DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2024.04.002

基于图像处理的菊花收缩率及色泽变化研究

徐辉煌[1, 2]，吴敏[1, 2*]，王梦露[1, 2]

(1. 中国农业大学工学院，北京市，100083；
2. 国家中药材产业技术体系机械化功能研究室，北京市，100083)

摘要：外观品质是评价干燥花质量的重要指标。为了实现对干燥过程中菊花外观品质的快速无损检测，本研究将计算机视觉技术应用于菊花的红外辅助热风干燥过程中，基于Python语言开发了一种图像处理算法来获取在不同温度下(35 ℃，50 ℃和65 ℃)的干燥过程中菊花花瓣和花蕊表面收缩率和色泽参数的变化信息，并作为外观品质的评价指标，以此实现对干燥过程的精准控制。干燥动力学研究表明：菊花的干燥过程中始终处于降速干燥阶段，且干燥温度的升高导致了干燥时间的显著($p<0.05$)缩短和干燥速率的显著升高。基于平方确定系数(R^2)、残差平方和(RSS)、均方误差(MSE)值评估了常用的薄层干燥数学模型与试验数据的拟合程度，发现Henderson and Pabis模型、Page模型、Lewis模型与试验数据拟合度更高，能更好地描述菊花的干燥过程。此外，基于图像处理获取的不同干燥阶段菊花的表面收缩率及亮度值(L^*)、红/绿值(a^*)和黄/蓝值(b^*)发现菊花形态和色泽的变化取决于干燥温度和干燥时间的共同作用，更低的干燥温度和更短的干燥时间更有利于抑制菊花在干燥过程的外观品质的劣变。进一步对零阶、一阶和一阶分数模型预测的收缩率和色泽(L^*、a^*和b^*)值与试验数据进行线性回归分析，发现一阶分数模型能更为精准地预测菊花在干燥过程中收缩率以及色泽的变化规律。

关键词：菊花；图像处理；干燥动力学；收缩率；色泽；预测模型

中图分类号：S37 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-7217 (2024) 04-0024-15

徐辉煌，吴敏，王梦露. 基于图像处理的菊花收缩率及色泽变化研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2024，5(4)：24－38
XU Huihuang，WU Min，WANG Menglu. Study on the kinetics of shrinkage and color changes of chrysanthemum based on image processing [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization，2024，5(4)：24－38

0 引言

菊花作为我国的传统名花，品种丰富，是制作干燥花的极好原料。我国菊花种植分布广泛，主要集中在江苏、安徽和浙江等地区。新鲜采摘的菊花含水量高达80%[1]，质地较为柔软，极易在运输过程中受到机械损伤，导致呼吸作用加剧，营养物质和能量消耗增加，进而加速组织的腐败和衰老，最终导致产品的商业价值大大降低。干燥是解决上述问题的一个重要手段，它通过脱水抑制微生物繁殖和多种化学反应[2-3]，有效地延长了产品的保质期。利用干燥脱水制成的干燥花有如下特点：鲜花原有的形态与颜色得到保留；鲜花可在花期集中采摘，且干燥后可长时间存放；干燥花及干花装饰品无需严格、复杂的贮藏、运输和保鲜条件，销售过程中损耗风险也大大降低[4-5]。因此，开展菊花干燥技术的研究，提升干燥效率和品质，对促进我国菊花产业的发展具有重要意义。

干燥产品的外观品质直接影响消费者的接受程度，并最终影响产品的经济价值[6]。因此，评估干燥技术的可行性，不仅要考虑干燥效率，还要考虑产品的色泽、收缩程度等外观属性。传统的人工检测存在主观性和破坏性，这导致产品的功能性不可避免地受到影响[7]。因此，急需开发一种非破坏性的快速检测技术。数字图像处理技术由于其可靠性和通用性，在农作物生长监测[8]、病虫害诊断[9]、种子品质检测[10]、农产品质量分级检测[11]等方面得到了广泛的应用。因此，采用计算机视觉技术有望实现干燥过程中对菊花外观品质的快速无损检测。然而，目前尚未有关于应用图像处理技术监测菊花在干燥过程中外观品质变化的研究。

本文以菊花为研究对象，探究不同干燥温度对菊花干燥特性的影响；使用图像处理技术，重点研究菊花收缩率以及色泽在干燥过程中随干燥时间和干燥温度

收稿日期：2024-05-13 修回日期：2024-06-28
基金项目：国家现代农业产业技术体系资助(CARS-21)；中央高校基本科研业务费专项资金资助(2022TC079)
第一作者：徐辉煌，男，1998年生，河南驻马店人，博士研究生；研究方向为花类中药材加工。E-mail：xhhhenan@163.com
*通信作者：吴敏，女，1982年生，辽宁沈阳人，博士，副教授；研究方向为植物蛋白、农产品加工。E-mail：minwu@cau.edu.cn

变化的规律，并以此构建相应的数学模型，为干燥工艺的优化提供理论依据和数据支撑。

1　材料与方法

1.1　试验材料与设备

试验材料选用雏菊的初始湿基含水率为84.50%±0.50%。红外辅助热风干燥机（中国农业大学工学院农产品加工技术与装备实验室，功率为1.8 kW）；工业摄像机（Aca250014-gc）；电子秤（JA21002，精度0.01 g）。

1.2　干燥动力学

1.2.1　水分比

菊花干燥过程中的干燥曲线采用水分比随干燥时间变化的曲线。菊花水分比的计算方法如式(1)所示[12]。

$$MR=\frac{M_t-M_e}{M_0-M_e} \tag{1}$$

式中：M_0——菊花初始的干基含水率，g/g；

M_e——菊花干燥结束时的干基含水率，g/g；

M_t——菊花在任意t时刻的干基含水率，g/g。

干燥速率可采用式(2)计算。

$$DR=\frac{M_{t1}-M_{t2}}{t_1-t_2} \tag{2}$$

式中：M_{t1}——干燥t_1时刻菊花的干基含水率，g/g；

M_{t2}——干燥t_2时刻菊花的干基含水率，g/g。

1.2.2　干燥模型

使用表1中4种常用的农产品干燥数学模型对试验数据进行拟合[13]，并用通过平方确定系数（R^2）、残差平方和（RSS）、均方误差（MSE）评价模型的好坏，R^2越大、RSS和MSE越小，说明数学模型与试验数据的拟合程度越高。

表1　四种常用的农产品干燥模型

Table 1　Four commonly used mathematical models for drying agricultural products

模型名称	表达式
Lewis model	$MR=\exp(-kt)$
Page model	$MR=\exp(-kt^n)$
Henderson and Pabis model	$MR=a\exp(-kt)$
Wang and Singh model	$MR=1+at+bt^2$

1.3　试验方法

选择大小均匀、表面无损伤的花朵从枝干上剪下，待干燥设备工作状态稳定后，将花朵放置在物料托盘上。在干燥过程中，前2 h每隔15 min将托盘取出放在天平上称重1次，并采集1次图像，2 h后每隔30 min称重1次并采集1次图像，直到菊花的湿基含水率低于12%停止干燥。每组试验重复3次。

图像采集装置由照明装置、工业摄像机和计算机组成。采集图像的工业摄像机安装在小型照相馆中，照相馆被不透光黑色布覆盖，使用荧光灯和漫射光实现均匀照明，避免环境光线对图像采集的影响[14]。在采集图像前先对相机进行白平衡校正，并调节镜头变焦环将拍摄画面聚焦在物料上，摄像机与计算机相连，使用pylon软件创建图片文件。

1.4　图像处理

1.4.1　菊花表面收缩率的计算

本文中使用的程序是基于Python语言实现，使用Pycharm软件编写，主要调用了OpenCV开源函数库。计算收缩率的流程图如图1所示。

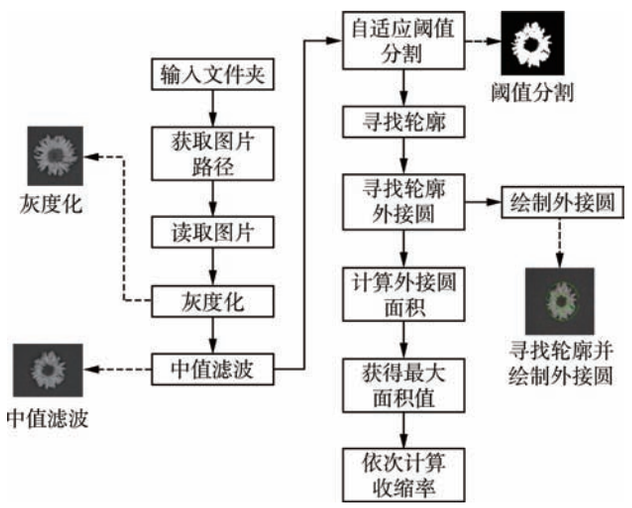


图1　使用图像处理计算菊花收缩率的流程

Figure 1　Flow of calculating chrysanthemum shrinkage using image processing

第1步先使用cv2.cvtColor函数将RGB图像转换为灰度图像；第2步使用cv2.medianBlur函数进行中值滤波，得到去除椒盐噪声的图像；第3步使用cv.threshold函数进行阈值分割，其中使用了OTSU算法来自动寻找最优的阈值；第4步用cv2.findContours函数来检测轮廓；第5步对于检测到的所有轮廓，首先使用cv2.minEnclosingCircle函数求得每个轮廓的最小外接圆，返回的值是最小外接圆的圆心和半径，由此计算每个外接圆的面积，并且绘制出每个外接圆，然后用enumerate函数来枚举计算得到的外接圆面积，再用max函数求得这其中的最大值，这个最大值即为我们所需要的这朵花的外接圆的面积A_0[15]。菊花的径向收缩率（SR）的计算方法如式(3)所示[16]。

$$SR=1-\frac{A_t}{A_0} \tag{3}$$

式中：A_0——新鲜菊花的投影面积；

A_t——干燥后菊花的投影面积。

1.4.2 花瓣颜色特征提取

在处理图像之前首先用 cv2. createTrackbar 函数创建滚动条,然后用 cv2. getTrackbarPos 函数获取花瓣的 HSV 色彩空间值的范围。测定花瓣色泽的流程图如图 2 所示。

