

线性插值优化多指标芦荟—玉米粉挤压膨化工艺

Optimization on extrusion process of aloe-maize blend by linear interpolation method

韦鸿钰 骆少明 朱立学 周玉梅

WEI Hong-yu LUO Shao-ming ZHU Li-xue ZHOU Yu-mei

(仲恺农业工程学院, 广东 广州 510225)

(Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou, Guangdong 510225, China)

摘要:针对芦荟加工过程副产物利用率较低的问题,提出将芦荟叶皮干燥制粉后,加入玉米粉中进行挤压膨化试验,制备芦荟—玉米功能膨化食品。采用单因素及五因素四水平正交试验方法,研究了芦荟添加量、物料含水率、螺杆转速、喂料速度以及膨化温度等工艺参数对膨化产品品质的影响规律;采用线性插值法对芦荟—玉米粉挤压膨化产品指标进行综合评价,得出添加芦荟超微粉体后的混合物料挤压膨化最优工艺参数为:喂料速度 30 r/min,螺杆转速 115 r/min,水分含量 14%,芦荟含量 4%,膨化温度 150 °C。

关键词:芦荟;玉米;挤压膨化

Abstract: Aiming at the problem of low efficiency of by-product in aloe processing, the aloe leaves were dried, crushed and mixed with maize flour, and then were extruded to make aloe-maize health food. Single factor and five factors four levels orthogonal test were used to study the influence of process parameters on characteristics of the extruded products. Linear interpolation method was used to evaluate the products characteristics, and the process parameters were optimized: the feeding rate is 30 r/min, the screw speed is 115 r/min, the water content is 14%, the aloe content is 4% and the extrusion temperature is 150 °C

Keywords: aloe; maize; extrusion

芦荟是药食两用植物,其富含多种生物活性成分,具有杀菌消炎、增强免疫功能等多种功效^[1-2]。美国、日本、韩国等开发了多种芦荟产品,中国芦荟的开发利用起步较晚,利用率较低,主要是将果肉制成饮料等产品^[3-5]。然而,芦荟

叶皮层中芦荟苷、大黄素等蒽醌类活性成分的含量比叶肉组织还要高^[6],但现有芦荟加工企业将芦荟叶皮丢弃,造成大量浪费。

挤压膨化是食品行业常用的加工技术,随着人们对健康营养的关注,各种功能食品不断出现,将功能原料添加至膨化食品中,增强其保健作用具有较好的应用价值^[7-10]。据相关文献^[11-13]报道,膨化原料的组成及粉末粒径对食品的口感、加工工艺及有效成分的释放影响显著。颗粒越小,其口感越好、原料有效成分的生物利用度越高,因而超微粉体原料被广泛应用于食品药品行业。然而这种粉体由于其粒径的减小和比表面积的增加,使其在很多方面的理化性质都有别于传统粉体^[14-19],其挤压膨化工艺与一般粉体亦有显著区别^[20-22]。现有的挤压膨化过程研究均是针对传统物料进行的工艺优化,而对添加芦荟超微粉体的挤压膨化过程研究尚属空白,本研究为解决芦荟加工过程中副产物浪费问题,提出将其干燥制粉,添加至膨化原料中,优化其挤压膨化工艺,制成芦荟功能膨化食品,旨在推动芦荟现代化产业发展。

1 材料与方 法

1.1 试验材料及设备

1.1.1 试验材料

玉米粉:市售;

库拉索芦荟鲜叶:广州健桥芦荟农业有限公司。

1.1.2 试验设备

电子天平:UTP313 型,上海花潮电器有限公司;

电热鼓风干燥箱:GZX-9070 MBE 型,上海鸿讯实业有限公司医疗设备厂;

粉碎机:GY-FS-06 型,江西赣云食品机械有限公司;

球磨机:QM-3SP2 型,上海新诺仪器设备有限公司;

激光粒度检测仪:Mastersizer 2000 型,英国马尔文仪器有限公司;

双螺杆膨化机:SYSLG30-IV 型,济南赛百诺科技开发

基金项目:广东省自然科学基金重点项目(编号:S3020012890);广东省普通高校青年创新人才项目(编号:KA1548817);广东省科技计划项目(编号:201604020060)

