

天祝野蘑菇热泵干燥工艺研究

杨玲 王小龙* 甘肃畜牧工程职业技术学院, 甘肃 武威 733006

作者简介: 杨玲(1983-), 女, 河南新野人, 讲师, 研究方向: 农产品加工教学与研究

* 通讯作者: 王小龙(1984-), 男, 甘肃甘谷人, 讲师, 研究方向: 农产品加工、发酵食品方向的教学与研究

项目来源: 2021年甘肃省教育厅高等学校创新基金项目《天祝野生白蘑菇(柴菇)的鉴定、评价及干燥工艺研究》

(项目编号: 2021A-271; 项目负责人: 杨玲)

摘要:基于甘肃天祝野蘑菇干制品成本低、效果好的考量,采用热泵干燥工艺,在单因素试验基础上,用正交试验优化试验,最终得出最佳工艺参数为:切片厚度6mm,干燥温度46℃,装载量1100g,干燥风速2.2 m/s;此时干燥制品的收缩率为79.68%,复水率为544.83%,色泽L值为73.68,Vc含量为4.28mg/100g,干燥时间4.8h,以上指标均在良好范围之内。为天祝野蘑菇干制品热泵干燥工艺的推广与应用奠定基础。

关键词:天祝野蘑菇;热泵;干燥工艺

甘肃天祝磨脐山产野生白蘑菇(当地人称柴菇、包头蘑菇),经北京中科光析化工技术研究所食品实验室DNA鉴定为担子菌门,伞菌目,白蘑科,口蘑属,在武威地区食用历史悠久,也是当地农民增收的重要途径,野生白蘑菇营养丰富、风味独特、口感顺滑^[1],但是其组织脆嫩且色白,极易变质变色。加上以直接晾晒为主的干制方法,导致产出的柴菇产品色泽差、贮藏时间短,很大程度上制约了产品销售。

热泵干燥技术因节约能源、成本低等特点,已经广泛应用到食品行业中的果蔬、粮食、烟草等多个行业中^[2]。本试验采用热泵干燥方式对天祝野生白蘑菇进行干燥处理,结合单因素试验和正交设计研究工艺参数对其干燥品质的影响,在成本低、效果好的前提下,以期得到天祝野生白蘑菇最佳干燥工艺参数,提高天祝野生白蘑菇的推广价值。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

试验选用天祝磨脐山的野生白蘑菇,采摘时间为2020年7月和2021年7月,采摘后运往实验室,于0-4℃冷藏备用。无水乙醚、苯酚、氢氧化钠、盐酸、浓硫酸、五水合硫酸铜、硫酸钾、丙酮、2,6-二氯靛酚、十六烷基三甲基溴化铵、甲醛、硼酸、甲基红溴甲酚绿、草酸等均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

奥豪斯仪器(上海)有限公司的分析天平DV214C、上海精宏实验设备有限公司的电热恒温鼓风干燥箱DHG-9240、上海精密科学仪器有限公司色差仪WSC-S、昆山市超声仪器有限公司的数控超声清洗器KQ-300DE、上海江星仪器有限公司数显恒温水浴锅HH-8。

1.3 方法

1.3.1 工艺流程

原料的选择→清洗消毒(漂白粉)→切片→预处理(常温超声 5min)→沥水→热泵干燥机干制→成品(水分含量约为 10%)→指标测定

1.3.2 单因素实验设定

为确定最佳的干燥条件,根据前期对野生白蘑菇成分进行了质地特性与理化特性分析,及预试验,然后根据试验结果设计了热泵干燥的单因素试验。温度 50℃,风速 2m/s,装载量 1500g,切片厚度 mm(2、4、6、8、10、12);风速 2m/s,装载量 1500g,切片厚度 6mm,温度 ℃(35、40、45、50、55、60);温度 50℃,装载量 1500g,切片厚度 6mm,风速 m/s(0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0);温度 50℃,风速 2m/s,装载量 g(500、1000、1500、2000、2500、3000)。分别统计温度、风速、装载量、切片厚度对制品收缩率、复水率、色泽 L 值、Vc 含量以及干燥时间的影响。根据试验结果,设计正交试验。

1.3.3 正交试验

表 1 热泵干燥正交因素水平表

水平	因素			
	A(干燥温度 / ℃)	B(风速 / m/s)	C(装载量 / g)	D(切片厚度 / mm)
1	46	1.8	1100	4
2	48	2.0	1300	5
3	50	2.2	1500	6
4	52	2.4	1700	7

根据单因素预试验结果,从中筛选出做正交试验的因素水平(见表 1-1),并利用 SPSS17.0 进行正交设计,分别统计不同处理条件下的收缩率、复水率、色泽、Vc 含

