

蝙蝠蛾拟青霉发酵全液喷雾干燥工艺优化研究

武忠伟^{1,2,3}, 黄蓓蓓⁴, 张朝辉^{1,2}, 吴希阳¹, 李斌¹, 王洋洋¹, 刘富泳¹, 孙悦悦¹, 张明霞^{1,2,*}

- (1.河南科技学院生命科技学院, 河南新乡 453003;
2.河南省现代生物育种协同创新中心, 河南新乡 453003;
3.河南科技学院博士后研发基地, 河南新乡 453003;
4.三门峡职业技术学院食品园林学院, 河南三门峡 472000)

摘要:本研究以蝙蝠蛾拟青霉发酵全液为原料,以喷雾干粉的综合品质和出粉速率为筛选指标,通过单因素实验比较了发酵液全液总固形物含量、进料速率、进风温度和通风量对喷雾干燥效果的影响。进一步通过正交实验优化得到了蝙蝠蛾拟青霉发酵全液喷雾干燥的最佳工艺参数为:发酵全液总固形物含量 38.72 g/L,进料速度 600 mL/h,进风温度 180 ℃,进风量 30 m³/h,此时蝙蝠蛾拟青霉发酵全液喷雾干燥出粉速率达到 17.89 g/h,出粉率为 76.3%,所得喷雾干粉为粉末状,淡黄色,气味香甜,无结块,分散性能良好。

关键词:蝙蝠蛾拟青霉,发酵全液,喷雾干燥,优化

Process optimization of spray drying of fermented mesh from *Paecilomyces hepiali*

WU Zhong-wei^{1,2,3}, HUANG Bei-bei⁴, ZHANG Chao-hui^{1,2}, WU Xi-yang¹, LI Bin¹,
WANG Yang-yang¹, LIU Fu-yong¹, SUN Yue-yue¹, ZHANG Ming-xia^{1,2,*}

- (1.College of Life Science and Technology, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China;
2.Henan Collaborative Innovation Center of Modern Biological Breeding, Xinxiang 453003, China;
3.Postdoctoral Research Base, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China;
4.School of Food and Landscape Architecture Faculty, Sanmenxia Polytechnic, Sanmenxia 472000, China)

Abstract: The aim of this study was to develop a reliable spray drying technology of preparing for high-value dried powder based on the raw materials of fermented mesh of *P.hepiali*. The method of spray drying was employed to study the effect of total solid content of fermented mesh, feed flow, inlet air temperature, ventilation rate on spray drying by single factor test with standards of the overall quality and the output rate of dried powder. The optimal preparation parameters were obtained by orthogonal experiment, were total solid content 38.72 g/L, feed flow 600 mL/h, inlet air temperature 180 ℃, ventilation rate 30 m³/h. On this condition, the spray drying rate of powder collecting was 17.89 g/h, the dried powder yield was 76.3%. In addition, the high quality dried powder with the state of primrose yellow, sweet smelling, no lumps and good dispersion performance was obtained.

Key words: *Paecilomyces hepiali*; fermented mesh; spray drying; optimization

中图分类号: TS201.1 文献标识码: B 文章编号: 1002-0306(2017)08-0284-06

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2017.08.047

冬虫夏草是我国传统的珍贵药用真菌,由于价格昂贵和资源匮乏,致使其应用受到限制。自上世纪 80 年代以来,从天然虫草中分离出的多种内生真菌已用于发酵生产并被作为虫草替代品^[1-3]。研究表明蝙蝠蛾拟青霉(*Paecilomyces hepiali*)作为天然虫草子实体生长发育后期的一种重要内生真菌,其在

基因和生理活性物质组成上与天然虫草具有高度相似性^[4-6]。从 *P.hepiali* 的液体发酵菌丝体和发酵液中已分离得到多种生物活性物质,如腺苷类、皂甙类、环肽类和多糖类等^[7-9]。蝙蝠蛾拟青霉也被列入国家食品药品监督管理局公布的《可用于保健食品的真菌菌种名单》中(卫法监发[2001]84号),其人

收稿日期:2016-09-26

作者简介:武忠伟(1979-),男,博士,副教授,研究方向:糖生物工程, E-mail: wuzhongwei0417@sina.com。

* 通讯作者:张明霞(1973-),女,博士,副教授,研究方向:酒类风味质量控制, E-mail: zhangmingxia@163.com。

基金项目:中国博士后基金资助项目(2016M602242);河南省博士后科研资助项目(2015100);河南省科技攻关计划项目(152102210308);河南省高校科技创新人才支持计划(15HASTT032);河南科技学院大学生创新训练计划项目(2015CX004)。

表1 $L_9(3^4)$ 正交实验因素和水平表

Table 1 Levels and factors table of $L_9(3^4)$ orthogonal array design

水平	因素			
	A 发酵全液总固形物含量(g/L)	B 进料速率(mL/h)	C 进风温度(°C)	D 进风量(m ³ /h)
1	32.27(稀释至 50%)	500	170	25
2	38.72(稀释至 60%)	600	180	30
3	45.17(稀释至 70%)	700	190	35