作者简介:韦鸿钰,女,仲恺农业工程学院副教授,博士。

通信作者:骆少明(1966—),男,仲恺农业工程学院教授,博士。

E-mail: smluo@gdut.edu.cn

收稿日期:2016-11-08

有限公司;

食品物性分析仪:TMS-Pro型,美国FTC公司;

通用色差计:HP-200型,上海汉普光电科技有限公司。

1.2 样品制备及检测方法

1.2.1 芦荟超微粉制备 将库拉索芦荟鲜叶皮剥下洗净,采用微波低火干燥,每隔5 min取出称重,直至含水率低于5%。烘干后的芦荟干叶皮经粉碎机初级粉碎后,置于球磨机中^[23-24]。根据前期正交旋转试验优化结果,设置转速为504 r/min、球料比为8.62、加工时间为3 h,获得芦荟超微粉平均粒径 D_{50} 为2.241 22 μm 。

1.2.2 芦荟—玉米粉挤压膨化 称取一定量的干燥芦荟粉和玉米粉,按照1.3中试验设计比例混合,加水至其含水率为试验设定值,采用电动搅拌机混合均匀后备用。按照试验方案设定加工工艺参数,将原料喂入双螺杆挤压膨化机中,进行试验。

1.2.3 产品特性检测方法 为减小试验误差,每个工艺参数下各取10段试验样品,每段8 cm进行检测,测试指标为膨化率、色差及硬度。

(1) 膨化率:用游标卡尺测出样品中间段的直径。膨化率按式(1)计算。

$$\sigma = S_{\text{模口}} / S_{\text{样品}}, \quad (1)$$

式中:

σ —— 膨化率,数值越小膨化度越高;

$S_{\text{模口}}$ —— 模口截面积, mm^2 ;

$S_{\text{样品}}$ —— 样品截面积, mm^2 。

(2) 色差:采用 $L^*a^*b^*$ 色空间法,借助色差计测定粉碎后样品的三维颜色坐标,并按式(2)计算其与标准白色瓷板($L^* = 75.85, a^* = -2.57, b^* = -3.61$)的总色差 ΔE 。

$$\Delta E = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2] / 2, \quad (2)$$

式中:

ΔE —— 色差, ΔE 值越大表示与白色瓷板差别越大;

ΔL —— 黑白差异;

Δa —— 红绿差异;

Δb —— 黄蓝差异。

(3) 硬度:采用食品物性分析仪测量样品硬度,设定测试速度为100 mm/min,穿刺距离为8 mm,其值为曲线中力的峰值,值越大表示产品越硬。

1.3 试验方法

1.3.1 单因素试验 固定芦荟添加量、物料含水率、螺杆转速、喂料速度以及膨化温度中的任意四个,让另一个因素变动,分别测定挤压膨化产品的膨化率、色差、硬度,探索各因素对各评价指标的影响规律,确定各参数取值范围。各试验参数具体设计:

(1) 固定芦荟添加量为3%、物料含水率为14%、螺杆转速为144 r/min、喂料速度为30 r/min,设定挤压膨化温度分别为150,155,160,165,170 $^{\circ}\text{C}$ 进行挤压膨化试验,测定膨化产品各指标特性,研究膨化温度对各指标的影响。

(2) 固定芦荟添加量为3%、物料含水率为14%、喂料速度为30 r/min、膨化温度为150 $^{\circ}\text{C}$,设定螺杆转速分别为

115,130,144,158,173 r/min进行挤压膨化试验,测定膨化产品各指标特性,研究螺杆转速对各指标的影响。

(3) 固定芦荟添加量为3%、物料含水率为14%、螺杆转速为144 r/min、膨化温度为150 $^{\circ}\text{C}$,设定喂料速度分别为23,27,30,33,36 r/min进行挤压膨化试验,测定膨化产品各指标特性,研究喂料速度对各指标的影响。

(4) 固定芦荟添加量为3%、螺杆转速为144 r/min、喂料速度为30 r/min、膨化温度为150 $^{\circ}\text{C}$,设定物料含水率分别为12%,14%,16%,18%,20%进行挤压膨化试验,测定膨化产品各指标特性,研究物料含水率对各指标的影响。