量、干燥时间,最终数据结果分析得出最佳因素水平。

1.4 指标测定

(1) 收缩率测定:参照郑素霞等人提出的方法,其中野生白蘑菇的体积等于野生白蘑菇与小米的总体积与小米的体积之差,计算方法如下所示^[3]。每组试验重复进行 5 次,取数据的平均值。

$$\text{收缩率} \% = \frac{\text{干燥前野生白蘑菇体积} - \text{干燥后野生白蘑菇体积}}{\text{干燥前野生白蘑菇体积}} \times 100\%$$

(2) 复水率测定方法:参照马先英等给出的方法,称取干制后的野生白蘑菇样品 (M_1) 放入盛有温度为 40℃ 蒸馏水的烧杯中,加热 5min 后,取出蘑菇,在通风干燥处沥干菇表面水分,称重 (M_2),再次放回原烧杯中,重复操作至整个野生白蘑菇样品吸水呈饱和状态^[4]。

$$\text{复水率} = \frac{M_2}{M_1} \times 100\%$$

(3) 色泽的测定方法:蘑菇色度,用色差计测定,其中 L 值为 100 表示白色, L 值为 0 表示黑色,且 L 值越大,色泽越好。

(4) Vc 的测定方法:参照国家标准以 2,6-二氯酚靛酚法测定。

(5) 干燥时间测定:记录从干燥开始至制品含水量 $\leq 10\%$ 时的时间。

1.5 数据统计与分析

上述测定指标均需重复 5 次。全部数据用 Microsoft Excel 2007 软件计算平均值和标准偏差,部分数据用 SPSS 17.0 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 切片厚度对野生白蘑菇干品的品质影响



