

黄秋葵热风干燥工艺研究

Study on drying process by hot air for okra

朱 杰 黄阿根 杨振泉 朱映华

ZHU Jie HUANG A-gen YANG Zhen-quan ZHU Ying-hua

甘 甜 吴 冰 陈学好

GAN Tian WU Bing CHEN Xue-hao

(扬州大学食品科学与工程学院, 江苏 扬州 225127)

(College of Food Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127, China)

摘要:为解决黄秋葵规模化种植后的深加工需要,采用 GZ-1 型热风对流干燥试验装置对黄秋葵干制工艺进行研究,并从能量消耗计算公式出发提出了比能量消耗因子,作为能耗的评价因素。试验测定了热风温度、风速、铺放层数对干燥速率的影响,以干燥速率、能耗、色泽指标、多酚含量的变化等参数为评价指标,得出了较优的热风干燥条件为:温度 80 ℃,双层铺放,前期采用风速 1.2 m/s,湿基含水量小于 53% 后降速到 0.8 m/s。该条件下得到的产品色泽指标好,总黄酮、多酚等有效成分损失少,能量利用率高。

关键词:黄秋葵;热风干燥;品质指标

Abstract: In order to seek the further processing technology of Okra after large scale planting, the drying process was researched by using the GZ-1 hot air convection drying apparatus. The specific energy consumption factor was presented from the formula of energy consumption, as an evaluation factor of energy consumption. The effects of different drying air temperature, wind speed and the layer number of laying on drying rate were tested. The drying rate, energy consumption, color and the change of polyphenols content were taken as the evaluation indexes. The optimum hot air drying conditions were temperature 80 ℃, double layer laying, wind speed 1.2 m/s at first, then reducing wind speed to 0.8 m/s when the wet basis moisture content is less than 53%. Under these conditions, the better color index, higher flavonoids and polyphenols content and higher energy efficiency were obtained.

Keywords: okra; hot air drying; quality index

基金项目:江苏省农业科技支撑资助项目(编号:NY2014006);江苏省大学生创新基金资助项目(编号:201511117095X);扬州大学交叉学科建设项目(编号:jcxk2015-14)

作者简介:朱杰,男,扬州大学在读硕士研究生。

通讯作者:黄阿根(1963—),男,扬州大学副教授,硕士。

E-mail: aghuang@yzu.edu.cn

收稿日期:2016-05-06

黄秋葵(*Hibiscus esculentus*. L.),一年生草本植物,别名秋葵、羊角豆、补肾草,为锦葵科(Malvaceae)秋葵属(*Abelmoschus*)^[1],是一种适应于热带、亚热带型的绿色植物。目前,普遍种植于非洲、中北美、亚洲等地区。中国大陆引入较晚,近几年来才将黄秋葵经台湾、日本等地作为栽培品种引进。黄秋葵含有丰富的营养,其可食部分嫩果含有丰富的胡萝卜素、维生素 A、E、C、B₁、B₂,还含有微量元素 K、Ca、P、Mg 等^[2]。此外,嫩果中特有的黏性物质可增强机体抵抗力,助消化促排泄、保护肝脏、增强性功能;同时黄秋葵低糖、低脂可作减肥食品使用,其黏液还可作为脂肪替代物^[3-5]。

国外黄秋葵种植历史长,其研究开发应用较为深入,已由鲜食转向到更广阔的应用,如黄秋葵天然乳化剂、絮凝剂、缓释剂等已应用到食品、医药、环保、化妆品等行业^[6-7]。而黄秋葵成熟期短、易纤维化,这些应用及生长特点使得黄秋葵干制技术具有重要的实用价值。

热风干燥是传统的农副产品工业化干制方法,而黄秋葵由于水分含量多(含水率在 90% 左右),果胶含量较多较难脱水,其干制工艺有其特殊性,工艺条件对品质影响更为苛刻。目前,对于黄秋葵热风干燥的研究^[8-11]主要集中于时间、温度对干燥速率的影响。本研究充分考虑风速、堆放层数等因素对黄秋葵干制效果的影响,并引入相对能耗作为评判标准,更具有实际意义,通过黄秋葵干燥动力学研究、品质分析及能耗因素的对比,进行综合分析比较,得出较为科学的干燥工艺参数,旨在为黄秋葵及其他农产品干燥研究提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