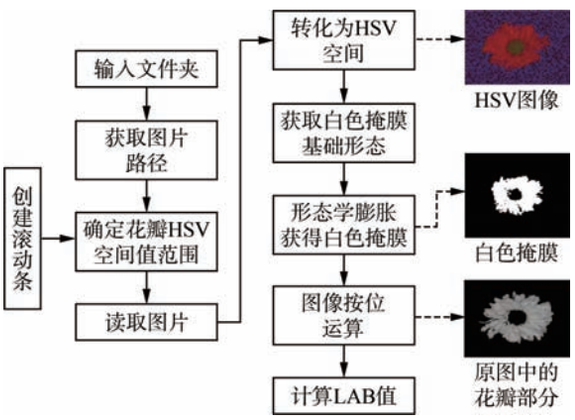


图 2 使用图像处理获取菊花花瓣色泽参数的流程

Figure 2 Flow of obtaining color parameters of chrysanthemum petals using image processing

第 1 步使用 cv2. cvtColor 函数将 RGB 图像转换为 HSV 图像;第 2 步使用 cv2. inRange 函数获取白色掩膜的基础形态;第 3 步用 cv2. getStructuringElement 函数设置一个(3,3)的椭圆形内核;用 cv2. dilate 函数将之前得到的白色掩膜的基础形态用此内核进行膨胀,即得到白色掩膜;第 4 步用 cv2. bitwise_and 函数将原图与白色掩膜进行与运算,即得到原图中的花瓣部分;第 5 步用 cv2. cvtColor 函数将 RGB 图像装换为 Lab 图像,先将亮度值(L^*)、红/绿值(a^*)和黄/蓝值(b^*)设置为 0,用 for 循环将每一像素点处的 L^*、a^*和 b^*累加,并且每循环一次计数一次得到像素点的个数,最后将总的 L^*、a^*、b^*值分别除以像素点的个数,即得到花瓣的平均 L^*、a^*、b^*值[17]。

1.4.3 花蕊颜色特征的提取

花蕊颜色特征的提取流程图如图 3 所示。首先对读入的图像进行预处理,用 cv2. resize 函数来调整其大小以适应屏幕尺寸。然后进行 ROI 手动截取,第 1 步是左键单击的鼠标事件 cv2. EVENT_LBUTTONDOWN,每点击 1 次就记录点的坐标(x,y),用 cv2. circle 画出点击的点,用半径为 10 的绿色圆圈显示,并且将每 1 点都保存在 lsPointChoose 以及 tpPointChoose 顶点集中,对于顶点集中的点,用 cv2. line 函数依次连线。第 2 步右键单击的鼠标事件 cv2. EVENT_RBUTTONDOWN,每点击 1 次,对顶点集中最新的点减去 1 个,所以每点击 1 次右键会清除最新的 1 条连线。最后左键双击的鼠标事件 cv2. EVENT_LBUTTONDBLCLK,双击表示结束选取,L^*、a^*、b^*值的结果将会自动输出。

在图像处理之前,先用 reshape 函数将顶点集中的顶点坐标变成 1 行 2 列的矩阵。处理的第 1 步先用 cv2. polylines 函数将顶点集中的坐标连线绘制多边形。第 2 步使用 cv2. fillpoly 函数将第 2 步中的多边形填充为白色,用 cv2. bitwise_and 函数将原图与白色多边形进行与运算,即求交集,得到了 ROI 的原图。第 3 步用 cv2. cvtColor 函数将 RGB 图像装换为 Lab 图像,先将 L^*、a^*、b^*的值设置为 0,用 for 循环将每 1 像素点处的 L^*、a^*、b^*值累加,并且每循环 1 次计数 1 次得到像素点的个数,最后将总的 L^*、a^*、b^*值分别除以像素点的个数,即得到 ROI 的平均 L^*、a^*、b^*值。

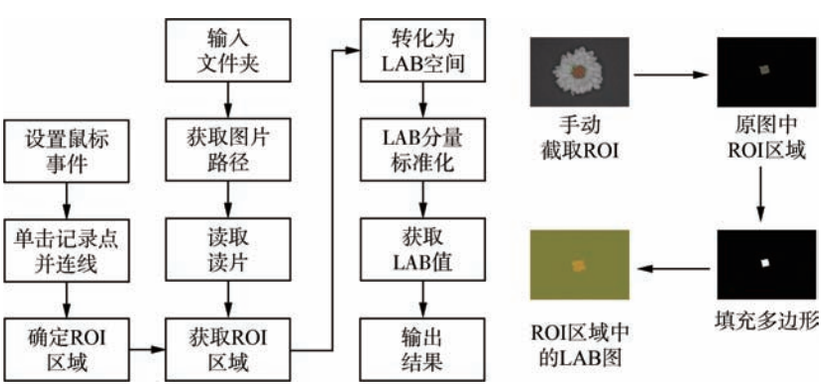


图 3 使用图像处理获取菊花花蕊色泽参数的流程

Figure 3 Flow of obtaining color parameters of chrysanthemum stamens using image processing

1.5 收缩率和色泽变化动力学模型

物料在干燥过程中其收缩率变化的动力学模型采用零阶模型、一阶模型来描述,分别如式(4)和(5)所示[18]。

$$P = P_0 - kt \tag{4}$$

$$P = P_0 \exp(-kt) \tag{5}$$

式中:P_0——干燥初始时的收缩率;

t——干燥时间;

P——干燥 t 时刻的收缩率；

k——收缩率变化速率常数。

物料在干燥过程中其色泽变化的动力学模型采用零阶模型、一阶模型和一阶分数模型来描述，分别如公式(6)～式(8)所示[19]。

$$C = C_0 \pm kt \tag{6}$$

$$C = C_0 \exp(\pm kt) \tag{7}$$

$$\frac{C - C_f}{C_0 - C_f} = \exp(\pm kt) \tag{8}$$

式中：C_0——干燥初色泽值；

C_f——干燥过程中的色泽值；

t——干燥时刻；

C——任意 t 时刻的色泽值；

k——色泽变化速率常数；

－——色泽值降低；

＋——色泽值升高。

研究中通过 Origin 软件计算模型与试验数据拟合的参数，用平方确定系数 R^2 来评估各模型与试验数据拟合程度，选取拟合度较高的模型来描述在干燥过程中菊花色泽的动态变化规律。

2　结果与讨论

2.1　干燥温度对菊花干燥动力学的影响

2.1.1　不同干燥温度下菊花的干燥水分比与干燥时间的关系曲线

不同温度下的干燥过程中菊花水分比 MR 随时间 t 变化的曲线如图 4 所示。

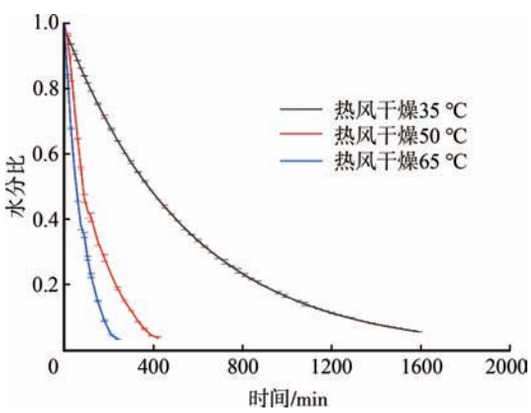


图 4　不同温度下菊花的干燥曲线

Figure 4　Drying curves of chrysanthemums at different drying temperatures

可以看出：(1)不同干燥温度下菊花的干燥水分比随干燥时间均呈指数下降趋势。(2)菊花在干燥初期水分比下降的十分迅速，这可能是由于在干燥初期菊花的含水率较高，干燥介质和花朵表面之间存在较大水蒸气压力梯度[20]，因此水分更容易除去，干燥后期水分比下降变得缓慢。(3)干燥温度为 35 ℃、50 ℃、65 ℃时，菊花干燥到达干燥终点所需的时间分别为 240 min、420 min、1 590 min，说明干燥温度的升高能显著减少干燥所需时间。

2.1.2　不同干燥温度下菊花的干燥速率曲线

不同干燥温度下的菊花的干燥速率曲线如图 5 所示。由此曲线图可以看出：菊花在干燥过程中，干燥速率随干基含水率的减少而降低，且始终处于降速干燥阶段[21]。干燥速率随干燥温度的升高而增大，干燥温度 35 ℃，50 ℃，65 ℃下干燥速率的最大值分别为 0.010 6，0.040 9 和 0.0652 g/(g•min)。说明干燥温度的增加对于提升干燥速率至关重要。

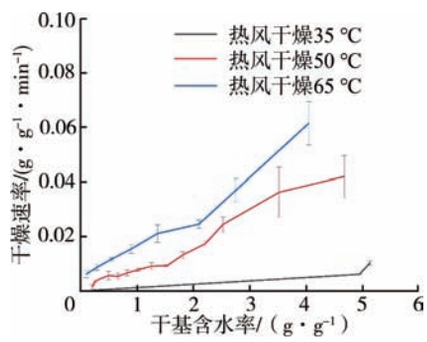


图 5　不同干燥温度下菊花的干燥速率曲线

Figure 5　Drying rate curves of chrysanthemums at different drying temperatures

2.1.3　不同干燥温度下菊花的干燥模型拟合

由表 2 可以看出，用 Lewis 模型与菊花在不同干燥温度下的试验数据拟合，其平方确定系数 R^2、残差平方和 RSS 和均方误差 MSE 分别在 0.992 7～0.998、3.33×10^{-3}～1.30×10^{-2}、1.42×10^{-4}～7.23×10^{-4} 的范围内变化。

