

周罗娜,王 辉,刘 嘉,等. 马铃薯片的热泵干燥与干燥动力学拟合[J]. 江苏农业科学,2019,47(16):208-213.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.16.047

马铃薯片的热泵干燥与干燥动力学拟合

周罗娜¹,王 辉¹,刘 嘉¹,刘永翔¹,雷尊国¹,叶发银²,计保芮²

(1. 贵州省农业科学院贵州省生物技术研究所,贵州贵阳 550006; 2. 西南大学食品科学学院,重庆 400700)

摘要:以马铃薯为原料,拟探索在热泵干燥的过程中,马铃薯片的切片厚度、漂烫时间、干燥温度、马铃薯品种及酸、盐处理对干燥速率的影响。结果表明,马铃薯片的切片厚度、漂烫时间、干燥温度对干燥速率均有较大影响,当切片厚度为 2 mm,漂烫时间为 60 s,干燥温度为 80 ℃时,马铃薯片的干燥速率最快;马铃薯品种不同,干燥速率也有所不同,其中品种为费乌瑞它的马铃薯片干燥速率最快;马铃薯片经过酸、盐预处理均能提高热泵干燥的干燥速率,其中乳酸、氯化钠提高得最多。通过模型拟合,得出符合马铃薯片热泵干燥动力学特性的模型为 Page 模型,可以准确地预测马铃薯片热风干燥的过程,从而为实际生产提供理论依据。

关键词:马铃薯片;热泵干燥;模型拟合;动力学拟合

中图分类号: TS215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)16-0208-06

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是1万年前起源于南美洲安第斯山脉中心地区的作物,其适应性强、耐瘠薄干旱、产量高,可供人类食用部分的占比高达85%^[1]。经过5个世纪的

发展,马铃薯逐渐扩展到欧洲、非洲和亚洲,现已成为继小麦、稻谷、玉米之后的世界第四大粮食作物。马铃薯作为日常饮食中的一部分,是钾、镁、膳食纤维、维生素B₆的重要来源^[2],老少皆宜,易于消化。

马铃薯除了可鲜食外,在云南、贵州、四川等地,人们喜爱将其切成薄片后晒成马铃薯干片。每次食用前,将马铃薯干片放入油锅中炸透,再撒入适量盐或辣椒面,即可得到一道美味可口的菜肴。在农村,几乎每家每户都能够晒出这种马铃薯片。但是,运用自然晾晒方法制作出的马铃薯片,消耗时间长,易褐变,尤其是冬季在缺少阳光的高原地区。

热泵干燥作为农副产品的干燥方法,近年来成为人们关注的焦点,在许多农副产品中均有研究,如枸杞^[3]、番木瓜^[4]、香菇^[5]、柠檬^[6]、辣椒^[7]等。热泵干燥法具有耗能少、操作简单、干燥效率高的优点。运用热泵干燥技术干燥马铃

收稿日期:2018-05-14

基金项目:贵州省科技重大专项(编号:黔科合重大专项字[2014]6016);贵州省科研机构服务企业行动计划[编号:黔科合企企(2015)4005];贵州省第五批创新人才基地建设项目(编号:黔人领发[2016]22号);贵州省农业科学院创新专项(编号:黔农科院科技创新[2017]07号)。

作者简介:周罗娜(1992—),女,贵州贵阳人,硕士,研究实习员,研究方向为食品加工。E-mail:343195567@qq.com。

通信作者:王 辉,硕士,助理研究员,研究方向为食品加工。E-mail:wanghui880101@163.com。

[12]李 方,卢立新. 果蔬微孔膜气调包装模型与试验验证[J]. 农业工程学报,2010,26(4):375-379.

[13]邓朝军,吴 琼,许奇志,等. 不同成熟度贵妃枇杷果实色泽与糖酸含量关系[J]. 热带作物学报,2016,37(9):1747-1751.

[14]马庆华,王贵禧,梁丽松. 质构仪穿刺试验检测冬枣质地品质方法的建立[J]. 中国农业科学,2011,44(6):1210-1217.

[15]周俊国,鲁晓晓,杨道印,等. 南瓜果肉可溶性固形物含量与叶、花、果肉色泽的相关性分析[J]. 中国瓜菜,2016,29(9):6-8.

[16]王海宏. 白玉枇杷采后生理特性及贮藏技术的研究[D]. 南京:南京农业大学,2007.

[17]陈昆松,徐昌杰,许文平,等. 猕猴桃和桃果实脂氧合酶活性测定方法的建立[J]. 果树学报,2003,20(6):436-438.

[18]陈明木. 魔芋葡甘聚糖涂膜用于龙眼常温保鲜的研究[D]. 福州:福建农林大学,2004.