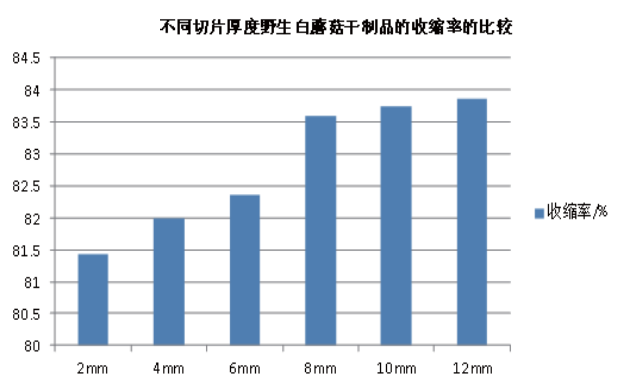


图 1-2

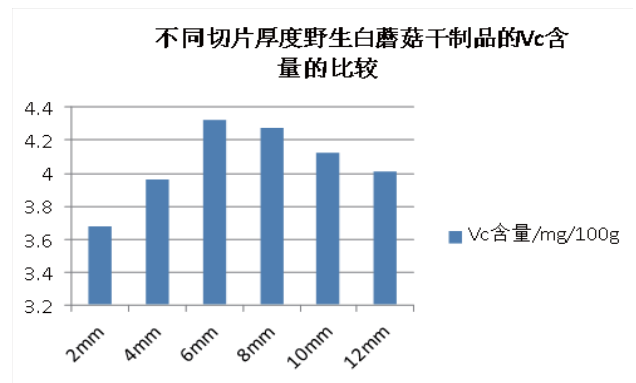


图 1-5

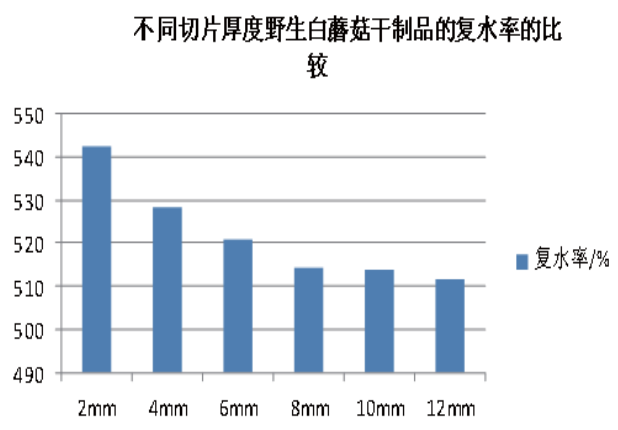


图 1-3

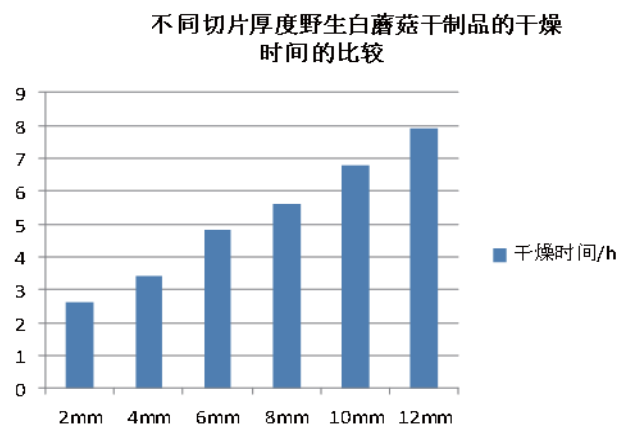


图 1-6

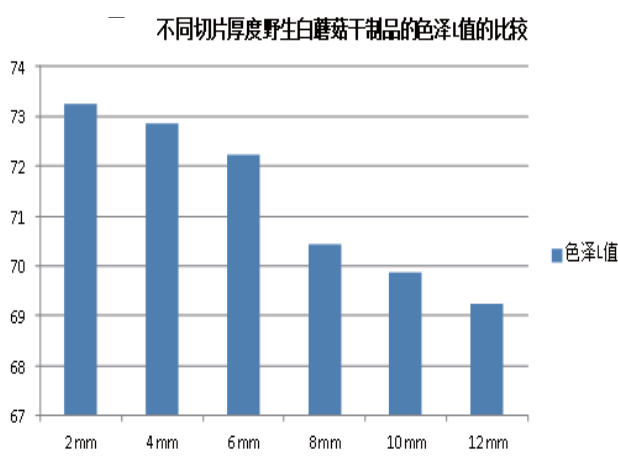


图 1-4

(1) 不同切片厚度野生白蘑菇干制品的收缩率的比较
由图 1-2 可知,野生白蘑菇干制品的收缩率越大,干制品的切片厚度也越大,原因可能是切片越厚,干燥速度越慢,从而导致收受率增大。

(2) 不同切片厚度野生白蘑菇干制品的复水率的比较
由图 1-3 可知,野生白蘑菇干制品的复水率大小与切片厚度密切相关,可能是由于切片越厚,干燥速度越慢,制品质地致密,收受率越大,导致复水率越小有关。

(3) 不同切片厚度野生白蘑菇干制品的色泽 L 值的比较
由图 1-4 可知,干制品色泽 L 值与切片厚度密切相关,并发现干制品色泽越好,切片厚度小和干燥时间短有关。



(4) 不同切片厚度野生白蘑菇干制品 Vc 含量的比较

由图 1-5 可知, 野生白蘑菇干制品的 Vc 含量较高时, 对应的切片厚度为 6-8mm。这可能是因为切片越薄, 在预处理过程中, 菇片的单位比表面积下 Vc 流失较大, 故在干制品中 Vc 含量较小。菇片越厚, 对应的干燥时间提高, 长时间的干制导致 Vc 氧化严重, 致使在干制品中含量降低。

