

鲜块菌片热风干燥工艺参数的优化

苗玉志¹, 张微帷², 何兵¹

(1. 四川师范大学生命科学学院, 四川成都 610101) (2. 四川白家食品有限公司, 四川成都 610100)

摘要: 为了为鲜块菌的干燥和工业化生产提供理论依据, 通过3因素5水平的二次正交旋转组合实验, 分析了风温、风速及装量与干燥产品质量、干燥速率及复水率比间的关系, 建立了二次回归数学模型, 并研究了3因素对各指标的交互作用及显著性影响; 利用多目标线性加权优化法, 确定了鲜块菌热风干燥的最佳工艺参数, 即风温50℃、风速0.3 m/s、装量2.81 kg/m²。在此条件下, 干燥产品质量得84.68分、脱水速率为10.98%/h、复水率比为3.7:1, 验证结果与优化预测值接近, 优化结果可信。

关键词: 鲜块菌; 热风干燥; 工艺; 优化

文章篇号: 1673-9078(2013)1-162-166

Hot-air Drying Technical Parameters Optimization of Fresh Truffle Slices

MIAO Yu-zhi¹, ZHANG Wei-wei², HE Bin¹

(1. College of Life Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China)

(2. Sichuan Baijia food Co., LTD, Chengdu 610100, China)

Abstract: To provide a theoretical foundation for drying and industrialized production of fresh truffle slices, the quadratic orthogonal rotation method with three factors and five levels for each factor was employed. Drying temperature, material load and airflow rate were the main influence factors. And synthetic score of sensory quality, dehydration rate and rehydrate ratio of dried truffle slices were used as experimental indices. The relationships between the experimental indices and the influence factors were analyzed. The regression mathematical models describing the relations between the experimental indices and the influence factors were established to analyze the interaction effects and the influence degree of the factors on the experimental indices. The optimal combination of technological parameters for drying materials was obtained by multi-objective linear weighted optimization method. The optimal parameters were as follows: hot-air temperature 50℃, material load 2.81 kg/m², and airflow rate 0.3 m/s. Under these conditions, score for sensory quality indicator was 86.1. Dehydration rate was 10.98%/h and rehydrate ratio was 3.7:1. There was a close agreement between experimental and predicted values.

Key words: hot-air drying; processing; optimization; fresh truffle

块菌在真菌分类学上属于子囊菌亚门 (*Ascomycotina*), 块菌目 (*Tuberales*), 块菌科 (*Tuberaceae*), 块菌属 (*Tuber*)^[1]。通过对不同产地的块菌子实果的营养组分分析, 表明块菌营养非常丰富, 是一种公认的功能性食品^[2,3]。通过对块菌化学和药理学研究表明: 块菌雄甾烯二酮是雄性酮前体类物质, 能够调节月经和引起女性的性欲^[4,5]; 神经酰胺能够参与调节细胞多种生物学过程, 如生物信息传递、抗原抗体反应等功能^[6,7]; 块菌多糖水溶性好, 能够抗癌和提高免疫系统等功能^[8]。因此, 块菌是世界上最珍贵的药食两用真菌之一, 自远古被发现以来被公认为自然界的奇迹, 餐桌上的珍品^[9]。

自然生块菌主要分布在北半球的温带地区, 主要产区为欧洲, 东南亚和北美洲。从上世纪70年代开始,

许多国家先后开展了块菌的半人工栽培研究^[10,11], 并取得了成功, 已进行规模化种植, 鲜块菌的产量将大幅度增加。由于鲜块菌营养丰富, 极易发生质变, 加之产地偏远, 其深加工一直是块菌产品生产中的薄弱环节, 严重制约块菌的产业化发展。