[19]吴 敏,陈昆松,张上隆. 桃果实采后成熟过程中脂氧合酶活性变化[J]. 园艺学报,1999,26(4):19-23.

[20]吴大军,陈妙金,孙奇勇,等. 采前避雨栽培影响桃果实采后贮藏品质[J]. 果树学报,2016,33(1):96-105.

[21]Cao S F, Yang Z F, Zheng Y H. Sugar metabolism in relation to

chilling tolerance of loquat fruit [J]. Food Chemistry, 2013, 136 (1):139-143.

[22]胡花丽,李鹏霞,王 炜,等. 不同气体成分对丰水梨果实采后品质和耐贮性的影响[J]. 江苏农业学报,2010,26(2):400-405.

[23]吴 敏,陈昆松,张上隆,等. 桃果实采后脂氧合酶活性和膜脂脂肪酸组分的变化[J]. 园艺学报,2001,28(3):218-222.

[24]李志强,刘春泉,李大婧,等. 脂氧合酶在果实成熟衰老中的功能研究进展[J]. 江西农业学报,2009,21(7):123-126.

[25]Song H W, Yuan W M, Jin P, et al. Effects of chitosan/nano-silica on postharvest quality and antioxidant capacity of loquat fruit during cold storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 119: 41-48.

[26]吴锦程,吴毕莎,黄审剑,等. 枇杷幼果 PLD 和 LOX 对低温胁迫的响应[J]. 植物科学学报,2015,33(2):203-209.

[27]Ye J J, Li J R, Han X X, et al. Effects of active modified atmosphere packaging on postharvest quality of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) stored at cold storage [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(3):474-482.

薯片,可以在缩短干燥时间的同时,使马铃薯片外表保持金黄,从而有效提高马铃薯片的干燥效率与品质,节约能量。本研究分析了切片厚度、漂烫时间、干燥温度、马铃薯品种以及酸、盐处理对马铃薯片热泵干燥效率的影响,并对热泵干燥过程中的动力学模型进行拟合,以期对马铃薯片热泵干燥提供理论依据和指导,较准确地把握其水分含量及干燥时间的变化规律。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为新鲜马铃薯,品种分别为大西洋、荷兰豆、费乌瑞它。

试验试剂:食品级醋酸(CH_3COOH)、食品级柠檬酸($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)、食品级乳酸($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$)、食品级氯化钠(NaCl)、食品级氯化钙(CaCl_2)、食品级碳酸钠(Na_2CO_3)。

1.2 主要设备与仪器

主要设备与仪器有热泵果蔬烘干机(JDYZN-5HG-13)、奥豪斯 cp213 电子秤、雷磁 PHS-2F pH 计。

1.3 试剂的配制

(1)醋酸(CH_3COOH)溶液的配制:精确量取 10.00 mL 醋酸,与 1 000 mL 蒸馏水充分混合,即得溶液(体积比为 1:100),pH 值为 3.02。(2)柠檬酸($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)溶液的配制(质量比为 1:100):精确称取 10.00 g 柠檬酸,于 1 000 g 蒸馏水中溶解,得到相应溶液,pH 值为 2.23。(3)乳酸($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$)溶液的配制:精确称取 10.00 g 乳酸,于 1 000 g 蒸馏水中溶解,得到相应溶液(质量比为 1:100),pH 值为 6.63。(4)碳酸钠(Na_2CO_3)溶液(0.5 mol/L)的配制:精确称取 53.00 g Na_2CO_3 ,加入适量蒸馏水充分溶解,定容至 1 000 mL。(5)氯化钙(CaCl_2)溶液(0.5 mol/L)的配制:精确称取 55.50 g CaCl_2 ,在适量蒸馏水中充分溶解后,定容至 1 000 mL。(5)氯化钠(NaCl)溶液(0.5 mol/L)的配制:精确称取 29.25 g NaCl ,于适量蒸馏水中充分溶解后,定容至 1 000 mL。

1.4 试验方法

1.4.1 马铃薯切片干燥处理流程 新鲜马铃薯→清洗→去皮→切片→冲洗→预处理→漂烫(沸水)→吸干表面水分→热泵干燥→留样。

1.4.2 干燥试验

1.4.2.1 马铃薯切片厚度、漂烫时间、干燥温度对干燥的影响 本研究选择的马铃薯品种为大西洋,选取 3 个切片厚度、3 个漂烫时间、3 个干燥温度进行热泵干燥试验。在烘干过程中,每 10 min 测定 1 次样品质量的变化,直至前后 2 次称量无变化、达到恒质量时结束试验。每组试验重复 3 次,具体试验参数见表 1。

