

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.02.009

百合热风薄层干燥特性及干燥品质

Drying characteristics and drying quality of
Lilium by hot-air thin-layer drying效碧亮¹ 孙 静¹ 刘晓风²XIAO Bi-liang¹ SUN Jing¹ LIU Xiao-feng²

(1. 兰州理工大学技术工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050)

(1. College of Technology and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

摘要:为提高规模化生产的百合品质,缩短干燥周期,以兰州百合为试样,运用 JK-LB1700 型薄层干燥试验台制干。系统研究了不同热风温度(60,70,80,90 ℃),热风速度(0.5,1.0,1.5,2.0 m/s)和湿度(20%,30%,40%)对百合热风薄层干燥速率、色泽 ΔE^* 值、V_C 含量、复水比的影响及各指标的变化规律;通过 Weibull 分布函数模拟了百合干燥过程及水分扩散规律。结果表明:随热风温度、热风速度增大百合热风薄层干燥时间显著缩短($P < 0.01$),不同相对湿度下无差异,但在干燥前期湿度大小与物料干燥速率呈正相关,后期呈负相关。采用 Weibull 分布函数能够准确($R^2 > 0.99$)描述百合热风薄层干燥过程,基于 Weibull 分布函数可准确获得百合薄层干燥水分有效扩散系数($1.213 \times 10^{-6} \sim 3.992 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), D_{eff} 值不仅受干燥参数影响,也受干燥设备和试样贮存时间的影响。试验干燥参数对百合品质指标色泽 ΔE^* 值、V_C 含量和复水比的综合影响大小依次为干燥温度 > 热风速度 > 相对湿度,品质指标色泽 ΔE^* 值和 V_C 含量受干燥参数影响较大,复水比较小。

关键词:薄层干燥;特性;品质;模型;百合

Abstract: In order to improve the quality of lily production and shorten the drying period, taken Lanzhou lily as sample and used JK-LB1700 thin layer drying test bed to dry. The effects were investigated, in different hot-air temperature (60, 70, 80, 90 ℃), hot-air rate (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s) and drying relative humidity (20%, 30%, 40%) on drying rate, color ΔE^* value, vitamin C content, rehydration ratio during lily drying and law of change. The Weibull distribution function was used to sim-

ulate the drying moisture diffusion law of lily. Results, the drying time of lily was significantly shortened ($P < 0.01$) with the hot air temperature and hot air speed increasing. There was no difference under different drying relative humidity, but the humidity was positively correlated with the drying rate of the lily in the early drying stage, and negatively correlated in the later stage. Weibull distribution function can accurately ($R^2 > 0.99$) describe drying process, and basing on Weibull distribution function, effective water diffusion coefficient was obtained between $1.213 \times 10^{-6} \sim 3.992 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. D_{eff} values were not only affected by drying parameters, but also by drying equipment and sample storage time. The combined effects order of experimental drying parameters on the color ΔE^* value, vitamin C content and rehydration ratio were dry temperature > hot air speed > relative humidity, and the quality index color ΔE^* value and vitamin C content were greatly affected by drying parameters, rehydration was relatively small.

Keywords: thin-layer drying; characteristics; quality; model; lily

百合为百合科百合属植物,为中国卫生部审批通过的首批药食兼用植物^[1],在中国常将其鳞茎加工成中草药和各种保健食品^[2]。鲜百合肉嫩、水分高,在贮藏期间极易受病菌侵染造成腐烂变质^[3],采用干制加工,可延长保存期,便于贮藏和运输,对缓解产销矛盾具有重要意义^[4]。

目前百合生产常用的干燥方式有热风干燥和真空冷冻干燥。真空冷冻干燥主要用于优质精品的加工,因设备昂贵、干燥时间长、成本高,未被普及。热风干燥设备简单,成本低,产量高,成为现阶段大规模干燥的主要手段。热风干燥存在主要问题为产品褐变较为严重,卖相差,干燥时间仍较长。为解决以上问题,从 20 世纪 80 年代至今出现了不同方面的研究与报道,如刘海宽^[5]研究

基金项目:甘肃省科技计划资助项目(编号:18YF1NA002)

作者简介:效碧亮(1984—),女,兰州理工大学副教授,硕士。

E-mail: xiaobiliang840824@126.com

收稿日期:2019-12-18

了硫磺熏蒸热风干燥技术,并确定了出口百合干生产工艺流程及质量标准;王存堂等^[6]探讨了热风温度对百合热风干燥动力学的影响,并确定了 Page 模型是描述百合薄层热风干燥过程的最优模型;李霞等^[7]研究了无硫护色后热风干燥,确定了最优复合护色剂配方 0.65% 氯化钠、0.3% 抗坏血酸、0.3% L-半胱氨酸、0.8% 柠檬酸,护色效果较好,但仍然无法解决成本低、干燥时间短、可规模化生产的问题。

现有报道^[6,8]主要研究了干燥参数温度、物料厚度、风速、预处理等对百合干燥时间、干燥特性的影响和干燥模型的拟合,然而将干燥相对湿度作为重要参数之一系统研究各因素对百合热风干燥特性及干燥品质的影响尚未出现,仅有山药^[9]、苹果片^[10]、胡萝卜^[11]等相关报道。物料温度和干燥介质相对湿度是影响干燥过程的主要因素,是反映干燥过程中传热传质的 2 个方面^[12]。鉴于此,为缩短百合热风薄层干燥时间,提高产品品质,试验拟选用吉林大学工学院吴文福等^[13]设计的控温控湿薄层干燥试验台,将干燥相对湿度作为重要干燥参数之一,系统研究干燥温度、干燥相对湿度、热风速度对百合干燥特性和干燥品质的影响,模拟干燥过程,并确定干燥有效扩散系数,旨在为百合规模化生产提高百合干品质、缩短干燥时间提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与设备