(5) 固定物料含水率为14%、螺杆转速为144 r/min、喂料速度为30 r/min、膨化温度为150 $^{\circ}\text{C}$,设定芦荟添加量为分别为1%,2%,3%,4%,5%进行挤压膨化试验,测定膨化产品各指标特性,研究芦荟添加量对各指标的影响。

1.3.2 正交试验 选取芦荟添加量、物料含水率、螺杆转速、喂料速度以及膨化温度为主要影响因素,以产品膨化率、色差以及硬度为评价指标,进行五因素四水平 $L_{16}(4^5)$ 正交试验,每组试验重复一次。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验

2.1.1 膨化温度对各指标的影响 由图1可知,随着温度的升高,膨化产品的硬度不断减小,当温度达165 $^{\circ}\text{C}$ 时,硬度值为5.75 N,产品口感很酥脆,温度继续升高后产品的硬度变化不大。膨化产品的色差随着温度的升高不断减小。随着温度的升高,产品的膨化率不断减小,膨化度越来越高,当膨化温度达160 $^{\circ}\text{C}$ 时,产品的膨化度最高,而随着温度的继续升高,膨化率的数值开始增大,其膨化程度降低。可见,温度的升高使水分子获得更多的能量,挤压过程产品的流动性好,在挤压腔内停留的时间短,物料的褐变程度小,当产品挤出模口时,水分子气化逃逸的更多,因而口感酥脆、膨化率高。综合考虑,确定膨化温度为150~165 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.1.2 螺杆转速对各指标的影响 由图2可知,随螺杆转速的增加,膨化产品的硬度不断减小,当转速为158 r/min时,硬度值最小,产品口感较酥脆,转速继续升高后产品的硬度增大。产品的膨化率也呈现类似的趋势,在转速158 r/min时膨化率最小,产品的膨化度最好。产品的色差随着螺杆转

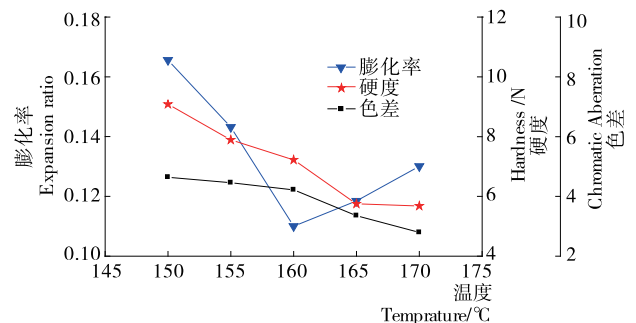


图1 膨化温度对各指标的影响

Figure 1 Effect of extrusion temperature on characteristics of the extruded products

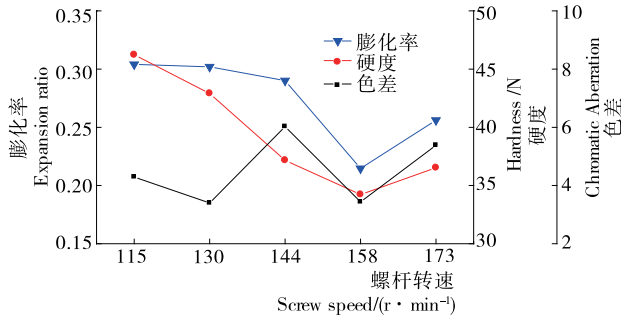


图 2 螺杆转速对各指标的影响

Figure 2 Effect of screw speed on characteristics of the extruded products

速变化上下波动,无明显上升或下降趋势,这可能是由随机误差引起的。可见,螺杆转速增加对物料的剪切力增大,物料中水分获得的能量增多,因而膨化后逃逸的水气增多,膨化度增高,口感酥脆,但若转速过快容易导致挤压过程不稳定,因此综合考虑,确定螺杆转速为 115~158 r/min。

2.1.3 喂料速度对各指标的影响 由图 3 可知,随喂料转速的增加,膨化产品的硬度先减小后增大,当转速为 30 r/min 时,硬度值较小,产品口感酥脆。产品的膨化率也呈现类似的趋势,在转速 30 r/min 时膨化率最小,产品的膨化程度最好。产品的色差随着喂料速度的增加而增大。上述结果说明喂料速度具有最优值,若喂料速度太小,物料在挤压腔内受挤压不充分,而喂料速度过大则会导致膨化度降低,口感差。综合考虑,确定喂料速度为 27~36 r/min。

