对干燥后杏干色泽影响不显著。在不同热风干燥温度和不同风速条件下干燥小白杏的 L 值和 b 值随着干燥时间的延长逐渐降低，而 a 值、$\triangle E$ 值和 BI 值均逐渐升高。小白杏热风干燥过程中颜色参数的反应速率常数 k 值随着干燥温度的升高而呈现出一定的规律性变化，其中 k 值受热风温度的影响较大，受风速的影响较小。根据拟合决定系数 R^2 的比较结果，通过动力学方程模拟，得出 0 阶模型能更好地描述和预测不同风速和不同干燥温度条件下小白杏在热风干燥过程中的颜色变化，而在不同风速和干燥温度条件下小白杏褐变动力学模型模拟效果较好的是 1 阶模型。该研究为小白杏干燥工艺及杏干产品感官品质控制提供了理论依据。

关键词：小白杏；热风干燥；色泽变化；动力学

Abstract: In order to ensure white apricot a good color after drying, avoiding brown appearance, as well as provide the theoretical basis for the selection of drying equipment and process determination of the small white apricot, the hot-air drying method was investigated in this study. The brightness value (L), red-green value (a), yellow-blue value (b), total chromatic aberration ($\triangle E$) and browning index (BI) were taken as the study indexes, the influence of different hot-air drying temperatures (40, 50, 60 ℃) and wind speeds (2, 3, 4 m/s) on Xinjiang white apricot was studied. Moreover, the dynamic model of its color change of by hot-air drying was established by using different models to effectively predict and regulate the degree of apricot browning. The results showed that more obvious color changes have occurred to white apricots in the different wind speeds and different hot-air drying temperature conditions, and the different hot-air drying temperatures have significant effects on the drying time and color of dried apricot after drying. However, different drying wind speeds were found no significant effect on the color of dried apricot after drying. Under conditions of different hot-air drying temperatures and wind speeds, the L and b values of dried white apricots were gradually decreased with the extension of the drying time, while $\triangle E$ and BI values gradually increased. In the process of hot-air drying, the reaction rate constant k value of the color parameter of white apricot showed a certain regular changes with the increase of the drying temperature. Of which the k value is greatly affected by the hot-air temperature, and was less affected by the wind speed. According to the comparison result of the fitting determination coefficient R^2, by means of kinetic equation simulation, it was concluded that the 0-order model could be used to better describe and predict the color change of white apricot in the hot-air drying process under different wind speeds and drying temperatures. However, under conditions of different wind speeds and drying temperatures, the first-order model was better for the dynamic simulation of white apricot browning. Our results provided the theoretical basis for drying process of white apricot as well as sensory quality control of dried apricots.

Keywords: white apricot; hot-air drying; colour change; kinetics

杏，蔷薇科李属植物（*Prunus armeniaca* L.），起源于中国的新疆。新疆是中国杏栽培面积和产量最大的地区，截止 2013 年底，年产量达到了 132.54 万 t[1]。新疆的杏主栽品种有赛买提、小白杏、明星杏和胡安娜等 20 余种[1]。杏果实因

基金项目：国家自然科学基金地区基金项目（编号：31460397）

作者简介：闫圣坤，女，新疆农业科学院农业机械化研究所助理研究员，硕士。

通信作者：李忠新（1958－），男，新疆农业科学院农业机械化研究所研究员。E-mail：13369677078@163.com

收稿日期：2016－11－25

其香气浓郁、营养丰富，不仅可以生津止渴，还对癌症及心血管疾病有一定的保健功效，深受人们的喜爱。但是鲜杏成熟期短，极不耐贮存，容易腐烂变质，常温货架期仅 5 d 左右，因此，将杏脱水干燥制成杏干成为延长杏贮藏期的重要方法之一。

目前，鲜杏干燥的主要方法为自然晾晒法，这种方法不需任何设备，成本低[2]，但受环境条件制约，产品质量很难保证，加工周期也较长，杏干成色较差。为防止传统干燥过程中杏子褐变严重，生产上通常是在干燥过程中进行熏硫处理。硫可以抑制杏内部部分酶促反应，但非酶促反应仍在继续[3]，而且硫对人体的消化系统具有很大的损害。因此，亟需一种现代干燥技术取代自然晾晒，既能缩短干燥时间，又能提高杏干的品质。

微波真空干燥、红外线干燥、真空脉动干燥等干燥技术都是近年来国内外果蔬干燥方法中常用的方法[4]，具有高效保留营养成分的优点，但是这些干燥方法存在着能耗大、成本高、稳定性要求高等缺点。相反，热风干燥可降低干燥成本[5-7]。目前关于杏热风干燥的研究多集中于干燥动力学的研究，Togrul 等[8]研究了杏在不同干燥温度和风速下的干燥动力学模型，确定了 logarithmic 模型为最优模型；Oguz[9]则进行了薄层干燥模型的研究，确定了 Page 模型为最佳动力学模型。而在干燥品质方面，色泽是影响小白杏品质的重要指标[8]，杜志龙等[10]研究了两个品种杏在促干剂和气体射流冲击作用下的干燥特性和色泽变化，得出不同处理的杏干燥特性不同，而相同处理不同杏，则干燥特性相近；Ali[11]研究了杏干干燥后储藏过程中的色泽变化规律，但未有涉及杏干燥过程中品质尤其是色泽劣变机理的研究。