块菌子囊果呈不规则的球形、半球形或块状, 其表皮上有棕色的疣突, 切面呈褐色, 具有白色的大理石纹样, 其形态结构与其它食用真菌完全不同。虽然国内外已有大量热风干燥产品的及相关技术研究报道^[12,13], 有些已经得到应用并取得了显著的经济效益。但至今尚未见到有关鲜块菌热风干燥方面的研究报道。因此, 开展鲜块菌的热风干燥过程研究, 分析风温、风速及装量与干燥产品质量、干燥速率及复水率比的关系, 旨在优化鲜块菌热风干燥工艺参数, 为企业规模化生产提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

收稿日期: 2012-09-02

作者简介: 苗玉志(1972-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为资源生物技术; 张微帷(1986-), 女, 食品专业助理工程师, 从事食品生产质量管理工作

1.1 材料

鲜块菌：产地为四川省会东县，样品装于塑料袋中真空密封冷藏备用。

1.2 仪器与设备

热风干燥设备，成都精工干燥设备厂制造；26000型探头式自动打印中心温度计，美国DELTA TRAK公司；BT-124S型电子天平，北京塞多利斯仪器有限公司；DHG-9245型电热恒温鼓风干燥箱，上海一恒科学仪器有限公司；SC69-02C型水分快速测定仪，上海精密科学仪器有限公司。

1.3 方法

原料-贮藏保鲜-清洗整理-分级及切片-热风干燥-质量检测-定重包装

操作要点：将鲜块菌清洗干净晾干明水，测定得到鲜块菌初始含水率为75.5%。按照块菌直径大小进行分级后并切片。然后将相同大小的鲜块菌片按规定数量薄层摆放在在不锈钢烘盘中，再放入热风干燥柜内进行干燥。

1.4 工艺优化

实验采用二次正交旋转组合进行，通过预实验，取对干燥过程影响较大的风温、风速及装量作为影响因素，以品质分数、脱水速率以及复水率比为评价指标，建立数学模型进行综合优化（dps9.0版软件）。利用软件获得二次正交旋转组合的各因子真实水平编码表见表1

表1 二次正交旋转组合设计因素和水平 (r=1.6818)

Table 1 Factor and level of Second orthogonal rotation design

实验水	实验因子		
平/ X_j	X_1 [热风温度/ $^{\circ}C$]	X_2 [热风风速(m/s)]	X_3 [装量(kg/m ²)]
r	70	0.5	6
1	65.95	0.42	5.19
0	60	0.3	4
-1	54.05	0.18	2.81
-r	50	0.1	2

1.5 综合优化

在单指标优化的基础上，分别将三个因素中的二个因素固定在各自优化值上，由此来分析第三个因素对三个指标的交互影响，然后利用线性加权法进行综合优化。

1.6 指标测定

物料含水率按GB5496-2003标准采用常压烘箱干燥法和水分快速测定仪结合进行测定。

含水率比是指干燥全过程去除水分后物料质量（干基）与去除水分前物料质量的比值，记为Mr，其测定和计算办法参照^[14]进行。

复水率比是干燥物料经过加热充分浸泡复原后，复原料与干物料的比值，其测定方法按照^[18]进行。

感官品质指标是干燥块菌产品的一项重要指标，本研究由9名行业专家组成9人小组，根据表2评分标准进行评定。

表2 干燥块菌片的感官质量评分标准

Table 2 The sensory quality criteria of the dried truffle slices

等级	优	良	差
评分标准	80~100	60~79	<60
色泽	片整体黑褐色无不正常色泽，切面有清晰可见的白色纹路，	片整体黑褐色略微偏黄无其它不正常色泽，切面有清晰可见的白色纹路，	无自身的黑褐色，整体为黄褐色，切面白色纹路不清晰
香味	具有块菌干片应有的浓郁香味，无焦味和霉味等异味	具有块菌干片应有的正常香味，略带焦味，无霉味等其它异味	无块菌干片应有的正常香味，整体呈现出焦味，或霉味等其它异味
质地	硬而脆	具有一定的脆度	较软，无脆度
水分/%	8~12	12~16	>16