(5) 不同切片厚度野生白蘑菇干燥时间的比较

由图 1-6 可知, 干燥时间越短, 切片厚度越小。

由以上分析得出, 切片厚度在 4-8mm 之间时野生白蘑菇干制品的品质较好。

2.1.2 干燥温度对野生白蘑菇干品的品质影响

(1) 不同干燥温度野生白蘑菇干制品收缩率的比较

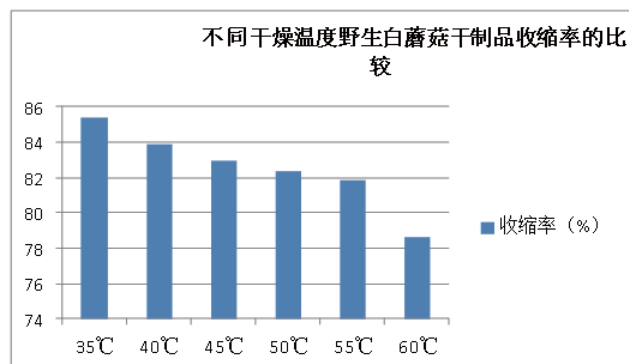


图 1-7

不同干燥温度野生白蘑菇干制品复水率的比较

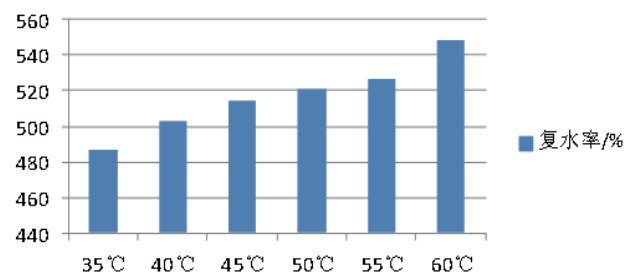


图 1-8

不同干燥温度野生白蘑菇干制品色泽 L 值的比较

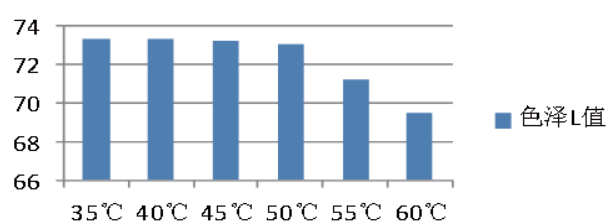


图 1-9

不同干燥温度野生白蘑菇干制品 Vc 含量的比较

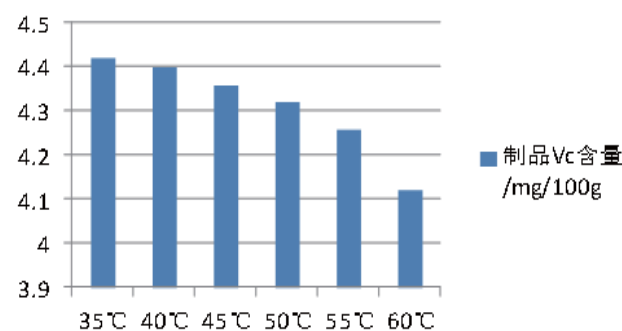


图 1-10

不同干燥温度野生白蘑菇干制品干燥时间的比较

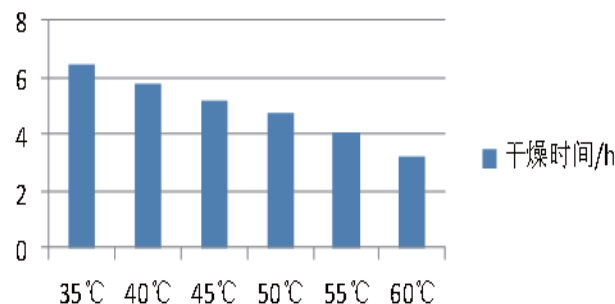


图 1-11



由图 1-7 可知，干制品的收缩率越低，对应的干燥温度越高，干燥温度越高，则干制速度加快，使制品收缩率越低。

(2) 不同干燥温度野生白蘑菇干制品复水率的比较

由图 1-8 可知，在一定范围内，干燥温度与干制品的复水率呈正相关关系，即复水率越高，对应干制温度越高，可能与温度越高干燥速度越快，制品质地疏松越高，导致制品复水率越高。

(3) 不同干燥温度野生白蘑菇干制品色泽 L 值的比较

由图 1-9 可知，干燥温度在 35-50℃ 范围时，制品的色泽 L 值变化不大，干燥温度高于 55℃ 后，制品的色泽 L 值变小，可能与较高温度下野生白蘑菇中的美拉德反应加快有关。

(4) 不同干燥温度野生白蘑菇干制品 Vc 含量的比较

由图 1-10 可知，高温会破坏 Vc 活性，则干燥温度越高 Vc 流失将被加速。

(5) 不同干燥温度野生白蘑菇干燥时间比较

由图 1-11 可知，干燥时间越短，则所需的干燥温度越大，因干燥温度越高，水分蒸发越高，故干燥时间越短，且当干燥温度在 45-55℃ 之间时，野生白蘑菇干制品的品质较好。

