

苦瓜微波干燥工艺优化*

唐小俊 池建伟 张名位 张雁 魏振承 张瑞芬

【摘要】 通过微波功率、切片厚度、载样量的单因素试验探讨了苦瓜微波干燥的失水特性,并以苦瓜干燥的失水速率、耗电量和感官评分为指标,利用三因素三水平的响应面分析法优化了微波干燥工艺条件并建立了回归模型。结果表明,微波功率、载样量对失水速率有极显著的影响,载样量对耗电量有极显著的影响,微波功率对苦瓜感官评分有极显著的影响。微波功率 480 W、切片厚度 0.59 cm、载样量 62.86 g 时,失水速率为 3.08 g/min,耗电量为 2.38 kW·h/kg,感官评分为 9.33。

关键词: 苦瓜 微波干燥 工艺优化 响应面分析法

中图分类号: TS201.1; TQ028.6⁺77; S642.5

文献标识码: A

Experimental Study on Microwave Drying of *Momordica Charantia* L. Slices

Tang Xiaojun Chi Jianwei Zhang Mingwei Zhang Yan Wei Zhencheng Zhang Ruifen
(Guangdong Academy of Agricultural Sciences)

Abstract

The dehydrating characteristics of *Momordica Charantia* L. during microwave drying process were studied by the single factor experiments including microwave power, section thickness and sample load. The drying technics conditions were optimized by response surface analysis at three factors and three levels when guided by integrated indicator of dehydration rate, electricity consumption and sensory quality, and the corresponding regression model was established. The results showed that microwave power and sample load had significant influences on the dehydration rate, the sample load had significant influences on the electricity consumption, and the microwave power had extremely significant influences on the sensory quality. When drying processing conditions of *Momordica Charantia* L. were as follows: microwave power was 480 W, section thickness was 0.59 cm and sample load was 62.86 g, the dehydration rate was 3.08 g/min, the electricity consumption was 2.38 kW·h/kg and the sensory quality was 9.33.

Key words *Momordica Charantia* L., Microwave drying, Technological optimization, Response surface analysis

引言

苦瓜(*Momordica Charantia* L.)为葫芦科苦瓜属一年生攀缘草本植物,具有较高的营养价值和医

疗保健价值。苦瓜生产季节性很强,货架期短^[1],将其制成苦瓜干片,对平衡淡旺季需求、调剂市场具有重要的实际意义。目前苦瓜干的制备主要是传统的晒干法和烘干法,未见微波技术在此领域的研究

收稿日期: 2006-10-20

* 广东省自然科学基金团队资助项目(项目编号:粤科基办字 20066 号)、广东省自然科学基金资助项目(项目编号:06025363)和广东省工业攻关计划资助项目(项目编号:2005B10201048)

唐小俊 广东省农业科学院农业生物技术研究所 副研究员, 510610 广州市

池建伟 广东省农业科学院农业生物技术研究所 研究员

张名位 广东省农业科学院农业生物技术研究所 研究员

张雁 广东省农业科学院农业生物技术研究所 副研究员

魏振承 广东省农业科学院农业生物技术研究所 研究员

张瑞芬 广东省农业科学院农业生物技术研究所 助理研究员

报道,而利用微波干燥技术对农产品进行干燥是发展趋势之一^[2~3]。

1 试验

1.1 材料与设备

苦瓜由广东省农业科学院良种苗木繁育中心提供。Galanz WD800B 型微波炉,800 W。JM10002 型电子天平。

1.2 试验方法

1.2.1 工艺流程

挑选新鲜无虫害、外形整齐、大小相近的苦瓜,去蒂,清洗干净后切片,护色,沥干水分,然后在盛物皿上均匀平铺成一层。根据试验要求分别选取不同微波功率、切片厚度、载样量,对苦瓜片进行干燥试验,每隔 2 min 测一次质量,直至恒重。每组试验重复 3 次,取平均值。