黄秋葵:速冻冷藏原料,江苏扬中广源食品科技集团公司;选择嫩荚完整及良好的黄秋葵,自然解冻,去除表面水分,5 mm 均匀切段,迅速进行试验。

标准样品芦丁:纯度 $\geq 99\%$,上海蓝季生物有限公司;
没食子酸丙酯:AR级,美国Sigma公司。

1.2 主要仪器与设备

数字风速表:DEY-IV型,中国长春仪器四厂;
干燥实验装置:GZ-1型,华南工学院化工机械厂;
真空干燥箱:ZKD-4025型,上海智城分析仪器制造有限公司;
紫外分光光度计:754型,上海菁华科技有限公司;
摇摆式中药粉碎机:DFY-400D400 g型,温岭市林大机械有限公司。

1.3 方法

1.3.1 黄秋葵干基含水量 X 与湿基含水量 w 的测定 干燥称重法。称取一定量原料重量为 G g,于 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下烘至恒重后测得绝干物料重为 G_c g,则干基含水量 X 和湿基含水量 w 可通过式(1)、(2)计算^{[12]254} :

$$X = \frac{G - G_c}{G_c} \quad (1)$$

$$w = \frac{X}{1 + X} \quad (2)$$

式中:

X ——湿物料干基含水量,kg/kg;
 G ——湿物料质量,g;
 G_c ——绝干物料质量,g;
 w ——湿基含水量,%;

1.3.2 黄秋葵黄酮含量测定 采用 $\text{NaNO}_2 - \text{Al}(\text{NO}_3)_3 - \text{NaOH}$ 体系络合化学吸光法^[13]。

1.3.3 黄秋葵多酚含量测定 采用酒石酸亚铁比色法^[14]。

1.3.4 黄秋葵干燥样品色泽指标 黄秋葵干燥切片在香气、味道上无明显差异,其主要差异就是颜色,色泽主要从黄秋葵外表皮色泽和切口端面的颜色进行评价。而切口端面色泽干燥条件不同时,色泽变化更明显,故设计切口端面占色泽权重为 70% ,外表皮占色泽指标权重 30% ,不同分值评价标准见表1。该评价表采用10分制评分法,分别对黄秋葵干燥样品进行评分,两组平行,结果取平均值。

表1 色泽指标评价表

Table 1 Evaluation form of color indexes

色泽指标	评价标准	得分
	绿色如初,色泽鲜艳	>9
	主体绿色,略带墨绿色,色泽不鲜艳	9
外表皮	主体墨绿色,几乎浅棕色	8
(30%)	主体墨绿色,浅棕色约占 20%	7
	墨绿色中浅棕色占约 40%	6
	墨绿色很少,约 80% 浅棕色,甚至黑色	<6
	内囊鲜艳,底色为白色,带浅黄绿色	10
	浅黄绿色,约 20% 内囊呈浅黄色	9
切口端面	浅黄绿色,约 40% 内囊呈浅黄色,少许棕色	8
(70%)	有约 60% 内囊呈浅黄色,约 10% 呈棕色	7
	有约 80% 内囊呈浅黄色,约 20% 呈棕色	6
	约 50% 为棕褐色	5

1.3.5 干燥速率计算 干燥速率 U 为单位时间内单位绝干物料蒸发的水量,试验中通过测定汽化一定质量水所需要的时间,通过式(3)来计算 U ^{[12]267}。

$$U = \frac{\Delta W}{G_c \Delta \tau} \quad (3)$$

式中:

U ——干燥速率,g/(g·s);
 ΔW ——一批操作中汽化的水分量,g;
 G_c ——绝干物料重,g;
 $\Delta \tau$ ——干燥去除水分所需要的时间,s;

1.3.6 比能耗因子分析 干燥过程热量消耗主要是指空气加热消耗的热量 Q ,通过式(4)来分析:

$$Q = W_H C_{pH} (t - t_0) (\tau - \tau_0) \quad (4)$$

式中:

W_H ——单位绝干物料所需的空气流量,kg/h;
 C_{pH} ——湿空气比热,kJ/(kg· $^\circ\text{C}$);
 t ——循环加热空气进口温度, $^\circ\text{C}$;
 t_0 ——环境温度(试验时室温 $20\text{ }^\circ\text{C}$), $^\circ\text{C}$;
 τ ——干燥时间,s;
 τ_0 ——干燥至初始含水量所需时间,s。

为了直观反映不同条件下热量的变化,特别引入比能耗因子的概念,比能耗因子为不同条件与能量消耗的相对比值,从而有:

①热量 Q 与温度 t 正比与 $(t - t_0)(\tau - \tau_0)$,定义 $(t - t_0)(\tau - \tau_0)$ 为温度比能耗因子 E_t ;绘制 E_t 与 X 关系曲线;

②热量 Q 与风速 u 正比与 $u(\tau - \tau_0)$,定义 $u(\tau - \tau_0)$ 为风速比能耗因子 E_u ;绘制 E_u 与 X 关系曲线;

③热量 Q 与层数 n 正比与 $(\tau - \tau_0)/n$,定义 $(\tau - \tau_0)/n$ 为层数比能耗因子 E_n ;绘制 E_n 与 X 关系曲线。

1.3.7 干燥试验设计

(1) 热风温度对干燥速率及品质的影响:在风速 1.2 m/s ,双层铺放条件下,测定 $60, 70, 80, 90\text{ }^\circ\text{C}$ 的热风温度下感官、理化指标,绘制干燥曲线及干燥速率曲线等。

(2) 风速对干燥速率及品质的影响:选择热风温度为 $80\text{ }^\circ\text{C}$,双层铺放条件下,在 $0.8, 1.0, 1.2, 1.3\text{ m/s}$ 风速下,比较感官、理化指标、干燥曲线及干燥速率曲线等规律。

(3) 铺放层数对干燥速率及品质的影响:在热风温度为 $80\text{ }^\circ\text{C}$,风速 1.2 m/s 下,比较不同铺放层数制品的感官、理化指标及干燥曲线及干燥速率曲线等规律。

2 结果与分析

2.1 热风温度对干燥速率及品质的影响

一般蔬菜含水量 w 15% 以后就易于保存^[15],转换为干基含水率即为 $X < 0.1765\text{ kg/kg}$ 。由图1可知,干燥温度 $60, 70, 80, 90\text{ }^\circ\text{C}$ 下达到保存要求各自需要的时间分别为 $230, 173, 138, 127\text{ min}$ 。图2显示温度较低时,随温度升高,干燥速率加快,达到相同的含水率时间越短,进入降速期后,温度影响显著性减小。当温度升至 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 后速度差别不太大。而从表2可以看出,温度对黄酮含量影响不大,多酚含量在 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 时有下降趋势;且温度升高,色泽指标呈下降趋势。从能耗图3可以看出, $90\text{ }^\circ\text{C}$ 能耗最高,而 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥达

表 2 不同温度下理化和色泽指标对比

Table 2 Physical-chemical indexes and color indexes at different temperatures

温度/℃	干燥时 间/min	最终含水 量 $w/\%$	黄酮含量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	多酚含量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	色泽指标		
					外表皮	切口端面	总分
60	230.0	17.59	9.80	11.13	9.0	9.5	9.4
70	173.0	16.71	9.77	11.46	8.5	9.0	8.9
80	155.5	7.55	9.74	11.51	8.5	9.0	8.9
90	163.0	4.54	9.78	10.79	8.0	7.5	7.7

到同样水分,需要的时间长,能耗也增加,超过 70 °C 和 80 °C 的能耗。从品质指标和能耗两方面看,70 °C 和 80 °C 均较优,且差别不大,结合干燥速率看,80 °C 干燥时间更短,综合

