

红外辐射干燥胡萝卜切片结构特性研究

张丽丽¹ 王相友¹ 魏忠彩¹ 孙传祝²

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255049)

摘要: 在不同干燥条件下进行胡萝卜切片红外辐射干燥试验,对表观密度、孔隙率、体积比和体积收缩系数进行了研究。结果表明:表观密度与辐射距离、辐射功率成反比,孔隙率随着含水率的减小而增大,样本厚度与孔隙率成反比,辐射距离与孔隙率成正比,辐射功率在一定范围与孔隙率成正比,超过该范围成反比;为确定适合胡萝卜收缩率和干基含水率比的数学模型,分别基于二次多项式利用线性最小二乘法、指数方程利用非线性最小二乘法对试验数据进行了拟合,得出二次多项式模型拟合较优,能够更好地预测红外干燥过程中胡萝卜收缩率和干基含水率比之间的关系。

关键词: 胡萝卜; 红外辐射干燥; 结构特性

中图分类号: S226.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)07-0246-06

Structural Properties Research of Infrared Radiation Drying for Carrot Slices

Zhang Lili¹ Wang Xiangyou¹ Wei Zhongcai¹ Sun Chuanzhu²

(1. School of Agricultural and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China

2. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Infrared drying experiments were carried out under different drying conditions. The apparent density, porosity, volume ratio variation and volume shrinkage of the dehydrated samples were researched. The experimental results showed that changes of apparent density were proportional to sample thickness in the initial drying process, and the apparent density was inversely proportional to radiation distance and radiation power. The final apparent density of dehydrated carrot was between $1.01 \times 10^3 \sim 1.71 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. The apparent density of fresh carrot slices was $1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. With the decrease of water content, the apparent density increased, and the maximum value was $1.71 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. The porosity increased with the decrease of moisture content. Sample thickness was proportional to porosity inversely, and the radiation distance was proportional to porosity, but when the radiation power exceeded a certain range the porosity would decrease. In the whole drying process, the range of the carrot's porosity was between 0.24 and 0.62. The sample thickness and radiation power had a significant effect on volume ratio variation and volume shrinkage. The two order polynomial was fitted with the test data by the linear least square method, and the exponential equation was fitted by the nonlinear least square method based on Matlab 7.0. The maximum determination coefficient R^2 of two order polynomial was 0.996 6, the minimum value was 0.976 2. But the maximum determination coefficient R^2 of exponential equation was 0.960 1, the minimum value was 0.901 7. The fitting results showed that two order polynomial model was a good fit to predict the relationship between shrinkage and the dry basis ratio of carrot more accurately.

Key words: carrot; infrared radiation drying; structural properties

收稿日期: 2016-04-15 修回日期: 2016-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(31271908)

作者简介: 张丽丽(1975—),女,讲师,博士,主要从事农产品加工与贮藏工程研究,E-mail: grass0606@126.com

通信作者: 王相友(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品加工技术及装备研究,E-mail: wxy@sdut.edu.cn

引言

干燥过程中物料的物理、化学变化会对最终产品(干制品)品质产生影响,物料干制品品质研究成为近年来农产品干燥领域的热点之一。干制品品质是指干燥后农产品的质量特性,主要包括:结构特性(密度、孔隙率、孔隙尺寸、真密度)、感官特性(颜色、表观、风味、滋味、香气)、营养特性(维生素、蛋白质等)及复水特性(复水速率、复水能力)等^[1-3]。合适的含水率、化学分解反应最小、能维持产品结构和成分、获得所需颜色均是农产品干燥的要求。

农产品干制品的结构特性参数有表观密度、真实密度和孔隙率等,密度和孔隙率等决定干制品的纹理特征和质量特性,确定这些参数有助于进一步了解农产品物料的物理结构,便于控制干制品的口感和外观品质^[4]。因此,系统研究农产品的结构参数对于提升农产品干制品品质有着重要参考价值。