1.4.2.2 酸处理对干燥的影响 本研究选择的马铃薯品种为大西洋,选择醋酸、柠檬酸、乳酸 3 种酸,对马铃薯片进行热泵干燥试验。在漂烫前,分别用配制好的不同种类的酸对切片马铃薯浸泡处理 1 h,浸泡时酸、马铃薯的质量比=10:1。在烘干过程中,每 10 min 测定 1 次样品质量的变化,直至前后 2 次称量无变化、达到恒质量时结束试验。每组试验重复 3 次,具体试验参数见表 2。

表 1 马铃薯切片厚度、漂烫时间、干燥温度对干燥效果影响的试验参数

切片厚度 (mm)	干燥温度 (℃)	沸水漂烫时间 (s)
2	80	120
4	80	120
6	80	120
4	80	10
4	80	60
4	80	120
4	60	120
4	70	120
4	80	120

表 2 酸处理对马铃薯切片干燥影响的试验参数

酸种类	切片厚度 (mm)	干燥温度 (℃)	沸水漂烫时间 (s)
醋酸	4	80	120
柠檬酸	4	80	120
乳酸	4	80	120

1.4.2.3 盐处理对干燥的影响 本研究中选择的大西洋、荷兰豆、费乌瑞它 3 种马铃薯品种进行热泵干燥试验。在漂烫前,用配制好的不同种类的盐分别对切片马铃薯浸泡处理 1 h,浸泡用盐、马铃薯的质量比=10:1。在烘干过程中,每 10 min 测定 1 次样品质量的变化,直至前后 2 次称量无变化、达到恒质量时结束试验。每组试验重复 3 次,具体试验参数见表 3。

表 3 盐处理对干燥影响的试验参数

盐种类	切片厚度 (mm)	干燥温度 (℃)	沸水漂烫时间 (s)
碳酸钠	4	80	120
氯化钙	4	80	120
氯化钠	4	80	120

1.4.2.4 不同马铃薯品种对干燥的影响 取新鲜的大西洋、荷兰豆、费乌瑞它 3 种马铃薯品种进行热泵干燥试验,在烘干过程中,每 10 min 测定 1 次样品质量的变化,直至前后 2 次称量无变化、达到恒质量时结束试验。每组试验重复 3 次,具体试验参数见表 4。

表 4 马铃薯品种对干燥影响的试验参数

马铃薯品种	切片厚度 (mm)	干燥温度 (℃)	沸水漂烫时间 (s)
大西洋	4	80	120
荷兰豆	4	80	120
费乌瑞它	4	80	120

1.4.3 结果计算 (1)干基含水率。计算公式如下:

$$X_i = \frac{m_i - m_g}{m_g}$$

式中: X_i 为干基含水率; m_g 为绝干时的物料质量; m_i 为物料在 t_i 时刻对应的质量。

(2)水分比(moisture ratio,简称 MR)^[8]。计算公式如下:

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

式中： M_t 为 t 时刻的干基含水率； M_e 为干燥平衡时的干基含水率； M_0 为初始时刻的干基含水率。

(3) 干燥速率 (drying rate, 简称 DR)^[9]。计算公式如下：

$$DR = \frac{M_1 - M_2}{t_2 - t_1}$$

式中： M_1 为干燥到 t_1 时刻的干基含水率； M_2 为干燥到 t_2 时刻的干基含水率。

1.4.4 干燥动力学模型拟合 本研究选取了 4 种较为经典的果蔬薄层数学模型,与马铃薯片热泵干燥试验中的数据进行拟合,模型方程如表 5 所示。

表 5 干燥的数学模型

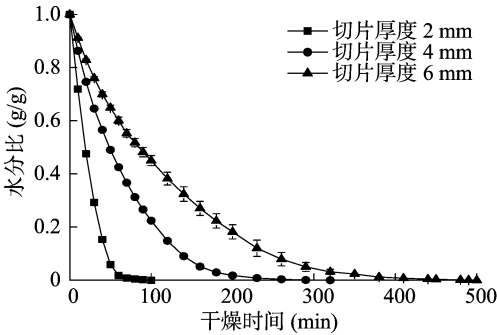
序号	模型名称	模型方程
1	Lewis ^[10]	$MR = \exp(-kt)$
2	Page ^[11]	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis ^[12]	$MR = a \exp(-kt)$
4	Wang and Singh ^[13]	$MR = 1 + at + bt^2$