1.2.2 试验参数

(1) 试样含水率为

$$W_t = \frac{m_t - m_g}{m_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中 W_t ——试样干燥至 t 时的含水率, %

m_t ——试样干燥至 t 时的质量, g

m_g ——试样干燥至恒重时的质量, g

(2) 试样失水速率为

$$v = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (2)$$

式中 v ——失水速率, g/min

Δm ——试样干燥 Δt 时间内的失水量, g

Δt ——干燥间隔时间

(3) 苦瓜干燥后感官质量评定

苦瓜感官质量以色泽为标准,以 10 分为满分,评价标准为:黑褐色 3 分、褐色 4 分、黄褐色 5 分、黄色 6 分、褐绿色 7 分、黄绿色 8 分、绿色 9 分、深绿色 10 分,位于两者之间的色泽再细分为 10 级,每级 0.1 分,干燥后色泽依照此标准评分^[4]。

(4) 苦瓜干燥耗电量为

$$p = \frac{Wt}{60m} \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中 p ——耗电量, kW·h/kg

W ——微波功率, W t ——干燥时间, min

m ——样品质量, kg

1.2.3 微波干燥单因素试验

微波干燥工艺的优化,主要包括微波功率、切片厚度、载样量等因素。针对这几个因素,分别在保持其他因素相同的条件下进行单因素试验,考察各因素对苦瓜干燥的影响,选择最佳的干燥条件。

1.2.4 微波干燥工艺的响应面分析

根据 Box-Behnken 的中心组合试验设计原理,综合单因子试验结果,选取对苦瓜干燥影响显著的 3 个因素——微波功率、切片厚度、载样量,在单因子试验的基础上采用三因素三水平的响应面分析方法,以苦瓜干燥失水速率、耗电量和感官质量为响应值,其因素水平编码见表 1。

表 1 响应面分析的因素水平编码表

Tab.1 Factors and levels coding table of response surface analysis

因素	水平		
	-1	0	1
微波功率 x_1 /W	480	640	800
切片厚度 x_2 /cm	0.7	0.5	0.3
载样量 x_3 /g	40	80	120

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 微波功率

切片厚度为 0.5 cm、载样量为 80 g,按不同的微波功率进行干燥,测定并计算出苦瓜含水率和失水速率,结果如图 1、2 所示。

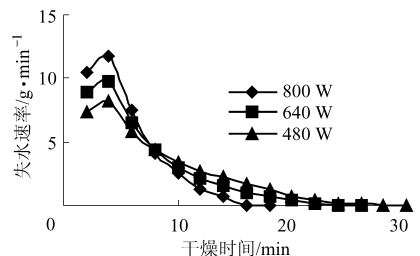


图 1 不同微波功率对失水速率影响曲线

Fig.1 Effect of microwave power on dehydration rate

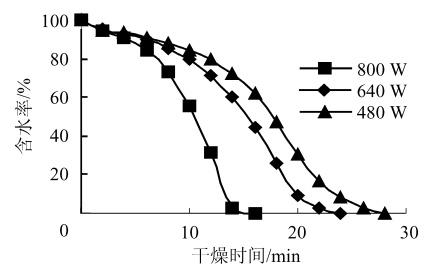


图 2 不同微波功率的干燥曲线

Fig.2 Curves of dehydration under different microwave power

从图 1 可知,在各微波功率处理的初始阶段,苦瓜失水速率有一个快速上升过程,然后是不不断递减的过程,中间恒速干燥阶段不明显;而到干燥后期,失水速率变得小而平缓。不同微波功率下的苦瓜失水速率在前期明显不同,功率越大,失水速率最大值也越大,800 W 时失水速率最大值为 11.7 g/min,

640 W时为9.75 g/min, 480 W时为8.15 g/min。从图2可知道, 苦瓜含水率随微波处理时间增加而不断减小, 微波功率越大, 干燥速度越快, 干燥时间越短。

由于试样在微波作用下有一个加温和水分扩散的过程, 因此苦瓜的失水速率在开始阶段有一个上升过程, 由于微波的高频特性、热特性及生物效应几大特点^[5], 这个过程非常短, 苦瓜的失水速率可以很快达到最大。而在随后的干燥过程中, 由于试样含水率不断降低, 蒸发量也不断减少, 因此失水速率不断下降。微波功率的增加可提高试样对微波能的吸收量, 加快试样中水分的蒸发和扩散, 因此增加微波功率可提高苦瓜的失水速率, 缩短干燥时间。

