

孙永林, 汤尚文, 裴冬玲, 等. 湖北麦冬红外干燥特性与干燥模型[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(2): 163–166.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.02.049

湖北麦冬红外干燥特性与干燥模型

孙永林, 汤尚文, 裴冬玲, 魏 冬

(湖北文理学院化学工程与食品科学学院, 湖北襄阳 441053)

摘要:为探讨物料在红外干燥过程中的水分变化规律,以湖北麦冬为干燥原料,进行薄层干燥特性及模型研究,并以 Fick 定律、Arrhenius 方程为依据,计算湖北麦冬在传热传质过程中的水分扩散系数和干燥活化能。结果表明,湖北麦冬的切片厚度及干燥温度对其红外干燥特性有明显影响,切片越薄,温度越高,湖北麦冬的干燥速率越快;Page 模型预测值与实测值比较吻合,可用来描述湖北麦冬干燥动力学过程;在不同切片厚度和干燥温度下,有效水分扩散系数在 $(0.10 \sim 1.64) \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内基本上随干燥温度和切片厚度的增加而增大;麦冬切片厚度为 1、2、3、4 mm 的干燥活化能分别为 32.88、32.12、32.49、37.09 kJ/mol。

关键词:湖北麦冬;红外干燥;数学模型;水分扩散系数;干燥活化能;干燥模型;产地初加工

中图分类号: S567.23+2.09 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)02-0163-03

湖北麦冬 [*Liriope spicata* (Thunb.) Lour. var. *prolifera* Y. T. Ma] 是百合科山麦冬属植物,是湖北襄阳大宗道地药材。襄阳地处汉水中游平原,其气候和土壤条件非常适合麦冬的生长,襄阳市欧庙镇被誉为“全国麦冬之乡”,该地所产麦冬单产高于川、杭麦冬,是中南地区最大的麦冬集散地^[1-2]。湖北麦冬纺锤形块根质地柔韧、味甜,含有皂苷、黄酮、多糖和氨基酸等人体所需的营养成分,具有养阴生津、润肺止咳、除烦安躁等功效^[3]。干燥是对中药材进行产地初加工的首要环节,但是在干燥过程中传热传质过程复杂,物料内部结构、理化性质、干燥温度、干燥方式等直接影响中药材的质量。红外干燥利用的原理是红外线能穿入物料内部粒子间的微小空隙,因分子能级的变化导致运动加剧、温度升高,物料内水分的扩散及表面水分的汽化均处于正向的最佳状态,加热速度快、传热效应高,从而保证物料的天然品质^[4]。目前已有对麦冬进行薄膜覆盖晒干处理^[5]、冷冻干燥和微波干燥等的报道^[6],但对湖北麦冬进行红外干燥的研究较少。本研究拟采用红外干燥方法对湖北麦冬进行薄层干燥处理,探讨干燥温度、切片厚度对干燥特性的影响并建立数学模型,以期对湖北麦冬的产地初加工提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

新鲜湖北麦冬采自湖北省襄阳市欧庙镇湖北麦冬标准化示范基地。

1.2 仪器与设备

MS-70 型红外水分快速测定仪,日本 AND 公司;百信中药立式切片机,瑞安市百信制药机械有限公司。

收稿日期:2016-03-31

基金项目:湖北省自然科学基金(编号:2011BMZ090);湖北文理学院食品新型工业化学科群建设项目(编号:2016zk017)。

作者简介:孙永林(1973—),女,湖北襄阳人,硕士,副教授,主要从事农产品加工研究。E-mail: syl16935@163.com。

1.3 样品制备与测试方法

将新鲜的湖北麦冬切去块根两端,再分别将中部横切成厚度为 1、2、3、4 mm 的圆形薄片,分别在 60、70、80、90、100、110、120 ℃ 条件下进行干燥,利用仪器自带的数据采集软件每隔 1 min 记录 1 次样品质量数据。