2.1.3 干燥风速对野生白蘑菇干品的品质影响

(1) 不同干燥风速情况下野生白蘑菇干制品收缩率的比较

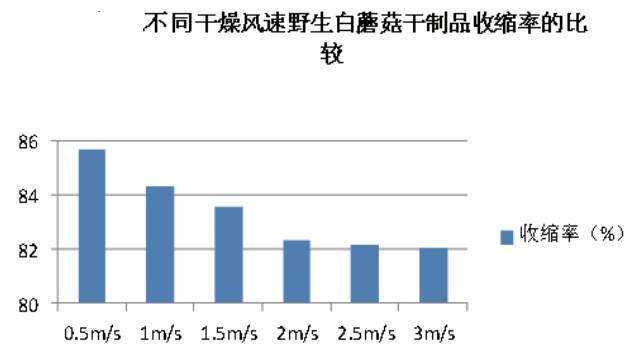


图 1-12

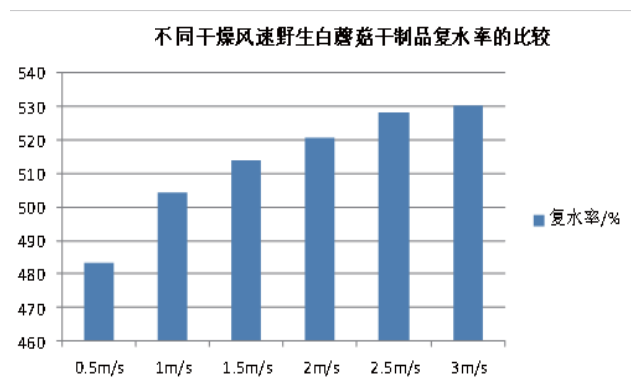


图 1-13

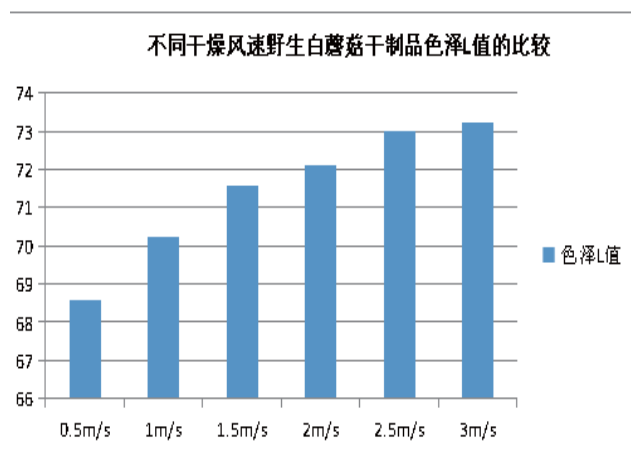


图 1-14

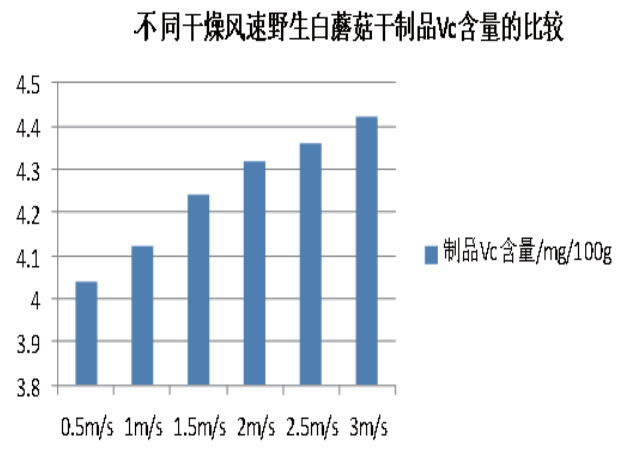


图 1-15



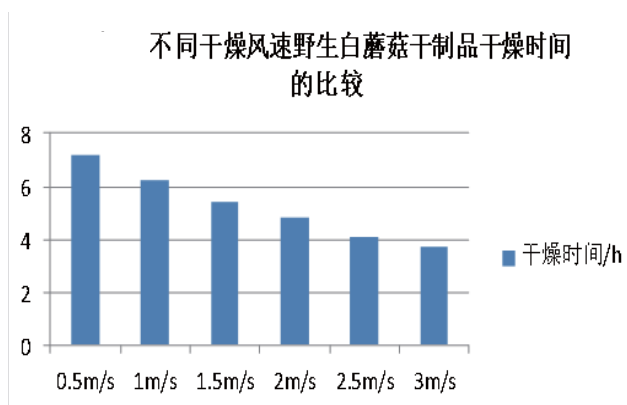


图 1-16

由图 1-12 可知，干燥风速越快，野生白蘑菇干制品的收缩率越小，这与干燥风速越快，传热越快，干燥速度越快有关。

(2) 不同干燥风速野生白蘑菇干制品复水率的比较

由图 1-13 可知，当野生白蘑菇干制品复水率越大时，对应的干燥风速越快，这与干燥风速越快，干燥速度越快，传热越快，制品的质地越疏松有关。

(3) 不同干燥风速野生白蘑菇干制品色泽 L 值的比较

由图 1-14 可知，当野生白蘑菇干制品色泽越好时，干燥风速越大，这与风速越大，干燥时间越短有关。

(4) 不同干燥风速野生白蘑菇干制品 Vc 含量的比较

由图 1-15 可知，当野生白蘑菇干制品 Vc 含量越高，对应的干燥风速越大，而当风速越大，干燥时间越短，则 Vc 流失越少。

(5) 不同干燥风速野生白蘑菇干燥时间的比较

由图 1-16 可知，当干燥时间越短时，所需的干燥风速越大，而当风速越大，传热越好，水分蒸发越快，故干燥时间越短。