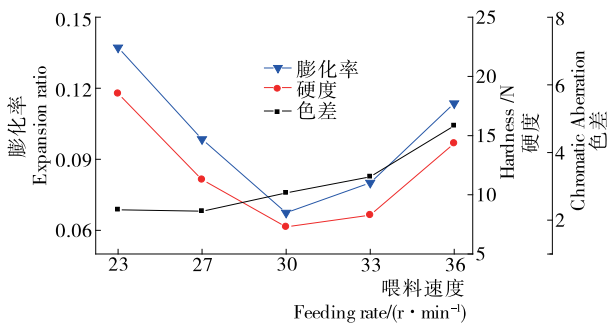


图 3 喂料速度对各指标的影响

Figure 3 Effect of feeding rate on characteristics of the extruded products

2.1.4 物料含水率对各指标的影响 由图 4 可知,随物料水分的增加,膨化产品的硬度和膨化率均随着物料水分的增加先减小后增大,当物料含水率为 16% 时,硬度值最小,膨化率最低,此时产品的口感较好。这说明水分过低对物料的结合不利,因而膨化效果不佳,但水分超过一定量后,会使得物料的挤压剪切效果变差,同样会影响产品质量。产品的色差则随着物料含水率的增大而降低,含水率低使得物料的黏度增大,物料与机筒、物料与螺杆的摩擦力大,剪切作用强,因而褐变程度高色差大。综合考虑,确定物料含水率为 12%~18%。

2.1.5 芦荟添加量对各指标的影响 由图 5 可知,随芦荟粉添加量的增多,膨化产品的硬度、膨化率及色差均呈增大趋

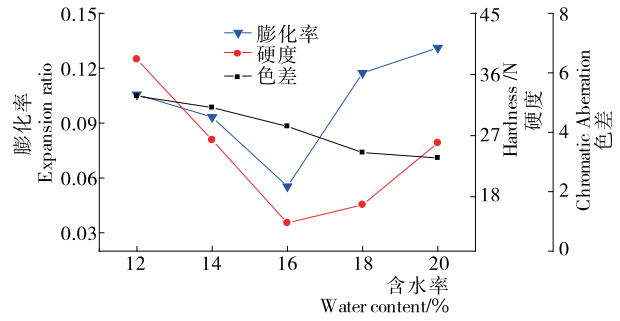


图 4 物料含水率对各指标的影响

Figure 4 Effect of water content on characteristics of the extruded products

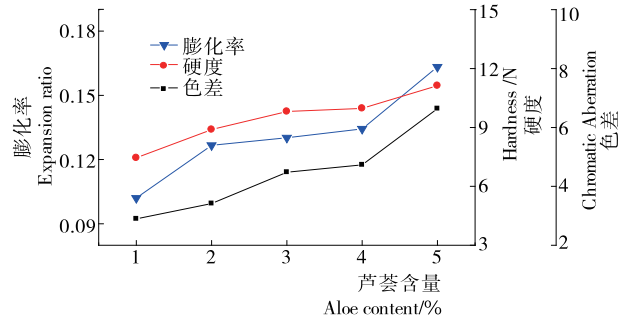


图 5 芦荟添加量对各指标的影响

Figure 5 Effect of aloe content on characteristics of product

势,这是由于产品的膨化效果主要与物料中的淀粉含量有关,随着芦荟粉量的增加,物料中淀粉含量减少,因此膨化效果不佳,硬度大,膨化度低。又由于芦荟干粉本身呈现咖啡色,因此会导致色差明显增大。综合考虑,确定芦荟添加量为 2%~5%。

2.2 正交试验

根据上述单因素试验结果,设计正交试验见表 1。按照 1.2.3 中方法测量各评价指标,结果见表 2。

2.2.1 各参数对产品硬度影响方差分析 对硬度测量结果进行方差分析,结果(见表 3)表明,5 个因素对挤压膨化产品硬度的影响都极显著。各因素对硬度影响的主次顺序为:膨化温度>水分含量>喂料速度>螺杆转速>芦荟粉含量。

