

正交试验优化苹果片低氧热泵干燥工艺

罗磊, 支梓鉴, 刘云宏, 朱文学, 张玉先, 朱敏, 王强
(河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 以红富士苹果作为实验材料, 以氮气为干燥介质置换空气降低设备中氧体积分数, 研究了温度、切片厚度、氧体积分数和风速对苹果片热泵干燥速率、*L*值、VC和总酚含量等指标的影响, 正交试验结果表明: 最佳干燥工艺参数为干燥温度55℃、切片厚度5 mm、氧体积分数5%, 干燥后苹果片水分含量为5.83%, *L*值为83.01, VC含量为3.68 mg/100 g, 总酚含量为68.26 mg/100 g。

关键词: 苹果片; 低氧; 热泵干燥

Optimization by Orthogonal Array Design of Heat Pump Drying Process for Apple Slices under Oxygen Condition

LUO Lei, ZHI Zi-jian, LIU Yun-hong, ZHU Wen-xue, ZHANG Yu-xian, ZHU Min, WANG Qiang
(College of Food and Bioengineering, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: This study was conducted to dry fresh-cut red Fuji apple slices using nitrogen as drying medium to reduce the oxygen concentration in a heat pump dryer. The influences of drying temperature, slice thickness, oxygen concentration and air speed on drying rate, brightness, vitamin C (VC) content and total phenol content were investigated. The experiment results of orthogonal array design showed that the optimal drying parameters were as follows: temperature, 55℃; slice thickness, 5 mm; and oxygen volume fraction, 5%. The moisture content of apple slices dried under these conditions was 5.83%, brightness value 83.01, VC content 3.68 mg/100 g, and total phenol content 68.26 mg/100 g.

Key words: apple slice; lowering oxygen; heat pump drying

中图分类号: TS255.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2014)04-0001-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201404001

苹果营养丰富, 富含黄酮、绿原酸等酚类物质, 具有抗氧化等保健功能, 是老幼皆宜的水果之一^[1-2]。近年来苹果片的研究日益受到重视。Mariscal等^[3]研究发现低温真空油炸的苹果片, 含油量低, 且外观颜色较好。Tregunno等^[4]将澳洲青苹果切片, 用高浓度糖液脱水至原来含水量的50%后进行真空冷冻干燥, 扫描电镜观察发现糖液处理苹果片的结构得到保护, 干燥产品硬度小。韩清华等^[5]报道了微波真空干燥苹果脆片的最佳工艺, 孟庆辉等^[6]研究了用气体射流冲击干燥苹果片的技术。但是, 采用糖液脱水会提高含糖量, 掩盖苹果片自身的香味, 且不符合“低糖”的健康理念, 而油炸脱水不可避免的存在含油量的问题。冷冻干燥和真空干燥虽能得到较好品质的产品, 但能耗较大、成本偏高; 传统热风干燥所得产品色泽、风味和营养均不能令人满意^[7-9]。

热泵干燥是利用干燥介质(空气或其他气体)进行闭路循环, 进行介质除湿的干燥形式, 由于干燥温度较低, 且闭路循环过程能采用惰性气体作为干燥介质,

从而实现低氧干燥, 适用于热敏性和氧敏性物料^[10-12]。Hawladar等^[13-14]的研究表明: 与空气干燥介质相比, N₂和CO₂热风干燥的苹果亮度*L**和色度角*h**值显著增加, 番木瓜的色泽甚至好于冷冻干燥, O'Neill等^[15]报道了惰性介质干燥的苹果块制品孔隙率高、复水快、制品色泽好、VC保留率高。因此, 本实验采用氮气降低干燥室内干燥介质的氧浓度, 以干燥速率、表观亮度(*L*值)、VC和总酚含量为指标, 对苹果片热泵干燥工艺进行研究。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

红富士苹果 洛阳大张超市; 硫酸、草酸等试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

GHRH-20型热泵干燥机 广东省农业机械研究所干燥设备制造厂; 2800UV/VIS紫外-可见分光光度计 尤

收稿日期: 2013-07-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31171723)

作者简介: 罗磊(1976—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为食品干燥品质控制、食品营养成分与活性。