1.1.1 试验材料

新鲜百合:产地兰州市七里河区西果园,兰州米家山百合有限公司,要求新鲜、色白、鳞片肥厚、无病虫害及机械损伤,6 年生。初始湿基含水量为 60%~63%。试验前从兰州米家山百合有限公司-4℃冷库中取出百合,带着泡沫箱一并存放于(4±1)℃的冰箱中备用。

1.1.2 试验试剂

2,6-二氯酚:分析纯,上海如吉生物科技发展有限公司;

L(+)-抗坏血酸标准品:纯度≥99%,美国 Sigma 公司。

1.1.3 试验设备

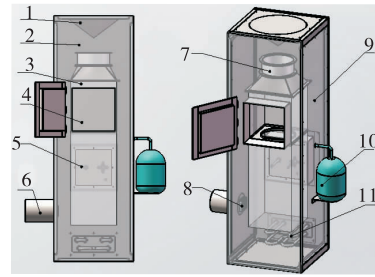
多参数可控原位精确干燥试验台(图 1):JK-LB1700 型,吉林大学工学院吴文福等设计,长春吉大科学仪器设备有限公司组装;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9425A 型,上海一恒科技有限公司;

真空干燥箱:DZF-6020 型,宁波江南仪器厂;

分光测色仪:NS800 型,深圳市三恩时科技有限公司;

真空保鲜包装机:W300 型,东莞市益健包装机械有



1. 空气导流装置 2. 外壳 3. 内胆 4. 物料仓 5. 传感器仓 6. 电动密封阀 7. 轴流风机 8. 排湿风扇 9. 侧板 10. 空气加湿器 11. 电热装置

图 1 薄层干燥试验台简图

Figure 1 Sketch of thin layer drying test bed

限公司;

数字温度表:TP-902C 型,北京中旺新业信息技术有限公司。

1.2 方法

1.2.1 预处理 将鲜百合从冰箱中取出,随机取样,切去毛根,弃掉沾有黑垢、存在黑点的外层,将洁白、完整的鳞片剥下,置于干净洗盆,将百合鳞片清洗干净,在蒸锅中蒸烫至百合由奶白色变为青白色,漂烫结束,快速冷却,以备干燥之用。

1.2.2 试验设计 根据前期预试验结果、设备干燥特点及功能,确定影响百合热风干燥的主要因素为热风温度、相对湿度、热风速度。因此,分别选取干燥温度(60,70,80,90℃),干燥风速(0.5,1.0,1.5,2.0 m/s),干燥相对湿度(20%,30%,40%)进行干燥试验,每组试验取 300 g 样品平铺于多孔物料盘中,按照试验设计设定干燥参数,每隔 60 min 取样称重,直至湿基含水率 3% 以下(便于干燥后制粉)^[14],取出冷却后真空包装。每组试验重复 3 次。具体试验安排如表 1。

表 1 试验设计和试验参数

Table 1 Design for experiments and experimental parameters

序号	干燥温度/℃	风速/(m·s ⁻¹)	干燥湿度/%
1	60	1.5	30
2	70	1.5	30
3	80	1.5	30
4	90	1.5	30
5	70	0.5	30
6	70	1.0	30
7	70	1.5	30
8	70	2.0	30
9	70	1.5	20
10	70	1.5	30
11	70	1.5	40

1.2.3 干燥参数的计算

(1) 水分比:百合干燥过程中干燥曲线采用水分比随时间变化的曲线。不同干燥时间百合水分比的计算如式(1)所示。

$$MR = \frac{M_t}{M_0}, \quad (1)$$

式中:

MR ——水分比;

M_0 ——物料初始干基含水率, %;

M_t ——物料在 t 时刻的干基含水率, %。

(2) 干燥速率:

$$DR = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_1 - t_2}, \quad (2)$$

式中:

DR ——干燥过程中 t_1 和 t_2 之间物料降水率, %/h;

M_{t_1} —— t_1 时刻的干基含水率, %;

M_{t_2} —— t_2 时刻的干基含水率, %。

(3) 干基含水率:

$$M_t = \frac{W_t - G}{G} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

W_t ——任意时刻物料总质量, g;

G ——干物质质量, g。

1.2.4 Weibull 分布函数^[15]

$$MR = \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right], \quad (4)$$

式中:

α ——尺度参数(表示干燥过程中的速率常数,约为干燥过程中物料脱去 63% 水分所需要的时间), min;

β ——形状参数(其值与干燥过程中干燥曲线的形态有关);

t ——干燥时间, min。

1.2.5 水分有效扩散系数 百合片的厚度远小于其直径,所以可将百合片看作大平板,其水分扩散特性为一维轴向扩散。因此,根据 Fick 第二扩散定律 MR 可采用式(5)计算^[16]。

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4 L^2}\right], \quad (5)$$

式中:

D_{eff} ——有效水分扩散系数, m^2/s ;

L ——物料厚度的 50%, m;

T ——干燥时间, s;

n ——组数。

试验干燥时间足够长,因此,可将其视为 0^[17]。故

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4 L^2}\right). \quad (6)$$

将式(6)两端取自然对数得

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4 L^2} t. \quad (7)$$

由式(7)可以看出, $\ln MR$ 与时间 t 呈线性关系,有效水分扩散系数(D_{eff})可由其斜率求出^[18]。

1.2.6 物料温度的测定 干燥过程中每隔 30 min 取数片百合快速放进保温杯中,然后用数字温度表测定物料温度,待温度稳定后记录结果。测定时杯口用自制泡沫密封,测定后百合片放回物料筛继续干燥。

1.2.7 品质指标测定

(1) V_C 含量的测定: 2,6-二氯酚酚滴定法,按 GB 5009.86—2016 执行。

(2) 水分含量的测定:减压干燥法,按 GB 5009.3—2016 执行。

(3) 色差差的测定:采用分光测色仪进行色差的测定,测定百合干鳞片的色泽明亮度 L^* , 红绿值 a^* 和蓝黄值 b^* , 每组测定 3 次,取平均值,计算色泽差异值 ΔE^* 进行综合评价^[19], 试验以鲜百合色泽参数 L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 作为百合色差 ΔE^* 的参照。其中 ΔE^* 值就是鲜百合与干燥后百合的色差:

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2}. \quad (8)$$

(4) 复水比的测定:参考闫旭等^[20]的测定方法,进行改良。将干燥后的百合片按料液比 1 : 20 (g/mL) 浸于蒸馏水中,在 40 °C 下浸没 30 min。复水结束后取出百合片,拭去表面水分,并称重。按式(9)计算复水比。

$$RR = \frac{M_t}{M_0}, \quad (9)$$

式中:

RR ——复水比, g/g;

M_0 ——百合干复水前重量, g;

M_t ——百合干复水后重量, g。

1.2.8 数据处理 通过 Excel 完成试验原始数据的整理、误差、方差分析和多重比较的计算,运用 Origin 8.5 软件绘图并完成非线性模拟。

2 结果与讨论

2.1 百合热风薄层干燥特性

2.1.1 干燥温度对百合干燥特性的影响 由图 2(a)可知,在干燥相对湿度为 30%,干燥风速为 1.5 m/s,试样初始湿基含水率为(62+2)%,热风温度分别为 60, 70, 80, 90 °C 时,试样达到目标含水量所需干燥时间为(420+6), (240+6), (180+7), (120+5) min, 60 °C 下所需时间最长, 70 °C 下较其干燥时间缩短了 42.86%, 90 °C 下缩短了 71.43%。说明热风温度对百合热风薄层干燥特性有极显著影响,温度越高,干燥时间越短, 90 °C 只需 2 h 可干至目标水分,百合中水分主要以自由水为主。由图 2(b)可

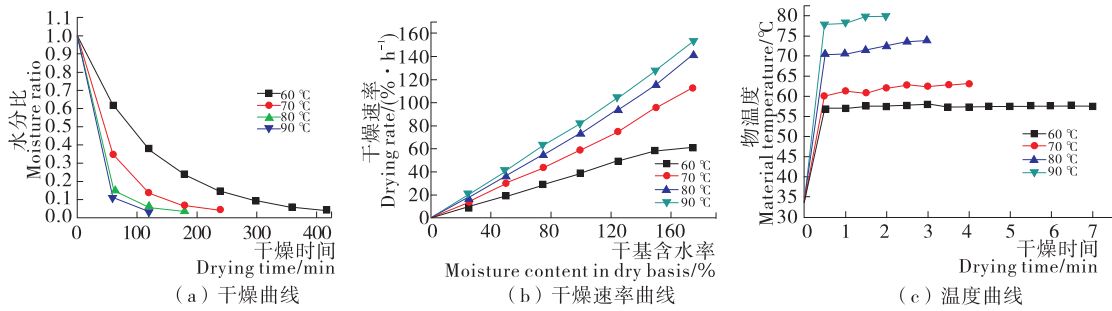


图2 不同干燥温度下百合的干燥特性、干燥速率和温度曲线

Figure 2 Drying characteristic, drying rate and temperature curves of lily under different drying temperature

见,随着干燥温度的增大,干燥速率显著增大,在不同干燥温度下百合干燥速率随干燥的进行呈快速下降趋势,没有恒速干燥段,说明整个干燥过程属于典型降速干燥。大多数农产物料的干燥都属于降速干燥,这是由于水分在物料内部扩散速度低于表层蒸发速度所致^[21]。干燥初期,物料含水量高,以非结合水为主,物料表面成壳程度低,随温度升高,水分扩散速率加快,干燥后期,物料水分慢慢以结合水为主,表面结壳,内部与环境湿度差小,干燥速率小。由图2(c)可知,温度曲线出现快速升温、缓速升温和恒温段。快速升温段,热风温度越高,百合初始预热温度上升越快,达最高温度越大;缓速升温段,热风温度越高,物料升温速率越快,缓速段消耗时间越短,从而有效缩短了干燥时间。不同温度下物料温度均低于热风温度,热风温度越高,物料温度与之相差越大,说明对于薄层干燥,温度越高,被分解消耗的能量越多。综合考虑干燥时间、耗能和百合片品质,选择热风温度70℃较宜。

2.1.2 相对湿度对百合干燥特性的影响 在干燥温度70℃,干燥风速为1.5 m/s,试样初始含水率为(60±1)% (湿基)条件下,不同干燥相对湿度特性曲线如图3(a)。在恒湿条件分别为20%,30%,40%下干燥时,至目标含水率所需时间相同,均为3 h,表明其他条件一定时降低干燥湿度对百合总的干燥时间无显著影响,这一结果与巨浩羽等^[21]关于胡萝卜降湿研究结论不一致,因干燥温度、干燥物料不同。但不同干燥湿度对不同阶段干燥初期、中期水分比下降却有显著影响。干燥初期,不同湿度下百合水分比下降速率表现为40%>30%>20%,且40%和30%下的水分散失速率显著快于20%,说明增加相对湿度有助于干燥初期物料水分快速扩散;干燥中期,干燥环境湿度越大,物料水分比下降速率越慢;干燥后期,各试样水分下降速率无显著差异,说明干燥进入中后期,增加湿度会阻碍物料水分由内向外迁移和蒸发。因此,干燥初期需较高的干燥湿度,干燥中后期需较低的干燥湿度,不同的恒定干燥湿度会将前后产生的差异消除而表现出对总的干燥时间无差异的现象。不同干燥湿度速率曲线如图3(b)。可见,在整个干燥过程中,无明显预