2.1.2 切片厚度

微波功率为640 W, 载样量为80 g, 按不同的苦瓜切片厚度进行干燥, 并测定计算出苦瓜含水率和失水速率, 结果如图3、4所示。

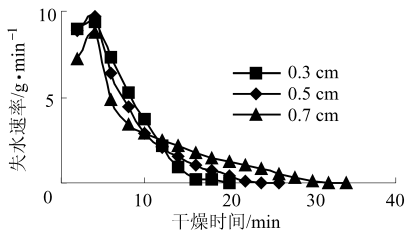


图3 不同切片厚度对失水速率影响曲线

Fig.3 Effect of section thickness on dehydration rate

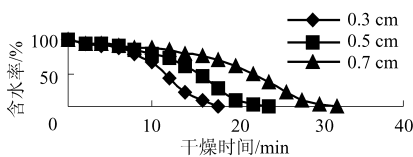


图4 不同切片厚度的干燥曲线

Fig.4 Curves of dehydration under different section thickness

从图3可知, 在不同切片厚度的情况下, 微波处理的初始阶段, 苦瓜失水速率有一个快速上升至最大的过程, 而在随后的干燥过程, 失水速率快速下降, 干燥后期失水速率下降减缓。不同的切片厚度, 失水速率上升至最高的时间和数值都比较接近, 都在干燥开始后4 min达到最大失水速率, 0.3、0.5、0.7 cm厚度下最大失水速率分别为9.39、9.66、8.76 g/min。从图4可知, 苦瓜含水率随微波处理时间增加而不断减小, 切片厚度越小, 干燥速度越快, 干燥时间越短。这是由于切片厚度越小, 比表面越大, 越有利于水分的扩散。

2.1.3 载样量

微波功率为640 W, 苦瓜切片厚度为0.5 cm, 按不同的载样量进行干燥, 并测定计算出苦瓜含水率和失水速率, 结果如图5、6所示。

从图5可知, 在微波处理的初始阶段, 载样量不同, 苦瓜失水速率明显不同: 载样量分别为80 g和120 g的条件下, 苦瓜失水速率各有一个逐渐上升的过程; 而载样量为40 g的条件下, 失水速率很快上升到最大值。这是由于载样量越小, 试样吸收微波能越多, 水分蒸发也越快, 从而使失水速率很快达到最大值。从图6可知, 苦瓜含水率随微波处理时间增加而不断减小, 载样量越小, 干燥速度越快, 干燥时间越短。

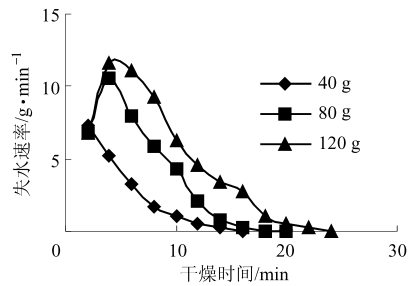


图5 不同载样量对失水速率影响曲线

Fig.5 Effect of sample load on dehydration rate

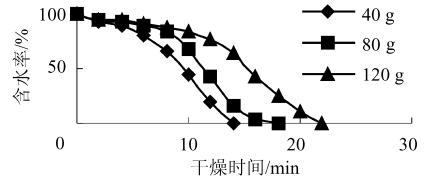


图6 不同载样量的干燥曲线

Fig.6 Curves of dehydration under different sample load

2.2 微波干燥工艺的响应面分析

以 X_1 、 X_2 、 X_3 为自变量, 分别以失水速率 Y_1 、耗电量 Y_2 、感官评分 Y_3 为响应值, 采用SAS 9.0中的SAS/analysis软件包进行响应面分析方案设计, 分析方案及试验结果见表2。并选用Box-Behnken模型对所得数据进行回归分析^[6]。

表2 响应面分析方案及试验结果

Tab.2 Design and results of the experiments

试验序号	微波功率 X_1	切片厚度 X_2	载样量 X_3	失水速率 Y_1 /g·min ⁻¹	耗电量 Y_2 /kW·h·kg ⁻¹	感官评分 Y_3
1	-1	-1	0	2.74	2.77	9.0
2	-1	1	0	3.36	2.27	8.8
3	1	-1	0	4.10	3.11	7.4
4	1	1	0	4.79	2.66	7.6
5	0	-1	-1	4.11	2.48	8.0
6	0	-1	1	2.86	3.56	7.6
7	0	1	-1	4.52	2.25	7.0
8	0	1	1	2.88	3.52	7.4
9	-1	0	-1	3.72	2.04	8.6
10	1	0	-1	5.36	2.37	6.5
11	-1	0	1	2.10	3.98	9.5
12	1	0	1	5.70	2.22	7.8
13	0	0	0	3.36	3.01	8.3
14	0	0	0	3.36	3.02	8.5
15	0	0	0	3.38	3.01	8.4