上述分析干燥温度取 80 °C 最优。

2.2 风速对干燥速率及品质的影响

由图 4 可知,当物料干燥至含水量 $X=0.1765 \text{ kg/kg}$ 时,在 0.8, 1.0, 1.2, 1.3 m/s 风速下所需时间分别为 210, 185, 142, 129 min。从干燥速率曲线可以看出风速越大干燥速率越快,达到相同含水量所需时间越短。但当风速增至 1.2 m/s 后,干燥速率增加趋缓,而从表 3 看出风速大于 1.2 m/s 后色泽变差,而从活性成分测定数据看,在试验范围内差别不大。结合比能耗因子(图 5)可以看出,当含水量较高时($X > 2 \text{ kg/kg}$),由于风速大,脱水速度快,干燥时间短,消耗热量差别不大。当 $X < 2 \text{ kg/kg}$ 时风速降低,能耗降低(见图 5 局部放大图),脱水速率受内扩散控制,强化外扩散的风速影响减弱,当含水量在 $X < 1 \text{ kg/kg}$ 时($w < 50\%$),风速对干燥降速影响不大(见图 6)。此时采用低速 0.8 m/s 更节约热量。

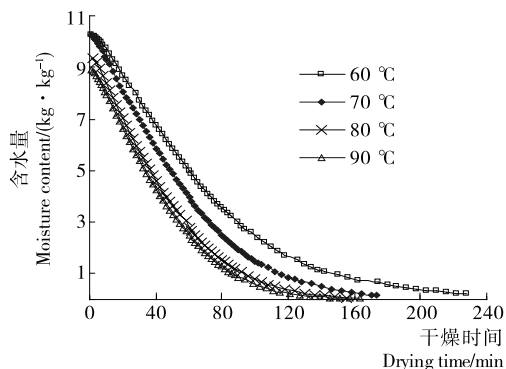


图 1 不同温度下干燥曲线

Figure 1 Drying curves at different temperatures

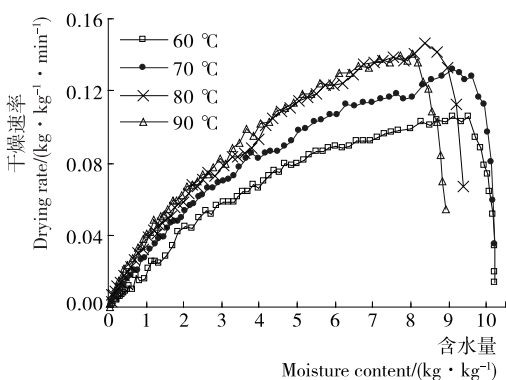


图 2 不同温度下干燥速率曲线

Figure 2 Drying rate curves at different temperatures

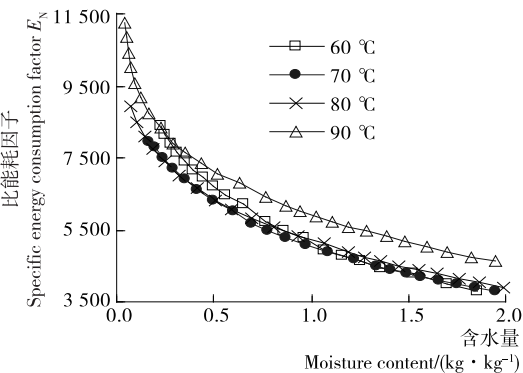


图 3 不同温度下比能耗因子对比关系

Figure 3 Contrast relationship of specific energy consumption factor at different temperatures