热段,且整体呈快速下降趋势。干燥初期,干基含水率>140%时,干燥速率随相对湿度增大而显著增大,依次为40%,30%,20%;干基含水率为80%~140%时,相对湿度为30%下的干燥速率与40%下的基本相当,无差异,却显著大于20%时的;但当干燥进入后期,干基含水率<80%时,环境相对湿度越大,干燥速率越慢。干燥相对湿度对干燥速率有显著影响,这一结果与Janjai等^[22]和Curocio等^[23]研究认为干燥相对湿度对干燥速率影响不显著不一致。由费克定律及其边界条件可知,环境相对湿度越低,物料和环境之间的水蒸气压差越大,干燥速率越大^[21]。在一定干球温度下,干燥相对湿度越高,湿球温度越高,物料升温越快。干燥初始阶段,物料含水量高,湿度远大于环境湿度,不同湿度试验下物料与环境间水蒸气压差均较大,此阶段水分的有效扩散速率大小主要取决于物料的升温快慢,环境湿度越大,物料升温越快,物料表面水分扩散速率越快。当干燥进入中后期,物料外层大部分水分蒸发,外表开始慢慢结壳,物料温度也基本趋于稳定,此时,物料内部水分向外迁移和蒸发的速率主要取决于物料与环境间水蒸气压差,差值越大,干燥速率越快,因此降低环境相对湿度可促进物料干燥速率,相反,起抑制效应。温度曲线见图3(c),不同相对湿度下物料温度曲线均呈先快速升温后缓慢升温,最后接近恒定温度,这一变化规律与巨浩羽等^[21]研究结果相一致。然而,在干燥初期,湿度越大,物料升温越快,且在中后期物料升至最高温度所需时间越短,这一结果较好地证明了图3(a)和(b)的结果。

综合考虑,不同干燥阶段应选择不同干燥湿度,可能会有助于干燥时间的缩短。

2.1.3 热风速度对百合干燥特性的影响 在干燥温度70℃,干燥相对湿度30%,试样初始湿基含水率为(62±1)%条件下,不同风速干燥特性曲线和速率曲线结果见图4(a)、(b)。由图4(a)可知,当干燥温度、湿度一定时,热风速度为0.5~2.0 m/s,百合干燥达到目标含水量所需干燥时间随之显著缩短,当热风速度为2.0 m/s时,百合片最先达到干燥状态。风速主要影响物料表面水分汽化

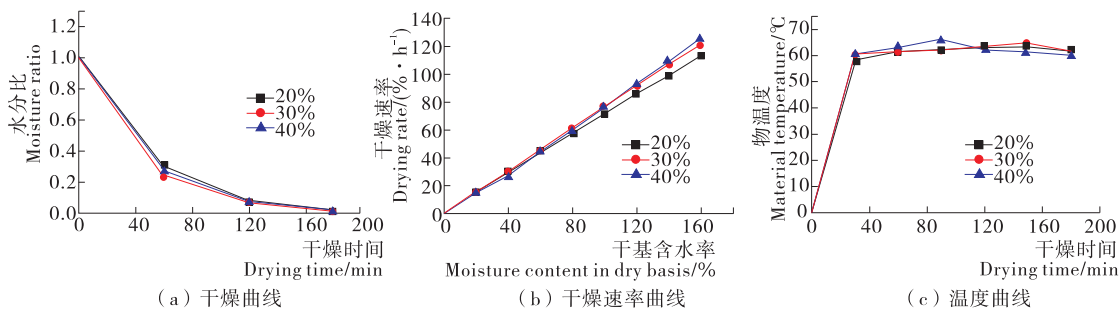


图 3 不同干燥湿度下百合的干燥特性、干燥速率和温度曲线

Figure 3 Drying characteristic, drying rate and temperature curves of lily under different drying humidity

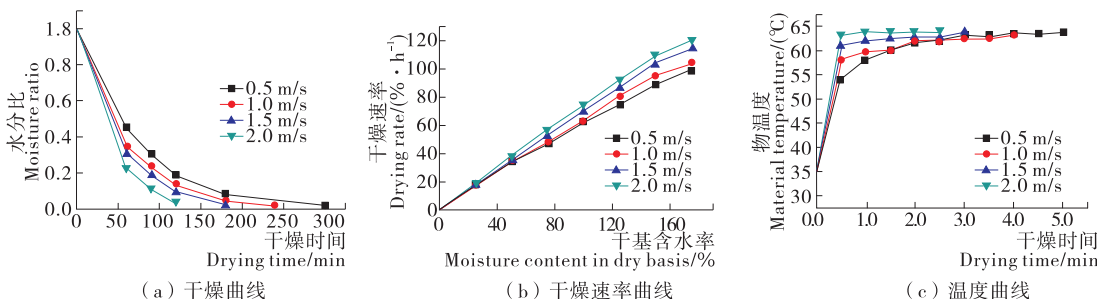


图 4 不同干燥风速下百合的干燥特性、干燥速率和温度曲线

Figure 4 Drying characteristic, drying rate and temperature curves of lily under different drying air velocity

的速率,整个干燥过程中不同阶段影响不同,尹慧敏等^[24]研究表明,热风速度对物料前期干燥速率有正相关影响,对干燥后期存在负相关影响,因前期物料表面水分汽化速率越快,结壳越快,对后期干燥影响越大。然而,在图 4 (b)中干燥后期并未出现热风速度对干燥速率负作用影响,干燥后期干基含水率小于 40%时,无显著差异,说明干燥过程中湿度的控制对物料表面结壳有较好的抑制作用。不同热风速度干燥物料曲线如图 4(c)。物料曲线呈快速升温段、缓速升温段和恒温段。风速越快,物料预热段温度上升越高,缓速段较短,干燥时间越短;风速越慢,预热段物料上升温度越低,缓速段越长,所需时间长。

综合考虑能耗、干燥时间,选择干燥风速为 1.5 m/s。

2.2 基于 Weibull 分布函数的干燥过程模拟

2.2.1 基于尺度参数 α 和形状参数 β 对干燥过程分析

运用 Origin 8.5 软件采用 Weibull 分布对不同干燥条件下的百合热风薄层干燥过程进行模拟,结果如表 2 所示。模型拟合程度良好性取决于 R^2 值大小, R^2 值越接近 1,表明模型拟合程度越好。由表 2 可见,决定系数 R^2 值均介于 0.999~1.000,说明利用该模型可准确描述百合在不同干燥温度、相对湿度和热风速度下的干燥过程。

α 值大小可反映物料干燥过程中脱去 63%水分所需干燥时间长短,其值越大,干燥时间越长。由表 2 可知,随干燥温度的升高,尺度参数 α 值迅速下降,温度越高, α 值