2 结果与分析

2.1 单指标的优化

按照表1所设计的因素和水平，利用统计软件dps9.5版本在二次正交旋转组合模式下得到一矩阵，共23次实验，矩阵和实验结果数据见表3。

对所得到的23组数据，利用dps9.5版本统计软件和回归分析对所测各项指标进行处理，建立鲜块菌片干燥质量分数回归方程、鲜块菌脱水速率回归方程和复水率比回归方程。并分别对得到的3方程进行方差分析

和显著性检验，分别得到质量分数方差分析、脱水率方差分析表和复水率比方差分析各因素和交互作用的显著性影响情况（方差分析和显著性检验结果表略）。

由方差分析和显著性检验，在 $\alpha=0.10$ 的显著水平上，剔除回归系数中对性能指标影响不显著的项，简化后得到以下回归方程：

质量分数回归方程

$$Y_1 = 81.58 - 5.30X_1 + 1.47X_2 - 5.6X_3 - 2.88X_1^2 - 3.75X_2^2 - 3.26X_3^2 - 3.18X_1X_2 \quad (1)$$

脱水速率回归方程:

$$Y_2 = 12.29 + 2.17X_1 - 0.78X_3 + 0.55X_1^2 - 0.53X_1X_3 - 0.51X_2X_3 \quad (2)$$

复水率比回归方程

$$Y_3 = 3.18 - 0.31X_1 + 0.19X_2 - 0.12X_3 + 0.10X_1^2 \quad (3)$$

对3个单指标方程, 在规定的取值范围内利用软件优化得到质量分数、脱水速率和复水率比达到最高值时, 各个因素的最佳工艺参数组合见表4。

表3 鲜块菌切片热风干燥工艺实验方案及结果

Table 3 Results of the experiment for optimization of hot air drying conditions for truffle

处理号	因子编码水平			质量评分/分*	脱水速率/(%/h)*	复水率比/倍*
	X ₁	X ₂	X ₃			
1	1	1	1	63.5	13.27	3.05
2	1	1	-1	72.0	17.1	3.67
3	1	-1	1	65.0	13.54	2.88
4	1	-1	-1	74.5	16.25	2.92
5	-1	1	1	75.8	9.85	3.82
6	-1	1	-1	83.5	12.26	3.88
7	-1	-1	1	66.0	10.66	3.68
8	-1	-1	-1	85.2	11.21	3.70
9	-1.6818	0	0	88.0	9.29	3.83
10	1.6818	0	0	60.2	18.1	2.82
11	0	-1.6818	0	68.9	11.4	2.68
12	0	1.6818	0	73.5	13.54	3.46
13	0	0	-1.6818	83.1	13	3.38
14	0	0	1.6818	65.5	11.82	2.86
15	0	0	0	82.8	12.36	3.22
16	0	0	0	82.0	12.26	3.20
17	0	0	0	81.8	12.18	3.23
18	0	0	0	83.0	12.26	3.23
19	0	0	0	82.5	12.27	3.21
20	0	0	0	82.0	12.35	3.23
21	0	0	0	83.1	12.34	3.25
22	0	0	0	82.5	12.20	3.23
23	0	0	0	82.9	12.25	3.19

注: *所得结果为三次实验的平均值。

表4 各单目标的最佳工艺参数组合

Table 4 The best coefficient combination of every target

目标	优化参数组合编码值和实际值			最大指标值
	X ₁	X ₂	X ₃	
质量评分/分	-1.6818(50)	-1.0000(0.42)	-1.0000(2.81)	88.15
脱水速率(%/h)	1.6818(70)	1.6818(0.5)	-1.6818(2)	21.76
复水率比	-1.6818(50)	1.6818(0.5)	-1.6818(2)	4.52