本研究拟通过研究不同干燥温度及风速条件下杏亮度值(L)、红绿值(a)、黄蓝值(b)、总色差($\triangle E$)和褐变指数(BI)[12]（以 Hunter Lab 表色系统中 L、a 和 b 为基本参数，通过公式计算得到）随干燥时间的变化规律，及在此基础上利用不同模型建立新疆小白杏热风干燥色泽变化动力学模型，旨在为新疆小白杏热风干燥工艺的确定和产品的品质控制方面提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

杏：新疆库车小白杏，购于新疆乌鲁木齐北园春市场。其平均直径约为 2.3 cm，平均质量为 13.2 g/个，湿基含水率为 81.2%（烘干法测定[10]，105 ℃烘 24 h）。试验前，鲜杏放于纸箱中，置于(5±1) ℃冰箱保存。

1.1.2 主要仪器设备

内循环热风干燥试验装置：新疆农业科学院农业机械化研究所研制；

电子天平：ME104E 型，梅特勒-托利多仪器公司；

色差仪：CR-10 型，日本 Konica Minolta 公司；

电热恒温鼓风干燥箱：DHG-9140A 型，上海一恒科技有限公司；

风速计：AS-836 型，东莞万创电子制品有限公司。

1.2 方法

将杏从冰箱中取出，常温放置 4 h。挑选大小、成熟度基本一致，无创伤的作为试验物料，洗净、擦干表面水分，放入密封袋中待用。开启干燥设备，当干燥室内温度达到设定温度时，将小白杏均匀地摆放在聚乙烯物料盘中，试验装置内托盘为上中下共 3 层，同一托盘中相邻的物料不重叠，开始试验。

分别采用不同的干燥温度(40，50，60 ℃)和风速(2，3，4 m/s)进行热风干燥试验[13-14]，在前 50 h，每隔 10 h 从设备中取出 10 个杏样品，测定样品的 L、a、b 值，自 50 h 后，每隔 2 h 从设备中取出 10 个杏样品，测定样品的 L、a、b 值，直到小白杏湿基含水率降到 15%时停止试验。具体试验安排见表 1。

表 1 不同干燥条件下试验温度及风速设定†

Table 1 Test temperature and air velocities setting under different drying condition

序号	热风温度/℃	风速/(m·s^{-1})
1	40	2
2	40	3
3	40	4
4	50	3
5	60	3
6	40(10 h)－ 60($t_{终}$－10 h)	3
7	50(10 h)－ 60($t_{终}$－10 h)	3
8	40(10 h)－ 50(10 h)－ 60($t_{终}$－20 h)	3

† $t_{终}$：小白杏干燥到湿基含水率降到 15%以下所用的总时间。

1.2.1 色泽的测定 将鲜样和干燥后的杏干用色差仪测定颜色参数亮度值 L、红绿值 a、黄蓝值 b，每组样品检测 6 次，取平均值，并以此为依据，按式(1)计算总色差$\triangle E$。

$$\triangle E=\sqrt{[(L_1-L_0)^2+(a_1-a_0)^2+(b_1-b_0)^2]}, \quad (1)$$

式中：

$\triangle E$——总色差；

L_0、a_0、b_0——初始原料测得的颜色指标；

L_1、a_1、b_1——干燥时间 t 测得的颜色指标。

1.2.2 褐变指数 BI 的计算 将干燥后的杏干用色差仪测定，其中 L 值越大说明色泽亮度越大，b 值越大说明其黄色度越大，a 值越大说明其红色度越大。有研究[15]指出，由表色系统为基本色泽参数，进一步利用相关公式来计算 BI 值经常被用来评价高糖物料的褐变大小，小白杏属于高糖物料，所以本研究也用此法表示物料的褐变程度。BI 值表示在加工或储藏过程中小白杏的颜色变化，按式(2)计算[12]：

$$BI=\frac{100(x-0.31)}{0.17}, \quad (2)$$

$$x=\frac{a+1.75L}{5.645L+a-3.012b}, \quad (3)$$

式中：

BI——在干燥过程中小白杏的褐变指数；

L——亮度值;

a——红绿值;

b——黄蓝值;

x——色度坐标。

1.2.3　色泽变化动力学模型　通过测定不同干燥条件下 L、a、b、$\triangle E$ 及 BI 值的变化,绘制颜色变化动力学曲线,为有效预测、调节杏褐变程度提供理论依据。根据已有研究[16-18]报道中均采用 0 阶模型和 1 阶模型来表现物料颜色变化与时间的关系,因此,本研究采用 0 阶模型和 1 阶模型,见式(4)、(5)。

$$D = D_0 + kt \ , \tag{4}$$

$$D = D_0 \cdot \exp(kt) \ , \tag{5}$$

式中:

D_0——初始颜色指数;

D——不同烘干条件下的颜色指数;

t——烘干时间,h;

k——变化速率常数。

将试验数据与 0 阶、1 阶模型进行拟合,计算出 k 值及其他参数,并利用 R^2 评价模型拟合好坏,选择拟合度高的模型描述杏干燥过程中的颜色变化规律。

2　结果与分析

2.1　不同风速条件下 L、a、b、$\triangle E$ 及 BI 的变化及动力学模型研究

2.1.1　L、a、b、$\triangle E$ 的变化及动力学模型研究　由图 1(a)、(c)可知,L、b 值均随着干燥时间的增加而降低,而且干燥温度越高,下降速率越快。由图 1(b)、(d)可知,a 值和 $\triangle E$ 值则是随着干燥时间的增加呈增大趋势,干燥温度越高,a 值上升的速率越快,即随着干燥时间的增长,小白杏的亮度降低,颜色加深,变为深红色。但小白杏在不同风速条件下,L、a、b、$\triangle E$ 值差距不明显,说明风速对小白杏颜色变化影响不大。这些颜色的变化可能跟它在干燥过程中发生了褐变反应有较大的关系。$\triangle E$ 值作为色差综合评定指标,其值越大表示颜色差异越大,当 $\triangle E > 3.5$ 时,色差就已经比较明显。因此,在不同风速条件下干燥小白杏,在视觉上均能观察出其颜色发生了明显变化。

由表 2 可知,按照 0 阶模型拟合 L、a、b、$\triangle E$ 的反应速率常数 k 值均呈现了较好的规律性变化。同一干燥温度,干燥风速由 2 m/s 变为 4 m/s,L 的 k 值则由 $-0.261\ 1\ \text{min}^{-1}$ 逐渐降低到 $-0.269\ 9\ \text{min}^{-1}$,$a$ 的 k 值由 $0.093\ 6\ \text{min}^{-1}$ 降低到 $0.092\ 2\ \text{min}^{-1}$,$b$ 的 k 值由 $-0.139\ 3\ \text{min}^{-1}$ 逐渐降低到 $-0.146\ 9\ \text{min}^{-1}$,$\triangle E$ 的 k 值由 $0.306\ 5\ \text{min}^{-1}$ 逐渐上升到 $0.321\ 0\ \text{min}^{-1}$,说明小白杏在干燥过程中,风速越高,小白杏的颜色变化速率越快,但是变化速率幅度很小。按照 1 阶模型拟合 L、a、b、$\triangle E$ 的反应速率常数 k 值的变化均仅为 0.000 1～0.000 2。由表 2 可知,小白杏热风干燥过程中颜色参数的反应速率常数 k 值受风速的影响较小。同时,从拟合决定系数 R^2 比较得出,0 阶模型的拟合程度要优于 1 阶模型,因此,用 0 阶模型能更好地描述和预测不同风速条件下小白杏在热风干燥过程中的颜色变化。

2.1.2　BI 的变化及动力学模型研究　由图 2 可知,鲜杏的初始 BI 值约为 130.53。随着干燥时间的延长,小白杏的褐变指数 BI 值逐渐升高,表明在热风干燥过程中,小白杏的褐变程度在增加,当含水率达到 15%时,风速为 2 m/s 干燥时间为70 h,褐变指数BI值最高(157.96),其次是风速为