越小,90 °C下最小(12.719 min),较 60 °C下(123.253 min)缩短了 89.68%;热风速率的增大同样可缩短干燥时间,风速越大, α 值越小,干燥时间越短(34.990 ~ 73.088 min);当干燥相对湿度增大时, α 值呈先下降后上升,出现最适湿度 30%(40.866 min),较 20%下最大值(49.939 min)缩短了 18.17%,说明水分比降至 0.37 最适湿度为 30%。以上结果表明,影响百合热风薄层干燥尺度参数 α 值大小的因素除了热风温度、热风速度,环境温度也是一个非常重要的因素。

不同条件下百合热风薄层干燥模型形状参数 β 值见表 2。 β 值最大值为 1.098,最小值 0.511,大小基本介于 0.3~1.0,说明百合热风薄层干燥属于降速干燥,物料水分汽化面由外慢慢转向内移动,降速后段干燥速率比前段下降得更快。干燥热风温度、相对湿度和热风速度对尺度参数 β 值均有不同程度影响。温度影响最大,随热风温度的升高其值迅速递减,这一结果与尹慧敏等^[24]、Corzo 等^[25]、白俊文等^[26] 研究结果干燥温度对尺度参数无显著影响不一致,可能是所用设备及研究干燥参数不同所致。说明干燥物料、方法、设备不同,尺度参数 β 值的影响因素也有所不同。

2.2.2 水分有效扩散系数分析 基于 Weibull 分布函数计算了水分有效扩散系数变化规律,结果见表 3。决定系数 R^2 值 <0.9 ,说明利用该线性模型可准确计算出不同研究条件下百合水分有效扩散系数。水分有效扩散系数随

表2 不同试验条件下的模型拟合结果[†]

Table 2 Model fitting results under different experimental conditions

干燥条件	模型参数		决定系数 R^2
	α/min	β	
60 °C	123.253 ^a	0.998 ^a	1.000
70 °C	55.663 ^b	0.864 ^b	0.999
80 °C	20.212 ^c	0.578 ^c	1.000
90 °C	12.719 ^d	0.511 ^c	1.000
20%	49.939 ^a	1.098 ^a	1.000
30%	40.866 ^c	0.950 ^a	1.000
40%	46.491 ^b	1.056 ^a	1.000
0.5 m/s	73.088 ^a	1.015 ^a	0.999
1.0 m/s	55.663 ^b	0.864 ^b	0.999
1.5 m/s	50.596 ^c	0.970 ^a	1.000
2.0 m/s	34.990 ^d	0.828 ^b	1.000

[†] 小写字母不同表示差异显著, $P < 0.05$ 。

温度升高显著增大,大小介于 $1.213 \times 10^{-6} \sim 3.992 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 90 °C下较 60 °C下提升了 69.61%,说明干燥温度是决定物料中水分有效扩散的关键因素。干燥相对湿度 20%, 30%, 40%下的 D_{eff} 值分别为 3.642×10^{-6} , 3.610×10^{-6} , $3.642 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 各值间基本无显著差异,这一结果与图 3(a)结果相一致,即恒定的不同环境湿度对物料总的干燥效率无显著影响。当干燥热风速度为 0.5~2.0 m/s 时,百合水分有效扩散系数为 $1.953 \times 10^{-6} \sim 2.891 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 风速越快,水分扩散速率越快。值得说明的两点:① 研究结果扩散系数数量级为 10^{-6} , 大于一般食品原料干燥有效水分扩散系数 $10^{-12} \sim 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 的范围^[27], 与王存堂等^[6]研究结果 10^{-9} 也不一致。该结果可能因干燥参数条件不同、所用干燥设备性能不同所致,同时表明此次所用干燥设备可显著提升百合干燥效率。② 不同湿度条件下水分扩散系数的平均值 $> 3.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 除低于干燥温度 90 °C下 ($3.992 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) 外,显著大于其他干燥条件下的 D_{eff} 值。此差异主要因百合贮藏时间所引起,不同湿度研究使用样品为贮藏 1 个月百合,不同温度和不同风速条件试样为贮藏 9 个月百合。随贮藏时间的延长,百合的淀粉含量逐渐下降,可溶性糖及还原糖含量上升,种球的顶牙不断生长,部分自由水转为结合水,严重影响了干燥过程中水分的迁移,说明试样贮藏时间也是影响物料水分扩散速率的一个重要因素。

2.3 百合热风薄层干燥品质

2.3.1 不同试验条件对百合片色泽的影响 由图 5 可知,热风薄层干燥参数热风温度、相对湿度和热风速度对百合色泽均有极显著影响。如图 5(a)所示,热风温度由 60 °C 升至 90 °C,百合色泽 ΔE^* 值呈先下降后上升, 70 °C

表3 不同试验条件下的水分有效扩散系数[†]

Table 3 Effective diffusion coefficient of water under different experimental conditions

干燥条件	模型参数		决定系数 R^2	水分有效扩散系数/ ($\times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
	α	β		
60 °C	0.462	-0.478	1.000	1.213 ^d
70 °C	0.610	-0.803	0.975	2.035 ^c
80 °C	0.759	-1.117	0.930	2.833 ^b
90 °C	1.363	-1.574	0.949	3.992 ^a
20%	1.554	-1.436	0.993	3.642 ^a
30%	1.434	-1.424	0.999	3.610 ^a
40%	1.554	-1.436	1.000	3.642 ^a
0.5 m/s	0.706	-0.770	0.991	1.953 ^c
1.0 m/s	0.610	-0.803	0.975	2.035 ^b
1.5 m/s	0.994	-1.070	0.991	2.714 ^a
2.0 m/s	1.045	-1.101	0.993	2.891 ^a