1.4 含水率的测定及计算

1.4.1 干基含水率的计算 湖北麦冬在干燥过程中干基含水率的测定方法参照 GB/T 5009.3—2010《食品中水分的测定方法》^[7],计算公式参照谭斯元等方法^[8]:

$$W_t = (G_t - G_g) / G_g \times 100\%;$$

$$G_g = G_0 \times (1 - W_{\text{湿}})。$$

式中: W_t 为 t 时刻的干基含水率,%; G_t 为干燥至 t 时刻的质量, g; G_g 为干质量, g; $W_{\text{湿}}$ 为湿基含水率, %。

1.4.2 干燥速率的计算 干燥率计算公式:

$$DR = (W_t - W_{t+\Delta t}) / \Delta t。$$

式中: DR 为干燥速率, %/min; Δt 为间隔时间, min。由于本试验在干燥过程中 Δt 为 1 min, 故将上式简化为 $DR = W_t - W_{t+\Delta t}$ 。

1.4.3 水分比的计算 水分比计算公式:

$$MR = (W_t - W_e) / (W_0 - W_e)。$$

式中: MR 为水分比; W_0 为物料初始干基含水率, %; W_e 为物料干燥平衡干基含水率, %。与 W_t 、 W_0 相比, W_e 一般很小, 且难以确定, 因此该式可简化为下式:

$$MR = W_t / W_0。$$

1.4.4 有效水分扩散系数及活化能的计算 有效水分扩散系数描述物料内水分的传质性能,其大小与物料的化学成分、水分含量等性质有关,同时也取决于干燥方式。有效水分扩散系数的计算,需要通过具体试验的测定,并结合数学模型进行估算^[9]。数学模型多以 Fick 第二定律为基础,在理想状态下 Fick 方程经简化后见式(1):

$$\ln MR = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \left(\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2} t \right)。 \quad (1)$$

式中: D_{eff} 为有效水分扩散系数, m^2/s ; L 为物料厚度的一半,

m ; t 为干燥时间, s。

作出 $\ln MR$ 和 t 的关系图, 拟合直线方程, 其斜率为 k_0 , 可用式(2)计算 $D_{\text{eff}}^{[10]}$:

$$k_0 = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2} \quad (2)$$

干燥活化能可表征物料在干燥过程中脱除单位摩尔的水分所需要的启动能量, 结合物料的 D_{eff} 和干燥温度的关系, 可用 Arrhenius 方程表示, 如式(3):

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp \left[-\frac{E_a}{R(T+273.15)} \right] \quad (3)$$

式中: D_0 为扩散基数, m^2/s , 为定值; E_a 为干燥活化能, kJ/mol ; R 为气体摩尔常数, 其值为 $8.314\,472\, \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为干燥温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

公式(3)两边取自然对数, 得式(4):

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \frac{1}{(T+273.15)} \quad (4)$$

可知 $\ln D_{\text{eff}}$ 与 $\frac{1}{(T+273.15)}$ 呈线性关系, 经拟合可得斜率为 $-\frac{E_a}{R}$, 经计算可得 $E_a^{[11]}$ 。

1.5 数据处理及拟合

所得数据用 Excel 软件处理后, 再用 Origin8.0 作图, 并用 1stOpt 软件进行拟合构建数学模型。用模型系数均方差(RMSE)、残差平方和(SSE)、相关系数(R)、决定系数(DC)、卡方系数(χ^2)、F 值等对所建模型进行衡量和评估^[10]。

2 结果与分析

2.1 温度对湖北麦冬干燥特性的影响

由图1可以看出, 干燥温度对湖北麦冬干基含水率有明显影响, 干燥温度越高, 干基含水率降至同一水平时所需要的时间越短; 在相同温度下, 随着干燥时间的延长, 干基含水率呈先急剧降低后逐渐趋于稳定的趋势。可见尽管高温可明显提高干燥效率、缩短干燥时间, 但因温度过高, 麦冬发生美拉德反应, 导致色泽变黄, 影响其品质^[6]。其他厚度的变化趋势与此类似。