由以上分析得出干燥风速在 2-3m/s 之间时，野生白蘑菇干制品的品质较好。

2.1.4 装载量对野生白蘑菇干品的品质影响

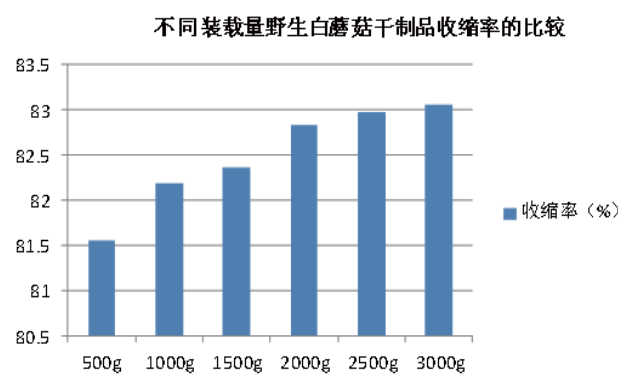


图 1-17

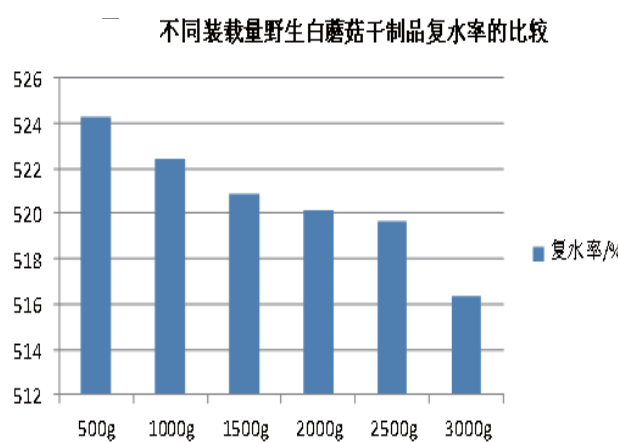


图 1-18

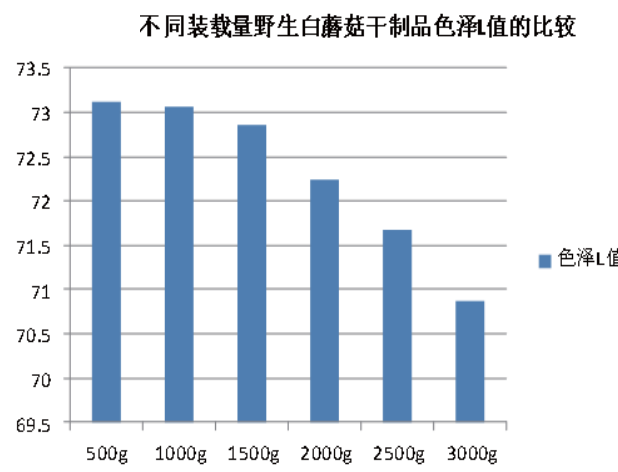


图 1-19



不同装载量野生白蘑菇干制品Vc含量的比较

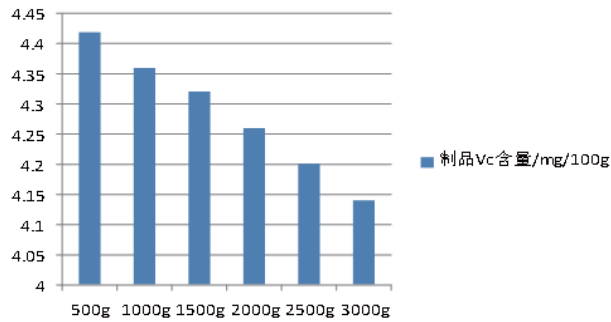


图 1-20

不同装载量野生白蘑菇干燥时间的比较

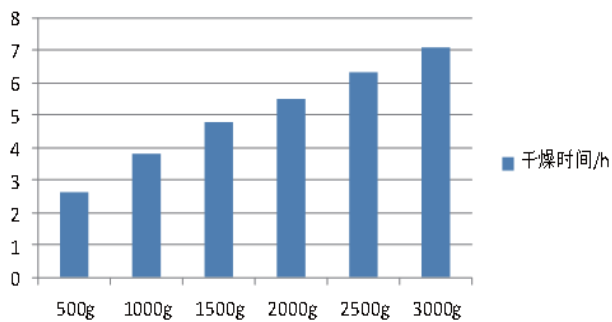


图 1-21

(1) 不同装载量野生白蘑菇干制品收缩率的比较

由图 1-17 可知, 装载量越大, 野生白蘑菇干制品收缩率

越大, 因为装载量越大干燥的速度越慢, 故制品收缩率越大。

(2) 不同装载量野生白蘑菇干制品复水率的比较

由图 1-18 可知, 当野生白蘑菇干制品复水率越小时, 其装载量越大, 因为装载量越大干燥的速度越慢。因此, 所得制品的质地越致密, 故复水率较小。

(3) 不同装载量野生白蘑菇干制品色泽 L 值的比较

由图 1-19 可知, 装载量越大, 野生白蘑菇干制品色泽 L 值越小, 这与装载量越大干燥的速度越慢, 加热时间越长有关。

(4) 不同装载量野生白蘑菇干制品 Vc 含量的比较

由图 1-20 可知, 当野生白蘑菇干制品 Vc 含量越小时, 对于物料的装载量越大, 因为装载量大, 所需加热时间长, 加之干燥的速度慢, 因此 Vc 流失较大。