国内外学者在不同干燥方式下对部分农产品进行了相关结构特性的研究,包括利用热风干燥、冷冻干燥、渗透干燥以及联合干燥的方式对榅桲(木梨)、苹果、土豆、胡萝卜和栗子等进行研究^[5-8]。本文对胡萝卜切片红外辐射干燥过程中的表观密度、孔隙率以及体积收缩变化进行研究,以探讨胡萝卜干燥过程中红外吸收能力对胡萝卜干制品品质的影响。

1 试验

1.1 表观密度的测定

将胡萝卜(品种:三红萝卜)切制成直径为(33±0.5) mm 的切片。每次将 50 片胡萝卜切片作为待测样本,均匀置于料盘中。使用山东理工大学干燥实验室自行设计的红外干燥装置^[9-11]进行了大量的试验,在此基础上,从最佳干燥参数范围内选择参数,如表 1 所示。

表 1 试验参数			
Tab.1 Experimental parameters			
编号	样本厚度/mm	辐射功率/(kW·m ⁻²)	辐射距离/mm
1	3	2.7	150
2	5	2.7	150
3	7	2.7	150
4	5	2.7	200
5	5	2.7	100
6	5	2.1	150
7	5	3.3	150

表观密度的测量步骤如下^[12]:选取样品,先称量其质量 M_b ,然后将样品快速放入处于融化状态的

石蜡中,随后迅速取出,置于调好刻度的量筒中,测定样品体积变化量,计算出样品体积 V_b ,利用公式 $\rho_b = M_b/V_b$,计算出样品的表观密度 ρ_b 。

1.2 确定真密度和孔隙率

真密度是不包括物料内部所有孔隙的密度,由样品的质量和真实体积所决定。孔隙率是表示物料松散结构特性的物理量,可由物料的表观密度和真密度通过公式推导出,即

$$\varepsilon = 1 - \rho_b/\rho_p \tag{1}$$

式中 ε ——孔隙率

ρ_b ——表观密度,kg/m³

ρ_p ——真密度,kg/m³

利用真密度仪(STEREOPYCNOMETER,美国康塔仪器有限公司)进行采集,可得出物料内部不包含气体成分的真实体积,然后利用体积密度公式计算出样品的真密度。此仪器的标准分析是在 117.215 kPa(1.156 781 3 标准大气压)下进行的,所以物料强度足以保证在分析过程中物料的孔隙不发生闭合,确保分析结果的精确性。

1.3 确定体积收缩率的体积比

农产品物料在干燥过程中一个重要的物理变化是外观体积的减小,水分的散失和加热使得细胞结构发生变化,导致结构尺寸变小。农产品物料的收缩影响了干制品品质,形状改变、体积收缩和表面硬度增加均会直接影响外观品质。

体积比计算式为^[13]

$$V_R = \frac{V_t}{V_0} \tag{2}$$

式中 V_0 ——样本的初始体积,m³

V_t —— t 时刻的样本体积,m³

为了考察胡萝卜在干燥过程中收缩的情况,引入了体积收缩系数 S_B ,公式为

$$S_B = 1 - \frac{V_t}{V_0} \tag{3}$$

在每次试验中,取 3 个样本的体积平均值作为最终值。

2 试验结果分析

2.1 表观密度分析

从图 1 可以看出,辐射功率为 2.7 kW/m²、辐射距离为 150 mm 时,不同样本厚度条件下得到的干制品的表观密度差别较大。样本厚度为 3 mm 时,表观密度最大,为 1.71×10³ kg/m³;当样本厚度为 7 mm 时,表观密度在样本含水率高于 20% 之前总体趋向较为平缓,含水率低于 20% 之后表观密度增加趋势稍加明显,最终值为 1.15×10³ kg/m³;在样本

厚度为 5 mm 时表观密度最小,为 $1.11 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,原因应是样本在较薄的情况下,被切割的表面细胞组织遭破坏的比例较大,样本组织变形较大,导致较薄的样本表观密度较大。从图 1 可以看出,表观密度随着含水率减小而增大,鲜胡萝卜切片样本的初始密度在 $1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,与水的密度接近。