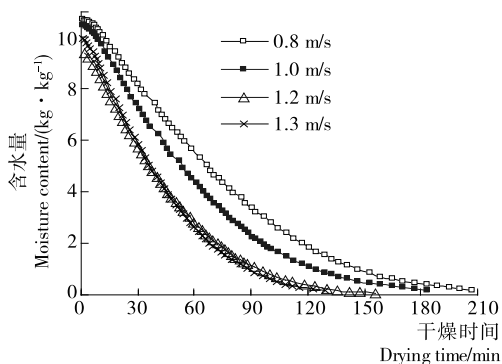


图 4 不同风速下干燥曲线

Figure 4 Drying curves at different wind speeds

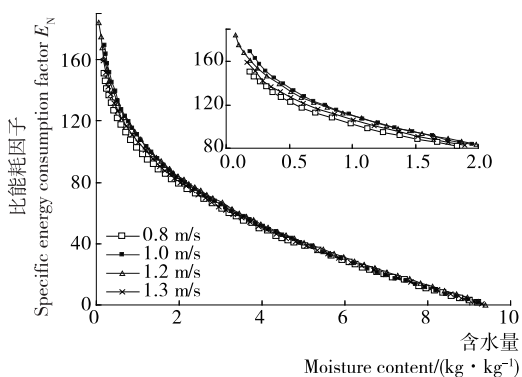


图 5 不同风速下比能耗因子对比关系

Figure 5 Contrast relationship of specific energy consumption factor at different wind speeds

表3 不同风速下理化和色泽指标对比

Table 3 Physical-chemical indexes and color indexes at different wind speeds

风速/ (m · s ⁻¹)	干燥时 间/min	最终含水 量 X/%	黄酮含量/ (mg · g ⁻¹)	多酚含量/ (mg · g ⁻¹)	色泽指标		
					外表皮	切口端面	总分
0.8	207.0	19.32	9.79	11.38	8.5	9.0	9.0
1.0	183.0	19.36	9.73	11.45	8.5	9.0	8.9
1.2	155.5	7.10	9.75	11.50	8.5	9.0	8.9
1.3	129.0	16.81	9.72	11.46	8.5	8.5	8.5

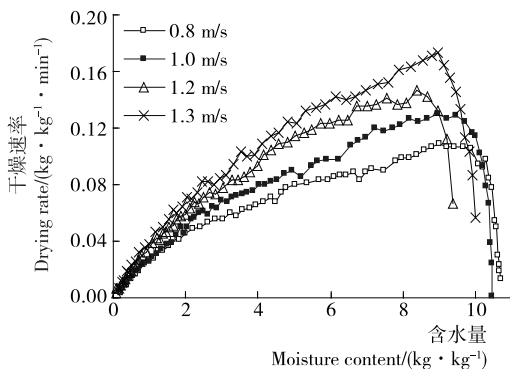


图6 不同风速下干燥速率曲线

Figure 6 Drying rate curves at different wind speeds

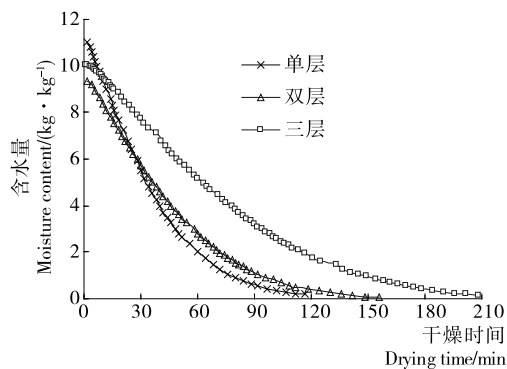


图7 不同层数下干燥曲线

Figure 7 Drying curves at different layers

结合干燥时间、品质指标和能耗等综合因素考虑,干燥最佳风速选择为:当湿基含水率 $w > 50\%$ 时 ($X = 1 \text{ kg/kg}$), 风速采用 1.2 m/s ;含水量 $w < 50\%$ 时,风速降为 0.8 m/s 更节能。

2.3 铺放层数对干燥速率及品质的影响

图7、8反映了干燥温度 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 、干燥风速 1.2 m/s 条件下黄秋葵的铺放层数对干燥速率的影响。实测数据揭示,干燥至含水量 $X = 0.1765 \text{ kg/kg}$ 时,双层和三层条件下时间分别比单层多 21.36% 和 76.27% 。由图8可知,在很宽水分范围内,三者脱水速率差别显著,干燥速率单层 $>$ 双层 $>$ 三层。由表4可知,层数越多色泽指标下降,多酚损失多。干燥层数增多,物料表面气流速度下降明显,湍流程度差,传热传质下降,达到同样含水量所需时间长,从试验过程看,物料在含水量较高,长时间的情况下,酶活较为活跃,多酚损失多,色泽变差明显,这在其他农产品加工中也较为常见^[16]。