2 结果与分析

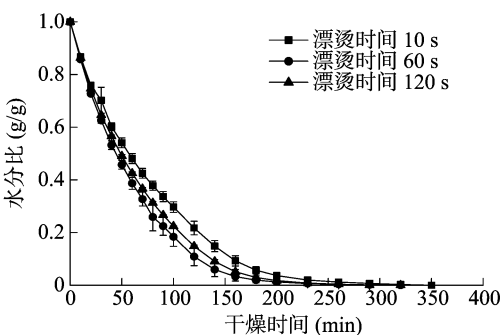
2.1 干燥试验结果

2.1.1 马铃薯切片厚度、漂烫时间、干燥温度对干燥的影响

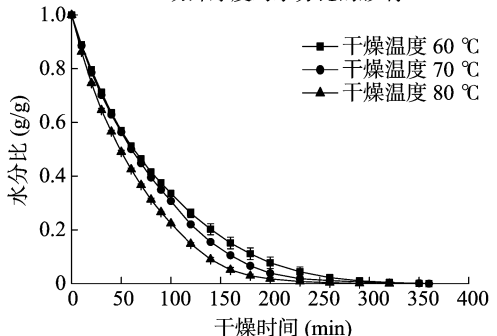
由图 1-a、图 1-d 可以看出,在漂烫时间、干燥温度和马铃薯品种恒定的条件下,随着切片厚度的降低,样品烘至恒质量的时间大大减少,且干燥速率随马铃薯片切片厚度的降低而提高。说明马铃薯片越薄,单位体积的表面积增大,马铃薯片与热空气的对流换热面积增大;马铃薯片的厚度减小,内部传递阻力减小,水分扩散速率增大,从而使得传热速率提高,最终提高干燥速率,减少达到恒质量所需时间。这与李丽等对山药干燥的研究结果^[14]、盛金凤等对香蕉片的研究结果^[15]一致。但在实际生产过程中,马铃薯片厚度过薄,会导致干燥后的马铃薯片变形卷曲严重,影响其外观;马铃薯片厚度过厚,会使得干燥时间显著增加,褐变严重,不利于干燥的最终结果,对油炸后马铃薯片的口感也会有影响,详见图 2。综上所述,马铃薯片的厚度以 4 mm 较为合适。