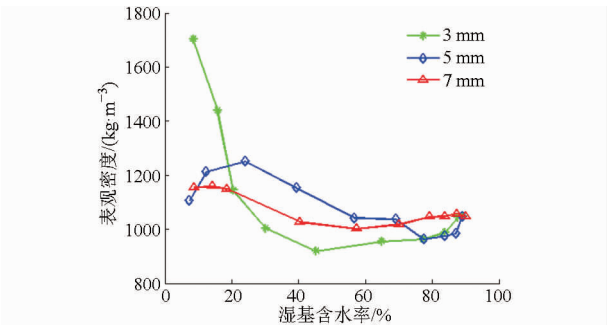


图 1 不同样本厚度下的表观密度变化曲线
Fig. 1 Changing curves of apparent density under different sample thicknesses

从图 2 可以看出,在辐射功率为 2.7 kW/m^2 、样本厚度为 5 mm 时,不同辐射距离下得到的干制品表观密度也有一定差别。辐射距离为 100 mm 时表观密度最大,为 $1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,而幅射距离为 150 mm 时表观密度最小,为 $1.11 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,原因应是在辐射距离较近时,物料表层温度和内部温度存在的温度差较大,外层水分急剧蒸发,而内部水分蒸发需要一定的时间,所以导致样本表层细胞壁组织和内部细胞壁组织产生的应力大小不均,导致临界部分细胞壁组织发生断裂,使表观密度变大。

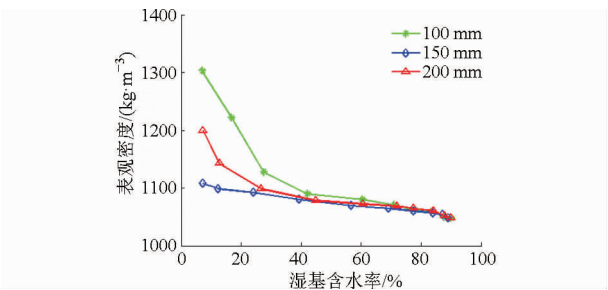


图 2 不同辐射距离下的表观密度变化曲线
Fig. 2 Changing curves of apparent density under different infrared distances

从图 3 可以看出,在辐射距离为 150 mm、样本厚度为 5 mm 时,不同辐射功率下得到的干制品表观密度也有差别。辐射功率为 2.1 kW/m^2 (物料附近温度 55°C) 表观密度最大,为 $1.45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;辐射功率为 2.7 kW/m^2 (物料附近温度 65°C) 时表观密度为 $1.12 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;在辐射功率为 3.3 kW/m^2 (物料附近温度 75°C) 时得到的表观密度最小,为 $1.01 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。辐射功率小时物流表观密度大,是因为辐

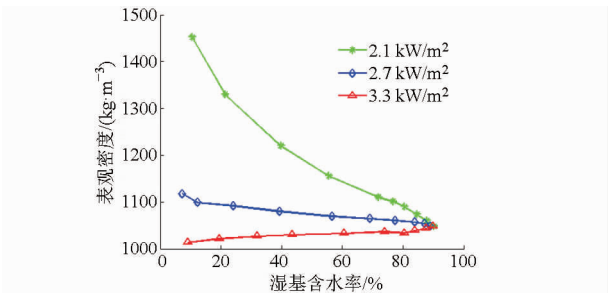


图 3 不同辐射功率下的表观密度变化曲线
Fig. 3 Changing curves of apparent density under different infrared powers

射功率密度较小时,物料表面水分减少时内部水分蒸发却较慢,细胞壁变形较大,导致内部细胞壁组织应力较大,使内部组织结构发生了坍塌所致。

从图 1~3 可以看出,干制胡萝卜最终表观密度介于 $1.01 \times 10^3 \sim 1.71 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 之间。鲜胡萝卜切片样品的表观密度为 $1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,随着含水率降低,密度增加。