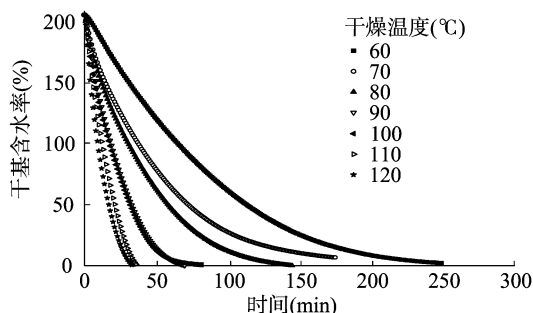


图1 不同干燥温度对2 mm湖北麦冬切片干基含水率的影响

由图2可见, 随着干基含水率的增加, 湖北麦冬干燥速率逐渐增大, 达到一定的峰值后呈逐渐降低趋势; 同时可以看出, 湖北麦冬在不同温度下进行干燥时, 高温状态下的干燥速率明显高于低温干燥条件的。

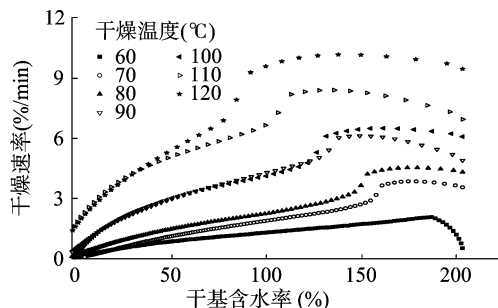


图2 干燥温度对2 mm湖北麦冬切片干燥速率的影响

2.2 切片厚度对湖北麦冬干燥特性的影响

由图3可以看出, 随着干燥时间的延长, 各种厚度的湖北麦冬切片的干基含水率逐渐降低; 随着切片厚度的增加, 湖北麦冬干基含水率降至同一水平时所需的时间延长。可能因为切片厚度增加, 麦冬内部的水分向外迁移的距离增大, 从而导致汽化的阻力增加、时间延长。

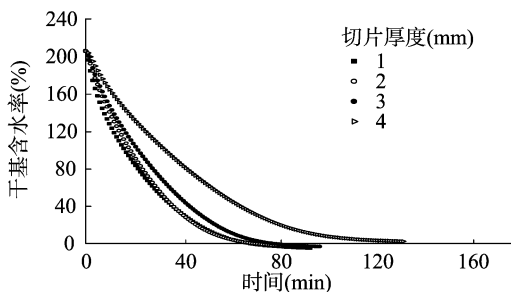


图3 干燥温度为90℃时不同切片厚度对湖北麦冬干基含水率的影响

由图4可以看出, 各种厚度的湖北麦冬切片, 其干燥速率随干基含水率的增加而逐渐提高, 至峰值后逐渐下降; 在相同温度下, 厚切片的干燥速率明显低于较薄切片的干燥速率, 可能因为麦冬切片增厚, 水分在迁移过程中所受的阻力增大, 从而导致传热和传质过程变慢, 干燥速率降低。

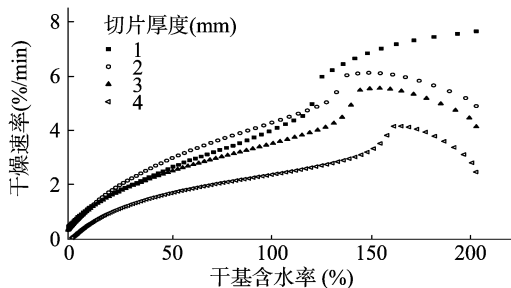


图4 干燥温度为90℃时切片厚度对湖北麦冬干燥速率的影响

2.3 干燥模型的建立

物料的干燥过程受干燥温度、厚度、形状、内部结构等诸多因素的影响, 为了定量描述湖北麦冬在干燥过程中的水分变化规律, 笔者在结合文献资料及试验数据的基础上选择了3种数学模型进行描述^[11-15], 详见表1。

图5为2 mm湖北麦冬切片在不同干燥温度下, 其MR值随时间的变化曲线(其他厚度与此类似)。利用1stOpt软件对MR随t变化的数据按照表1中的模型进行拟合, 结果见图6、表2。