2.2.2 各参数对膨化率影响方差分析 对膨化率测量结果进行方差分析,结果(见表 4)表明,5 个因素对挤压膨化产品的膨化率影响都极显著。各因素对膨化率影响的主次顺序为:喂料速度>水分含量>芦荟粉含量>螺杆转速>膨化温度。

表 1 试验因素水平表

Table 1 Experimental variables & levels

水平	A 喂料速度/ (r · min ⁻¹)	B 螺杆转速/ (r · min ⁻¹)	C 物料含 水率/%	D 芦荟添 加量/%	E 膨化 温度/℃
1	27	115	12	2	150
2	30	130	14	3	155
3	33	144	16	4	160
4	36	158	18	5	165

表2 正交方案及结果
Table 2 Experimental plan & results

序号	A	B	C	D	E	硬度/N		膨化率		色差		综合评分	
						1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	1	1	1	1	7.806	6.844	7.192	56.624	21.100	86.097	68.74	79
2	2	2	1	2	2	8.806	9.416	4.712	65.448	07.091	61.111	10.84	79
3	3	3	1	3	3	22.110	19.072	3.134	92.427	31.011	16.122	51.54	55
4	4	4	1	4	4	11.608	11.398	3.755	37.381	954.012	4.31.123	48.73	73
5	1	2	2	3	4	8.348	8.928	3.966	84.346	177.012	4.96.129	96.79	79
6	2	1	2	4	3	14.786	15.036	4.690	29.414	969.011	29.01.108	85.66	68
7	3	4	2	1	2	13.912	14.202	2.980	54.291	53.011	52.01.117	61.75	73
8	4	3	2	2	1	10.278	10.404	4.623	89.493	07.011	38.01.102	96.74	77
9	1	3	3	4	2	18.376	17.230	3.797	48.276	73.021	19.0.223	89.31	36
10	2	4	3	3	1	11.560	11.086	5.108	42.461	838.008	4.93.095	84.79	79
11	3	1	3	2	4	20.264	20.892	3.007	91.337	65.011	4.97.121	27.60	55
12	4	2	3	1	3	25.044	24.710	5.176	44.455	91.012	38.01.124	89.36	41
13	1	4	4	2	3	19.268	18.508	4.768	27.519	98.020	30.0.205	03.29	29
14	2	3	4	1	4	13.470	13.600	4.525	13.417	60.013	6.71.129	36.62	66
15	3	2	4	4	1	10.072	10.446	3.012	43.344	46.014	1.80.134	73.75	74
16	4	1	4	3	2	12.214	13.508	3.049	12.260	18.011	2.05.104	80.78	80
k_1	108.95	139.95	142.85	126.40	152.35								
k_2	145.75	136.70	148.00	121.70	134.10								
k_3	130.30	113.95	104.30	145.60	94.60								
k_4	133.10	127.50	122.95	124.40	137.05								
R	36.80	26.00	43.70	23.90	57.75								

表3 硬度方差分析结果[†]

Table 3 Variance analysis of hardness

来源	平方和	自由度	均方和	F比	显著水平
A	81.497	3	27.166	56.002	***
B	23.741	3	7.914	16.314	***
C	232.211	3	77.404	159.568	***
D	15.117	3	5.039	10.388	***
E	414.020	3	138.007	284.500	***
误差	7.761	16	0.485		
总计	774.348	31			

[†] ***表示影响极显著, $F \geq F_{0.01(3,16)}$; **表示影响显著, $F \geq F_{0.05(3,16)}$; *表示影响不显著, $F \geq F_{0.1(3,16)}$ 。

表4 膨化率方差分析结果[†]

Table 4 Variance analysis of expansion ratio

来源	平方和	自由度	均方和	F比	显著水平
A	0.014	3	0.005	144.371	***
B	0.006	3	0.002	61.909	***
C	0.007	3	0.002	72.996	***
D	0.006	3	0.002	65.561	***
E	0.005	3	0.002	47.116	***
误差	0.001	16	3.232E-5		
总计	0.039	31			