E-mail: 13623896431@139.com

尼柯(上海)仪器公司; X·rite Color I5色差仪 美国爱色丽公司; 200S电子分析天平 美国塞多利斯公司。

1.3 方法

1.3.1 苹果片的预处理

将苹果去皮、去核后, 切成指定厚度, 面积为20 mm×20 mm苹果片, 放入质量分数为1%的NaCl水溶液中, 备用。

1.3.2 苹果片的干燥

打开热泵干燥机电源, 设置鼓风机风速和干燥温度, 达到预定温度后, 打开氮气通气阀通入氮气, 使干燥室内氧体积分数达到指定值, 关闭氮气通气阀, 放入待干燥苹果片, 间隔为1 cm; 干燥过程中每隔20~30 min打开氮气通气阀3~5 min, 保持干燥室内氧气体积分数达所需标准, 直至干燥完成。

1.3.3 干燥速率测定^[16]

干燥速率定义为单位时间内在单位干燥面积上汽化的水分量 W , 用符号 u 表示, 按公式(1)计算:

$$u=W/St \quad (1)$$

式中: u 为干燥速率/(kg/(m²·h)); W 为汽化水分量/kg; S 为干燥面积/m²; t 为干燥所需时间/h。

1.3.4 理化指标的测定

色差: 利用色差仪测定干燥后每个样品的Lab色度^[17], 并以 L 值(亮度值)可表示样品褐变程度, L 值越高, 褐变程度越低, 苹果片品质越好; VC含量: 采用2,4-二硝基苯肼比色法^[18]; 总酚含量: 采用没食子酸-福林酚法^[19]。

1.4 正交试验指标的归一化计算^[20]

正交试验以干燥速率、色泽、VC含量和总酚含量为指标, 需对正交试验各指标数据进行归一化处理, 按式(2)计算各指标观测值的评分值, 然后按照加权平均的方法综合指标值, 权值分配均为0.25。

设各个指标的最大值 $y_{j\max}$ 对应 $y_{j\max}'=100$ 分, 最小值 $y_{j\min}$ 对应 $y_{j\min}'=0$ 分。

$$y_{ij}' = (y_{ij} - y_{j\min}) (y_{j\max}' - y_{j\min}') / (y_{j\max} - y_{j\min}) \quad (2)$$

式中: y_{ij}' 是指标观测值的评分值。

2 结果与分析

2.1 温度对苹果片热泵干燥的影响

取厚度为5 mm的苹果片, 在40、45、50、55、60℃条件下进行热泵干燥, 风速为1.5 m/s, 氧体积分数为21%。干燥后的样品, 测定其干燥速率、 L 值、VC和总酚含量, 研究温度对苹果片热泵干燥工艺的影响。

2.1.1 温度对干燥速率和 L 值的影响

由图1可以看出, 干燥速率随温度的升高而加快, 60℃干燥条件下的干燥速率约为40℃时的2倍, 但考虑到较高温度对苹果片外观色泽和营养成分的影响, 温度的上限设置为60℃^[21]。

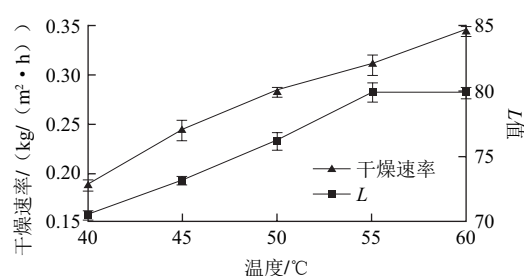


图1 温度对干燥速率和 L 值的影响

Fig.1 Effect of drying temperature on drying rate and L value

由图1还可以看出, 当温度为40℃时, 苹果片 L 值最低, 这可能是较低温度导致干燥速率较低, 干燥时间较长, 酶促褐变产生的褐色素积累较多所致。随着干燥温度的升高, 干燥速率增加, 干燥时间缩短, 苹果片表面水分以较快速度蒸发, 酶促褐变受到抑制, 褐变程度逐渐降低。当温度升至55℃后, L 值略有下降, 这可能是由于干燥温度达到苹果多酚氧化酶最适催化温度区间, 酶促褐变有所加快所致^[22]。