将90℃下的实测值与利用3种干燥模型进行拟合后的

表 1 3 种基础干燥模型

模型编号	模型类型	模型名称	模型方程
1	半理论方程	单项扩散模型	$MR = a \exp(-kt)$
2	半经验方程	Lewis 模型	$MR = \exp(-kt)$
3	半经验方程	Page 模型	$MR = \exp(-kt^n)$

注: a 为待定速率系数; k 为干燥速率常数; n 为幂指数。

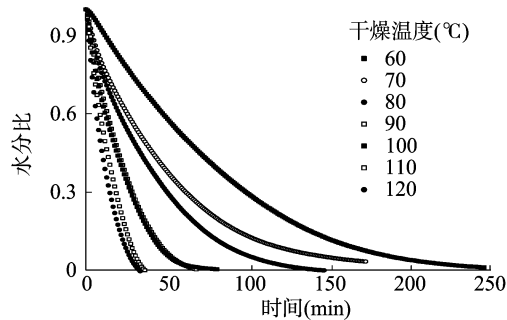


图5 不同干燥温度对2 mm湖北麦冬切片水分比的影响

预测值进行比较,由图 6 可以看出,单项扩散模型和 Lewis 模型与实测值有一定的偏离,而通过 Page 模型得到的预测值与

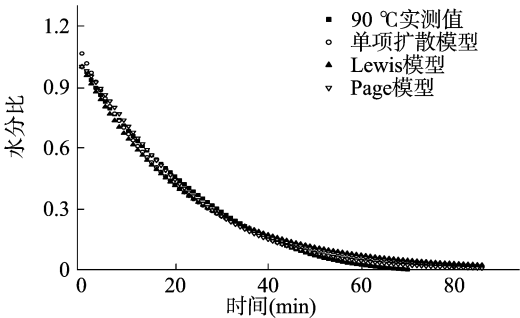


图6 2mm 湖北麦冬切片在 90℃ 红外干燥条件下 3种模型预测值与实测值比较

实测值比较吻合。

表 2 为 3 种基础干燥模型的拟合计算结果,通过比较 3 种模型的系数 $RMSE$ 、 SSE 、 R^2 、 DC 、 χ^2 和 F 值可以发现,Page 模型拟合的 $RMSE$ 、 SSE 、 χ^2 最小, F 值最大。 R^2 为 0.996 3, DC 为 0.995 5,均趋近 1,表明 Page 模型最能反映实测值,适于描述湖北麦冬红外干燥规律。其他温度下模型拟合结果与此类似,因此 Page 模型可作为湖北麦冬红外干燥的数学模型。

表 2 3 种基础干燥模型计算结果

模型编号	拟合参数	模型检验					
		$RMSE$	SSE	R^2	DC	χ^2	F 值
1	$k = 0.046\ 7$	0.032\ 8	0.093\ 3	0.990\ 8	0.987\ 3	2.029\ 9	9\ 146.782\ 7
2	$a = 1.065\ 1, k = 0.045\ 1$	0.037\ 2	0.120\ 4	0.990\ 6	0.983\ 6	2.002\ 4	14\ 407.602\ 6
3*	$k = 0.017\ 5, n = 1.291\ 3$	0.019\ 5	0.033\ 1	0.996\ 3	0.995\ 5	0.027\ 7	23\ 078.419\ 5

注:标注“*”的模型为最适模型。

2.4 有效水分扩散系数和活化能的计算

从表 3 可以看出,在不同的切片厚度、干燥温度下,有效水分扩散系数在 $(0.10 \sim 1.64) \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内随干燥温度和切片厚度的增加而增大。干燥活化能是物料处于理想状态下脱除单位摩尔的水分所需要的启动能量^[16],厚度为 1、2、3 mm 的湖北麦冬切片的干燥活化能差异较小,但 4 mm 厚麦冬切片的干燥活化能达 37.09 kJ/mol,可能因为较厚的湖北麦冬样品在干燥过程中块根内部水分、温度梯度存在差异所致。