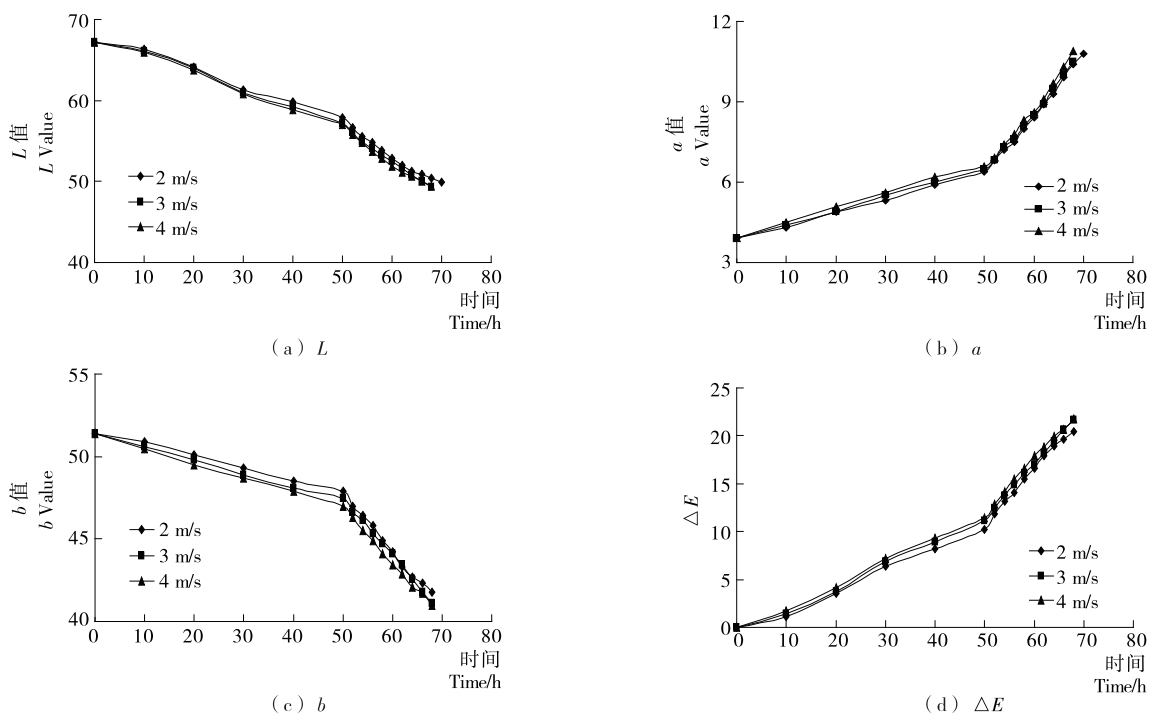

图 1　不同风速条件下小白杏的 L、a、b、$\triangle E$ 随干燥时间的变化曲线

Figure 1　L, a, b, $\triangle E$ value of white apricot changes with drying time in different air velocities

表 2 不同风速条件下小白杏 L、a、b、$\triangle E$ 变化动力学模型拟合结果

Table 2 Kinetic model parameters for L, a, b, $\triangle E$ change of white apricot in different air velocities

干燥风速/(m·s^{-1})	参数	$D=D_0+kt$			$D=D_0\cdot\exp(kt)$		
		D_0	k	R^2	D_0	k	R^2
2	L	68.946 0	−0.261 1	0.970 1	69.619 0	−0.004 5	0.956 5
	a	2.921 6	0.093 6	0.866 6	3.591 5	0.014 2	0.945 0
	b	52.843 0	−0.139 3	0.868 6	53.118 0	−0.003 0	0.850 5
	$\triangle E$	−2.269 8	0.306 5	0.949 0			
3	L	68.857 0	−0.269 1	0.972 5	69.525 0	−0.004 6	0.958 0
	a	3.111 1	0.089 5	0.874 7	3.680 1	0.013 9	0.948 7
	b	52.639 0	−0.141 4	0.878 8	52.922 0	−0.003 0	0.858 7
	$\triangle E$	−2.163 0	0.317 0	0.954 1			
4	L	68.677 0	−0.269 9	0.975 7	69.335 0	−0.004 6	0.962 7
	a	3.151 3	0.092 2	0.867 1	3.740 5	0.013 9	0.945 1
	b	52.551 0	−0.146 9	0.901 9	52.843 0	−0.003 2	0.883 9
	$\triangle E$	−1.967 1	0.321 0	0.959 4			

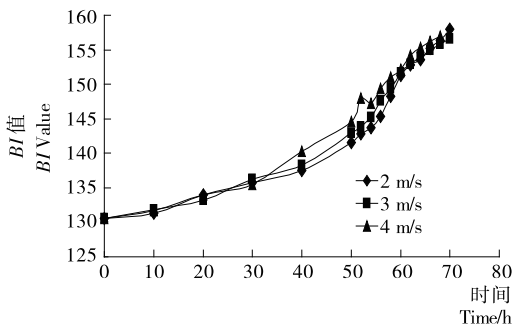

图 2 不同风速条件下小白杏褐变指数随干燥时间的变化曲线

Figure 2 BI value of white apricot changes with drying time in different air velocities

4 m/s 干燥时间为 68 h,褐变指数 BI 值为 156.93,风速为 3 m/s,干燥时间也为 70 h,褐变指数 BI 值最低(156.53),说明不同风速对小白杏的褐变指数 BI 影响不大,仅在干燥时间上存在略微差异。

0 阶模型和 1 阶模型对小白杏在不同风速条件下干燥的褐变动力学模拟结果见表 3,可知,两种模型在不同风速条件下的拟合决定系数 R^2 为 0.879 4～0.943 5,模拟效果均良好,其中在风速为 2,3,4 m/s 条件下,均是 1 阶模型的模拟效果较好,R^2 分别为 0.894 2,0.931 0,0.952 3,因此,在不同风速条件下小白杏褐变动力学模型模拟效果较好的是 1 阶模型。

2.2 不同热风温度条件下 L、a、b、$\triangle E$ 及 BI 的变化及动力学模型研究

2.2.1 L、a、b、$\triangle E$ 的变化及动力学模型研究 由图 3 可知,L、b 值均随着干燥时间的增加而降低,而 a 值和 $\triangle E$ 值则是随着干燥时间的增加呈增大趋势。并且由图可得出,温度为 40 ℃时,L、b 值下降和 a、$\triangle E$ 值上升速率均为最慢,证明干燥温度越低,干燥后的小白杏颜色越为鲜亮,但干燥时间却较长,在同等时间条件下,最终干燥温度均为 60 ℃时,分段式热风干燥较单一温度干燥 L、b 值下降和 a、$\triangle E$ 值上升速率均慢,同时还印证了随着干燥的时间的增长,小白杏的亮度降低,颜色变红变深,说明颜色的变化与褐变反应有关。同理,在视觉上也能观察出不同温度条件下干燥小白杏的颜色发生了明显变化。