2.2.1 对失水速率的影响

由表3可知,微波功率、载样量的一次项在苦瓜果的微波干燥中对失水速率的影响达到了极显著水平, X_1 和 X_3 的交互项则达到了显著水平,而切片厚度则不明显。从 F 值可知,各因素的影响程度依次排列为:微波功率、载样量、切片厚度。由于各因素对苦瓜微波干燥的影响不是简单的线性关系,为

了更明确各因子对响应值 Y_1 的影响,采用SAS统计软件对表2数据进行多元回归分析,得到回归模型

$$Y_1 = 0.088\ 229 - 0.044\ 017X_1 - 0.009\ 059X_2 + 0.035\ 642X_3 - 0.001\ 83X_1^2 + 0.007\ 179X_1X_2 - 0.039\ 631X_1X_3 - 0.005\ 214X_2^2 + 0.002\ 14X_2X_3 + 0.004\ 726X_3^2$$

表3 微波功率、切片厚度、载样量对失水速率影响的方差分析表

Tab.3 Variance analysis of the effects of microwave power, section thickness and sample load on the dehydration rate

方差来源	自由度	平方和	均方	F值	大于F值的概率	显著性
X_1	1	0.015 500	0.015 500	39.293 880	0.001 516	**
X_2	1	0.000 656	0.000 656	1.664 257	0.253 469	
X_3	1	0.010 163	0.010 163	25.764 060	0.003 848	**
X_1^2	1	0.000 012	0.000 012	0.030 434	0.868 353	
X_1X_2	1	0.000 206	0.000 206	0.522 651	0.502 105	
X_1X_3	1	0.006 282	0.006 282	15.926 410	0.010 418	*
X_2^2	1	0.000 100	0.000 100	0.254 422	0.635 415	
X_2X_3	1	0.000 018	0.000 018	0.046 444	0.837 886	
X_3^2	1	0.000 082	0.000 082	0.209 060	0.666 685	
模型	9	0.033 036	0.003 671	9.305 469	0.012 162	*
一次项	3	0.026 320	0.008 773	22.240 730	0.002 548	**
平方项	3	0.000 210	0.000 070	0.177 176	0.907 459	
交叉乘积项	3	0.006 507	0.002 169	5.498 501	0.0485 22	*
误差	5	0.001 972	0.000 394			
失拟项	3	0.001 972	0.000 657	1 804.937 000	0.000 554	**
纯误差	2	7.282×10^{-7}	3.641×10^{-7}			
所有项	14	0.035 008				

* 5%显著水平,** 1%显著水平。

从表3方差分析可知,用该回归方程描述各因子与响应值之间关系时,其因变量与全体自变量之间的多元回归关系显著。对回归模型进行可信度分析,得到复相关系数的平方为94.37%,说明模型拟合程度好^[7],可用该方程对不同微波功率、切片厚度、载样量处理条件下苦瓜果的微波干燥失水速率进行预测。

以 Y_1 取最大值时对 X_1 、 X_2 、 X_3 进行优化,则可求出3个因素的最优化条件编码值为1、1、0.142 86,即微波功率800 W、切片厚度0.3 cm、载样量85.71 g,得到失水速率最大值为5.33 g/min。

2.2.2 对耗电量的影响

由表4可知,载样量的一次项在苦瓜果微波干燥中对耗电量的影响达到了极显著水平, X_1 和 X_3 的交互项则达到了显著水平。从 F 值可知,各因素的影响大小顺序为:载样量、切片厚度、微波功率。采

用SAS统计软件对表2数据进行多元回归分析,得到回归模型

$$Y_2 = 0.331\ 859 + 0.003\ 36X_1 + 0.022\ 291X_2 - 0.061\ 639X_3 + 0.046\ 596X_1^2 - 0.006\ 28X_1X_2 + 0.066\ 862X_1X_3 - 0.003\ 7X_2^2 - 0.009\ 507X_2X_3 + 0.025\ 006X_3^2$$