用 Page 模型与菊花在不同干燥温度下的试验数据拟合，其平方确定系数 R^2、残差平方和 RSS 和均方误差 MSE 分别在 0.992 5～0.998 2、3.21×10^{-3}～1.27×10^{-2}、1.25×10^{-4}～7.00×10^{-4} 的范围内变化。用 Henderson and Pabis 模型与试验数据拟合，其平方确定系数 R^2、残差平方和 RSS、均方误差 MSE 分别在 0.993 4～0.998 5、3.32×10^{-3}～1.11×10^{-2}、1.09×10^{-4}～6.52×10^{-4} 的范围内变化。

用 Wang and Singh 模型与试验数据拟合，其平方确定系数 R^2、残差平方和 RSS 和均方误差 MSE 分别在 0.972 8～0.994 8、2.07×10^{-2}～4.57×10^{-2}、3.71×10^{-4}～2.69×10^{-3} 的范围内变化。可以发现所选用的数学模型均能较好地描述菊花的脱水过程[22]。对比 4 个模型的拟合结果，发现 Wang and Singh 模型与试验数据的拟合情况更差。

表 2 不同干燥温度的试验数据与数学模型拟合及相关性检验结果

Table 2 Experimental data of different drying temperatures and mathematical model fitting and correlation test results

模型名称	干燥温度/℃	模型参数	*RSS*	*MSE*	R^2
Lewis $MR=\exp(-kt)$	35	$k=0.001\ 3$	8.06×10^{-3}	1.42×10^{-4}	0.998
	50	$k=0.007\ 3$	1.30×10^{-2}	7.23×10^{-4}	0.992 7
	65	$k=0.012\ 7$	3.33×10^{-3}	2.78×10^{-4}	0.997 1
Page $MR=\exp(-kt^n)$	35	$k=0.001\ 5, n=0.972\ 2$	7.00×10^{-3}	1.25×10^{-4}	0.998 2
	50	$k=0.006\ 5, n=1.023\ 4$	1.27×10^{-2}	7.48×10^{-4}	0.992 5
	65	$k=0.011\ 7, n=1.018\ 5$	3.21×10^{-3}	2.92×10^{-4}	0.996 9
Henderson and Pabis $MR=a\exp(-kt)$	35	$k=0.001\ 2, a=0.985\ 6$	6.11×10^{-3}	1.09×10^{-4}	0.998 5
	50	$k=0.007\ 6, a=1.029\ 1$	1.11×10^{-2}	6.52×10^{-4}	0.993 4
	65	$k=0.012\ 7, a=1.002\ 5$	3.32×10^{-3}	3.02×10^{-4}	0.996 8
Wang and Singh $MR=1+at+bt^2$	35	$a=-0.001\ 1, b=3.51\times10^{-7}$	2.08×10^{-2}	3.71×10^{-4}	0.994 8
	50	$a=-0.005\ 6, b=8.25\times10^{-6}$	4.57×10^{-2}	2.69×10^{-3}	0.972 8
	65	$a=-0.009\ 5, b=2.33\times10^{-5}$	2.07×10^{-2}	1.88×10^{-3}	0.980 1

2.2 干燥过程中菊花外观品质变化的分析

图 6 展示了在不同温度下的干燥过程中采集到的菊花图像,可以发现,除 35 ℃外,菊花在干燥初期均发生剧烈的收缩,主要表现为花瓣的卷曲和褶皱[23]。随着干燥的进行,菊花的收缩变化程度逐渐减缓,但收缩一直持续进行直到干燥结束。相比于干燥初期,干燥后期的菊花发生了严重的组织塌陷,这造成了其外观品质不可逆的损害。此外,就菊花色泽变化而言,在干燥初期,菊花的明亮度表现出明显的下降。随着干燥的进行,可以观察到菊花的花瓣开始呈现出褐色,且随着干燥的进行,褐色有加深的趋势。与收缩变化的情况类似,菊花的色泽在干燥中后期的变化会逐渐变缓,直至干燥结束。这些发现证明了机器视觉技术在快速获取菊花品质变化信息的优势,以此来为实现菊花干燥过程的精准控制提供工艺指导和理论基础。

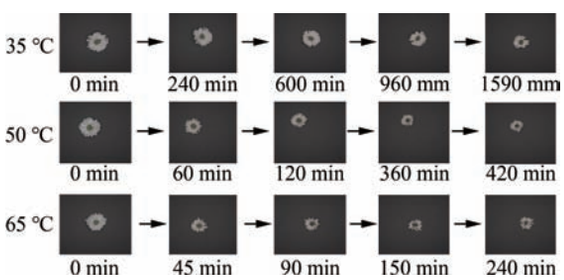


图 6 干燥过程中采集的菊花图像

Figure 6 Chrysanthemum images collected during drying

2.3 干燥温度对菊花收缩率的影响

2.3.1 收缩率的变化曲线

菊花在不同温度下的干燥过程中的收缩率变化曲线如图 7 所示,可以发现菊花在干燥初期收缩剧烈,这是由于花瓣质地柔软且保护组织不发达,无法承受高温所导致。随着干燥的进行,菊花的收缩率的变化逐渐趋于平缓。干燥温度为 35 ℃、50 ℃、65 ℃时,菊花干燥到达干燥终点的收缩率分别为 54.1%、58.5%、52.6%。干燥温度为 65 ℃时的收缩率低于 35 ℃和 50 ℃,这可能是因为干燥时间的显著减少抑制了菊花收缩[24]。而干燥温度为 50 ℃时的收缩率比 35 ℃时高,这可能是因为此时干燥温度对收缩率的影响大于干燥时间对于收缩率的影响。

这些结果表明干燥过程中菊花收缩率的变化是由干燥温度和时间共同决定的[25]。

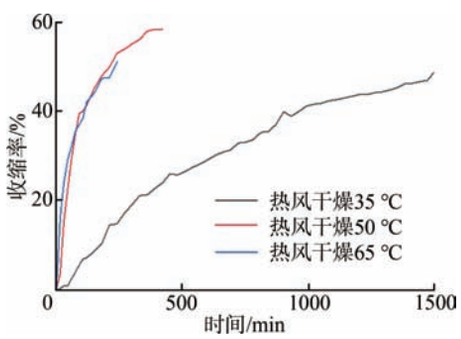


图 7 干燥过程中菊花收缩率的变化曲线

Figure 7 Variation curve of shrinkage rate of chrysanthemums during drying

2.3.2 菊花收缩率的动态变化模型

将零阶和一阶模型与试验数据拟合,计算出各参数值与平方确定系数 R^2,得到的拟合结果如表 3 所示。当干燥温度为 35 ℃时,零阶和一阶模型与试验数据拟合得到的 R^2 分别为 0.937 5 和 0.868 9;当干燥温度为 50 ℃时,零阶和一阶模型与试验数据拟合得到的 R^2 分

别为0.757 1和0.635 4；当干燥温度为65 ℃时，零阶和一阶模型与试验数据拟合得到的R^2分别为0.772 5和0.754 5。

表3　零阶、一阶模型与不同干燥温度下收缩率值的拟合结果

Table 3　Fitting of zero-order and first-order models to shrinkage rate values at different drying temperatures

干燥温度/℃	模型	P_0	k	R^2
35	$P=P_0+kt$	0.07	0.000 3	0.937 5
	$P=P_0\exp(-kt)$	0.10	0.028 9	0.868 9
50	$P=P_0+kt$	0.19	0.001 2	0.757 1
	$P=P_0\exp(-kt)$	0.25	0.002 4	0.635 4
65	$P=P_0+kt$	0.17	0.001 7	0.772 5
	$P=P_0\exp(-kt)$	0.21	0.003 7	0.754 5

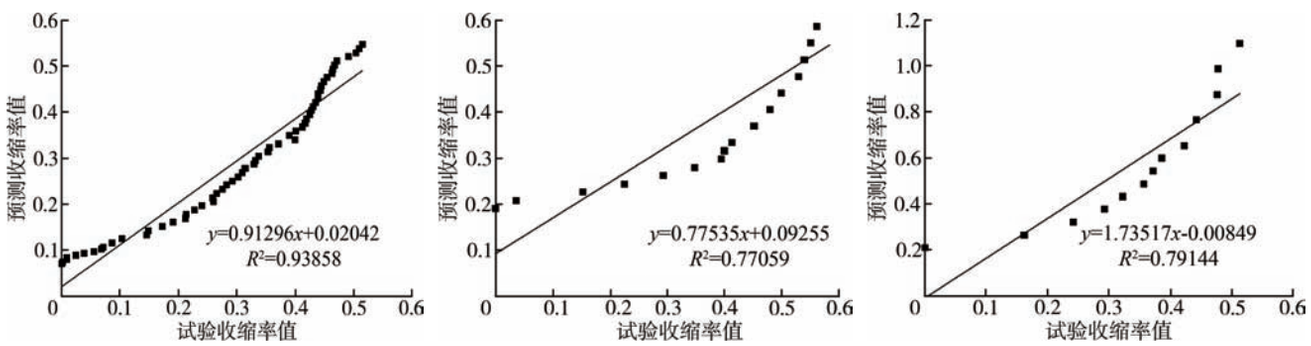
综上，零阶模型与试验数据的拟合情况最好。因此，菊花在干燥温度为35 ℃，50 ℃和65 ℃时，其收缩率值的动态变化可以用零阶模型描述。

$$SR_{35}=0.07+0.000\,3t \tag{9}$$

$$SR_{50}=0.19+0.001\,2t \tag{10}$$

$$SR_{65}=0.17+0.001\,7t \tag{11}$$

从图8可以看出，当干燥温度为35 ℃时，模拟值和试验值具有极高的相关性，说明当干燥温度为35 ℃时，用公式(9)可以准确地预测菊花在红外辅助热风干燥中其收缩率值的动态变化规律；当干燥温度为50 ℃和65 ℃，R^2表现出下降的趋势，但预测值基本在倾斜角为45°的直线两侧分布，这说明当干燥温度为50 ℃和65 ℃时，式(10)～式(11)可以预测菊花在红外辅助热风干燥中其收缩率值的动态变化规律[26]。