由表 4、5 可知,按照 0 阶模型拟合 L、a、b、$\triangle E$ 的 k 值均呈现了较好的变化规律。随着热风薄层干燥温度的升高,恒定干燥温度条件下 L 的 k 值由 −0.272 3 min^{-1} 逐渐降低到 −0.344 5 min^{-1},a 的 k 值由 0.095 9 min^{-1} 上升到 0.104 1 min^{-1},b 的 k 值由 −0.188 8 min^{-1} 逐渐降低到 −0.208 3 min^{-1},$\triangle E$ 的 k 值由 0.344 9 min^{-1} 逐渐上升到 0.415 6 min^{-1},说明小白杏在干燥过程中,随着温度的升高小白杏的颜色变化速率加快;变温干燥 50 ℃→60 ℃条件下小白杏 L、b 的 k 值依次为 −0.308 9,−0.194 6 min^{-1},均为最大,40 ℃→60 ℃条件下 a、$\triangle E$ 的 k 值依次为 0.147 7,

表 3 不同风速条件下小白杏褐变动力学模型拟合结果

Table 3 Fitting results of white apricot colour kinetics in different air velocities

参数	干燥风速/(m·s^{-1})	$D=D_0+kt$			$D=D_0\cdot\exp(kt)$		
		D_0	k	R^2	D_0	k	R^2
BI	2	125.86	0.399 8	0.879 4	126.56	0.002 8	0.894 2
	3	126.28	0.400 7	0.919 9	126.92	0.002 8	0.931 0
	4	126.55	0.418 6	0.943 5	127.16	0.002 9	0.952 3

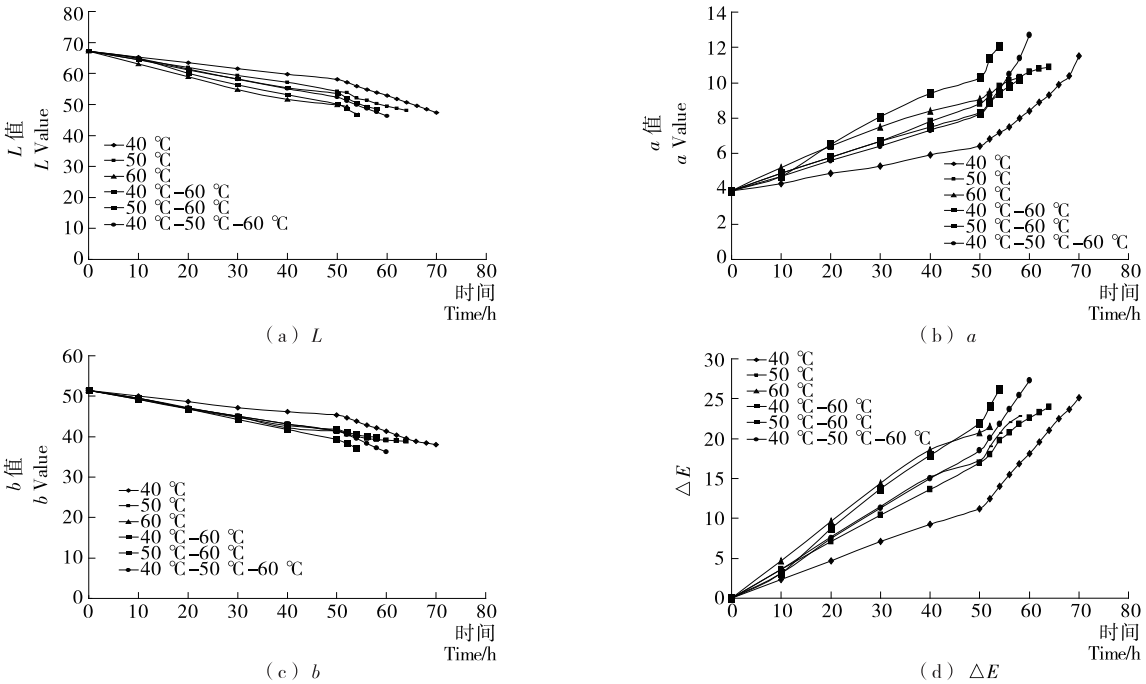

图 3　不同热风温度条件下小白杏的 L、a、b、$\triangle E$ 随干燥时间的变化曲线

Figure 3　L, a, b, $\triangle E$ value of white apricot changes with drying time in different hot-air temperatures