表 3 不同厚度和不同温度下湖北麦冬红外干燥的有效水分扩散系数

厚度 (mm)	温度 (°C)	R^2 ($t - \ln MR$)	斜率 K_0 ($\times 10^{-4}$)	D_{eff} ($\times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)
1	60	0.992 1	-1.792 1	0.18
1	70	0.988 3	-3.353 0	0.34
1	80	0.986 5	-3.206 8	0.33
1	90	0.983 9	-5.995 9	0.61
1	100	0.984 8	-7.260 3	0.74
1	110	0.990 4	-9.253 0	0.94
1	120	0.992 0	-11.477 6	1.16
2	60	0.986 9	-1.655 0	0.17
2	70	0.992 6	-2.664 7	0.27
2	80	0.986 8	-3.277 0	0.33
2	90	0.985 3	-5.697 9	0.58
2	100	0.982 4	-5.905 1	0.60
2	110	0.979 0	-8.811 1	0.72
2	120	0.985 3	-11.311 0	1.15
3	60	0.988 0	-1.408 6	0.10

续表 3

厚度 (mm)	温度 (°C)	R^2 ($t - \ln MR$)	斜率 K_0 ($\times 10^{-4}$)	D_{eff} ($\times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)
3	70	0.984 3	-2.243 4	0.15
3	80	0.985 5	-2.954 5	0.22
3	90	0.983 2	-4.800 8	0.32
3	100	0.984 1	-5.043 2	0.41
3	110	0.980 6	-7.126 6	0.60
3	120	0.985 5	-8.700 6	0.80
4	60	0.994 6	-1.034 7	0.28
4	70	0.990 5	-1.471 7	0.46
4	80	0.986 7	-2.145 9	0.60
4	90	0.983 3	-3.196 6	0.98
4	100	0.980 8	-4.032 6	1.02
4	110	0.981 4	-5.942 1	1.44
4	120	0.982 4	-7.914 7	1.64

注:厚度为 1、2、3、4 mm 时,活化能的 $R^2 [(1/T + 273.15) - \ln D_{\text{eff}}]$ 分别为 0.962 7、0.982 5、0.981 9、0.998 1, E_a 分别为 32.88、32.12、32.49、37.09 kJ/mol。

3 讨论与结论

湖北麦冬的红外干燥特性与温度、切片厚度密切相关,温度越高、切片越薄,干燥速率越快、干燥时间越短。但在实际生产中,为保证湖北麦冬的色泽和品质,应选用适宜的温度。湖北麦冬切片的红外干燥规律可用 Page 模型准确描述,因为 Page 模型预测值与实测值更接近,能准确地预测湖北麦冬在干燥过程中水分变化规律。根据湖北麦冬的干燥特性,有效水分扩散系数在 $(0.10 \sim 1.64) \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内随干燥温度

韩艳丽,凡军民,李 静,等. 果胶酶-微波法提取茶树花多糖的工艺[J]. 江苏农业科学,2017,45(2):166-168.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.02.050

果胶酶-微波法提取茶树花多糖的工艺

韩艳丽, 凡军民, 李 静, 贾 君

(江苏农林职业技术学院, 江苏句容 212400)

摘要:以茶树花为材料,采用果胶酶-微波法提取茶树花多糖,研究提取茶树花多糖的工艺。结果表明:通过单因素和正交试验,在加酶量 1.0%、酶解 pH 值 5.5、酶解时间 2.5 h、酶解温度 50 ℃的条件下,茶树花多糖提取率最高;茶树花经酶解后,在 700 W 微波强度下,微波时间 60 s,茶树花多糖提取率达 4.82%。由结果可知,果胶酶-微波法明显提高了茶树花多糖的提取率。

关键词:茶树花;果胶酶;微波;茶多糖

中图分类号: TS201.1;TQ281 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)02-0166-03

茶树花是茶树的生殖器官之一,其生长周期较长,营养消耗较多,茶农多弃之。近年来的研究发现,茶树花中含有与茶叶相似的生物活性成分,如茶多糖^[1]。茶多糖是茶叶中含有一类复合多糖,具有降血糖、降血脂、辅助治疗糖尿病等功效^[2-3]。茶多糖的提取方法主要有热水浸提法、酶法、超声波法、微波法等^[4-6]。其中酶工程技术方法是近几年来用于天然植物有效成分提取的一项生物工程技术。