(a) 干燥温度为35 ℃　　(b) 干燥温度为50 ℃　　(c) 干燥温度为65 ℃

图8　收缩率试验值与预测值拟合

Figure 8　Fit of experimental and predicted values of shrinkage rate

2.4　干燥温度对花瓣色泽的影响

2.4.1　亮度值(L^*)的变化曲线

不同干燥温度下花瓣的L^*值的变化曲线如图9所示。

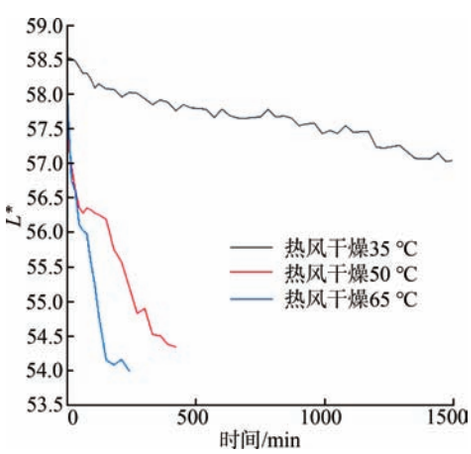


图9　花瓣L^*值在干燥过程中的变化曲线

Figure 9　Change curves of L^* values of petals during drying

可以看出：(1)在不同干燥温度下，L^*值都随着干燥时间的增加而降低，说明在干燥过程中花瓣的明亮度不断降低。(2)在干燥温度为50 ℃和65 ℃时，花瓣的明亮度在干燥过程中下降比较迅速。而干燥温度为35 ℃时，花瓣的明亮度变化相比高温时较缓慢。(3)干燥温度为35 ℃、50 ℃和65 ℃时，花瓣在干燥开始时的L^*值分别为58、57和58左右，干燥结束时花瓣的L^*值分别为56、54和54左右，说明低温干燥有利于改善花瓣的明亮度[27]。

2.4.2　L^*值的动态变化模型

将零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合，得到的拟合情况如表4所示。当干燥温度为35℃时，零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的R^2分别为0.91、0.909 9和0.908 3，因此零阶模型与试验数据的拟合情况最好。所以当干燥温度为35℃时，L^*值的动态变化规律可以用零阶模型表示。

$$L^*_{35}=58.31-0.000\,8t \tag{12}$$

式中：L^*_{35}——干燥温度为35℃时，菊花花瓣的L^*值；

t——干燥时间，min。

当干燥温度为50 ℃时，零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的R^2分别为0.956 2、0.957和

0.957 7;当干燥温度为65 ℃时,零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的R^2分别为0.880 4、0.885 7和0.953 6。对于这两个温度下的干燥试验数据,一阶分数模型与试验数据的拟合情况最好。

表4 零阶、一阶和一阶分数模型与不同干燥温度下L^*值的拟合结果

Table 4 Fitting of zore-order, first-order and first-order fraction models to L^* values at different drying temperatures

干燥温度/℃	模型	C_0	C_f	k	R^2
35	$C=C_o+kt$	58.31	—	−0.000 8	0.91
	$C=C_o\exp(-kt)$	58.31	—	0.000 01	0.909 9
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	58.31	168.31	0.000 003 6	0.908 3
50	$C=C_o+kt$	56.94	—	−0.006 8	0.956 2
	$C=C_o\exp(-kt)$	56.95	—	0.000 1	0.957
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	54.41	49.62	0.001 1	0.957 7
65	$C=C_o+kt$	57.05	—	−0.015 3	0.880 4
	$C=C_o\exp(-kt)$	57.07	—	0.000 2	0.885 7
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	53.77	53.27	0.008 2	0.953 6

所以干燥温度为50 ℃和65 ℃时,花瓣L^*值的动态变化规律可以分别用一阶分数模型表示。

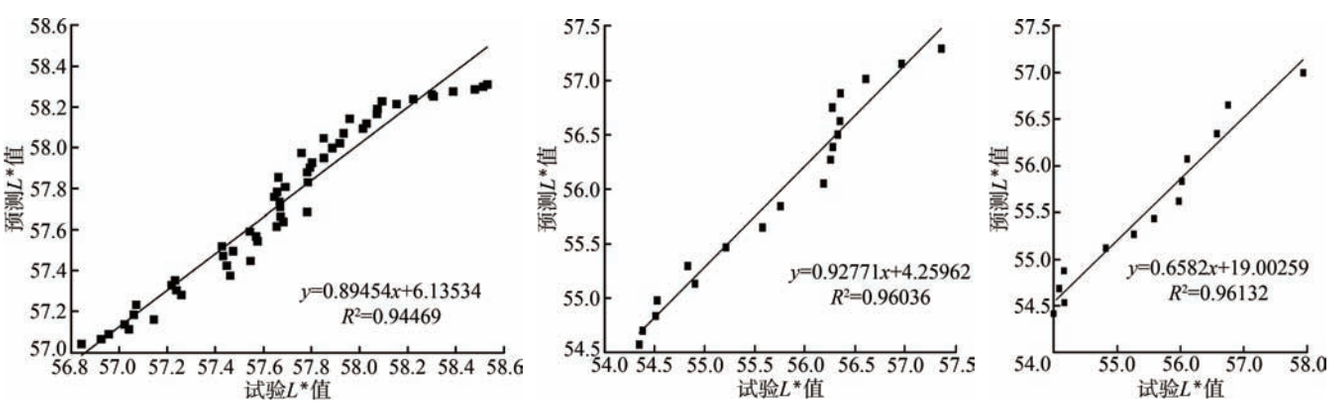
$$\frac{L^*_{50}-49.62}{54.41-49.62}=\exp(-0.001\,1t) \tag{13}$$

$$\frac{L^*_{65}-53.27}{53.77-53.27}=\exp(-0.008\,2t) \tag{14}$$

式中:L^*_{50}——干燥温度为50 ℃时,菊花花瓣的L^*值;

L^*_{65}——干燥温度为65 ℃时,菊花花瓣的L^*值。

从图10可以看出,在3种干燥温度下,预测值和试验值均表现出较高的相关性,说明当干燥温度为35 ℃,50 ℃和65 ℃时,选用的动力学模型均可以准确地预测菊花花瓣在红外辅助热风干燥中其L^*值的变化规律。



(a) 干燥温度为35 ℃ (b) 干燥温度为50 ℃ (c) 干燥温度为65 ℃

图10 L^*试验值与预测值拟合

Figure 10 Fit of experimental and predicted values of L^*

2.4.3 红/绿值(a^*)的变化曲线

在不同温度下的干燥过程中,花瓣的a^*值的变化曲线如图11所示,可以看出:(1)在不同干燥温度下,a^*值都随着干燥时间的增加而升高,说明在干燥过程中花瓣的颜色越来越红[28]。(2)在干燥温度为50 ℃和65 ℃时,a^*值变化程度很大。而干燥温度为35 ℃时,a^*值的变化较缓慢。(3)干燥温度为35 ℃、50 ℃和65 ℃时,在干燥开始时的a^*值分别为−0.16、−0.15和0.028左右,到干燥结束时花瓣的a^*值分别为−0.02、0.12和0.33左右,说明a^*的变化程度随温度的升高而增大,降低干燥温度有利于减少花瓣的红色劣变。

2.4.4 a^*值的动态变化模型

零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据的拟合情况如表5所示。当干燥温度为35 ℃时,零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的R^2分别为0.716 9、0.712 4和0.711 8;当干燥温度为50 ℃时,零阶、一阶

和一阶分数模型与试验数据拟合得到的R^2分别为0.957 8、−0.531 7和0.952 7，当干燥温度为65 ℃时，零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的R^2分别为0.910 1、0.803 9和0.901。在这2个温度下，零阶模型与试验数据的拟合情况最好。