由表4可知, 单为了获得理想的产品质量, 在确定

工艺条件参数时就要风温低, 风速适中, 装量要少, 风温和装量越大, 质量越差, 可能是因为装量过大, 干燥温度过高会使块菌长时间处于高温环境, 使得块菌的组成成分焦化和变质。要获得较大的干燥速率, 就需要较高的温度, 较大的风速以及最少的装量, 这说明风温高, 风速大时, 干燥速率较大, 这是因为块菌片在这样的条件下水分蒸发较快, 干燥时间短, 导致干燥速率就高。要获得最大复水率比的工艺条件参数是较低的温度, 较大的风速和较少的装量, 说明装量少, 风温低, 风速大时, 复水率比大, 可能是由于温度高很容易导致块菌的组织结构被破坏, 而较大的风速和较少的装量都有利于温度和热量的散失, 还有就是装量过大, 风速低会造成干燥时间的延长, 也将增加块菌组织结构的变化程度, 从而导致块菌复水性下降。

2.2 各因子对三指标的交互效应分析

将优化获得的各单指标最大目标值对应的因子值(表4)代入方程(1), 以温度(取值范围50℃~70℃)为变量作图, 以考察风温对三指标指数的交互影响, 见图1。

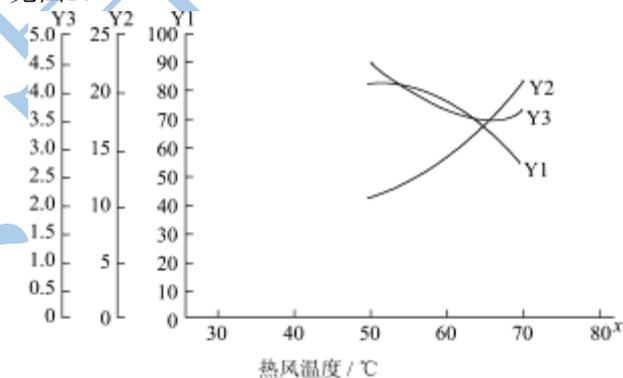


图1 热风温度对三指标的交互影响

Fig.1 Effect of hot-air temperature on three targets

由图1可以看出, 对块菌片的质量分数Y₁而言, 热风温度在50℃时, 质量分数最高, 也即获得的块菌片的质量最好, 而随着温度的升高质量明显下降; 对块菌的干燥速率Y₂而言, 当热风温度为50℃时最小, 随着温度的升高, 干燥速率明显增大, 当温度达到70℃, 干燥速率达到最大; 复水率比Y₃在温度为50℃时也是最高, 而随着温度的升高起初明显降低, 当达到约66℃时达最低, 其后随着温度的升高又有升高的趋势。温度对三指标值的影响在约68℃附近有一个交叉点。

将优化获得的各单指标最大目标值对应的因子值(表4)代入方程(2), 以风速(0.1 m/s~0.5 m/s)为变量作图, 来考察风速对三个指标指数的交互影响规律, 见图2。

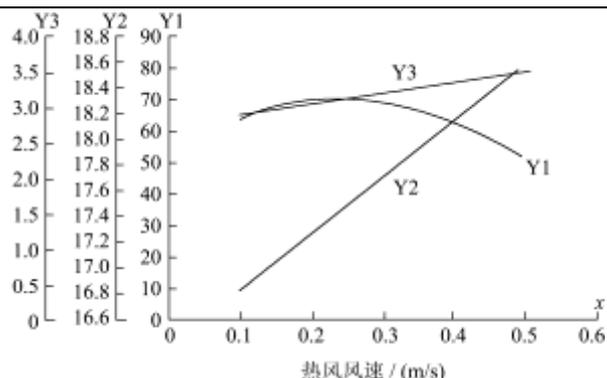


图2 不同因子对三指标的交互影响

Fig.2 Effect of airflow rate on three targets

由图2可以看出,对块菌片的质量分数 Y_1 而言,风速在开始阶段随风速的增加质量提高,当达到约0.18 m/s时达到最大,而后随着风速提高则呈明显的下降趋势;对块菌的干燥速率 Y_2 和块菌片的复水率比 Y_3 而言,都是随着热风风速的增大干燥速率和复水率比明显增大,当风速达到最大的0.5 m/s时干燥速率和复水率比都达到最大。风速对三目标的影响两两间有交叉点,质量分数与干燥速率在风速为0.4 m/s附近交叉,而复水率比与干燥速率在0.5 m/s有交叉。