2.1.2 温度对VC和总酚含量的影响

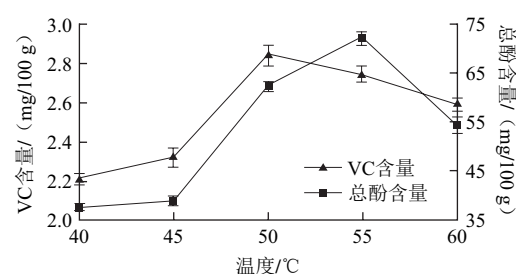


图2 温度对VC和总酚含量的影响

Fig.2 Effect of drying temperature on the contents of vitamin C and total phenolic compounds

由图2分析可得, 当温度为40℃时, 干燥速率低, 长时间的干燥使VC含量较低, 随着温度的升高, VC含量逐渐增加, 但温度超过50℃后, VC含量又有所下降, 这可能是较高温度加快VC氧化所致。

由图2还可以看出, 随温度的升高苹果片总酚含量先增加后下降。当温度为40℃时, 干燥时间较长, 酚类物质损失较多; 在干燥温度逐渐上升至55℃过程中, 干燥时间缩短, 总酚含量逐渐增高, 但温度达到60℃时, 总酚含量又明显降低, 可能是达到苹果多酚氧化酶最适反应温度区间, 酶促褐变有所加快所致。

由以上分析可知, 提高干燥温度, 能够缩短干燥时间, 避免苹果片的表面褐变和营养损失, 但过高的温度将促进酶促和非酶促氧化的发生, 因此选择50、55、60℃作进一步的正交试验研究。

2.2 切片厚度对苹果片热泵干燥的影响

将厚度为3、5、7、9 mm的苹果片进行热泵干燥, 干燥条件为温度60℃、风速1.5 m/s、氧体积分数21%。

2.2.1 切片厚度对干燥速率和L值的影响

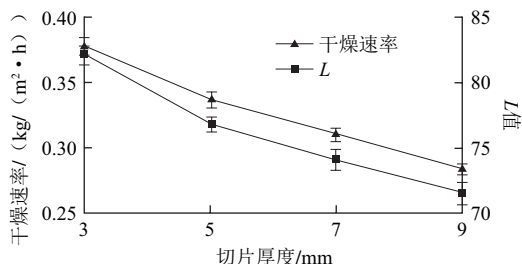


图3 切片厚度对干燥速率和L值的影响

Fig.3 Effect of slice thickness on drying rate and L value

由图3可以看出,其他条件相同时,干燥速率随切片厚度的增加而下降。这是由于切片厚度越小,比表面积越大,与空气接触面积越大,物料升温越快,且物料内部水分迁移距离越短。

从图3还可看出,其他条件恒定时,随切片厚度的增加,L值逐渐降低,这是由于水分可作为化学反应进行的介质,促进酶促褐变的进行,因此干燥时间越长,苹果片表面L值越低。

2.2.2 切片厚度对VC和总酚含量的影响

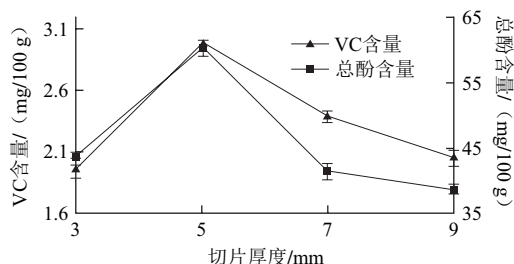


图4 切片厚度对VC和总酚含量的影响

Fig.4 Effect of slice thickness on the contents of VC and total phenolic compounds

从图4可以看出,VC含量随切片厚度的增加,先增加后下降。当切片厚度3 mm时,苹果片比表面积最大,因此干燥过程中氧气更容易充分进入细胞组织中,引发VC的氧化损失。当切片厚度为5 mm时,比表面积减小,降低了苹果片内部VC氧化速率。当切片厚度超过7 mm后,干燥时间增长,较高温度条件下的长时间氧化,反而造成VC含量逐渐下降。

由图4还可以看出,总酚含量随切片厚度的增加,先增加后下降,此变化规律与VC含量相似:当切片厚度3 mm时,苹果片比表面积较大,酚类物质易与空气接触发生酶促褐变,当厚度增至5 mm时,较厚的植物组织降低了内部酚类物质与空气接触的几率,因此总酚含量较高,当厚度超过7 mm以后,干燥时间的延长又造成总酚含量的逐渐下降。