[†] 小写字母不同表示差异显著, $P < 0.05$ 。

和 80 °C 下色泽 ΔE^* 值无显著差异 ($P < 0.01$), 且最小。百合富含淀粉和蛋白质, 低温 60 °C 下加热导致其色泽发青, 90 °C 高温导致还原糖与多种氨基酸发生美拉德反应使百合片发红。热风干燥热量一部分用于物料升温, 一部分用于物料表面水分汽化, 在整个干燥过程前段和中段物料温度低于热风温度, 因此百合片在 80 °C 下仍然保持较高的白度, 且与 70 °C 下无显著差异, 故 70 °C 和 80 °C 下百合白度最高。图 5(b) 显示, 在不同干燥相对湿度 20%, 30%, 40% 下, 百合色泽 ΔE^* 值分别为 5.43 ± 0.13 , 4.31 ± 0.15 , 6.13 ± 0.12 , 30% 下最小。 ΔE^* 值越小, 与对照样品鲜样的色差越小, 白度越高, 说明干燥相对湿度为 30% 较适。图 5(c) 显示, 随热风速度增加百合色泽 ΔE^* 值总体呈下降趋势, 热风速度为 2.0 m/s 时其最小, 1.0 m/s 下和 1.5 m/s 下无显著差异。蒸烫后的百合因大部分酶失活, 在干燥过程中其褐变主要以非酶褐变为主, 干燥温度越高、时间越长, 非酶促褐变越严重。因此, 在一定的干燥温度、湿度下, 热风速度越快, 干燥时间越短, 有效阻碍了百合褐变现象。

2.3.2 不同试验条件对百合片 V_c 含量的影响 如图 6 所示, 干燥参数热风温度和热风速度对百合片 V_c 含量有极显著影响 ($P < 0.01$), 而干燥湿度对其含量无显著影响 ($P < 0.05$)。在干燥热风温度 60~90 °C 范围内, 百合 V_c 含量呈先迅速上升后缓慢下降趋势, 80 °C 下其含量最高。资料^[28]显示: V_c 具有较强的还原性, 遇氧、热不稳定, 极易被氧化。随温度升高, 其含量会极显著下降, 可耐受最高温度为 80 °C。结果表明百合 V_c 含量随热风温度由 60 °C 升至 80 °C 呈迅速上升, 可能因干燥时间短, 说明在耐受温度范围内, 缩短物料干燥时间有助于保留 V_c 含

量。图 6(b)表明,在干燥温度 70 °C,热风速度 1.5 m/s, 相对干燥湿度分别为 20%,30%,40%下,百合中 V_C 的含量之间无显著差异,说明在一定的范围内,相对干燥湿度对 V_C 含量无显著影响。图 6(c)表明,随百合干燥热速率加快 V_C 含量逐渐下降,分别为(5.60±0.23),(4.36±0.33),(3.73±0.21),(2.65±0.27) mg/100 g。V_C 的氧化反应与干燥环境氧含量呈正相关,低速热风输出空气中供物料利用的氧分较低,可延缓 V_C 的氧化,高速热空气不仅提高了干燥环境中氧的含量,而且增加了氧与物料

间接触密度,促进了 V_C 的氧化,因此最适热风速度的选择不仅要考虑干燥时间,还应综合考虑其他因素。

2.3.3 不同试验条件对百合片复水比的影响 不同试验条件下的百合复水比结果如图 7,除热风温度对百合片复水比有显著影响外(P<0.05),相对湿度和热风速度对其均无显著影响(P>0.05)。图 7(a)可见,干燥温度在 90 °C 下时,复水比最大,60~80 °C 时无显著影响。可能因热风温度在 90 °C 下时,物料温度仅为 80 °C,且干燥时间最短,仅需 2 h,故差异不显著。其他干燥温度下,因干燥时