在干燥初期,细胞组织有弹性,当水分蒸发外迁、细胞收缩时弹性仍然保持,细胞壁没有受到破坏。随着干燥过程的进行,细胞组织的结构改变导致细胞框架刚性变强,弹性变差,逐渐形成孔隙,如果应力不均,还会产生坍塌,所以随着样品内部水分的减少,表观密度均呈现变大的趋势。

2.2 孔隙率变化分析

通过公式(1)计算出孔隙率,孔隙率与含水率的关系如图 4~6 所示。

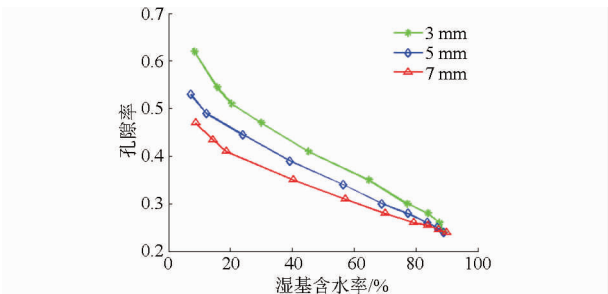


图 4 不同样本厚度下的孔隙率变化曲线
Fig. 4 Changing curves of porosity under different sample thicknesses

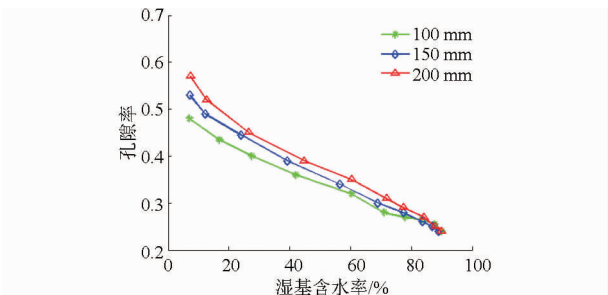


图 5 不同辐射距离下的孔隙率变化曲线
Fig. 5 Changing curves of porosity under different infrared distances

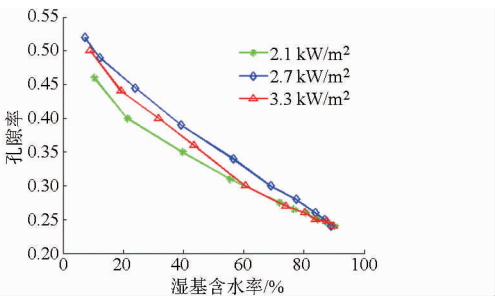


图 6 不同辐射功率下的孔隙率变化曲线
Fig. 6 Changing curves of porosity under different infrared powers

通过图 4 ~ 6 可以看出,物料的孔隙率与样本厚度成反比,样本厚度越小,孔隙率越大;辐射距离对孔隙率的影响也较明显,辐射距离越大,孔隙率越大;辐射功率为 3.3 kW/m²时,孔隙率为 0.50,辐射功率为 2.7 kW/m²时,孔隙率为 0.52,辐射功率为 2.1 kW/m²时,孔隙率只有 0.46,所以利用不同的功率密度对样本进行加热时,未呈现出规律性变化趋势。

在整个干燥过程中,胡萝卜孔隙率范围在 0.24 ~ 0.62 之间;研究表明,真空干燥胡萝卜的孔隙率在 0.1 ~ 0.5 之间,热风干燥在 0.1 ~ 0.3 之间^[1]。由此可见,红外干燥的孔隙率优于热风干燥,与真空干燥相近。

2.3 体积收缩系数与体积比分析

体积比、体积收缩系数与含水率之间的关系如图 7 ~ 12 所示,由此可以看出,在含水率为 4.5% ~ 14.2% 时,体积收缩系数为 85.8% ~ 95.5%,这与文献[14 - 16]的研究数据相符。