0.476 5 min^{-1},均为最大。按照 1 阶模型拟合 L、a、b、$\triangle E$ 的反应速率常数 k 值也呈现了较好的变化规律,变化规律与 0 阶模型相近。由表 4 分析可知,小白杏热风干燥过程中颜色参数的反应速率常数 k 值受温度的影响较大。同时,从拟合决定系数 R^2 比较得出,0 阶模型的拟合程度要优于 1 阶模型,因此用 0 阶模型能更好地描述和预测不同热风温度条件下小白杏在热风干燥过程中的颜色变化。

2.2.2　*BI* 值的变化及动力学模型研究　在不同的干燥温度条件下[恒温 40,50,60 ℃,变温 40 ℃(10 h)→60 ℃(结束)、50 ℃(10 h)→60 ℃(结束)、40 ℃(10 h)→50 ℃(10 h)→60 ℃(结束)]小白杏 *BI* 值随着干燥时间的变化曲线见图 4。由图 4 可知,随着干燥时间的延长,小白杏的 *BI* 值逐渐升高,这表明在热风干燥过程中,小白杏的褐变程度在增加。热风温度 60 ℃下,干燥至水分含量 15%的时间为 52 h,时间最短但小白杏的 *BI* 值最高,为 169.54;热风温度 50 ℃(10 h)→60 ℃(结束)条件下,干燥时间为 58 h,其 *BI* 值为 166.97;热风温度 40 ℃(10 h)→60 ℃(结束)条件下,干燥时间为 54 h,其 *BI* 值为 163.51;热风温度 40 ℃(10 h)→50 ℃(10 h)→60 ℃(结束)条件下,干燥时间为 60 h,其 *BI* 值为 160.49;热风温度 50 ℃下,干燥时间为 64 h,其 *BI* 值为 158.94;热风温度 40 ℃下,干燥时间为 70 h,干燥时间最长但其 *BI* 值最低,为 156.53,说明干燥温度越低,小白杏的 *BI* 值越小,其褐变程度越小,但干燥时间却越长。另外,分段式热风干燥较单一温度干燥时的 *BI* 值小;干燥前 30 h 小白杏的褐变变化速率上升慢,30～50 h 时上升快,50 h 后趋于平缓。小白杏在干燥过程中的褐变反应分为酶促褐变和非酶促褐变,热风干燥时小白杏中的多酚氧化酶在干燥过程中仍具有活性,在干燥过程中与氧气、水作用发生酶促褐变,同时小白杏中的糖类物质分解发生美拉德反应,也生成了棕褐色

表 4　不同热风温度条件下小白杏 L、a、b、$\triangle E$ 变化动力学模型拟合结果(0 阶模型)

Table 4　Kinetic model parameters for L, a, b, $\triangle E$ change of white apricot in different hot-air temperatures(0-order model)

干燥温度/℃	参数	$D = D_0 + kt$		
		D_0	k	R^2
40	L	69.064 0	−0.272 3	0.931 4
	a	2.857 6	0.095 9	0.845 7
	b	52.651 0	−0.188 8	0.921 8
	$\triangle E$	−2.431 4	0.344 9	0.924 1
50	L	67.843 0	−0.294 7	0.984 8
	a	3.627 5	0.112 5	0.989 9
	b	51.182 0	−0.200 5	0.996 1
	$\triangle E$	−0.447 2	0.373 7	0.993 5
60	L	66.342 0	−0.344 5	0.984 3
	a	4.139 8	0.104 1	0.991 6
	b	51.342 0	−0.208 3	0.988 2
	$\triangle E$	0.820 0	0.415 6	0.987 2
40→60	L	67.742 0	−0.370 8	0.992 9
	a	3.574 3	0.147 7	0.984 5
	b	51.887 0	−0.260 5	0.994 5
	$\triangle E$	−0.780 5	0.476 5	0.993 4
50→60	L	67.490 0	−0.308 9	0.987 4
	a	3.755 3	0.102 3	0.978 5
	b	51.040 0	−0.194 6	0.993 5
	$\triangle E$	−0.067 9	0.379 0	0.991 6
40→50→60	L	68.088 0	−0.341 1	0.988 3
	a	3.159 6	0.126 6	0.887 4
	b	51.934 0	−0.237 4	0.973 5
	$\triangle E$	−0.189 9	0.434 5	0.979 7

表 5 不同热风温度条件下小白杏 L、a、b、$\triangle E$ 变化动力学模型拟合结果(1 阶模型)

Table 5 Kinetic model parameters for L, a, b, $\triangle E$ change of white apricot in different hot-air temperatures(1-order model)