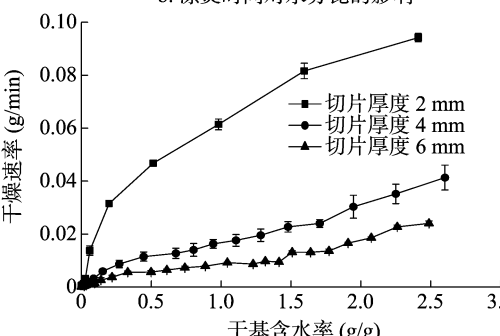
a. 切片厚度对水分比的影响



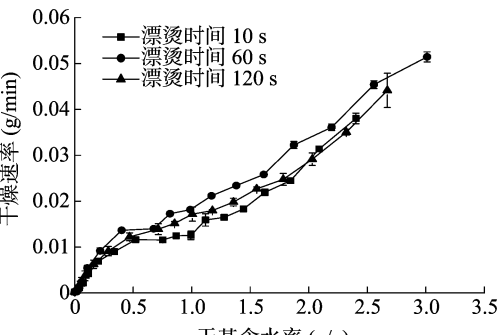
b. 漂烫时间对水分比的影响



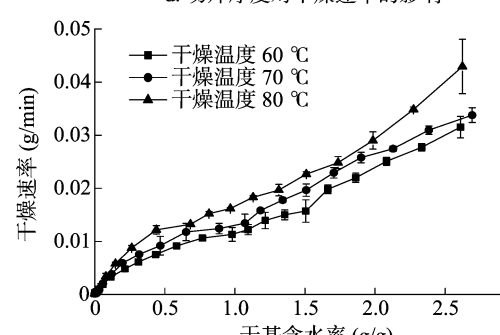
c. 干燥温度对水分比的影响



d. 切片厚度对干燥速率的影响



e. 漂烫时间对干燥速率的影响



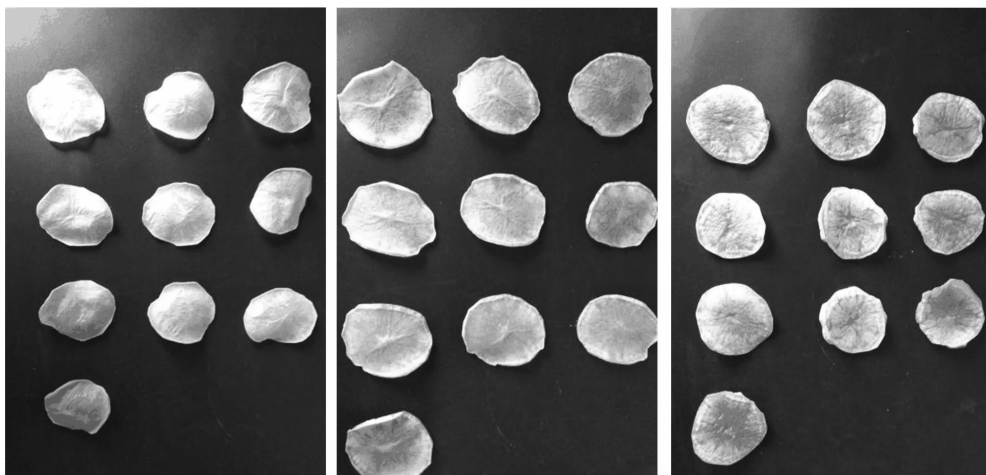
f. 干燥温度对干燥速率的影响

图1 不同切片厚度、漂烫时间、干燥温度下的干燥曲线与不同切片厚度、漂烫时间、干燥温度的干燥速率曲线

由图 1-b、图 1-e 可以看出,在切片厚度、干燥温度和马铃薯品种恒定的条件下,马铃薯片烘至恒质量所需时间排序为漂烫时间为 60 s < 漂烫时间为 120 s < 漂烫时间为 10 s,漂烫时间为 60 s 时的干燥速率最大。漂烫主要是为了灭酶、去糖、杀菌,使马铃薯片部分淀粉糊化,改善原料的组织结构,提高马铃薯片的坚挺性。漂烫还可以改善其口感,增强马铃薯片细胞膜的通透性,加快脱水速率。但是,漂烫时间太长会使薯片细胞被破坏程度加大,组织硬度呈下降的趋势,对马铃薯片的口感会有很大的影响^[16-18]。这与在南瓜片干燥中,Filho 等发现的漂烫会导致水分蒸发流速增加、干燥速度更快^[19]以及 Workneh 等发现的在干燥前对南瓜片进行漂烫处理后能够明显减少干燥时间、增加干燥速率的研究结果^[20]一

致。漂烫时间过短时,达不到淀粉糊化的效果;漂烫时间过长时,会使原料组织结构破坏严重,口感变差。综上所述,漂烫时间为 60 s 时,干燥速率最快,达到恒质量的时间最短,既能保持马铃薯片的口感,又能缩短热泵干燥的时间。

由图 1-c、图 1-f 可看出,在切片厚度、漂烫时间和马铃薯品种恒定的条件下,干燥温度越高,样品烘至恒质量的时间越短,且干燥速率随干燥温度的增加而提高。这与杨韦杰等研究热泵干燥对荔枝干燥动力学的影响^[21]、吴雪辉等研究热泵干燥对油茶籽楂片的影响^[22]相比,得出了类似结果,即干燥温度越高,传热速率越快,干燥物料中的水分含量下降得越快,水分扩散的速率越快,样品达到恒质量的时间就越短。综上所述,在本试验中,80 ℃ 适合马铃薯片的干燥。

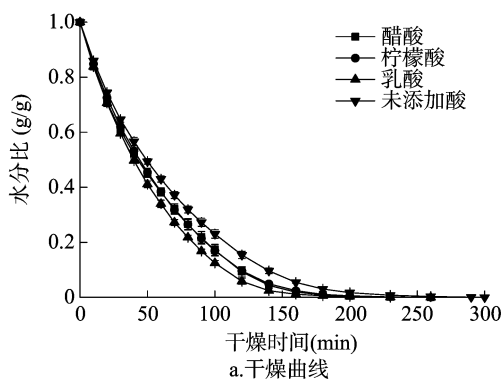


从左到右切片厚度依次为 2、4、6 mm

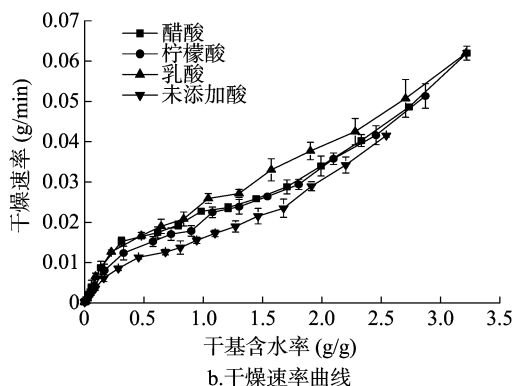
图2 不同切片厚度下热风干燥的马铃薯片

2.1.2 酸处理对干燥的影响 由图 3 可看出,在马铃薯品种、切片厚度、漂烫时间、干燥温度恒定的条件下,添加酸可以使马铃薯片达到恒质量的时间减少,醋酸和柠檬酸达到恒质量的时间相当,添加乳酸达到恒质量的时间最短;添加酸可以提高马铃薯片的干燥速率,添加乳酸的干燥速率比添加醋酸和柠檬酸的快。酸处理下干燥速率的加快与漂烫使干燥速率