由图 7 ~ 12 可以看出,样本厚度和辐射功率对体积比变化的影响相比于辐射距离更为明显。体积比与样本厚度成正比;辐射功率在 3.3 kW/m²时,体积比比辐射功率为 2.1 kW/m²时值大,其原因是辐射功率较大时,物料的温度较高,导致物料表面形成硬壳,而造成体积收缩量变小。通过图 9 可以看出,辐射距离对体积比的影响较小。

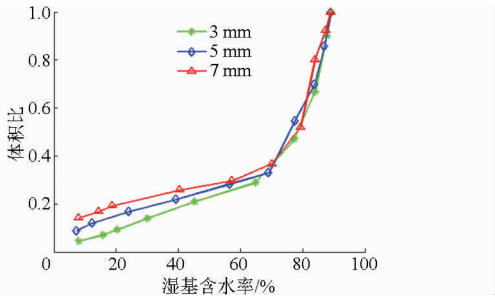


图 7 不同样本厚度下的体积比变化曲线
Fig. 7 Changing curves of volume ratio under different sample thicknesses

在干燥初期,样品为线性收缩,但是随着含水率的降低,呈非线性收缩状态。在干燥过程中,随着水

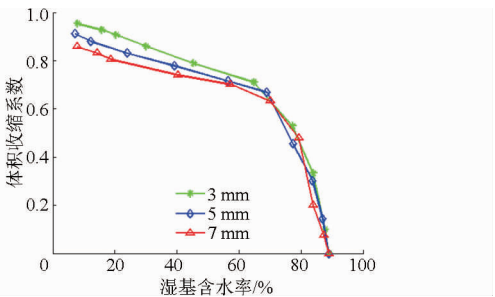


图 8 不同样本厚度下的体积收缩系数变化曲线
Fig. 8 Changing curves of volume shrinkage under different sample thicknesses

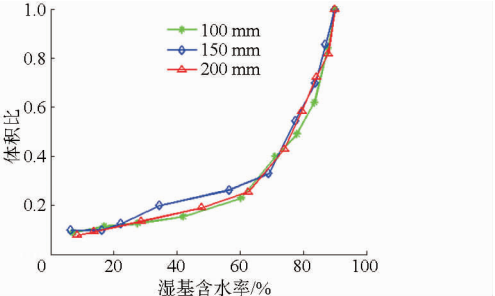


图 9 不同辐射距离下的体积比变化曲线
Fig. 9 Changing curves of volume ratio under different infrared distances

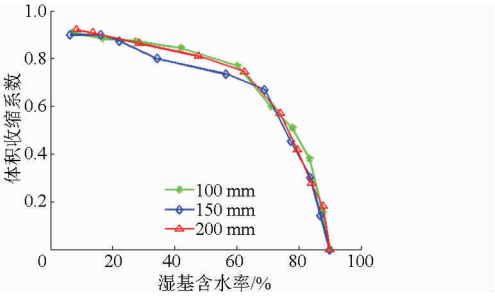


图 10 不同辐射距离下的体积收缩系数变化曲线
Fig. 10 Changing curves of volume shrinkage under different infrared distances

分的减少,物料收缩程度变大,水分散失量越大,收缩应力也越来越大,当干燥物料中水分与收缩量一致时,物料内部达到机械平衡。这种现象发生在物料含水率较低时,主要是由于固体基质的流动性降低所造成。固体基质的流动性与物料物理状态有关,高流动性与高弹态的粘弹性有关,而低流动性与玻璃态有关。当含水率较高时,干燥物料处于高弹态,收缩完全与水分的流失有关,物料体积收缩与含水率线性相关。当物料含水率降低时,物料从高弹态转变到玻璃态,这时体积收缩速率以及收缩程度就明显降低。这种现象可以解释当含水率不断变化时,样本体积的收缩偏离线性^[17 - 19]。