[†] ***表示影响极显著, $F \geq F_{0.01(3,16)}$; **表示影响显著, $F \geq F_{0.05(3,16)}$; *表示影响不显著, $F \geq F_{0.1(3,16)}$ 。

2.2.3 各参数对色差影响方差分析 对色差测量结果进行方差分析,结果(见表5)表明,5个因素中膨化温度、喂料速度、芦荟粉含量、水分含量对色差影响极显著,螺杆转速对色差无显著影响。各因素对色差影响的主次顺序为:膨化温度>喂料速度>芦荟粉含量>水分含量>螺杆转速。

由上述分析结果可知,若想要得到某个指标的最优值,在选择最优加工参数时,只考虑显著因素,且要根据各因素的影响顺序来调整参数。

2.3 综合评价

上述分析仅仅考虑了某一单方面指标,某些参数对某一个指标较好,但对于其他指标表现不佳。为了综合评价各参数对挤压膨化产品特性的影响,采用线性插值法将各指标转

表5 色差方差分析结果[†]

Table 5 Variance analysis of chromatic aberration

来源	平方和	自由度	均方和	F比	显著水平
A	10.228	3	3.409	22.578	***
B	0.411	3	0.137	0.908	*
C	3.964	3	1.321	8.750	***
D	6.390	3	2.130	14.106	***
E	11.548	3	3.849	25.493	***
误差	2.416	16	0.151		
总计	34.958	31			

[†] ***表示影响极显著, $F \geq F_{0.01(3,16)}$; **表示影响显著, $F \geq F_{0.05(3,16)}$; *表示影响不显著, $F \geq F_{0.1(3,16)}$ 。

化为评价分数,设定硬度最小值为 100 分,最大值为 0 分;膨化率最大值为 0 分,最小值为 100 分;色差最大值为 0 分,最小值为 100 分。按式(3)计算:

$$C_i = 100 - 100 \times (X_i - X_{i100}) / (X_{i100} - X_{i0}), \quad (3)$$

式中:

C_i —— i 指标评价分数;

X_i —— i 指标值;

X_{i100} —— 100 分所对应 i 指标值;

X_{i0} —— 0 分所对应 i 指标值。

综合评分则为各指标加权得分之和,综合评分按式(4)计算:

$$C_{\text{综合}} = 0.4 \times C_{\text{硬度}} + 0.4 \times C_{\text{膨化率}} + 0.2 \times C_{\text{色差}}, \quad (4)$$

式中:

$C_{\text{综合}}$ —— 综合评分;

$C_{\text{硬度}}$ —— 硬度评价分数;

$C_{\text{膨化率}}$ —— 膨化率评价分数;

$C_{\text{色差}}$ —— 色差评价分数。

上述正交试验各指标经线性插值后的综合评分结果见表 2,对综合评分结果进行直观分析可知,膨化温度对产品综合评分影响最大,螺杆转速对产品综合评分影响最小。在喂料速度为 30 r/min,螺杆转速为 115 r/min,水分含量为 14%,芦荟含量为 4%,膨化温度为 150 °C 时综合膨化效果最好。

3 结论

(1) 根据试验得出,除螺杆转速对色差无显著影响外,各因素对 3 个评价指标均有特别显著影响。对硬度影响的排序为:膨化温度>水分含量>喂料速度>螺杆转速>芦荟粉含量;对膨化率影响的排序为:喂料速度>水分含量>芦荟粉含量>螺杆转速>膨化温度;对色差影响的排序为:膨化温度>喂料速度>芦荟粉含量>水分含量>螺杆转速。

(2) 综合考虑产品硬度、膨化率和色差 3 个指标,添加芦荟超微粉体的物料在喂料速度为 30 r/min,螺杆转速为 115 r/min,水分含量为 14%,芦荟含量为 4%,膨化温度为 150 °C 时膨化效果最好。

参考文献

[1] NIDIRY E S J, GANESHAN G, LOKESHA A N. Antifungal activity of some extractives and constituents of Aloe vera[J]. Research Journal of Medicinal Plant, 2011, 5(2): 196-200.

[2] RADHA M H, LAXMIPRIYA N P. Evaluation of biological properties and clinical effectiveness of Aloevera: A systematic review[J]. Journal of Traditional & Complementary Medicine, 2014, 5(1): 21-26.