果胶酶(pectinase)是一类通过不同机制降解果胶基质的酶的总称,主要作用于茶树花细胞壁中的果胶,破坏果胶、半纤维素组成的无定形结构,有助于茶树花中有效成分的渗出和扩散^[7]。微波提取法能显著缩短提取时间,较大程度地提

高茶树花多糖的提取效率^[8]。

本研究主要采取果胶酶-微波提取的方法,通过单因素试验和正交试验研究果胶酶提取茶树花多糖的最佳工艺条件,以期对茶树花多糖的进一步研究提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

茶树花采于江苏省句容市江苏茶博园内。摘取新鲜的茶树花,装入牛皮纸袋中,放置于干燥箱中,于 105 ℃杀青 10 min,然后在 70 ℃烘干、粉碎后过 60 目筛备用。

1.2 试验方法

1.2.1 果胶酶提取茶树花多糖工艺流程 主要工艺流程:茶树花粉末→果胶酶处理→灭酶→微波处理→真空抽滤→浓缩→加 95%乙醇→离心→醇沉→真空干燥→获得茶树花多糖。

1.2.2 果胶酶提取的单因素试验 在预备试验的基础上,选择酶解时间、酶解 pH 值、加酶量和酶解温度为考察因素,每

收稿日期:2015-11-19

基金项目:江苏省自然科学基金(编号:BK20131243)。

作者简介:韩艳丽(1979—),女,江苏铜山人,硕士,副教授,从事食品分析与检验技术研究。Tel:(0511)87290302;E-mail:45600134@qq.com。

和切片厚度的增加而增大。厚度为 1、2、3、4 mm 湖北麦冬切片的干燥活化能分别为 32.88、32.12、32.49、37.09 kJ/mol。

参考文献:

- [1] 陈心启,马元俊. 百合科药用新植物[J]. 植物科学学报,1985,3(1):25-27.
- [2] 孙永林,刘慧宏,汤尚文,等. 湖北麦冬的研究进展[J]. 襄樊学院学报,2009,30(11):74-76.
- [3] 吴美枢,柏官发,姚家国,等. 湖北麦冬与杭、川麦冬的生药学比较研究[J]. 第二军医大学学报,1990,11(1):31.
- [4] 徐晚秀,李 静,宋飞虎,等. 中草药干燥现状[J]. 中药与临床,2015,6(2):114-118.
- [5] 朱卫平. 介绍麦冬的干燥方法[J]. 中国中药杂志,1988,13(9):24.
- [6] 吴发明,张芳芳,李 敏,等. 川麦冬产地干燥方法综合评价研究[J]. 中药材,2015,38(7):1400-1402.
- [7] 食品中水分的测定:GB 5009.3—2010[S].
- [8] 谭斯元,李学琼,陈厚荣. 紫薯热风干燥工艺参数优化[J]. 食品

- 工业科技,2013,34(7):265-268,272.
- [9] 杨爱金,刘 璇,毕金峰,等. 食品干燥过程中水分扩散特性的研究进展[J]. 食品与机械,2012,28(5):247-250.
- [10] 王宝和. 干燥动力学研究综述[J]. 干燥技术与设备,2009,7(1):51-56.
- [11] 林喜娜,王相友. 苹果切片红外辐射干燥模型建立与评价[J]. 农业机械学报,2010,41(6):128-132.
- [12] 黄枝梅. 南瓜热风干燥特性与动力学模型[J]. 包装与食品机械,2014,32(1):23-27.
- [13] Evin D. Thin layer drying kinetics of *Gundelia tournefortii* L. [J]. Food and Bioproducts Processing,2012,90(2):323-332.
- [14] 肖旭霖. 洋葱真空远红外薄层干燥模型[J]. 食品科学,2002,23(5):40-43.
- [15] 吴 振,李 红,罗 杨,等. 银耳红外辐射干燥特性研究及动力学模型构建[J]. 天然产物研究与开发,2014,26(4):471-474.
- [16] 孟岳成,王 君,房 升,等. 熟化红薯热风干燥特性及数学模型适用性[J]. 农业工程学报,2011,27(7):387-392.