当物料从高弹态不断向玻璃态转变时,物料的刚性增加,抵消了毛细管力,因此阻碍了收缩的进一步进行,这时样本内部形成孔隙。

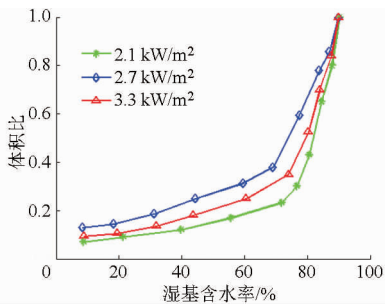


图 11 不同辐射功率下的体积比变化曲线

Fig. 11 Changing curves of volume ratio under different infrared powers

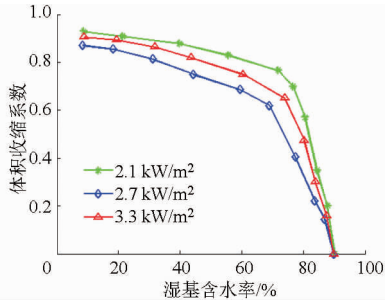


图 12 不同辐射功率下的体积收缩系数变化曲线

Fig. 12 Changing curves of volume shrinkage under different power intensities

收缩率与干基含水率比之间的数学模型为^[14]

$$D_R = k_1 + k_2 X/X_0 + k_3 (X/X_0)^2 \tag{4}$$

$$D_R = k_1 \exp(k_2 X/X_0) \tag{5}$$

式中 D_R ——收缩率,即 V_R
 X ——任意时刻的干基含水率
 X_0 ——初始干基含水率
 $k_1、k_2、k_3$ ——模型参数

基于 Matlab 软件,利用高斯-牛顿算法,利用式(4)和式(5)对试验数据分别进行最小二乘线性和非线性拟合,通过决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 进行评定,确定适合胡萝卜收缩率和干基含水率比的数学模型,从而更好地预测和控制干燥过程。对上述数学模型进行拟合,得到结果如表 2 所示。

通过回归分析结果可以看出,试验中二次多项式回归分析的决定系数 R^2 均比指数方程回归分析的决定系数 R^2 大,均方根误差 RMSE 小,由此表明,相比于指数方程,二次多项式对试验数据拟合精确度更高。

表 2 多项式和指数数学模型数据拟合的决定系数和均方根误差

Tab. 2 Determination coefficients and root mean square errors based on polynomial and exponential models

样本厚度/mm	辐射功率/(kW·m ⁻²)	辐射距离/mm	式(4)		式(5)	
			R^2	RMSE	R^2	RMSE
3	2.7	150	0.996 6	0.023 34	0.960 1	0.070 50
5	2.7	150	0.991 8	0.029 42	0.956 9	0.071 56
7	2.7	150	0.986 2	0.043 53	0.932 9	0.089 61
5	2.7	200	0.976 2	0.057 06	0.923 1	0.095 95
5	2.7	100	0.993 6	0.032 21	0.947 9	0.085 75
5	2.1	150	0.987 3	0.041 55	0.901 7	0.108 3
5	3.3	150	0.994 5	0.027 77	0.949 6	0.785 9

通过表 2 可看出,二次多项式对试验数据拟合的 R^2 最大值是 0.996 6,最小值为 0.976 2;而利用指数函数拟合的结果最大值只有 0.960 1,最小值为 0.901 7;对二次多项式拟合得出的 RMSE 均比指数函数低;综合上述可以看出,利用二次多项式对试验数据(收缩率与干基含水率比)进行线性拟合精度更高。

3 结论

(1)胡萝卜在干燥过程中表观密度和样本厚度成正比,但是随着干燥的进行,样本厚度为 5 mm 时表观密度最小,而样本厚度为 3 mm 时表观密度最大。在整个干燥过程中,表观密度与辐射距离、辐射功率成反比。

(2)孔隙率随着含水率的减小而增大,孔隙率与样本厚度成反比,与辐射距离成正比;在一定范围内辐射功率对孔隙率的影响成正比,但超过一定范围时辐射功率越大反而孔隙率会越小。