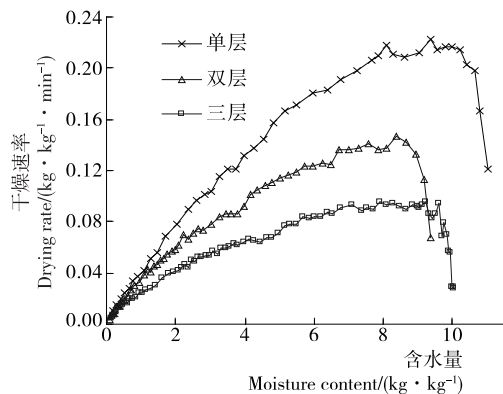


图8 不同层数下干燥速率曲线

Figure 8 Drying rate curves at different layers

而从比能耗因子对比(图9)可看出单层能耗最多,且差别较大,双层和三层能耗差别不大。综合干燥速率、理化指

标、能耗等方面因素考虑,最佳物料干燥层为两层。由于干燥后期物料被干燥收缩,可多床合并干燥,由图9可知,当含水量 $X < 1 \text{ kg/kg}$ ($w < 50\%$) 后,多层比能耗也低。合并成3层或更多,有利于节能。

表4 不同铺放层数下理化和色泽指标对比

Table 4 Physical-chemical indexes and color indexes at different layers

层数	干燥时 间/min	最终含 水量 X/%	黄酮含量/ (mg · g ⁻¹)	多酚含量/ (mg · g ⁻¹)	色泽指标		
					外表皮	切口端面	总分
单层	117.0	17.78	9.82	11.41	9.0	9.5	9.4
双层	155.5	7.15	9.78	11.38	8.5	9.0	8.9
三层	208.0	15.80	9.70	10.22	7.5	8.0	7.9

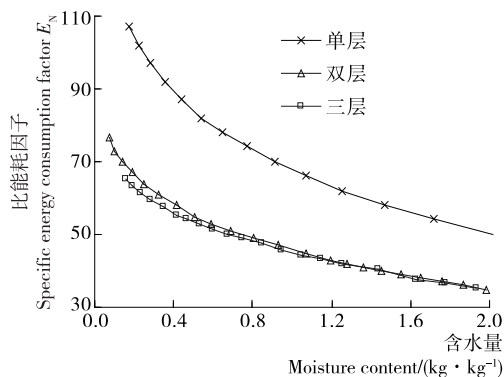


图 9 不同层数下比能消耗因子对比关系

Figure 9 Contrast relationship of specific energy consumption factor at different layers

3 结论

(1) 本试验测定了不同条件下干燥动力学曲线和理化色泽评价指标,提出了干燥比能耗因子的评价指标,使得能量消耗对比数据化,为干燥条件优化的选择提供了客观依据。

(2) 从干燥曲线、干燥速率曲线、理化、色泽指标、比能耗因子进行综合考察得出热风干燥黄秋葵的较优的工艺条件为:采用 80 ℃、双层物料,含水量较高时风速 1.2 m/s,湿基含水率低于 50%后降速为 0.8 m/s,并可多床合并干燥,更为高效节能。

(3) 本试验是在小试装置上完成的,而干燥过程是一个复杂的传质、传热同时进行的过程,空气湿度、风速及温度的均匀性等都会对干燥动力学规律及产品品质、能耗等产生影响,这些都是在工业化放大装置开发中应该考虑的。

参考文献

[1] 祝子坪,李娜.黄秋葵多糖含量检测方法的探索[J].江苏农业科学,2012,40(2):241-242.
 [2] 高振茂,高冠亚,杜丽红.天然佳蔬黄秋葵的营养与食用方法[J].上海蔬菜,2005(2):76-77.
 [3] TILMON R W, ROMANCHIK-CERPOVICZ J E. Feasibility of using okra exudate as a fat replacer in low fat chocolate dropped

cookies[J].Journal of the American Dietetic Association, 2001, 101(9): A-23.