以上研究证实,切片厚度的增加将降低干燥速率,并使苹果片表面褐变程度加重,但对于VC和总酚厚度为

5 mm时损失最小,因此选择切片厚度为4、5、6 mm作进一步研究。

2.3 风速对苹果片热泵干燥的影响

将厚度为5 mm的苹果片,在0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m/s风速条件下进行热泵干燥,温度为60℃,氧体积分数为21%,并测定干燥后样品的各项指标。

2.3.1 风速对干燥速率和L值的影响

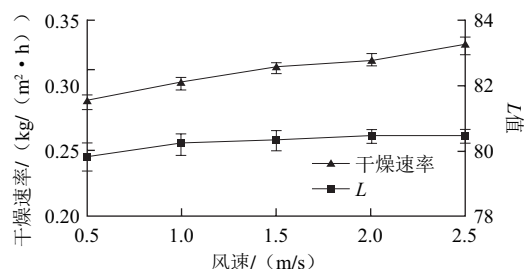


图5 风速对干燥速率和L值的影响

Fig.5 Effect of air speed on drying rate and L value

由图5可知,当风速升高时,干燥速率也增加,但增加很少,0.5 m/s条件下的干燥速率与2.5 m/s条件下相差仅0.04 kg/(m²·h)。

由图5还可以看出,苹果片L值随风速的增加而增加,此干燥过程中,干燥时间相差不大,酶促反应程度相近,所以L值随风速增加而略微增加。

2.3.2 风速对VC和总酚含量的影响

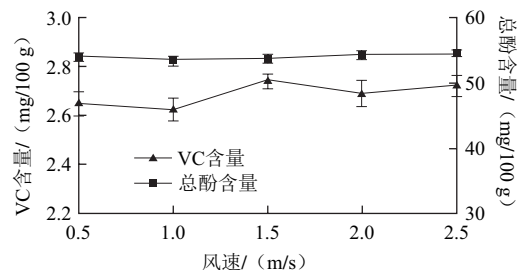


图6 风速对VC和总酚含量的影响

Fig.6 Effect of air speed on the contents of VC and total phenolic compounds

由图6可以看出,VC含量在2.628~2.742 mg/100 g范围内波动,没有出现较大差别,因此风速对VC影响不显著。

由图6还可看出,总酚含量在53.50~54.60 mg/100 g之间变化,没有出现较大差别,因此风速对总酚影响不显著。

由于风速对苹果片干燥速率影响很小,对L值、VC和总酚含量影响不显著,因此不作为正交试验研究的因素,后续试验中风速均设定为1.5 m/s。

2.4 氧体积分数对苹果片热泵干燥的影响

将厚度5 mm的苹果片,在氧体积分数为5%、10%、15%、21%条件下分别进行热泵干燥,温度为60℃,风速为1.5 m/s。干燥后的样品,测定其干燥速率、色度、VC和总酚含量,研究氧体积分数对它们的影响。

2.4.1 氧体积分数对干燥速率和L值的影响

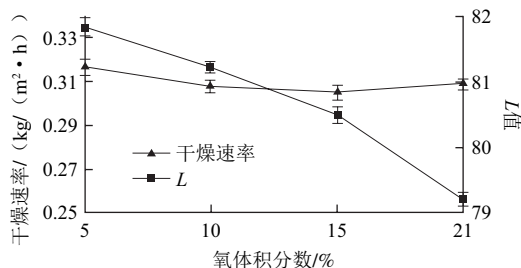


图7 氧体积分数对干燥速率和L值的影响

Fig.7 Effect of oxygen concentration on drying rate and L value

由图7可知,随氧体积分数的降低,其干燥速率变化不明显,差异小于 $0.01 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,因此氧体积分数对苹果片干燥速率影响不显著。

从图7还可看出,随着氧体积分数的增加,苹果片L值逐渐下降,在15%~21%范围内降低尤为显著,这是由于较低的氧气浓度抑制了酶促褐变的发生,减少褐色素的生成,从而使L值升高,得到较好表观色泽的干燥苹果片^[23]。

2.4.2 氧体积分数对VC和总酚含量的影响

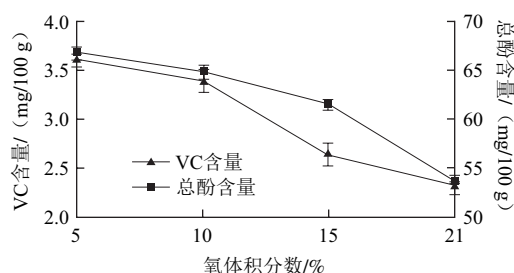


图8 氧体积分数对VC和总酚含量的影响

Fig.8 Effect of oxygen volume fraction on the contents of VC and total phenolic compounds