所以花瓣在不同的干燥温度下，a^*值的动态变化规律可以分别用零阶模型如式(15)～式(17)所示。

$$a^*_{35}=0.000\,1t-0.14 \tag{15}$$

$$a^*_{50}=0.000\,6t-0.17 \tag{16}$$

$$a^*_{65}=0.000\,6t-0.01 \tag{17}$$

式中：a^*_{35}——干燥温度为35 ℃时，花瓣的a^*值

a^*_{50}——干燥温度为50 ℃时，花瓣的a^*值；

a^*_{65}——干燥温度为65 ℃时，花瓣的a^*值；

t——干燥时间，min。

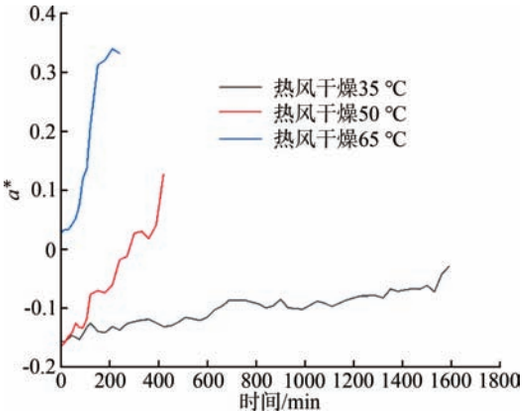


图11　花瓣a^*值在干燥过程中的变化曲线

Figure 11　Change curves of a^* values of petals during drying

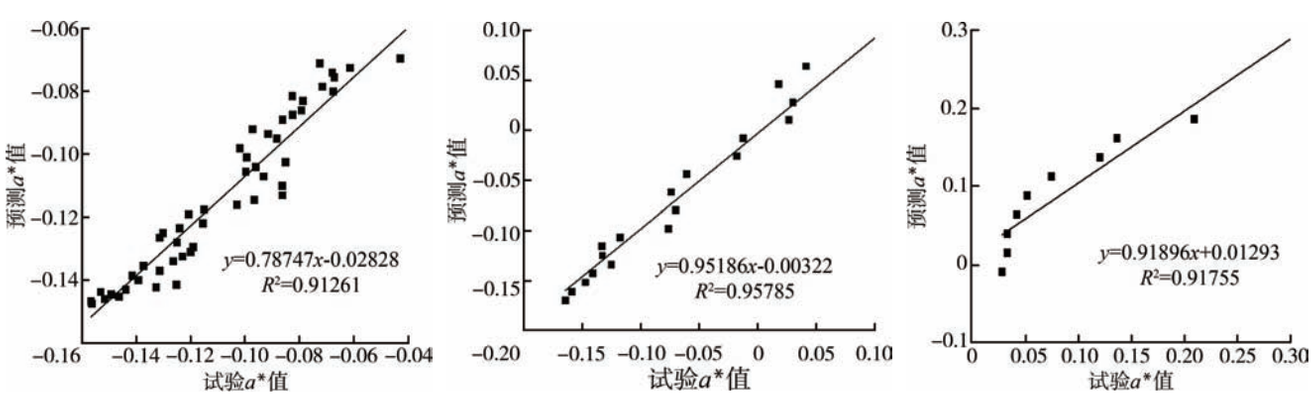
表5　零阶、一阶和一阶分数模型与不同干燥温度下a^*值的拟合结果

Table 5　Fitting of zero-order, first-order and first-order fraction models to a^* values at different drying temperatures

干燥温度/℃	模型	C_0	C_f	k	R^2
35	$C=C_0+kt$	−0.14	—	0.000 1	0.716 9
	$C=C_0\exp(-kt)$	−0.14	—	0.000 5	0.712 4
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	−0.14	0.89	0.000 1	0.711 8
50	$C=C_0+kt$	−0.17	—	0.000 6	0.957 8
	$C=C_0\exp(-kt)$	0.000 000 32	—	−0.030 6	0.531 7
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	−0.16	−0.65	−0.001	0.952 7
65	$C=C_0+kt$	−0.01	—	0.001 6	0.910 1
	$C=C_0\exp(-kt)$	0.06	—	−0.007 9	0.803 9
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	−0.01	−61.24	−0.000 03	0.901

研究通过采用动力学模型分别模拟菊花花瓣在干燥温度为35 ℃，50 ℃和65 ℃时其a^*试验值的变化规律。

从图12可以看出，除了在干燥开始和结束时，预测值和试验值存在一定的误差，在干燥过程中二者非常接近。这说明，所选用的动力学模型可以较为准确地预测菊花花瓣在红外辅助热风干燥过程中a^*值的变化规律。



(a) 干燥温度为35 ℃　　(b) 干燥温度为50 ℃　　(c) 干燥温度为65 ℃

图12　a^*试验值与预测值拟合

Figure 12　Fit of experimental and predicted values of a^*

2.4.5 黄/蓝值(b^*)的变化曲线

在干燥过程中,花瓣b^*值的变化曲线如图13所示,从中可以看出:(1)在不同干燥温度下,b^*值都随着干燥时间的增加而升高,说明在干燥过程中花瓣的黄色加深。(2)在干燥温度为50 ℃和65 ℃时,在干燥过程的前期,b^*上升十分迅速,后期的变化比较缓慢。而干燥温度为35 ℃时,b^*值的变化和相比高温时较缓慢。(3)干燥温度为35 ℃、50 ℃和65 ℃时,花瓣在干燥开始时的b^*值为2.57、2.49和2.9左右,到干燥结束时b^*值分别为4.16、4.55和5.59左右,说明b^*值随温度的升高而降低,降低干燥温度有利于减少花瓣的黄色劣变[29]。

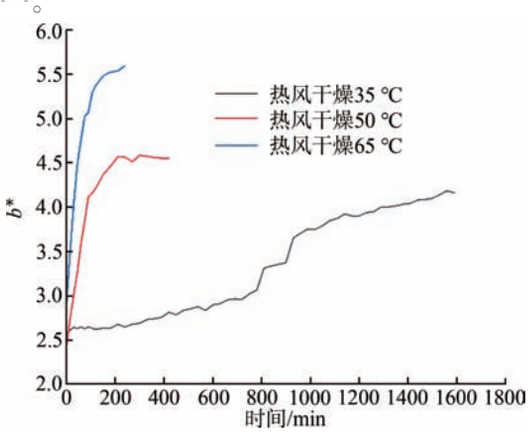


图13 花瓣b^*值在干燥过程中的变化曲线

Figure 13 Change curves of b^* values of petals during drying

2.4.6 b^*值的动态变化模型

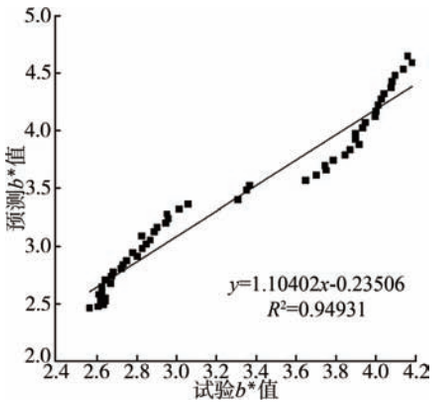
零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据的拟合情况如表6所示。

表6 零阶、一阶和一阶分数模型与不同干燥温度下b^*值的拟合结果

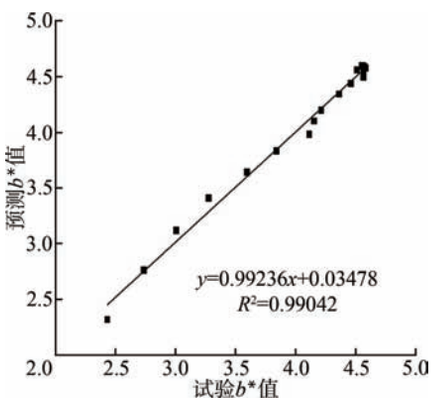
Table 6 Fitting of zero-order, first-order and first-order fraction models to b^* values at different drying temperatures

干燥温度/℃	模型	C_0	C_f	k	R^2
35	$C=C_0+kt$	2.40	—	0.001 2	0.936 5
	$C=C_0\exp(-kt)$	2.46	—	−0.000 4	0.943 5
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	2.47	0.07	−0.000 4	0.942 5
50	$C=C_0+kt$	3.30	—	0.004 2	0.632 9
	$C=C_0\exp(-kt)$	3.39	—	−0.000 9	0.585 6
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	2.32	4.61	0.014 4	0.989 2
65	$C=C_0+kt$	3.84	—	0.009 7	0.699
	$C=C_0\exp(-kt)$	3.98	—	−0.001 8	0.640 6
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	2.86	5.62	0.019 4	0.997 4

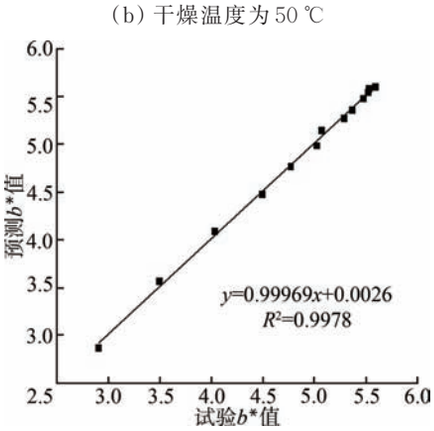
图14展示了动力学模型预测值与试验测得的b^*值的拟合结果。



(a) 干燥温度为35 ℃



(b) 干燥温度为50 ℃



(c) 干燥温度为65 ℃

图14 b^*试验值与预测值拟合

Figure 14 Fit of experimental and predicted values of b^*

当干燥温度为35 ℃时,零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的R^2分别为0.936 5、0.943 5和0.942 5,一阶模型拟合情况最好。所以干燥温度为35 ℃时,b^*值的动态变化规律可以用一阶模型表示。

$$b^*_{35}=2.46\exp(0.000\,4t) \tag{18}$$

式中:b^*_{35}——干燥温度为35 ℃时,花瓣的b^*值;

t——干燥时间,min。

当干燥温度为50 ℃时,零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的R^2分别为0.632 9、0.585 6和

0.989 2；当干燥温度为 65 ℃时，零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的 R^2 分别为 0.699、0.640 6 和 0.997 4。

在这两个温度下，一阶分数模型与试验数据的拟合情况最好。所以在干燥温度为 50 ℃和 65 ℃时，b^* 值的动态变化规律可以分别用一阶分数模型表示。

$$\frac{b^*_{50}-4.61}{2.32-4.61}=\exp(-0.014\,4t) \tag{19}$$

$$\frac{b^*_{65}-5.62}{2.82-5.62}=\exp(-0.019\,4t) \tag{20}$$

式中：b^*_{50}——干燥温度为 50 ℃时，花瓣的 b^* 值；

b^*_{65}——干燥温度为 65 ℃时，花瓣的 b^* 值；

t——干燥时间，min。

线性回归表现出极高的相关性，尤其是 50 ℃和 65 ℃条件下选用的动力学模型（$R^2>0.99$）。在整个干燥过程中，预测值都对称分布在倾斜角为 45°的直线两侧，这充分证明了动力学模型在模拟花瓣 b^* 值变化规律时的准确性。