干燥温度/℃	参数	$D = D_0 \cdot \exp(kt)$			
		阶段温度/℃	D_0	k	R^2
40	L	40	69.925 0	−0.004 7	0.905 5
	a		3.570 9	0.014 4	0.936 1
	b		53.179 0	−0.004 2	0.899 1
50	L	50	68.497 0	−0.005 2	0.973 1
	a		4.101 9	0.015 8	0.994 9
	b		51.486 0	−0.004 5	0.996 2
60	L	60	66.686 0	−0.006 0	0.991 5
	a		4.315 9	0.016 0	0.957 3
	b		51.520 0	−0.004 6	0.989 3
40→60	L	40	67.200 0	−0.003 5	1.000 0
		60	68.364 0	−0.006 6	0.988 2
	a	40	3.900 0	0.018 7	1.000 0
		60	4.053 8	0.020 2	0.980 4
	b	40	51.400 0	−0.803 8	1.000 0
		60	52.304 0	−0.005 9	0.987 6
50→60	L	50	67.200 0	−0.004 1	1.000 0
		60	68.011 0	−0.005 4	0.979 3
	a	50	3.900 0	0.022 8	1.000 0
		60	4.101 5	0.015 3	0.988 5
	b	50	51.400 0	−0.004 4	1.000 0
		60	51.249 0	−0.004 3	0.995 7
40→50→60	L	40	67.200 0	−0.003 5	1.000 0
		50	68.600 0	−0.005 5	1.000 0
		60	68.838 0	−0.006 1	0.976 9
	a	40	3.900 0	0.018 7	1.000 0
		50	3.944 6	0.017 5	1.000 0
		60	3.834 9	0.017 6	0.963 6
	b	40	51.400 0	−0.003 8	1.000 0
		50	52.133 0	−0.005 2	1.000 0
		60	52.423 0	−0.005 4	0.957 6

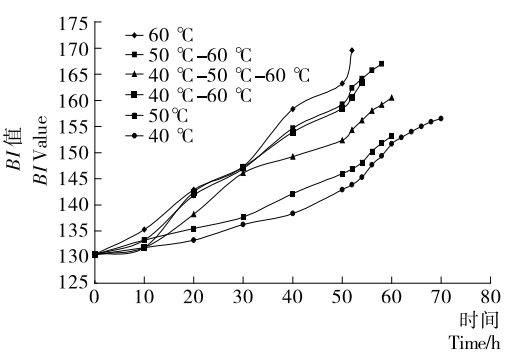

图 4 不同热风温度条件下小白杏褐变指数随干燥时间的变化曲线

Figure 4 BI value of white apricot changes with drying time in different hot-air temperatures

的物质。因此,分段式干燥较单一温度干燥既可缩短干燥时间,又可降低小白杏的褐变。

0 阶模型和 1 阶模型对小白杏在不同热风温度条件下干燥的褐变动力学模拟结果见表 6、7。两种模型在不同热风温度条件下的拟合决定系数 R^2 为 0.919 9～0.993 9,其中在热风恒温温度为 40,50,60 ℃,变温 50 ℃(10 h)→60 ℃(结束)和 40 ℃(10 h)→50 ℃(10 h)→60 ℃(结束)条件下,均是 1 阶模型的模拟效果较好,R^2 依次为 0.931 0,0.970 5,0.985 5,0.993 9,0.984 4,在 40 ℃(10 h)→60 ℃(结束)热风温度条件下,0 阶模型的模拟效果较好,R^2 为 0.984 0,比较两种模型的 R^2,表明不同热风温度条件下小白杏褐变动力学模型模拟效果较好的是 1 阶模型。

表 6 不同热风温度条件下小白杏褐变动力学模型拟合结果(0 阶模型)

Table 6 Fitting results of white apricot colour kinetics in different hot-air temperatures(0-order model)

干燥温度/℃	$D = D_0 + kt$		
	D_0	k	R^2
40	126.28	0.400 7	0.919 9
50	128.83	0.367 6	0.963 6
60	128.63	0.725 9	0.978 9
40→60	128.76	0.618 4	0.984 0
50→60	128.56	0.648 6	0.992 1
40→50→60	128.82	0.510 0	0.983 7

表 7 不同热风温度条件下小白杏褐变动力学模型拟合结果(1 阶模型)

Table 7 Fitting results of white apricot colour kinetics in different hot-air temperatures(1-order model)

干燥温度/℃	$D = D_0 \cdot \exp(kt)$			
	阶段温度/℃	D_0	k	R^2
40	40	126.92	0.002 8	0.93 10
50	50	129.17	0.002 6	0.970 5
60	60	129.40	0.004 9	0.985 5
40→60	40	130.53	0.129 0	1.000 0
	60	129.30	0.004 2	0.982 9
50→60	50	130.53	0.273 0	1.000 0
	60	129.29	0.004 4	0.993 9
40→50→60	40	130.53	0.129 0	1.000 0
	50	125.43	0.639 0	1.000 0
	60	129.31	0.003 5	0.984 4

3 结论

(1) 小白杏热风干燥过程中,热风温度对干燥时间和产品品质(主要是褐变)有重要影响,在不同风速、不同温度的热风干燥条件下,小白杏均发生了较为明显的颜色变化,其中 L 值和 b 值逐渐降低,而 a 值、$\triangle E$ 值和 BI 值均逐渐升高。

(2) 通过动力学方程模拟,0 阶模型能更好地描述和预测不同风速和温度的热风干燥条件下小白杏的颜色变化,而 1 阶模型能够较好地模拟不同风速和温度的热风干燥条件下小白杏的褐变指数变化。同时,分段式变温干燥较单一温度干燥既可缩短小白杏的干燥时间,又可降低其褐变。

小白杏热风干燥过程的动力学研究,为实时监控干燥进程和保证产品质量,避免不必要的损失提供了数据支持,但从目前的研究现状来看,模型还需要进一步的精确化,模型未与自动化控制技术紧密结合,因此,利用动力学模型方法优化实际操作进程为未来的研究提供了理论依据。

参考文献

[1] 徐晓伟. 软包装杏果罐头制作工艺的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012: 17.