由图8可以看到,热泵干燥过程中,随氧体积分数的增加,VC含量逐渐下降,可见较低的氧体积分数能够减少VC的氧化损失。

从图8还可以看出,酚类物质含量随氧体积分数的升高而降低,其变化规律与亮度L值(图7)相似,由于酚类物质氧化损失的主要途径为酶促褐变,而氧体积分数的降低能够抑制苹果片中酚类物质的酶促氧化,减少了褐变产物的产生,提高了苹果片表观亮度。

从以上分析能够得出如下结论,氧体积分数对苹果片干燥速率无显著影响,但能够明显降低VC和酚类物质的氧化损失,进而改善苹果片表面色泽,因此充氮低氧能够明显降低苹果片干燥过程中的色泽劣变和营养成分损失,且氧体积分数越低效果越好,但由于设备的限制,不能对5%以下氧体积分数的效果进行研究,因此选择5%、7.5%、10%氧体积分数做进一步正交试验。

2.5 苹果片氮气源低氧热泵干燥工艺正交试验

采用 $L_9(3^4)$ 正交表对干燥速率、L值、VC和总酚含量进行综合研究,正交试验结果及极差分析见表1所示,其方差分析结果见表2。

表1 $L_9(3^4)$ 正交试验结果与极差分析Table 1 Experimental results of $L_9(3^4)$ orthogonal array design and range analysis

试验号	A温度/℃	B切片厚度/mm	C氧体积分数/%	D空列	平均速率/(kg/(m²·h))	L值	VC含量/(mg/100g)	总酚含量/(mg/100g)	加权值
1	50	4	5	1	0.226	85.03	2.574	61.273	54.78
2	50	5	7.5	2	0.204	83.33	2.736	63.178	50.08
3	50	6	10	3	0.193	80.88	1.866	48.733	9.34
4	55	4	7.5	3	0.285	85.87	3.210	61.749	75.23
5	55	5	10	1	0.267	82.57	3.330	55.241	53.90
6	55	6	5	2	0.242	83.76	3.612	66.194	72.61
7	60	4	10	2	0.375	80.97	2.034	46.510	34.13
8	60	5	5	3	0.334	81.85	3.708	62.543	74.84
9	60	6	7.5	1	0.278	79.12	2.814	59.051	40.47
k_1	38.07	54.72	67.41	49.72					
k_2	67.25	59.61	55.26	52.28					
k_3	49.81	40.81	32.46	53.14					
极差	29.18	18.8	34.95	3.42					
较优水平	A_2	B_2	C_1						

表2 正交设计方差分析表

Table 2 Analysis of variance for the experimental results of orthogonal array design

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	显著水平
温度	1 293.513	2	646.756	68.092	*
切片厚度	570.796	2	285.398	30.047	*
氧体积分数	1 889.411	2	944.706	99.461	**
空列(误差)	18.997	2	9.498		
总和	3 772.716				

注: **. 差异极显著 ($P < 0.01$); *. 差异显著 ($P < 0.05$); $F_{0.01(2,8)} = 99$, $F_{0.05(2,8)} = 19$ 。

从表2可以看出,综合指标下最佳的干燥工艺参数为当温度55℃、切片厚度5 mm、氧体积分数5%,影响因素顺序:氧体积分数>温度>切片厚度。

2.6 验证实验

根据正交试验结果,选取最优水平,即温度55℃、切片厚度5 mm、氧体积分数5%进行验证实验,在此条件下平均干燥速率为 $0.275 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,干燥时间为4.5 h,干燥所得苹果片水分含量为5.83%,L值为83.01,VC含量为3.68 mg/100 g,总酚含量为68.26 mg/100 g,此时的加权值为77.91。

3 结论

苹果片氮气源低氧热泵干燥工艺最佳参数为:干燥温度55℃、切片厚度5 mm、氧体积分数5%,此条件下

平均干燥速率为 $0.275 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，干燥时间为4.5 h，干燥后苹果片水分含量为5.83%， L 值为83.01，VC含量为 $3.68 \text{ mg}/100 \text{ g}$ ，总酚含量为 $68.26 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 。最终产品呈淡黄色，外形完整，有一定皱缩，具有苹果特有的香气，口感酥脆，滋味酸甜。