[4] ROMANCHIK-CERPOVICZ J E, COSTANTINO A C, GUNN L H. Sensory evaluation ratings and melting characteristics show that okra gum is an acceptable milk-fat ingredient substitute in chocolate frozen dairy dessert [J]. Journal of the American Dietetic Association, 2006, 106(4): 594-597.
 [5] ROMANCHIK-CERPOVICZ J E, TILMON R W, BALDREE K A. Moisture retention and consumer acceptability of chocolate bar cookies prepared with okra gum as a fat ingredient substitute [J]. Journal of the American Dietetic Association, 2002, 102(9): 1301-1303.
 [6] GHORI M U, ALBA K, SMITH A M, et al. Okra extracts in pharmaceutical and food applications[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 42: 342-347.
 [7] LEE C S, CHONG M F, ROBINSON J, BINNER E. Optimisation of extraction and sludge dewatering efficiencies of bio-flocculants extracted from *Abelmoschus esculentus* (okra)[J]. Environmental Management, 2015, 157: 320-325.
 [8] DOYMAZ I. Drying characteristics and kinetics of okra[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 69(3):275-279.
 [9] WANKHADEA P K, SAPKAT R S, SAPKAL V S. Drying characteristics of okra slices on drying in hot air dryer[J]. Procedia Engineering, 2013, 51: 371-374.
 [10] 卫天业,冯耐红,侯东辉,等.黄秋葵与黄秋葵花干燥工艺研究[J].食品科学,2015(5):309-312.
 [11] 龙映均,刘四新,余敏华,等.椰果果热风干燥工艺优化研究[J].食品与机械,2011,27(4):146-148.
 [12] 夏清,陈常贵.化工原理(下)[M].天津:天津大学出版社,2005.
 [13] 周兰香,黄阿根,谢凯舟,等.化学分光光度与 HPLC 法测定荷叶总黄酮的研究[J].中草药,2002,33(1):35-37.
 [14] 盛丽,任爱梅.天然抗氧化剂茶多酚[J].化学教育,2004,25(11):8-9.
 [15] 王迪轩,何咏梅,唐春华.蔬菜的干制技术(下)[J].湖南农业,2001(11):21.
 [16] 杨玉明,王敏红,黄阿根.茶树花热风干燥工艺研究[J].扬州大学学报,2011,32(2):81-85.
 [24] 王若兰,杨延远,杨志慧.γ射线、电子束处理对玉米品质的影响[J].粮食与饲料工业,2010(3):11-13.
 [25] 吴秋明,叶兴乾,吴丹,徐黎.脂肪酶在食品工业中的应用[J].粮油加工与食品机械,2004(11):72-73.
 [26] 曾洁,李新华,高海燕.直链淀粉含量对玉米淀粉糊化性质的影响[J].沈阳农业大学学报,2006,37(5):740-743.
 [27] 于勇.γ射线辐照对稻谷小麦干燥特性及品质的影响[D].杭州:浙江大学,2006:113-121.
 [28] TOPUZ A, OZDEMIR F. Influences of gamma irradiation and storage on the capsaicinoids of sun-dried and dehydrated paprika [J]. Food Chemistry, 2004, 86(4): 509-515.
 [29] 吕欣,毛忠贵.玉米黄色素研究进展[J].粮油与油脂,2003(4):43-45.

(上接第 114 页)

[20] DIAO En-jie, HOU Han-xue, CHEN Bin, et al. Ozonolysis efficiency and safety evaluation of aflatoxin B₁ in peanuts [J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 55: 519-525.
 [21] SAOUSSEM H, SADOK B, HABIB K, et al. Fatty acid accumulation in the different fractions of the developing corn kernel [J]. Food Chemistry, 2010, 117(3): 432-437.
 [22] SUPRIYA P, SRIDHAR KR, NARESHKUMAR S. Impact of Electron Beam Irradiation on Fatty Acid Profile of Canavalia Seeds [J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 5(3): 1049-1060.
 [23] 罗小虎,王韧,王莉,等.臭氧处理对黄曲霉毒素 B₁ 污染玉米品质影响[J].食品科技,2015,40(9):266-271.