2.5　干燥温度对花蕊色泽的影响

2.5.1　亮度值（L^*）的变化曲线

花蕊在不同干燥温度下的 L^* 值的变化曲线如图 15 所示。

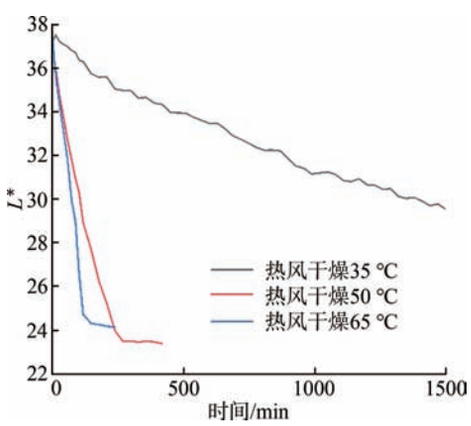


图 15　花蕊 L^* 值在干燥过程中的变化曲线

Figure 15　Change curves of L^* values of stamens during drying

由此曲线图可以看出：

1）在不同干燥温度下，花蕊的 L^* 值都随着干燥时间的增加而降低，说明在干燥过程中花蕊的亮度不断降低[30]。

2）在干燥温度分别为 50 ℃和 65 ℃时，L^* 值在干燥过程的前期下降十分迅速，后期的变化则比较缓慢。而干燥温度为 35 ℃时，L^* 值的变化相比高温时较缓慢。

3）干燥温度分别为 35 ℃、50 ℃和 65 ℃时，花蕊在干燥开始时的 L^* 值分别为 37、36 和 37 左右，到干燥结束时花蕊的 L^* 值分别为 29、23 和 24 左右，说明降低干燥温度有利于提高花蕊的明亮度。

2.5.2　L^* 值的动态变化模型

零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合拟合结果如表 7 所示。

表 7　零阶、一阶和一阶分数模型与不同干燥温度下 L^* 值的拟合结果

Table 7　Fitting of zero-order, first-order and first-order fractional models to L^* values at different drying temperatures

干燥温度/℃	模型	C_0	C_f	k	R^2
35	$C=C_0+kt$	36.63	—	0.005	0.974 7
	$C=C_0\exp(-kt)$	36.78	—	0.000 2	0.982 4
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	37.26	25.46	0.000 7	0.993 9
50	$C=C_0+kt$	34.26	—	0.033	0.871 9
	$C=C_0\exp(-kt)$	35.01	—	0.001 3	0.913 2
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	37.19	21.40	0.006 2	0.983
65	$C=C_0+kt$	35.29	—	0.059 9	0.834 1
	$C=C_0\exp(-kt)$	36.18	—	0.002 3	0.884 3
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	38.34	21.72	0.010 2	0.958 9

当干燥温度为 35 ℃时，零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的 R^2 分别为 0.974 7、0.982 4 和 0.993 9；当干燥温度为 50 ℃时，零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的 R^2 分别为 0.871 9、0.913 2 和 0.983；当干燥温度为 65 ℃时，零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的 R^2 分别为 0.834 1、0.884 3 和 0.958 9。综上，可以发现一阶分数模型与试验数据的拟合程度最高。

因此，菊花在干燥温度为 35 ℃、50 ℃和 65 ℃时，花蕊 L^* 值的动态变化规律可以分别用一阶分数模型表示。

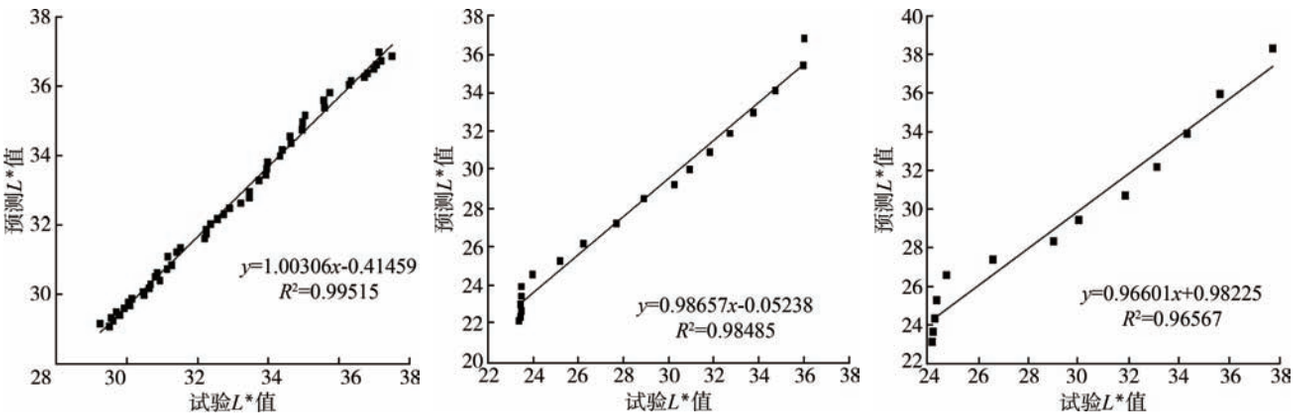
$$\frac{L^*_{35}-25.46}{37.26-25.46}=\exp(-0.000\,7t) \tag{21}$$

$$\frac{L^*_{50}-21.40}{37.19-21.40}=\exp(-0.006\,2t) \tag{22}$$

$$\frac{L^*_{65}-21.72}{38.34-21.72}=\exp(-0.010\,2t) \tag{23}$$

动力学模型预测值与试验测得的 L^* 值的线性回归结果如图 16 所示。

可以发现一阶分数模型的预测值与试验所测值具有极高的相关性，这表明在不同干燥温度下，一阶分数模型能够以较为精准地预测花蕊亮度值的变化规律。



(a) 干燥温度为 35 ℃ (b) 干燥温度为 50 ℃ (c) 干燥温度为 65 ℃

图 16 L^*试验值与预测值拟合

Figure 16 Fit of experimental and predicted values of L^*

2.5.3 红/绿值(a^*)的变化曲线

花蕊在不同干燥温度下的a^*值的变化曲线如图 17 所示。可以看出:(1)在不同干燥温度下,花蕊的a^*值都随干燥时间的增加而升高,说明干燥过程中花蕊颜色越来越红。(2)干燥温度为 50 ℃和 65 ℃时,在干燥过程前期,花蕊a^*值升高十分迅速,后期变化则较缓慢。而干燥温度为 35 ℃时,花蕊a^*值和高温时相比变化较缓慢。(3)干燥温度为 35 ℃、50 ℃和 65 ℃时,菊花在干燥开始时a^*值基本相同,干燥结束时花蕊a^*值分别为−2.3、0.93 和 0.68 左右。干燥温度为 35 ℃时a^*值变化最小,干燥温度为 65 ℃时a^*值变化比 50 ℃时小,这可能是因为干燥温度提高了,但是 65 ℃所需的干燥时间比 50 ℃缩短了 42.8%,这抑制了花蕊的色泽劣变。

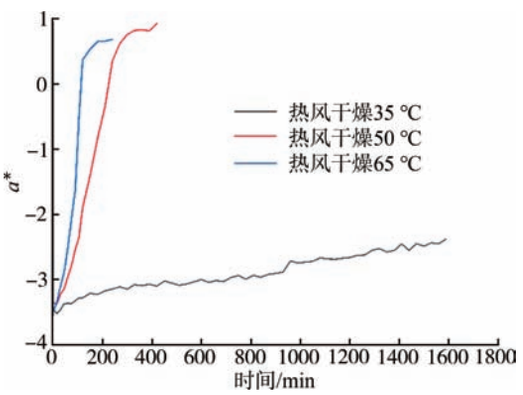


图 17 花蕊a^*值在干燥过程中的变化曲线

Figure 17 Change curves of a^* values of stamens during drying

2.5.4 a^*值的动态变化模型

表 8 展示了动力学模型与试验数据的拟合情况。

表 8 零阶、一阶和一阶分数模型与不同干燥温度下a^*值的拟合结果

Table 8 Fitting of 0th-order, first-order and first-order fractional models to a^* values at different drying temperatures

干燥温度/℃	模型	C_0	C_f	k	R^2
35	$C=C_0+kt$	−3.39	—	0.000 7	0.971
	$C=C_0\exp(-kt)$	−3.42	—	0.000 2	0.967 6
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	−3.39	149.03	0.000 004 4	0.970 4
50	$C=C_0+kt$	−3.43	—	0.012 4	0.935 6
	$C=C_0\exp(-kt)$	−4.23	—	0.009	0.808 7
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	5.03	3.61	0.002 8	0.961 9
65	$C=C_0+kt$	−3.44	—	0.021 3	0.866 5
	$C=C_0\exp(-kt)$	−4.26	—	0.014 9	0.783 1
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	4.74	2.87	0.005 8	0.906 4