(3)在干燥过程中,体积收缩系数与含水率的关系在干燥初期为线性,但是随着含水率的降低,呈非线性状态。表观密度受样本体积收缩的影响明显。分别对二次多项式利用线性最小二乘法、指数方程利用非线性最小二乘法对试验数据进行了拟合,然后对拟合结果进行比较分析,得出二次多项式模型拟合较优,能够更好地预测红外干燥过程中胡萝卜收缩率和干基含水率比之间的关系。

参 考 文 献

1 郑先哲,汪春,贾富国.农产品干燥理论与技术[M].北京:中国轻工业出版社,2009.
2 宋洪波,毛志怀.干燥方法对植物产品物理特性影响的研究进展[J].农业机械学报,2005,36(6):117-121.
SONG Hongbo, MAO Zhihuai. Review of drying methods on the physical characteristics of plant materials[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(6): 117-121. (in Chinese)
3 KROKIDA M K, MAROULIS Z B. Effect of microwave drying on some quality properties of dehydrated products[J]. Drying Technology, 1999, 17(3): 449-466.
4 VASILIKI P O, MAGDALINI K K, VAIOS T K. Structural properties of freeze-dried rice[J]. Journal of Food Engineering, 2011,

- 107(3-4): 326-333.
- 5 BANU K, İSMAIL E, FIGEN K E. Modeling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: the effect of drying method[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(3): 340-349.
- 6 JANOWICZ M, LENART A. Selected physical properties of convection dried apples after HHP treatment[J]. Food Science and Technology, 2015, 63(2): 828-836.
- 7 RATTI C. Shrinkage during drying of foodstuffs[J]. Journal of Food Engineering, 1994, 23(1): 91-105.
- 8 DELGADO T, PEREIRA J A, BAPTISTA P, et al. Shell's influence on drying kinetics, color and volumetric shrinkage of *Castanea sativa* Mill. fruits[J]. Food Research International, 2014, 55(11): 426-435.
- 9 张丽丽, 王相友, 张海鹏. 山药切片红外干燥温度神经网络预测[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 246-249.
ZHANG Lili, WANG Xiangyou, ZHANG Haipeng. Temperature prediction of yam under infrared drying based on neural networks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 246-249. (in Chinese)
- 10 王相友, 张海鹏, 张丽丽, 等. 胡萝卜切片红外干燥特性与数学模型[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 198-202.
WANG Xiangyou, ZHANG Haipeng, ZHANG Lili, et al. Infrared radiation drying characteristics and mathematical model for carrot slices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 198-202. (in Chinese)
- 11 王相友, 林喜娜, 刘强. 果蔬红外干燥在线实时检测系统设[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 136-139.
WANG Xiangyou, LIN Xi'na, LIU Qiang. Design of online measurement system of infrared radiation drying for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 136-139. (in Chinese)
- 12 DISSA A O, DESMORIEUX H, SAVADOGO P W, et al. Shrinkage, porosity and density behaviour during convective drying of spirulina[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(2): 410-418.
- 13 REN Z, CAMPBELL T, YANG J. Investigation on a computer controlled sequential turbo charging system for medium speed diesel engines[C]. SAE Paper 981480, 1998.
- 14 MAYOR L, SERENO A M. Modeling shrinkage during convective drying of food materials: a review[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(3): 373-386.
- 15 MAY B K, PERREÉ P. The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 54(4): 271-282.
- 16 APRAJEETA J, GOPIRAJAH R, ANANDHARAMAKRISHNAN C. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 144(1): 119-128.
- 17 LOZANO J E, ROTSTEIN E, URBICAIN M J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents [J]. Journal of Food Science, 1983, 48(2): 1497-1502, 1553.
- 18 WANG N, BRENNAN J G. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration[J]. Journal of Food Engineering, 1995, 24(1): 61-76.
- 19 ACHANTA S, OKOS M R, CUSHMAN J H, et al. Moisture transport in shrinking gels during saturated drying[J]. Journal of American Institute of Chemical Engineers, 1997, 43(8): 2112-2122.