将优化获得的各单指标最大目标值对应的因子值(表4)代入方程(3),以装量(取值范围2 kg/m²~6 kg/m²)为变量作图,来考察风温对三个指标指数的交互影响规律,见图3。

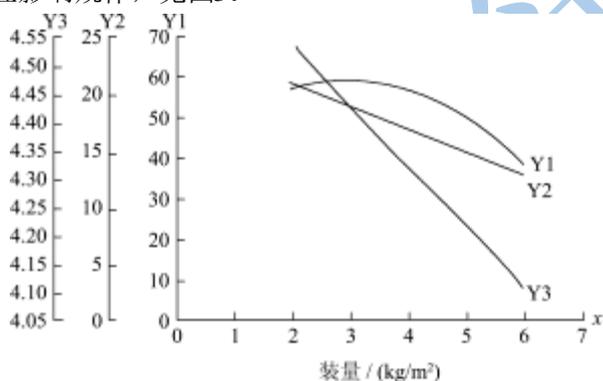


图3 装量对三指标的交互影响

Fig.3 Effect of material load on three targets

由图3可以看出,装量对块菌片的质量分数影响情况,产品质量分数 Y_1 随装量的增加而增高,当达到2.81 kg/m²达到最大,此后随装量的增加反而降低;对块菌的干燥速率 Y_2 和块菌片的复水率比 Y_3 而言,都是随着装量的增加干燥速率和复水率比明显减小,当装量在最小值2 kg/m²时干燥速率和复水性比都达到最大。装量对三指标值在约2.5 kg/m²附近有三个交叉点。

2.3 综合优化

热风干燥鲜块菌切片和干燥其它食用菌一样,获得的工艺参数应尽量满足干后产品质量好、干燥速率

快、复水率比大以及生产率高要求。由于以上优化都是针对某一单个指标进行的,各单个指标所获得的优化组合各不相同。而在实际生产中应同时需要综合考虑三个指标的影响,所以在单个指标优化的基础上,根据各指标对终产品的重要程度必须确定出某一较佳组合,因而需对上述三因素进行综合优化。

本实验用线性加权法来确定评价函数 F

$$令 F = \lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2 + \lambda_3 y_3$$

式中, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为按照产品品质,干燥速率,复水比的重要程度给定的一组加权系数,满足 $\lambda_1 > 0$ 、 $\lambda_2 > 0$ 、 $\lambda_3 > 0$,且 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ 。综合优化计算时,设定权重大小依次为:产品品质 > 干燥速率 > 复水比,且取 $\lambda_1 = 0.5$ 、 $\lambda_2 = 0.3$ 、 $\lambda_3 = 0.2$ 。这样目标函数转化为: $F = 0.5y_1 + 0.3y_2 + 0.2y_3$,求其最大值,约束条件为表1中取值范围。

计算上式,解得优化结果为:热风温度50℃、热风风速0.3 m/s、装量2.81 kg/m²,与此相对应的干燥产品质量分数为84.68分、脱水速率为10.98%/h、复水率比为3.7:1。

根据综合优化的参数条件,进行实验验证:热风温度50℃、热风风速0.3 m/s、装量2.81 kg/m²,测得干燥产品质量分数为86.1分、脱水速率为11.05%/h、复水率比为3.58:1,与优化时的预测值接近,表明优化结果可信。