加快的原因相似,可能由于添加酸改变了马铃薯片细胞的通透性,使得细胞内的水分丧失加快,从而使得达到恒质量的时间减少。同时,添加酸对马铃薯片有护色的作用^[23],能够改善马铃薯片的外观。综上所述,添加乳酸对马铃薯片的干燥较为有利。



a.干燥曲线



b.干燥速率曲线

图3 不同酸处理的干燥曲线与干燥速率曲线

2.1.3 盐处理对干燥的影响 由图 4 可看出,在马铃薯品种、切片厚度、漂烫时间、干燥温度恒定的条件下,添加盐可以使马铃薯片达到恒质量的时间减少,添加碳酸钠、氯化钙、氯化钠 3 种盐的马铃薯片达到恒质量的时间相当,添加氯化钠的马铃薯片的干燥速率比添加碳酸钠、氯化钙的干燥速率稍

快,达到恒质量的时间略短。添加盐不仅可以减少干燥至恒质量的时间,还可以改善马铃薯片的质地^[24],减少油炸过程中产生的丙烯酰胺^[25]。综上所述,添加氯化钠对马铃薯片的干燥效果较好,且添加氯化钠可以给马铃薯片带来一定的咸味,增加了马铃薯片的风味。

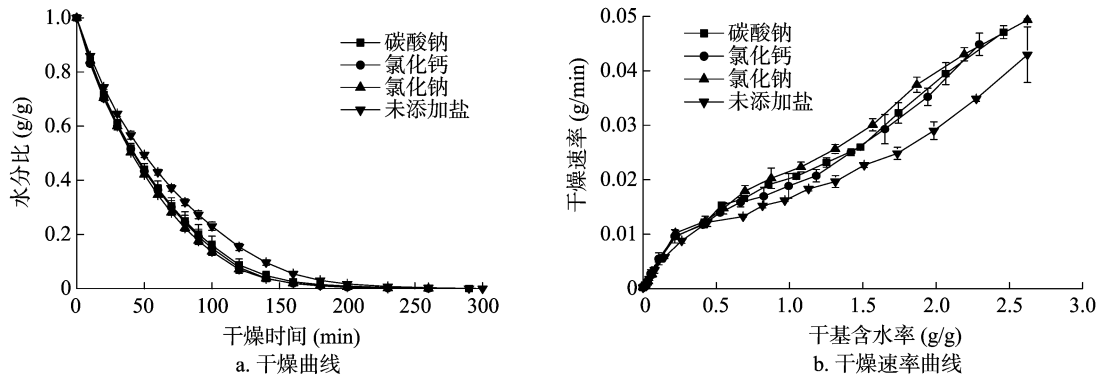


图4 不同盐处理的干燥曲线与干燥速率

2.1.4 不同马铃薯品种对干燥的影响 由图 5 可看出,在切片厚度、漂烫时间、干燥温度恒定的条件下,马铃薯片达到恒质量的时间、干燥速率与马铃薯品种有一定的关系。在达到恒质量的时间方面,费乌瑞它 < 荷兰豆 < 大西洋,费乌瑞它的干

燥速率高于荷兰豆、费乌瑞它。不同马铃薯品种的淀粉、还原糖、水分含量都有所不同,因此不同马铃薯品种的热风干燥速率也有所不同。费乌瑞它的干燥速率比大西洋、荷兰豆高,可能是由费乌瑞它的淀粉含量较少、水分流动较为容易造成的。