从表4方差分析可知,用该回归方程描述各因子与响应值之间关系时,其因变量与全体自变量之间的多元回归关系接近显著水平。对回归模型进行可信度分析,得到复相关系数的平方为88.02%,说明模型拟合程度较好。

以 Y_2 取最小值时对 X_1 、 X_2 、 X_3 进行优化,则可求出3个因素的最优化条件编码值为-1、1、-1,即微波功率480 W、切片厚度0.3 cm、载样量40 g,此时得到耗电量最小值为1.78 kW·h/kg。

表4 微波功率、切片厚度、载样量对耗电量影响的方差分析表

Tab.4 Variance analysis of effects of microwave power, section thickness and sample load on electricity consumption

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	大于 F 值的概率	显著性
X_1	1	0.000 090	0.000 090	0.052 781	0.827 395 0	
X_2	1	0.003 975	0.003 975	2.322 501	0.188 021 7	
X_3	1	0.030 395	0.030 395	17.759 090	0.008 375 0	**
X_1^2	1	0.008 017	0.008 017	4.684 041	0.082 740 0	
X_1X_2	1	0.000 158	0.000 158	0.092 182	0.773 649 0	
X_1X_3	1	0.017 882	0.017 882	10.448 280	0.023 144 0	*
X_2^2	1	0.000 051	0.000 051	0.029 530	0.870 300 0	
X_2X_3	1	0.000 362	0.000 362	0.211 221	0.665 103 0	
X_3^2	1	0.002 309	0.002 309	0.348 937	0.297 891 0	
模型	9	0.062 873	0.006 986	4.081 711	0.067 887 0	
一次项	3	0.034 460	0.011 487	6.711 459	0.033 295 0	*
平方项	3	0.010 011	0.003 337	1.949 778	0.239 955 0	
交叉乘积项	3	0.018 402	0.006 134	3.583 895	0.101 601 0	
误差	5	0.008 558	0.001 712			
失拟项	3	0.008 557	0.002 852	7 070.564 000	0.000 141 0	**
纯误差	2	8.068×10^{-7}	4.034×10^{-7}			
所有项	14	0.071 430				

* 5%显著水平,** 1%显著水平。

2.2.3 对感官评分的影响

由表5可知,微波功率的一次项在苦瓜微波干燥中对感官评分的影响达到了极显著水平。从F值可知,各因素的影响大小顺序为:微波功率、载样量、切片厚度。采用SAS统计软件对表2数据进行多元回归分析,得到回归模型

$$Y_3 = 8.4 - 0.825X_1 - 0.15X_2 + 0.275X_3 + 0.2X_1^2 + 0.1X_1X_2 + 0.1X_1X_3 - 0.4X_2^2 + 0.2X_2X_3 - 0.5X_3^2$$

从表5方差分析可知,用该回归方程描述各因子与响应值之间关系时,其因变量与全体自变量之间的多元回归关系达到显著水平。对回归模型进行

表5 微波功率、切片厚度、载样量对感官评分影响的方差分析表

Tab.5 Variance analysis of the effects of microwave power, section thickness and sample load on the sensory quality

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	大于 F 值的概率	显著性
X_1	1	5.445	5.445	16.433 600	0.009 788	**
X_2	1	0.18	0.18	0.543 26	0.494 196	
X_3	1	0.605	0.605	1.825 956	0.234 527	
X_1^2	1	0.147 692	0.147 692	0.794 045	0.413 700	
X_1X_2	1	0.04	0.04	0.215 054	0.662 323	
X_1X_3	1	0.04	0.04	0.215 054	0.662 323	
X_2^2	1	0.590 769	0.590 769	3.176 179	0.134 815	
X_2X_3	1	0.16	0.16	0.860 215	0.396 245	
X_3^2	1	0.923 077	0.923 077	4.962 779	0.076 383	
模型	9	8.139 333	0.904 37	4.862 206	0.048 175	*
一次项	3	6.23	2.076 667	11.164 870	0.011 797	*
平方项	3	1.669 333	0.556 444	2.991 637	0.134 414	
交叉乘积项	3	0.24	0.08	0.430 108	0.740 601	
误差	5	0.93	0.186			
失拟项	3	0.91	0.303 333	30.333 300	0.032 084	
纯误差	2	0.02	0.01			
所有项	14	9.369 333				