3 结论

3.1 采用二次正交旋转组合设计,探讨了热风温度、热风风速以及装量对干燥产品质量分数、干燥速率以及复水率比的影响并得到各单目标的最佳参数组合:当热风温度为50℃、热风风速为0.42 m/s以及装量为2.81 kg/m²,质量分数最大为88.15分,也即在此条件下产品质量最好;当热风温度70℃、热风风速0.5 m/s以及装量2 kg/m²时,脱水速率最高为21.76%/h;当热风温度为50℃、热风风速0.5 m/s以及装量2 kg/m²时,复水率比最大为4.52:1。

3.2 利用得到的方程作图进行二因子互作效应分析,得出了各影响因素对干燥产品质量、干燥速率以及复水率比的交互影响,总的趋势是:风温低,风速适中,装量少,产品质量好;而要获得较大的干燥速率,就需要较高的温度,较大的风速以及最少的装量;获得最大复水比的工艺条件参数是较低的温度,较大的风速和较少的装量,因此烘干作业中,在选择参数时,应考虑热风温度、热风速度以及装量的交互作用。

3.3 采用线性加权法,对干燥条件进行了综合优化,得出了最佳工艺参数组合,即热风温度50℃、热风风

速0.3 m/s、装量2.81 kg/m²，与此相对应的干燥产品质量分数为84.68、脱水速率为10.98 %/h、复水率比为3.7:1。实验验证测得各指标为干燥产品质量分数为86.1、脱水速率为11.05%/h、复水率比为3.58:1，与优化时的预测值接近，表明优化结果可信。

参考文献

- [1] Jasmina Glamoelija, Radmila Vujjeic, Jelena Vukojevie. Evidence of Truffles in Serbia [J]. Mycotaxon, 1997, 65: 211-222
- [2] Beuchat LR, Brennen TB, Dove CR. Composition of the pecan Truffle (*Tuber texense*) [J]. Food Chemistry, 1993, 46:189-192
- [3] 陶恺,科波.中国块菌的生态和营养价值[J].山西大学学报, 1990,13(3):319-321
- [4] Bradshaw D. Vertebrate ecophysiology: an introduction to its principles and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003
- [5] Brooksbank BWL, Haslewood GAD. The isolation of androst-16-en-3a-ol from women's urine [J]. Biochem J, 1952, 51:286-288
- [6] Gao JM, Zhang AL, Chen H, et al. Molecular species of ceramides from the ascomycete truffle *Tuber indicum* [J]. Chem Phys Lipids, 2004, 131: 205-213
- [7] Fillet M, Van Heugen JC, Servais AC, et al. Separation, identification and quantitation of ceramides in human cancer cells by liquid chromatography-electrospray ionization tandem mass spectrometry [J]. J Chromatogr A, 2002, 949 (1-2): 225-33
- [8] Yu-Zhi Miao, Qiang Lin, Yu Cao, et al. Extraction of Water-soluble Polysaccharides (WSPS) from Chinese Truffle and its Application in Frozen Yogurt [J]. Carbohydrate polymers, 2011, 86(2): 566-573
- [9] Mello A, Murat C, Bonfante P. Truffles: much more than a prized and local fungal delicacy [J]. FEMS Microbiol Lett, 2006, 260(1): 1-8
- [10] Hall IR, Yun W, Amicucci A. Cultivation of edible ectomycorrhizal mushrooms [J]. Trends Biotechnol, 2003: 21, 433-438
- [11] 张小雷,李树红,李世彪,等.印度块菌与园叶杨合成菌根苗技术初探[J].中国食用菌,2011,30(6):18-20
- [12] 唐明,赵焱,罗少华,等.切片双孢菇干燥节能技术研究[J].现代食品科技,2010,26(3):241-243
- [13] 周爱梅,万艳娟,李少华,等.喷雾干燥及热风干燥对南瓜粉营养特性和感官品质的影响[J].现代食品科技, 2011, 27(5): 528-533
- [14] 彭桂兰,吴文福,陈晓光,等.萝卜丝薄层干燥实验及其数学模型的建立[J].农业机械学报,2005,36(3):79-81