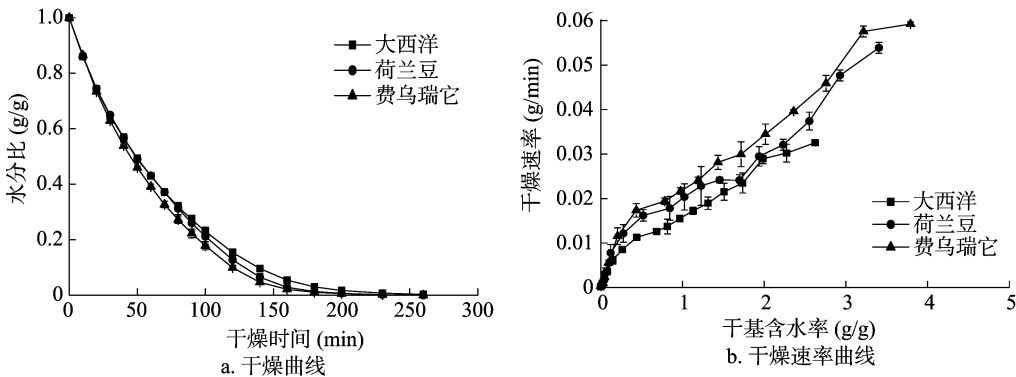


图5 不同马铃薯品种的干燥曲线与干燥速率

2.2 干燥动力学模型拟合

为了描述马铃薯片在热泵干燥过程中的脱水规律,本研究选取了 4 种不同的干燥模型对其干燥曲线进行经验模型的回归分析,并取 R^2 作为方程接受程度的评价指标。 R^2 越接近 1,则拟合精度越优,各方程对马铃薯片热泵干燥过程的平均拟合效果如表 6 所示。

用乳酸处理、氯化钠处理的 k 值最大。以上结果与图 1 至图 5 得出的规律相同。在 Page 模型拟合中, R^2 值在 0.994 6 ~ 0.999 9 之间变化,标准差 s 小于 2%,说明模型拟合的结果较好,因此选择 Page 模型用于描述马铃薯片热泵干燥过程中的脱水规律。

3 结论

本研究结果表明,马铃薯的切片厚度、漂烫时间、干燥温度对于马铃薯片的干燥特性都有影响。干燥速率随着马铃薯切片厚度的增加而减慢,随着漂烫时间、干燥温度的增加而增加。酸处理和盐处理均对马铃薯片的干燥特性有影响,可能由于添加酸和盐后,改变了马铃薯片细胞的通透性,使得细胞内的水分丧失加快,达到恒质量的时间减少,干燥速率加快。

当马铃薯切片厚度为 2 mm 时,马铃薯片的干燥速率最快,但切片厚度为 4 mm 时,马铃薯片的形状最佳;当漂烫时间为 60 s 时,干燥速率最快,达到恒质量的时间最短,口感最适合;当干燥温度为 80 ℃ 时,干燥速率最快;马铃薯品种费乌瑞它的干燥速率最快;添加乳酸、氯化钠使马铃薯片的干燥速率提高得最多。

本研究确定了符合马铃薯片热泵干燥的动力学模型为 Page 模型,Page 模型可以准确地预测马铃薯片热风干燥的过程。

表 6 干燥数学模型拟合结果

序号	模型名称	模型方程	R^2
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	0.990 2 ± 0.014 5
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	0.998 4 ± 0.000 1
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	0.995 2 ± 0.000 5
4	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	0.977 5 ± 0.033 5

由表 6 可知,大部分经验模型均达到较高的拟合度,Page 模型回归结果的平均 R^2 最大,为 0.998 4。表 7 为 Page 模型对马铃薯片在不同条件下干燥曲线的参数模拟结果,其中 k 表示干燥常数,可以看出,温度、漂烫时间、干燥温度及马铃薯品种对 k 值有影响。在对马铃薯片进行酸处理与盐处理后, k 值也受到了影响。在不同的切片厚度下,切片厚度为 2 mm 时的 k 值最大;在不同的漂烫时间下,漂烫时间为 60 s 时的 k 值最大;当干燥温度不同时,干燥温度为 80 ℃ 时的 k 值最大;当马铃薯品种为费乌瑞它时, k 值最大;当进行酸处理与盐处理时,

表 7 Page 模型参数拟合结果

干燥条件 (品种,切片厚度,漂烫温度,漂烫时间)	模型方程	模型参数		R^2 (%)	s (%)
		k	n		
2 mm,80 ℃,120 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.017 0	1.315 7	99.97	1.220 0
4 mm,80 ℃,120 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.011 8	1.056 6	99.86	1.329 5
6 mm,80 ℃,120 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.005 7	1.142 6	99.84	1.158 5
4 mm,80 ℃,10 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.011 6	1.070 4	99.95	0.784 3
4 mm,80 ℃,60 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.012 5	1.088 8	99.99	0.495 1
4 mm,80 ℃,120 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.012 4	1.043 5	99.89	1.144 5
4 mm,60 ℃,120 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.004 3	1.211 3	99.55	1.019 7
4 mm,70 ℃,120 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.005 4	1.207 3	99.76	1.697 3
4 mm,80 ℃,120 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.010 6	1.055 6	99.85	1.334 0
大西洋,4 mm,80 ℃,120 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.007 6	1.221 7	99.46	1.468 0
荷兰豆,4 mm,80 ℃,120 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.009 4	1.137 4	99.78	1.673 0
费乌瑞它,4 mm,80 ℃,120 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.009 9	1.131 7	99.71	1.651 0
醋酸,4 mm,80 ℃,120 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.011 2	1.156 3	99.98	1.267 1
柠檬酸,4 mm,80 ℃,120 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.011 1	1.153 7	99.96	0.758 5
乳酸,4 mm,80 ℃,120 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.012 6	1.118 9	99.83	1.347 1
碳酸钠,4 mm,80 ℃,120 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.013 8	1.087 1	99.99	0.877 5
氯化钙,4 mm,80 ℃,120 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.013 6	1.123 9	99.95	1.151 8
氯化钠,4 mm,80 ℃,120 s	$MR = \exp(-kt^n)$	0.014 1	1.087 1	99.95	1.394 5