当干燥温度为 35 ℃时,零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的R^2分别为 0.971、0.967 6 和 0.970 4,零阶模型与试验数据的拟合情况最好。所以在干燥温度为 35 ℃时,a^*值的动态变化规律可以用零阶模型表示。

$$a^*_{35}=-3.39+0.000\,7t \tag{24}$$

式中：a^*_{35}——干燥温度为 35 ℃时，花蕊的 a^* 值；

t——干燥时间，min。

当干燥温度为 50 ℃时，零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的 R^2 分别为 0.935 6、0.808 7 和 0.961 9；当干燥温度为 65 ℃时，零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的 R^2 分别为 0.866 5、0.783 1 和 0.906 4。此时，一阶分数模型与试验数据的拟合情况最好。所以干燥温度为 50 ℃和 65 ℃时，a^* 值的动态变化规律可以分别用一阶分数模型表示。

$$\frac{a^*_{50}-3.61}{5.03-3.61}=\exp(-0.002\,8t) \tag{25}$$

$$\frac{a^*_{65}-2.87}{4.74-2.87}=\exp(-0.005\,8t) \tag{26}$$

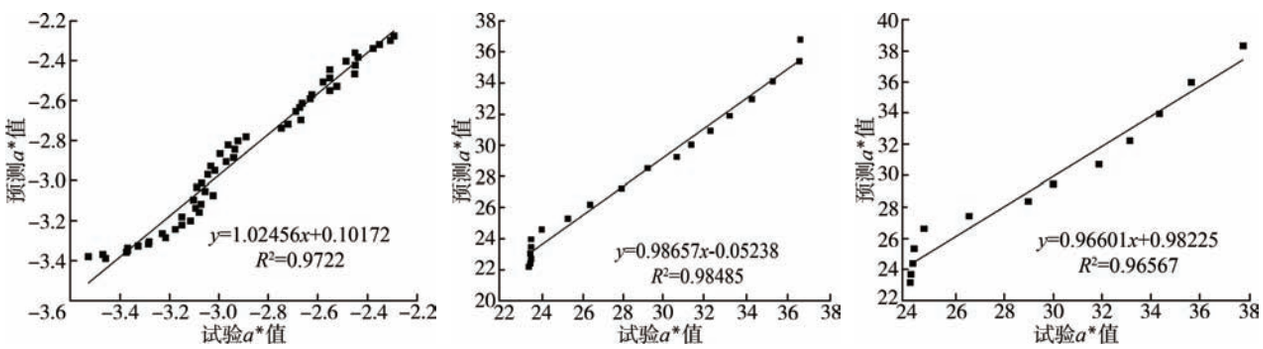
式中：a^*_{50}——干燥温度为 50 ℃时，花蕊的 a^* 值；

a^*_{65}——干燥温度为 65 ℃时，花蕊的 a^* 值；

t——干燥时间，min。

将动力学模型预测值与试验值进行线性回归，如图 18 所示。

可以发现在不同干燥温度下，动力学模型的预测值都沿倾斜角为 45°的直线分布，并且与试验值具有极高的相关性。这说明选用的动力学模型在预测干燥过程中花蕊 a^* 的变化时具有较高的准确性。



(a) 干燥温度为 35 ℃　　(b) 干燥温度为 50 ℃　　(c) 干燥温度为 65 ℃

图 18　a^* 试验值与预测值拟合

Figure 18　Fit of experimental and predicted values of a^*

2.5.5　黄/蓝值(b^*)的变化曲线

花蕊在不同温度下的干燥过程中，其 b^* 值的变化曲线如图 19 所示。

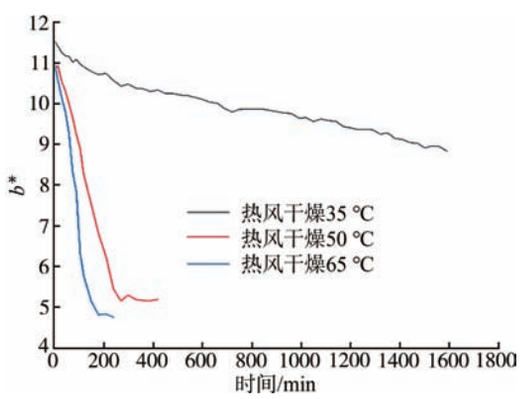


图 19　花蕊 b^* 值在干燥过程中的变化曲线

Figure 19　Change curves of b^* values of stamens during drying

可以看出：(1)在各干燥温度下，花蕊的 b^* 值都随干燥时间的增加而降低，说明在干燥的过程中花蕊的褐色逐渐加深。(2)在干燥温度为 50 ℃和 65 ℃时，花蕊的 b^* 值在干燥过程前期下降十分迅速。而干燥温度为 35 ℃时，花蕊的 b^* 值和高温时相比下降较缓慢。(3)干燥温度为 35 ℃、50 ℃和 65 ℃时，菊花在干燥开始时色泽 b^* 值基本为 11 左右，干燥结束时花蕊的 b^* 值分别为 8.82、5.18 和 4.75 左右，说明花蕊的 b^* 值随温度的升高而降低，降低干燥温度有利于改善花蕊色泽的劣变。

2.5.6　b^* 值的动态变化模型

将零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合，计算出各参数值与平方确定系数，如表 9 所示。

表 9　零阶、一阶和一阶分数模型与不同干燥温度下 b^* 值的拟合结果

Table 9　Fitting of zero-order, first-order and first-order fractional models to b^* values at different drying temperatures

干燥温度/℃	模型	C_0	C_f	k	R^2
35	$C=C_0+kt$	11.03	—	−0.001 4	0.951 7
	$C=C_0\exp(-kt)$	11.07	—	0.000 1	0.958 3
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	8.38	8.09	0.000 8	0.970 5
50	$C=C_0+kt$	10.55	—	−0.016 1	0.897 7
	$C=C_0\exp(-kt)$	11.15	—	0.002 4	0.951 5
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	4.19	3.47	0.004 6	0.966 2
65	$C=C_0+kt$	10.66	—	0.030 3	0.889 3
	$C=C_0\exp(-kt)$	11.37	—	0.004 5	0.942 9
	$\frac{C-C_f}{C_0-C_f}=\exp(-kt)$	3.87	2.21	0.006 5	0.943 5

当干燥温度为35 ℃时,零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的R^2分别为0.951 7、0.958 3和0.970 5;当干燥温度为50 ℃时,零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的R^2分别为0.897 7、0.951 5和0.966 2;当干燥温度为65 ℃时,零阶、一阶和一阶分数模型与试验数据拟合得到的R^2分别为0.889 3、0.942 9和0.943 5。

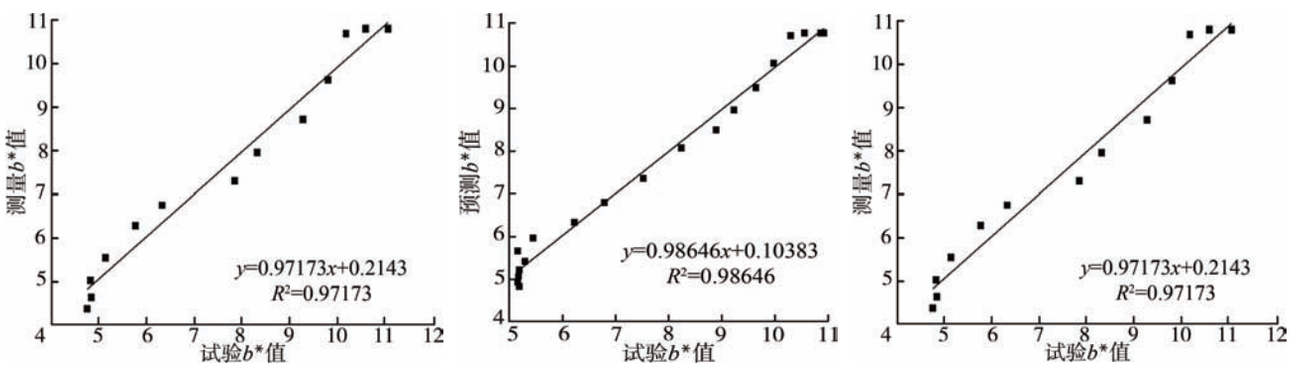
在不同干燥温度下,一阶分数模型与试验数据的拟合情况最好。所以菊花在干燥温度为35 ℃、50 ℃和65 ℃时,花蕊b^*值的动态变化规律可以分别用一阶分数模型表示。

$$\frac{b^*_{35}-8.09}{8.38-8.09}=\exp(-0.000\,8t) \tag{27}$$

$$\frac{b^*_{50}-3.47}{4.19-3.47}=\exp(-0.004\,6t) \tag{28}$$

$$\frac{b^*_{65}-2.21}{3.87-2.21}=\exp(-0.006\,5t) \tag{29}$$

从图20可以看出,当干燥温度为35 ℃,50 ℃和65 ℃时,模拟值和试验值具有极高的相关性,说明在不同的干燥温度下,一阶分数模型可以准确地预测花蕊在红外辅助热风干燥中其b^*值的动态变化规律。



(a) 干燥温度为35 ℃ (b) 干燥温度为50 ℃ (c) 干燥温度为65 ℃

图20 b^*试验值与预测值拟合

Figure 20 Fit of experimental and predicted values of b^*

3 结论

研究将机器视觉技术应用于基于红外辅助的热风干燥技术,以雏菊为试验物料,探究了不同干燥温度(35 ℃,50 ℃和65 ℃)对其干燥动力学,收缩率和色泽的影响,得到的主要结论如下。

1) 干燥温度对菊花干燥时间的影响显著;干燥温度由35 ℃增加至65 ℃,菊花所需干燥时间由1 590 min减少至240 min;菊花在干燥过程中始终处于降速阶段,干燥速率随干燥温度的升高而增大,且干燥温度65 ℃下获得了最高干燥速率,为0.065 2 g/(g·min)。

2) 4种数学模型均能较好地描述菊花的干燥过程,根据拟合程度,建议选择Henderson and Pabis模型、Page模型、Lewis模型去描述菊花在不同干燥温度下的脱水过程($0.992\,5<R^2<0.998\,5$)。

3) 菊花的收缩程度受干燥温和时间的共同影响。因此,更短的干燥时间和更低的干燥温度有利于降低其收缩率。此外,零阶模型的预测值与试验值的相关性更高($0.757\,1<R^2<0.937\,5$)。

4)干燥温度的升高导致菊花明亮度的降低和红棕色的加深,因此采用较低的温度能够抑制菊花在干燥过程中的颜色劣变。通过对动力学模型预测值和试验值拟合发现,一阶分数模型能更好地预测菊花在不同干燥温度下色泽的变化情况。

参 考 文 献

[1] 孙东宇, 郑志安, 李博睿, 等. 杭白菊干燥技术及干燥品质研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 295−300.
SUN Dongyu, ZHENG Zhi'an, LI Borui, et al. Research progress on drying technology and drying quality of *Chrysanthemum morifolium* [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(15): 295−300.