[3] PARK H M, MOON E, LEE S, et al. Topical application of baby- and adult-aloe on ultraviolet B irradiated mouse skin with metabolite profiling[J]. Metabolomics, 2015, 11(5): 1-12.

[4] CUBA L D F, FILHO A B, CHERUBINI K, et al. Topical application of Aloe vera and vitamin E on induced ulcers on the tongue of rats subjected to radiation: clinical and histological evaluation[J]. Supportive Care in Cancer, 2016, 24(6): 2 557-2 564.

[5] 贾艳萍, 赵晴潇, 郑胜. 芦荟保健功能性饮料的研制[J]. 中国酿造, 2012, 31(4): 197-199.

[6] 陶海腾, 王文亮, 程安玮, 等. 芦荟皮的营养价值及开发应用[J]. 农产品加工: 学刊, 2011(8): 116-117.

[7] HORVAT M, EMIN M A, HOCHSTEIN B, et al. Influence of medium-chain triglycerides on expansion and rheological properties of extruded corn starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 93(2): 492-498.

[8] CHENG Hong-yuan, HANSEN J H. Extrudate expansion model in a twin-screw extrusion cooking process considering melt rheological property[J]. Food & Bioprocess Technology, 2016, 9(4): 604-611.

[9] VILLANUEVA M J, YOKOYAMA W H, HONG Y J, et al. Effect of high-fat diets supplemented with okara soybean by-product on lipid profiles of plasma, liver and faeces in Syrian hamsters[J]. Food Chemistry, 2011, 124(1): 72-79.

[10] 刘全德, 唐仕荣, 宋慧, 等. 芦荟蒽醌类化合物的超声提取及其抗氧化性研究[J]. 食品与机械, 2011, 27(5): 68-71.

[11] 刘超, 张波, 魏益民. 影响淀粉类挤压膨化产品膨化率的因素研究进展[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(7): 124-128.

[12] 谢怡斐, 田少君, 马燕, 等. 超微粉碎对豆渣功能性质的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 7-11.

[13] 叶晓青, 莫树平, 庾文伟, 等. 农产品超微干粉加工的现状与应用前景[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 258-261.

[14] ZHU Feng-mei, DU B, XU B. Superfine grinding improves functional properties and antioxidant capacities of bran dietary fibre from Qingke (hull-less barley) grown in Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Journal of Cereal Science, 2015, 65: 43-47.

[15] ZHONG Chen, ZU Yuan-gang, ZHAO Xiu-hua, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical and antioxidant properties of pomegranate peel[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 51(1): 212-221.

[16] ZHAO Xiao-yan, DU Fang-ling, ZHU Qing-jun, et al. Effect of superfine pulverization on properties of Astragalus membranaceus powder[J]. Powder Technol, 2010, 203(3): 620-625.

[17] CHEN Guang-jing, WANG Li-sha, ZHANG Fu-sheng, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical properties of mulberry leaf powder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(24): 307-314.

[18] 杜冰, 梁淑如, 程燕锋, 等. 挤压膨化加工过程参数及其影响[J]. 食品与机械, 2008, 24(5): 133-136.

[19] 李静鹏, 邓力, 金佳幸, 等. 基于黄酮保持率及糊化度的杂粮米挤压工艺优化[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 190-195.

[20] 林江娇, 赵春芳, 朱立学. 双螺杆挤压膨化机温升特性的仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 47-53.

[21] HE Yun, FAN Zi-wei, WU Yu, et al. Comparative study on physicochemical characteristics and flavone dissolution properties of mulberry leaf powder with different particle sizes[J]. Food Science, 2016, 37(9): 123-128.

[22] 汪立君, 吴敏, 王勇, 等. 豆渣-玉米粉挤压膨化分散体系流变特性[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 119-125.

[23] LIU Cheng-hai, ZHENG Xian-zhe. Comparison of puffing characteristics for blackcurrant slice obtained by microwave and microwave vacuum method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Z1): 194-198.

[24] 韦鸿钰, 朱立学, 马稚煜. 药用银杏叶超微粉碎工艺优化[J]. 农机化研究, 2013(3): 184-187.