参考文献:

- [1] Litaladio N B, Castaldi L. Potato: the hidden treasure[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2009, 22(6): 491–493.
- [2] Anonymous. Report of the dietary guidelines advisory committee dietary guidelines for americans, 1995[J]. Nutrition Reviews, 2010, 53(12): 376–379.
- [3] 赵丹丹, 彭郁, 李 莱, 等. 枸杞热泵干燥室系统设计与应用[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊1): 359–365, 373.
- [4] 李昌宝, 孙 健, 辛 明, 等. 番木瓜热泵干燥特性及数学模型的研究[J]. 轻工科技, 2018(2): 1–4.
- [5] 张国治, 聂林林, 王安建, 等. 香菇干燥中热泵法优势研究[J]. 粮食加工, 2017(3): 42–45.
- [6] 龚 丽, 刘清化, 刘 军, 等. 柠檬热泵干燥工艺参数优化[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(7): 79–83.
- [7] 姬长英, 蒋思杰, 张 波, 等. 辣椒热泵干燥特性及工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 296–302.
- [8] Thakor N J, Sokhansanj S, Sosulski F W, et al. Mass and dimensional changes of single canola kernels during drying[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 40(3): 153–160.
- [9] Doymaz I. Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices[J]. Journal of Food Science and Technology, 2012, 49(6): 760–766.
- [10] Lewis W K. The rate of drying of solid materials[J]. Indian Chemical Engineer, 1921, 13(5): 427–432.
- [11] Page G E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers[D]. Purdue University, 1949.
- [12] Henderson S M. Grain drying theory I, temperature effect of drying coefficient[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1961: 6.
- [13] Balasubramanian S, Sharma R, Gupta R K, et al. Validation of drying models and rehydration characteristics of betel (*Piper betel* L.) leaves[J]. Journal of Food Science and Technology, 2011, 48(6): 685–691.
- [14] 李 丽, 孙 健, 盛金凤, 等. 山药热泵干燥特性及数学模型的研究[J]. 现代食品科技, 2014(10): 212–217.
- [15] 盛金凤, 李 丽, 孙 健, 等. 香蕉片热泵干燥特性及数学模型研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(20): 89–94.
- [16] 郭 楠, 叶金鹏, 林亚玲, 等. 漂烫对速冻薯条品质及淀粉糊化度的影响研究[J]. 食品科技, 2014(9): 186–191.
- [17] 江 敏. 速冻马铃薯新产品和新工艺的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
- [18] 张 群. 马铃薯脆片真空油炸前预处理工艺的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007.
- [19] Filho L M, Frascareli E C, Mauro M A. Effect of an edible pectin coating and blanching pretreatments on the air-drying kinetics of pumpkin (*Cucurbita moschata*) [J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(5): 859–871.
- [20] Workneh T S, Zinash A, Woldetsadik K. Blanching, salting and sun drying of different pumpkin fruit slices[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(11): 3114–3123.
- [21] 杨韦杰, 唐道邦, 徐玉娟, 等. 荔枝热泵干燥特性及干燥数学模型[J]. 食品科学, 2013, 34(11): 104–108.
- [22] 吴雪辉, 龙 婷, 王泽富, 等. 油茶籽热泵干燥特性及模型的研究[J]. 中国粮油学报, 2018(1): 111–117.
- [23] 邓清云, 刘海杰, 张 芊. 酸性电解水对鲜切马铃薯酶促褐变抑制效果研究[J]. 食品科技, 2012(10): 35–38.
- [24] 晏绍庆, 华泽钊, 刘宝林, 等. CaCl_2 预处理、漂烫和冻结对马铃薯质地特性影响的研究[J]. 食品工业科技, 2000(4): 20–22.
- [25] Pedreschi F, Granby K, Risum J. Acrylamide mitigation in potato chips by using NaCl [J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 3(6): 917–921.