* 5%显著水平,** 1%显著水平。

可信度分析,得到复相关系数的平方为 89.75%,说明模型拟合程度较好。

以 Y_3 取最大值时对 X_1 、 X_2 、 X_3 进行优化,则可求出 3 个因素的最优化条件编码值为 -1、-0.142 86、0.142 86,即微波功率 480 W、切片厚度 0.53 cm、载样量 91.43 g,此时得到感官评分最大值为 9.46。

2.2.4 最优参数的确定

在 Y_1 取最大值, Y_2 取最小值,并取苦瓜干燥后的感官评分在优等范围(即 Y_3 值为 9.0~9.5)为主要指标的条件下,对 X_1 、 X_2 、 X_3 进行优化,则可求出 3 个因素的最优化条件编码值为 -1、-0.428 57、-0.428 57,即微波功率 480 W、切片厚度 0.59 cm、载样量 62.86 g,此时 Y_1 为 3.08 g/min, Y_2 为 2.38 kW·h/kg, Y_3 为 9.33。

3 结论

(1) 在不同微波功率、切片厚度和载样量处理的条件下,苦瓜的失水速率基本上在初始阶段有一

个上升过程,并很快达到最大,然后是快速递减的过程,恒速干燥的阶段不明显;而到干燥后期,失水速率变得较小而且缓慢下降。苦瓜的失水速率随微波功率的增加、切片厚度的减少、载样量的减少而加快。

(2) 响应面分析结果表明,在苦瓜干燥过程失水速率的各影响因素中,微波功率、载样量有极显著的影响, X_1 和 X_3 的交互项达到了显著水平,各因素对失水速率的影响顺序为:微波功率、载样量、切片厚度;在影响耗电量的各因素中,载样量对苦瓜耗电量有极显著的影响, X_1 和 X_3 的交互项达到了显著水平,各因素的影响大小顺序为:载样量、切片厚度、微波功率;在影响感官评分的各因素中,微波功率的影响达到了极显著水平,各因素的影响大小顺序为:微波功率、载样量、切片厚度。

(3) 苦瓜微波干燥的最佳工艺条件为:微波功率 480 W、切片厚度 0.59 cm、载样量 62.86 g,此时失水速率为 3.08 g/min,耗电量为 2.38 kW·h/kg,感官评分为 9.33。

参 考 文 献

- 1 华中农业大学. 蔬菜贮藏加工学[M]. 北京:中国农业出版社,2001.
- 2 韩清华,李树君,马季威,等. 微波真空干燥膨化苹果脆片的研究[J]. 农业机械学报,2006,37(8):155~158,167.
- 3 王俊,金天明,许乃章. 稻谷的微波干燥特性及质热模型[J]. 中国粮油学报,1998,13(5):6~8.
- 4 周凌霄,杨荣华,马平. 脱水蔬菜护绿方法的研究[J]. 食品工业科技,2000,20(3):47~49.
- 5 胡冠九,徐明华. 微波萃取在环境有机样品分析中的应用[J]. 江苏环境科技,1997,10(1):31~33,36.
- 6 高■珑,王允祥,武宁,等. 响应面法优化超高压杀灭食品中枯草芽孢杆菌工艺[J]. 食品科学,2004,25(3):101~106.
- 7 庄绪亮,张洪勋. 乳链菌肽发酵的主要影响因子[J]. 化工冶金,2000,21(1):93~97.

(上接第 59 页)

- 4 Devahastin S, Mujumdar A S, Raghavan G S V. Hydrodynamic characteristics of a rotating jet annular spouted bed[J]. Powder Technology, 1999, 103(2): 169~174.
- 5 徐圣言,刘伟民. 旋转导向管喷动床装置:中国, ZL 2003 2 0110645. 8[P]. 2004-10-27.
- 6 刘伟民,糜茂俊,李小果,等. 旋转导向管新型喷动床空气动力学特性研究[J]. 农业机械学报,2005,36(10):73~76.
- 7 李小果. 新型旋转导向管喷动床干燥机研究[D]. 镇江:江苏大学,2005.
- 8 刘伟民,徐圣言. 喷动床干燥[M]//潘永康,王忠喜,刘相东. 现代干燥技术. 2版. 北京:化学工业出版社,2007:249~277.
- 9 张鹏程. 新型喷动床干燥油菜籽技术的研究[D]. 镇江:江苏大学,2007.