(5) 不同装载量野生白蘑菇干燥时间的比较

由图 1-21 可知, 当干燥时间越长时, 对应的装载量越大, 因为装载量越大, 干燥室内的, 水分越多, 蒸发所需的时间越长。

由以上综合分析得出装载量在 1000-2000g 之间时, 野生白蘑菇干制品的品质较好。

2.2 正交设计分析

表 1-21 热泵干燥正交试验 L16 (4⁴)

表 1-21 热泵干燥正交试验 L16 (4⁴)

试验	组合 (spss 生成设计)				结果				
	温度 (°C)	风速 (m/s)	装载量 (g)	切片厚度 (mm)	收缩率 (%)	复水率 (%)	色泽 L 值	Vc 含量 (mg/100g)	干燥时间 (h)
1	48	1.8	1300	5	83.86	500.22	72.46	3.96	5.4
2	52	2.2	1100	6	80.28	546.34	69.46	4.02	5.2
3	46	1.8	1100	4	84.02	488.32	74.28	3.96	5.4
4	50	2.4	1700	4	82.46	520.48	69.98	3.72	4.6
5	46	2.2	1700	5	84.86	486.56	73.24	4.12	6.4
6	50	2.2	1300	7	81.84	534.26	71.14	4.08	5.6
7	48	2.4	1100	7	82.64	518.32	72.38	4.34	5.6



8	46	2	1500	7	85.46	468.49	72.88	4.28	7.6
9	52	1.8	1700	7	82.98	514.48	65.78	3.98	6.9
10	48	2.2	1500	4	83.46	507.48	72.58	3.88	4.2
11	50	2	1100	5	81.68	530.06	72.24	4.08	4.6
12	52	2	1300	4	79.12	562.88	69.88	3.42	3.6
13	52	2.4	1500	5	79.22	561.22	69.13	3.82	4
14	48	2	1700	6	83.22	508.02	71.24	4.22	6.8
15	46	2.4	1300	6	83.78	506.43	74.04	4.28	6
16	50	1.8	1500	6	81.68	530.06	69.52	4.12	6.2

在单因素试验结果的基础上，天祝野生白蘑菇热泵干燥的工艺优化试验，采用四因素四水平的正交设计（利用 SPSS17.0 自动生成）。选取装载量、干燥温度、风速、切片厚度四个因素，分析这四个因素对野生白蘑菇干制品的收缩率、复水率、Vc 含量、色泽、干燥时间的影响规律，以得到最佳干制工艺参数。

利用 SPSS17.0 对表 1-21 正交试验结果进行方差分析，其结果见表 1-22。根据表 1-22 可以得出结论如下：在判定产品质量时，干燥温度对所有指标均造成显著性影响（ $P < 0.05$ ），其影响顺序为色泽 L 值 > Vc 含量 > 干燥

时间 > 复水率 > 收缩率，其中色泽和 Vc 含量对干燥温度较为敏感；而色泽 L 值和干燥时间受干燥风速影响较大（ $P < 0.05$ ），其影响顺序为色泽 L 值 > 干燥时间 > 复水率 > 收缩率 > Vc 含量；装载量只对色泽 L 值和干燥时间显著影响（ $P < 0.05$ ），其影响顺序为色泽 L 值 > 干燥时间 > Vc 含量 > 收缩率 > 复水率，其中装载量对色泽 L 值的影响极显著（ $P < 0.01$ ）；切片厚度只对 Vc 含量、干燥时间、色泽 L 值影响（ $P < 0.05$ ），其影响顺序为 Vc > 干燥时间 > 色泽 L 值 > 收缩率 > 复水率，其中 Vc 含量和干燥时间均受切片厚度对的影响极为显著（ $P < 0.01$ ）。

表 1-22 主体间效应的检验

表 1-22 主体间效应的检验

源	因变量	III 型平方和	df	均方	F	Sig.
鲜果	1	0.0747	0.0345	0.1273	0.0155	0.50
	2	0.0727	0.0340	0.1309	0.0162	0.64
	3	0.0603	0.0477	0.1569	0.0042	0.45
	4	0.0568	0.0365	0.1357	0.0043	0.46
	5	0.1240	0.1002	0.1050	0.0093	0.28
截距	收缩率 %	108992.420	1	108992.420	96487.624	.000
	复水率 %	4288647.519	1	4288647.519	20037.506	.000
	色泽 L 值	81257.778	1	81257.778	1235429.147	.000
	干燥时间 h	485.101	1	485.101	7208.926	.000
	Vc 含量 mg/100g	258.245	1	258.245	87048.843	.000