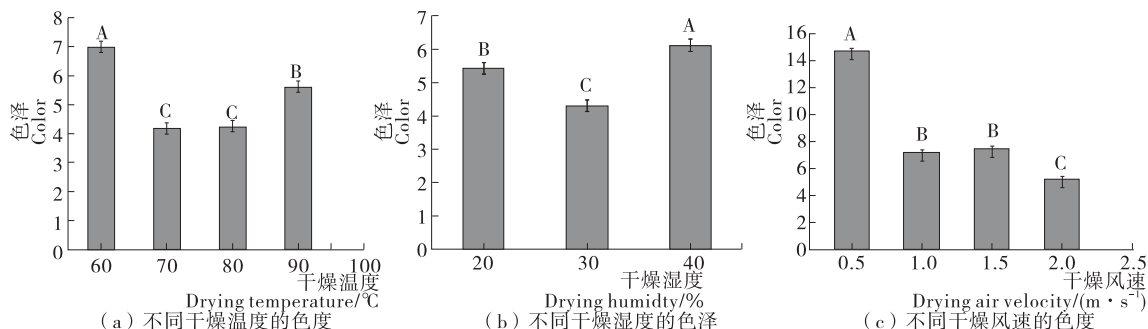


图 5 不同干燥条件下的色泽

Figure 5 Color under different drying condition

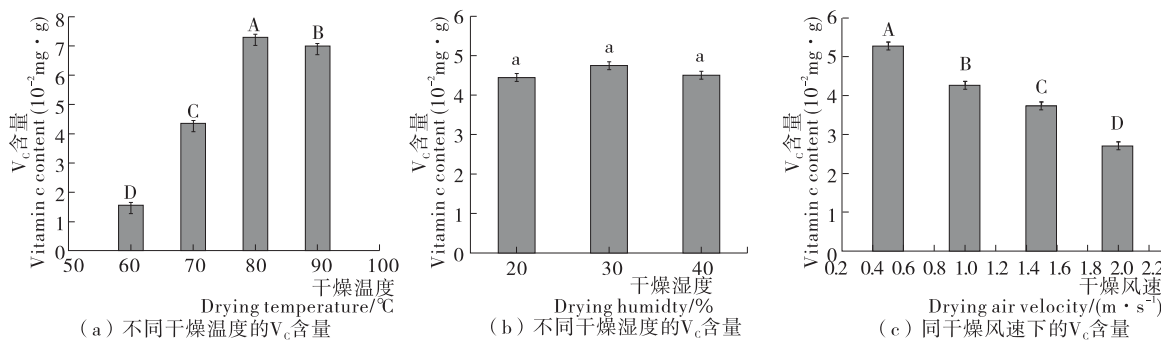


图 6 不同试验条件下的 V_C 含量

Figure 6 Vitamin C content under different drying condition

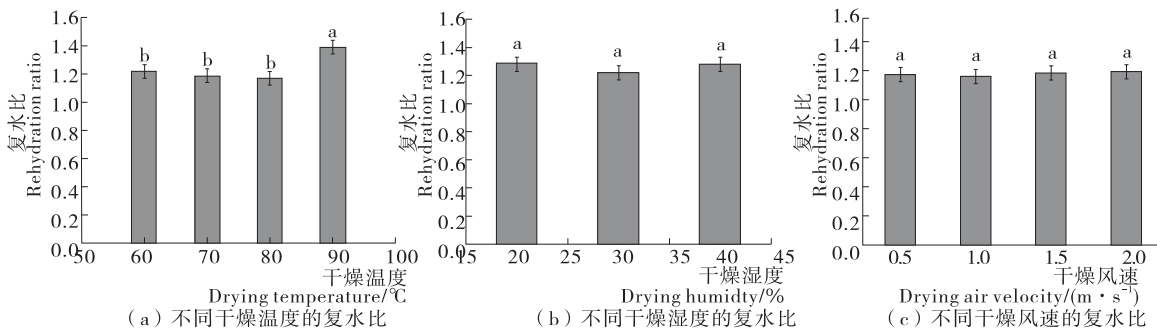


图 7 不同试验条件下的复水比

Figure 7 Rehydration under different drying condition

间均较 90 °C 下延长至少 1 h 或以上,导致细胞被严重破坏,复水比均低于 90 °C 的。图 7(b)、(c)可见,在相对湿度为 20%,30%,40%,热风速度分别为 0.5,1.0,1.5,2.0 m/s 下,百合复水比之间无显著差异($P < 0.05$),说明相对湿度、热风速度对百合薄层干燥复水并不是关键影响因素。

3 结论

(1) 干燥特性研究结果表明,热风温度、热风速度对百合干燥时间有极显著影响($P < 0.01$),热风温度和热风速度越大,干燥时间越短,干燥速率越快。不同干燥相对湿度对总干燥时间无显著影响,但对不同干燥阶段却有不同影响,干燥初期,湿度较大时,水分比下降较快,后期出现相反现象。

(2) 利用 Weibull 分布函数可准确描述百合热风薄层干燥的干燥过程,决定系数 R^2 值均介于 0.999~1.000,模型中尺度参数 α 值和形状参数 β 值大小不仅与热风温度、热风速度有密切关系,与相对湿度也有一定关系。基于 Weibull 分布获得百合水分有效扩散系数,大小介于 $1.213 \times 10^{-6} \sim 3.992 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,系数数量级较一般食材的 10^{-8} 高了 2 级。

(3) 热风温度、相对湿度和热风速度对百合片品质指标 ΔE^* 值色泽、 V_c 含量和复水比的影响程度依次为热风温度 > 热风速度 > 相对湿度。其中色泽 ΔE^* 值与 V_c 含量随各因素增大变化幅度较大,复水比变化幅度较小。

(4) 试验仅对百合热风薄层控湿控温干燥特性及干燥品质进行研究,后期将进一步确定其干燥最优参数。

参考文献

- [1] 胡悦,杜运鹏,田翠杰,等.百合属植物化学成分及其生物活性的研究进展[J].食品科学,2017,39(15):323-332.
- [2] 赵秀玲.百合的营养成分与保健作用[J].中国野生植物资源,2010,29(1):44-46.
- [3] 朱明德,潘其云,邓建玲,等.百合贮藏病害及其防腐措施的研究[J].上海农业科技,2004(2):92-93.
- [4] 李波,芦菲,刘本国,等.双孢菇片微波真空干燥特性及工艺优化[J].农业工程学报,2010,26(6):380-384.
- [5] 刘海宽.百合干的研制与生产[J].食品科学,1984,5(3):26-28.
- [6] 王存堂,张译心,李梦.百合热风干燥动力学研究[J].食品工业科技,2017,38(18):74-84.
- [7] 李霞,李永才,毕阳,等.响应面法优化兰州百合干无硫护色剂配方[J].食品科学,2014,35(4):16-20.
- [8] 黄敬,朱文学,刘云宏,等.基于 Weibull 分布函数的百合真空远红外干燥过程模拟及应用[J].食品与机械,2017,33(5):71-76,82.
- [9] JU Hao-yu, HAMED M, EI-MASHAD H, et al. Drying characteristics and modeling of yam slices under different relative humidity conditions[J]. Drying Technology, 2016, 34(3): 296-306.
- [10] SANDHYA R S, UMESH HEBBAR H. Effect of infrared pretreatment on low-humidity air drying of apple slices[J]. Drying Technology, 2017, 35(4): 490-499.
- [11] 巨浩羽,张茜,郭秀良,等.基于监测物料温度的胡萝卜热风干燥相对湿度控制方式[J].农业工程学报,2016,32(4):269-276.
- [12] 李长友,赵懿琨,马兴灶.荔枝干燥湿热特性模型解析与验证[J].农业工程学报,2014,30(15):289-298.
- [13] 吴文福,金毅,张亚秋,等.一种立式湿热控速薄层干燥试验台:中国,201620245530.7[P].2016-08-31.
- [14] 乔宏柱,高振江,王军,等.大蒜真空脉动干燥工艺参数优化[J].农业工程学报,2018,34(5):256-263.
- [15] BANTLE M, KOLSAKER K, EIKEVIK T M. Modification of the Weibull distribution for modeling atmospheric freeze-drying of food[J]. Drying Technology, 2011, 29(10): 1161-1169.
- [16] JEFFERSON L G C, ALICE M P B, MARILIA H, et al. The influence of ethanol on the convective drying of unripe, ripe, and overripe bananas[J]. Drying Technology, 2012, 30(8): 817-826.
- [17] 张卫鹏,肖红伟,高振江,等.中短波红外联合气体射流干燥提高茯苓品质[J].农业工程学报,2015,31(10):269-276.
- [18] 刘云宏,孙悦,王乐颜,等.超声波强化热风干燥梨片的干燥特性[J].食品科学,2015,36(9):1-6.
- [19] LAW C L. Color change kinetics of american ginseng (*Panax quinquefolium*) slices during air impingement drying[J]. Drying Technology, 2014, 32(4): 418-427.
- [20] 闫旭,刘璇,毕金峰,等.番石榴脉动压差闪蒸联合干燥工艺优化及品质评价[J].中国食品学报,2018,18(4):112-123.
- [21] 巨浩羽,肖红伟,郑霞,等.干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(16):296-304.
- [22] JANJAI S, PRECOPPE M, LAMLERT N, et al. Thin-layer drying of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.)[J]. Food and Bioproducts Processing, 2011, 89(3): 194-201.
- [23] CURCIO S, AVERSA M, CALABRÒ V, et al. Simulation of food drying: Fem analysis and experimental validation[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87(4): 541-553.
- [24] 尹慧敏,聂宇燕,沈瑾,等.基于 Weibull 分布函数的马铃薯丁薄层热风干燥特性[J].农业工程学报,2016,32(17):252-258.
- [25] CORZO O, BRACHO N, ALVAREZ C. Weibull model for thin-layer drying of mango slices at different maturity stages[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2010, 34(6): 993-1008.