[2] SUN Dongyu, WU Min, XU Huihuang, et al. The bioactive properties and quality attributes of *Chrysanthemum morifolium* Ramat as affected by pulsed vacuum drying [J]. Drying Technology, 2021, 40: 3021−3035.

[3] TIAN Yuting, ZHAO Yingting, HUANG Jijun, et al. Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms [J]. Food Chemistry, 2016, 197: 714−722.

[4] 李学铃, 张莹莹, 陈晓雯, 等. 切花非洲菊不同外植体初代培养的比较研究[J]. 现代园艺, 2022, 45(10): 7−9.

[5] 陈霞, 钟建民, 曹玉婵, 等. 黄色蝴蝶兰平面干燥花压制干燥方法研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(22): 180−183.
CHEN Xia, ZHONG Jianmin, CAO Yuchan, et al. Study on pressing drying method of Yellow *Phalaenopsis* Taida

pressed-dried flowers [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2021, 49(22): 180－183.

[6] ONWUDE D I, HASHIM N, ABDAN K, et al. The potential of computer vision, optical backscattering parameters and artificial neural network modelling in monitoring the shrinkage of sweet potato (*Ipomoea batatas L.*) during drying [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(4): 1310－1324.

[7] LI Xingyi, LIU Yanhong, GAO Zhenjiang, et al. Computer vision online measurement of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) surface wrinkling and shrinkage during hot air drying with humidity control [J]. Journal of Food Engineering, 2021, 292: 110253.

[8] 汪京京，张武，刘连忠，等. 农作物病虫害图像识别技术的研究综述[J]. 计算机工程与科学，2014，36(7)：1363－1370.
WANG Jingjing, ZHANG Wu, LIU Lianzhong, et al. Summary of crop diseases and pests image recognition technology [J]. Computer Engineering and Science, 2014, 36(7): 1363－1370.

[9] 贾少鹏，高红菊，杭潇. 基于深度学习的农作物病虫害图像识别技术研究进展[J]. 农业机械学报，2019，50(S1)：313－317.
JIA Shaopeng, GAO Hongju, HANG Xiao. Research progress on image recognition technology of crop pests and diseases based on deep learning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(S1): 313－317.

[10] 高振，卢彩云，李洪文，等. 基于计算机视觉的种子分布信息检测关键技术研究现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2023，4(3)：50－60.
GAO Zhen, LU Caiyun, LI Hongwen, et al. Research progress and the prospect of crucial technology of seed spacing information detection based on computer vision [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(3): 50－60.

[11] 白振伟，严富威，袁培海，等. 基于嵌入式机器视觉智能果实分拣机器人设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2023，4(3)：61－70.
BAI Zhenwei, YAN Fuwei, YUAN Peihai, et al. Design and experiment of fruit sorting robot based on embedded machine vision [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(3): 61－70.

[12] XIAO A J, DING C J. Effect of electrohydrodynamic (EHD) on drying kinetics and quality characteristics of shiitake mushroom [J]. Foods, 2022, 11(9): 1303.

[13] WEN Y X, CHEN L Y, LI B S, et al. Effect of infrared radiation-hot air (IR-HA) drying on kinetics and quality changes of star anise (*Illicium verum*) [J]. Drying Technology, 2020, 39(1): 90－103.

[14] 李星仪，张悦，谢永康，等. 热风干燥过程相对湿度对香菇品质的影响[J]. 农业工程学报，2020，36(24)：281－291.
LI Xingyi, ZHANG Yue, XIE Yongkang, et al. Effects of relative humidity on the exterior quality of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) during hot air drying [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(24): 281－291.

[15] 宫元娟，于永伟，秦军伟，等. 以图像计算收缩率优化香菇真空缓苏干燥工艺[J]. 农业工程学报，2010，26(12)：352－357.
GONG Yuanjuan, YU Yongwei, QIN Junwei, et al. Optimization of shiitake mushroom vacuum tempering drying process based on imaginary calculation of its shrinking rate [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 352－357.

[16] 李晓，袁帅，姚二民，等. 基于片烟图像处理面积及 feret 直径的分形分析[J]. 烟草科技，2020，53(2)：80－87.
LI Xiao, YUAN Shuai, YAO Ermin, et al. Fractal analysis of tobacco strip area and feret′s diameter based on image processing [J]. Tobacco Science & Technology, 2020, 53(2): 80－87.

[17] 郑小南，杨凡，李富忠. 图像处理在农业应用的研究进展[J]. 物联网技术，2020，10(9)：80－82.

[18] 闫圣坤，李忠新，王庆惠，等. 热风干燥过程中小白杏色泽的变化及其动力学研究[J]. 食品与机械，2017，33(2)：39－45.
YAN Shengkun, LI Zhongxin, WANG Qinghui, et al. Kinetics of color change of white apricot in XinJiang during hot-air drying [J]. Food and Machinery, 2017, 33(2): 39－45.

[19] 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.
ZHANG Qianyu, SUN Jie, ZHANG Jiong. Color change kinetics model of apple slices during hot-air thin drying [J]. Science and Technology of Food industry, 2015, 36(24): 137－141.

[20] LI B R, LIN J Y, ZHENG Z, et al. Effects of different drying methods on drying kinetics and physicochemical properties of *Chrysanthemum morifolium* Ramat [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(3): 187－193.

[21] WANG Y, LI X, CHEN X T, et al. Effects of hot air and microwave-assisted drying on drying kinetics, physicochemical properties, and energy consumption of chrysanthemum [J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2018, 129: 84－94.

[22] AZEEZ L, ADEBISI S A, OYEDEJI A O, et al. Bioactive compounds′ contents, drying kinetics and

mathematical modelling of tomato slices influenced by drying temperatures and time [J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2019, 18(2): 120－126.

[23] XU H H, WU M, WANG Y, et al. Effect of combined infrared and hot air drying strategies on the quality of Chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) cakes: Drying behavior, aroma profiles and phenolic compounds [J]. Foods, 2022, 11(15): 2240.

[24] ARAL S, BEŞE A V. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity [J]. Food Chemistry, 2016, 210: 577－584.

[25] WU X F, ZHANG M, LI Z. Dehydration modeling of Cordyceps militaris in mid-infrared-assisted convection drying system: Using low-field nuclear magnetic resonance with the aid of ELM and PLSR [J]. Drying Technology, 2019.

[26] MARQUES B C, PLANA-FATTORI A, FLICK D, et al. Convective drying of yacón (*Smallanthus sonchifolius*) slices: A simple physical model including shrinkage [J]. LWT, 2022, 159: 113151.

[27] XIAO H W, LAW C L, SUN D W, et al. Color change kinetics of American ginseng (*Panax quinquefolium*) slices during air impingement drying [J]. Drying Technology, 2014, 32(4): 418－427.

[28] LIU Z L, NAN F, ZHENG X, et al. Color prediction of mushroom slices during drying using Bayesian extreme learning machine [J]. Drying Technology, 2020, 38(14): 1869－1881.

[29] ONWUDE D I, HASHIM N, ABDAN K, et al. The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 241: 75－87.

[30] HUANG M, WANG Q, ZHANG M, et al. Prediction of color and moisture content for vegetable soybean during drying using hyperspectral imaging technology [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 128: 24－30.

Study on the kinetics of shrinkage and color changes of chrysanthemum based on image processing

XU Huihuang[1, 2], WU Min[1, 2*], WANG Menglu[1, 2]

(1. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*;
2. *Mechanisation Functional Research Laboratory of National Traditional Chinese Medicine Industry Technology System, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Appearance quality is an important indicator in assessing the quality of dried chrysanthemums. To achieve rapid and non-destructive detection of the appearance quality of chrysanthemums during drying, this study applied computer vision technology in the infrared-assisted hot air drying of chrysanthemums and developed a Python-based image processing algorithm to acquire information on the changes in the shrinkage and color of petals and stamens of chrysanthemums at different temperatures (35 ℃, 50 ℃, and 65 ℃). These parameters serve as evaluation indices for the appearance quality and facilitat precise control of the drying process. The kinetic analysis showed that the drying of chrysanthemums had a consistently decreasing drying rate. High drying temperatures significantly reduced drying time and increased drying rates ($p<0.05$). Evaluation of the fit of mathematical models for thin-layer drying, including the Henderson and Pabis model, the Page model, and the Lewis model, showed that these models were in better agreement with the experimental data and thus more accurately described the drying process of chrysanthemums. Furthermore, changes in shrinkage rate and lightness (L^*), red/green (a^*), and yellow/blue (b^*) values during drying showed that the morphological and color of chrysanthemums depended on drying temperature and time. Lower temperatures and shorter drying times were favorable for maintaining the appearance quality of the chrysanthemums. Linear regression analysis using zero-order, first-order, and first-order fractional models showed that the first-order fractional model provided more accurate predictions of shrinkage and color changes during the drying process of chrysanthemums.

Keywords: chrysanthemum; image processing; drying kinetics; shrinkage; color; prediction model