W	收缩率 %	38.001	3	12.667	11.214	.039
	复水率 %	7739.228	3	2579.743	12.053	.035
	色泽 L 值	55.638	3	18.546	281.971	.000
	干燥时间 h	4.462	3	1.487	22.102	.015
	Vc 含量 mg/100g	.282	3	.094	31.674	.009
F	收缩率 %	2.612	3	.871	.771	.582
	复水率 %	677.561	3	225.854	1.055	.483
	色泽 L 值	3.146	3	1.049	15.943	.024
	干燥时间 h	1.892	3	.631	9.372	.049
	Vc 含量 mg/100g	.004	3	.001	.461	.730
Z	收缩率 %	4.052	3	1.351	1.196	.443
	复水率 %	738.276	3	246.092	1.150	.456
	色泽 L 值	10.269	3	3.423	52.043	.004
	干燥时间 h	2.672	3	.891	13.235	.031
	Vc 含量 mg/100g	.055	3	.018	6.169	.085
H	收缩率 %	2.639	3	.880	.779	.579
	复水率 %	441.780	3	147.260	.688	.617
	色泽 L 值	3.933	3	1.311	19.930	.017
	干燥时间 h	9.682	3	3.227	47.960	.005
	Vc 含量 mg/100g	.473	3	.158	53.180	.004
误差	收缩率 %	3.389	3	1.130		
	复水率 %	642.093	3	214.031		
	色泽 L 值	.197	3	.066		
	干燥时间 h	.202	3	.067		
	Vc 含量 mg/100g	.009	3	.003		
总计	收缩率 %	109043.113	16			
	复水率 %	4298886.457	16			
	色泽 L 值	81330.961	16			
	干燥时间 h	504.010	16			
	Vc 含量 mg/100g	259.068	16			



校正的总计	收缩率 %	50.693	15			
	复水率 %	10238.938	15			
	色泽 L 值	73.183	15			
	干燥时间 h	18.909	15			
	Vc 含量 mg/100g	.823	15			

由以上分析可知,干燥温度将决定干燥产品品质的好坏,而切片厚度为影响产品品质的第二类因素,次要因素为干燥风速和装载量。

根据表 1-21 直观分析、方差分析、均值趋势图分析得出野生白蘑菇热泵干燥最佳工艺条件为,干燥温度 46℃,装载量 1100 g,切片厚度 6 mm,干燥风速 2.2 m/s。

2.3 验证回归实验

根据正交试验得出的最优工艺(干燥温度 46℃,切片厚度 6 mm,装载量 1100 g,干燥风速 2.2 m/s)进行野生白蘑菇干制试验,经检验干燥制品的收缩率为 79.68%,复水率为 544.83%,色泽 L 值为 73.68, Vc 含量为 4.28 mg/100g,干燥时间 4.8 h,以上指标均在良好范围之内。

3 结论

通过确定的最佳工艺参数,进行了正交试验,选取了装载量、干燥温度、风速、切片厚度四个因素,分析这四个因素对野生白蘑菇干制品的收缩率、复水率、Vc 含量、色泽、干燥时间的影响规律,以得到最佳干制工艺参数。通过正交实验可知,对所有判定质量指标而言,干燥温度均对考察指标产生了有显著影响($P < 0.05$),其影响顺序为色泽 > Vc 含量 > 干燥时间 > 复水率 > 收缩率,其中干燥温度对色泽、Vc 含量的影响极显著($P < 0.01$);干燥风速只对干燥时间和色泽 L 值有显著影响($P < 0.05$),其影响顺序为色泽 L 值 > 干燥时间 > 复水率 > 收缩率 > Vc 含量;装载量只对干燥时间和色泽 L 值有

显著影响($P < 0.05$),其影响顺序为色泽 L 值 > 干燥时间 > Vc 含量 > 收缩率 > 复水率,其中装载量对色泽 L 值的影响极显著($P < 0.01$);切片厚度只对 Vc 含量、色泽 L 值、干燥时间有显著影响($P < 0.05$),其影响顺序为 Vc 含量 > 干燥时间 > 色泽 L 值 > 收缩率 > 复水率。

根据前期实验得到的最佳工艺参数,即装载量为 1150 g,干燥温度 46℃,切片厚度 6mm,干燥风速 2.2m/s 下进行干制试验,结构表明:蘑菇干燥制品的收缩率为 79.68%,复水率为 544.83%,色泽 L 值为 73.68, Vc 含量为 4.28mg/100g,干燥时间 4.8h,以上指标均在良好范围之内。经过回归试验发现,干制蘑菇的品质较好,符合产品质量标准。■

参考文献

- [1] 杨玲;王小龙.磨脐山野生白蘑菇营养成分分析与评价[J].食用菌,2021,43(02):60-62+67.
- [2] 任晓芬;陈启东;郜玉聪;王莉媛;郭军霞;郭晓红.热泵干燥技术的研究进展[J].节能,2021,40(04):74-76.
- [3] 郑素霞等.微波对苹果脆皮干燥特性的影响[J].华南农业大学学报,2004.
- [4] 马先英,赵世明,等.不同干燥方式对胡萝卜复水性及品质的影响[J].大连水产学院学报,2006,21(21):58-61.