本研究将氮气源低氧热泵干燥技术用于苹果片的干燥，解决了苹果片干燥过程中外观色泽劣变和营养物质损失的难题，其工艺过程简单，设备要求及运行成本低，具有较高的应用推广价值，该研究成果也为热敏性、氧敏性物料的干燥提供了新的思路。

参考文献：

- [1] 丁秀玲, 张京芳, 韩明玉. 不同品种苹果化学成分及抗氧化活性比较[J]. 食品科学, 2011, 32(21): 41-47.
- [2] KHANIZADEH S, TSAO R, REKICA D, et al. Polyphenol composition and total antioxidant capacity of selected apple genotypes for processing[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2008, 21(5): 396-401.
- [3] MARISCAL M, BOUCHER P. Comparison between atmospheric and vacuum frying of apple slices[J]. Food Chemistry, 2008, 107: 1561-1569.
- [4] TREGUNNO N B, GOFF H D. Osmodehydrofreezing of apples: structural and textural effects[J]. Food Research International, 1996, 29(5/6): 411-419.
- [5] 韩清华, 李树君, 毛志怀, 等. 微波真空干燥条件对苹果脆片感官质量的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 130-134.
- [6] 孟庆辉, 肖旭霖, 吕晓东. 苹果片气体射流冲击干燥工艺的优化[J]. 农产品加工: 学刊, 2008(11): 56-59.
- [7] 邓红, 王小娟. 不同干燥方法对苹果片品质的影响[J]. 食品科技, 2007, 32(2): 84-87.
- [8] BILBAO-SAINZ C, ANDRES A, CHIRALT A, et al. Microwaves phenomena during drying of apple cylinders[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(1): 160-170.
- [9] 毕金峰, 方芳, 公丽艳, 等. 苹果干燥技术研究进展[J]. 农产品加工: 创新版, 2010(3): 4-7.
- [10] AKTAS M, CEYLAN I, YILMAZ S. Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer[J]. Desalination, 2009, 239(1/3): 266-275.
- [11] 李远志, 郑春明, 陈照传, 等. 热泵干燥技术在脱水蔬菜加工中的应用研究[J]. 食品工业科技, 1998, 19(5): 7-8.
- [12] 石启龙, 薛长湖, 赵亚, 等. 热泵变温干燥对竹荪鱼干燥特性及色泽的影响[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 83-86.
- [13] HAWLADER M N A, PERERA C O, TIAN Min. et al. Drying of guava and papaya: impact of different drying methods[J]. Journal of Drying Technology, 2006, 24(1): 77-87.
- [14] HAWLADER M N A, PERERA C O, TIAN Min. Properties of modified atmosphere heat pump dried foods[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(1): 392-401.
- [15] O' NEILL M B, RAHMAN M S, PERERA C O, et al. Colour and density of apple cubes dried in air and modified atmosphere[J]. International Journal of Food Properties, 1998, 1(3): 197-205.
- [16] 徐刚, 顾霞. 胡萝卜热泵远红外联合干燥工艺研究[J]. 食品与发酵工程, 2009, 18(6): 4-6.
- [17] 胡庆国, 张慙, 杜卫华, 等. 不同干燥方式对颗粒状果蔬品质变化的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2006, 25(2): 265-268.
- [18] GB/T 5009.86—2003 蔬菜、水果及其制品中总抗坏血酸的测定: 荧光法和2,4-二硝基苯肼法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1986.
- [19] 徐辉艳, 孙晓东, 张佩君, 等. 红枣汁中总酚含量的福林法测定[J]. 食品研究与开发, 2009, 30(3): 126-127.
- [20] 张仲欣, 杜双奎. 食品实验设计与数据处理[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2011: 43-44.
- [21] 李敏霞, 赵雷, 马一太. CO_2 热泵干燥胡萝卜性能的研究[C]// 工程热力学与能源利用. 大连: 中国工程热物理学会, 2009: 32-36.
- [22] 孙蕾. 果实褐变机理及研究进展[J]. 经济林研究, 2002, 6(2): 91-94.
- [23] 刘斌, 林启训, 陆燕, 等. 金针菇充 N_2 降 O_2 干燥优化试验[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2004, 3(1): 113-116.