[2] 肖红伟, 张世湘, 白竣文, 等. 杏子的气体射流冲击干燥特性[J]. 农业工程学报, 2010(7): 318-323.

[3] 杨瑞云, 王瑞祥, 张振涛. 小白杏热泵干燥特性和褐变研究[J]. 北京建筑工程学院学报, 2013(4): 27-30.

[4] LEMUEL M D, GEOFFREY P S, LEO V, et al. Effects of maltodextrin level, frying temperature and time on the moisture, oil and beta-carotene contents of vacuum-fried apricot slices[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2011(47): 325-331.

[5] JUNWEN B, DAWEN S, HONGWEI X, et al. Novel high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) pretreatment enhances drying kinetics and color attributes of seedless grapes [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2013, 20(4): 230-237.

[6] 马超. 果蔬干制技术概况及展望[J]. 中国果菜, 2013(12): 38-40.

[7] 刘娟娟. 红枣的粉体化微波干燥特性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2013: 16.

[8] TOGRUL I T, PEHLIYAN D. Mathematical Modelling of Solar Drying of Apricots in Thin Layers[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 55(3): 209-216.

[9] OGUZ B. Thin Layer Drying and Mathematical Modeling for Washed Dry Apricots[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(1): 146-151.

[10] 杜志龙, 高振江, 张春敏, 等. 杏的自然风干试验研究[J]. 食品科技, 2006, 31(8): 97-101.

[11] ALI L C, MELTEM T, OZGE T A, et al. Effects of Various Sulphuring Methods and Storage Temperatures on the Physical and Chemical Quality of Dried Apricots[J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 3 670-3 680.

[12] MEDENI M. Kinetics of Colour Change of Kiwifruits during Hot Air and Microwave Drying [J]. Journal of Food Engineering, 2001(48): 169-175.

[13] 王庆惠, 李忠新, 杨劲松, 等. 圣女果分段式变温变湿热风干燥特性[J]. 农业工程学报, 2014(3): 271-276.

[14] 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.

[15] 王丽芳, 王晓拓, 王志东. 贮藏温度对双孢蘑菇褐变和抗氧化活性的影响及动力学研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(2): 157-163.

[16] SOLEIMAN H, SHAHIN R, SEVED S M, et al. Application of computer vision technique for on-line monitoring of shrimp color changes during drying[J]. Journal of Food Engineering, 2013(115): 99-114.

[17] 张倩钰, 孙杰, 郑炯. 苹果片热风薄层干燥过程中颜色变化的动力学模型[J]. 食品工业科技, 2015, 36(24): 137-141.

[18] HIROKI M, YVAN L, MIKA F, et al. Color changes in fish during grilling-Influences of heat transfer and heating medium on browning color [J]. Journal of Food Engineering, 2013 (116): 130-137.

信息窗

中国科学家破解“西红柿咋没了从前味道”谜题

日前, 中国农业科学院深圳农业基因组所黄三文研究员领衔的科研团队在番茄风味品质研究中取得重要突破,首次阐明了番茄风味遗传基础,发现了番茄风味调控机制,为番茄风味改良奠定了重要理论基础。相关研究成果日前在国际顶级学术期刊《科学》上以封面文章的形式发表。

近年来消费者常常抱怨“现在的西红柿越来越没有以前的味儿了”。为了解决这一难题,黄三文研究员和美国佛罗里达大学哈里·克利(Harry Klee)教授组成了 20 人的联合研究团队,历时 4 年多的协同攻关,终于发现了番茄风味调控机制。该研究团队组织了一个 170 人的 “品尝小组”,对 100 多种番茄进行了多次严格的品尝实验,利用数据模型分析确定了 33 种影响消费者喜好的主要风味物质,包括葡萄糖、果糖、柠檬酸、苹果酸和 29 种挥发性物质,揭示了番茄风味的物质基础。之所以“西红柿没有以前的味道了”,是由于在现代育种过程中过于注重产量、外观等商品品质, 导致了控制风味品质的部分基因位点丢失,造成 13 种风味物质含量在现代番茄品种中显着降低,最终使得番茄口感下降。

这项成果则为培育美味番茄提供了切实可行的路线图,并得到科技部、国家自然科学基金委、中国农科院创新工程、广东省“珠江人才”的资助,基因组所是该成果的第一完成单位。

(来源:www.foodmate.net)