(下转第 218 页)

表 1 模型预测误差对比表

Table 1 The comparison of model prediction error

卷烟牌号	卷烟规格	实测均值/%	预测均值/%	预测绝对误差平均/%	实测标准差	技术标准允差/%
a	常规烟支	66.8	67.0	2.1	2.5	8.0
b	常规烟支	65.1	66.0	2.0	2.6	8.0
c	常规烟支	66.5	66.8	2.3	2.8	8.0
d	短支	67.8	66.7	2.3	3.0	8.0
e	中支	65.0	65.8	1.9	2.4	8.0
f	常规烟支	65.7	65.8	2.2	2.9	8.0
g	细支	59.8	59.4	2.7	3.5	10.0
h	中支	66.8	66.6	1.9	2.8	10.0
i	常规烟支	66.2	66.4	2.3	2.9	8.0
j	常规烟支	70.1	67.0	3.2	2.5	8.0
k	中支	61.1	62.2	2.8	3.4	10.0
l	中支	64.7	65.6	2.4	2.9	8.0

从表 1 可以看出,模型对各不同规格卷烟的硬度指标预测误差远远小于指标正常波动范围及企业产品技术标准规定的允差范围,说明模型可应用于实际生产过程中的卷烟硬度预测,且应用方便,不受卷烟规格、设备型号、烟丝特性等因素限制,适用范围广。

3 结论

试验研究了烟支中段填充系数与测量卷烟硬度时的径向压缩量的关系,建立了压缩量与烟丝填充系数和烟支直径的回归模型,进而建立卷烟硬度预测模型对卷烟硬度进行预测,模型拟合优度 > 98%,测试集的标准化均方误差为 0.6,相对误差均值为 3.7%,模型预测误差远远小于指标正常波动范围及产品技术标准规定的允差范围,说明模型预测效果较好,同时模型适用于各种规格的卷烟,可以应用于实际生产中的卷烟硬度预测,为制定卷烟重量标准和产品质量改进提供参考。下一步将加入更多规格牌号的卷烟数据对模型进一步优化和完善。

参考文献

[1] DAVIS D L, NIELSEN M T. 烟草: 生产、化学和技术[M]. 国家烟草专卖局科技教育司, 中国烟草科技信息中心, 译. 北京: 化学工业出版社, 2003: 342.

[2] 于建军. 卷烟工艺学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009: 268-271.

[3] 姚二民, 邵宁, 李晓, 等. 基于回归分析方法的烟丝结构与卷烟物理指标关系研究[J]. 食品工业科技, 2017(20): 27-30, 35.

[4] 李永宽, 冯剑, 王雷. 卷烟单支质量与物理和烟气指标的相关性研究[J]. 河南科技, 2011(21): 72.

[5] 倪克平, 范铁楨, 王涛. 卷烟硬度、吸阻与单支重相关性分析[J]. 烟草科技, 2016, 49(1): 60-65.

[6] 张文, 徐秀峰. 烟支重量、圆周与硬度关系的二元回归分析[J]. 安徽农学通报: 上半月刊, 2010(9): 50-52.

[7] 赵同林, 李兵役, 田兴友, 等. 烟支密度与烟支重量、吸阻、硬度及标准偏差的关系[J]. 烟草科技, 2016, 49(10): 74-80.

[8] 高雪萍, 许玉江, 王伟伟, 等. 膨胀梗丝填充能力对卷烟硬度的影响[J]. 科学之友, 2013(6): 16.

[9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 22838.6—2009 卷烟和滤棒物理性能的测定 第 6 部分: 硬度[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-2.

[10] GARETH James, DANIELA Witten, TREVOR Hastie, et al. 统计学习导论: 基于 R 应用[M]. 王星, 译. 北京: 机械工业出版社, 2015: 267-270.

[11] 吴喜之. 应用回归及分类: 基于 R [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2016: 4.

(上接第 55 页)

[26] 白峻文, 王吉亮, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 分布函数的葡萄干燥过程模拟及应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 278-285.

[27] LIU Yun-hong, SUN Yue, MIAO Shuai, et al. Drying characteristics of ultrasound assisted hot air drying of Flos Lonice rae[J]. J Food Sci Technol, 2015, 52(8): 4 955-4 964.

[28] 刘军军, 刘金兰, 李帅, 等. 拳参黄酮与 Vc、芦丁协同抗氧化作用研究[J]. 化学与生物工程, 2014, 31(6): 34-37.