工发酵产物作为冬虫夏草的代用品已在中成药和保健食品中广泛使用^[10-11]。因此,采用快速高效的干燥工艺将整体发酵醪即发酵全液干燥后,其产品不但可作为功能食品加工原料,而且便于保藏和运输。

喷雾干燥工艺由于在物料干燥过程中具有受热时间短、料温低和生理活性物质活性损失小等特点被广泛应用于多种热敏性物质的干燥^[12-15]。除此之外,喷雾干燥后的粉末颗粒度小而均匀,具有良好的分散性和速溶性^[16-18]。运用该技术,多种食药两用真菌提取液或发酵液优化获得了最佳的喷雾干燥参数,如王平等^[19]和陈君琛等^[20]分别采用响应面法优化获得了黄绿蜜环菌提取液和大球盖菇漂烫液的喷雾干燥工艺,得到了高感官评分和营养保留率的喷雾干粉,而关于蝙蝠蛾拟青霉发酵醪的喷雾干燥工艺还未见相关报道。因此,本研究以蝙蝠蛾拟青霉发酵醪打浆后的发酵全液为原料,研究不同工艺参数对发酵全液喷雾干燥速率和产品品质的影响,通过单因素与正交实验优化获得最佳的喷雾干燥工艺,以期蝙蝠蛾拟青霉发酵产物在功能食品中的应用提供条件。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

蝙蝠蛾拟青霉发酵全液 为 *P.hepiali* HN-1 菌株经液体发酵后将发酵醪打浆后的浆液,具体制备方法见 1.2.1; 液体 PDA 培养基 将 200 g 土豆切块煮汁后,然后分别加入蔗糖 20 g, KH_2PO_4 1.5 g, $MgSO_4$ 0.5 g, 混合均匀后定容至 1000 mL; 液体发酵培养基组成为(g/L) 蔗糖 50, 酵母膏 4, 硫酸铵 6, KH_2PO_4 1.5, $MgSO_4$ 0.5, 麦芽汁 10, 土豆汁 10, pH 为 6.5。

WPG120 型微型实验室喷雾干燥机 济南奥诺能源科技有限公司; 空气压缩机 上海有龙机电设备有限公司; RE52A 旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂; FB224 电子分析天平 上海舜宇恒平科学仪器有限公司; GWS100 型 10 L 机械搅拌通风发酵罐 镇江东方生物工程设备技术有限公司; S-4800 场发射扫描电子显微镜 日本日立公司。

1.2 实验方法

1.2.1 蝙蝠蛾拟青霉发酵全液的制备 取活化 2 代的 *P.hepiali* HN1 菌株的琼脂菌种块接种于 250 mL 三角瓶中,装液量为 100 mL(液体 PDA 培养基),于 17 °C、120 r/min 下振荡培养 96 h 后,接种于 10 L 机械搅拌通风发酵罐中,于接种量为 5%、培养温度 17 °C、离心力 $3.06 \times g$ 、通风量 $1.10 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下培养 72 h,然后于同样温度条件下,通风量 $1.40 \text{ m}^3/\text{h}$ 、离

心力 $3.59 \times g$ 条件下进行液体发酵 72 h 后收获发酵醪,用打浆机打浆过滤后,所得到的混合浆液即为蝙蝠蛾拟青霉发酵全液^[21]。

1.2.2 单因素实验 在基础参数:发酵全液总固形物含量为 32.27 g/L(即发酵全液稀释至 50%)、进料速度为 500 mL/h、进风温度为 180 °C、进风量为 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 、出风口温度为 70 °C 条件下,以蝙蝠蛾拟青霉发酵全液喷雾干燥速率和干燥后干粉的综合评分为指标,分别测试总固形物含量为 12.91、25.81、38.72、61.62、64.53 g/L,进料速度在 200、400、600、800、1000 mL/h,进风温度 140、160、180、200、220 °C,进风量在 10、20、30、40、50 m^3/h 等条件下喷雾干燥速率和喷雾干燥综合得分。

1.2.3 正交实验 根据单因素实验结果,选择不同总固形物含量的发酵全液、进料速率、进风温度和进风量为指标,按 $L_9(3^4)$ 正交实验设计进行优化,因素和水平见表 1。

1.2.4 蝙蝠蛾拟青霉发酵全液总固形物含量的测定 精确量取方法 1.2.1 所述制备好的发酵全液 100 mL 置于器皿上,105 °C 烘箱中烘干至恒质量 (M_1 g),总固形物含量按以下公式计算:

$$\text{总固形物含量(g/L)} = M_1 \times 10 \quad \text{式(1)}$$

1.2.5 物料和喷雾干粉含水率的测定 采用减压干燥法。

$$\text{含水率(\%)} = (\text{湿质量} - \text{干质量}) / \text{湿质量} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

1.2.6 喷雾干燥出粉率的测定 指在不同干燥参数下,单位重量物料喷雾干燥粉占总发酵全液固形物的质量百分比:

$$\text{出粉率(\%)} = \frac{G(1-R)}{G_0} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

式中, G 为收集到的干粉质量, g; R 为干粉的含水率, %; G_0 为发酵全液固形物总质量, g。

1.2.7 喷雾干燥出粉速率的测定 指在不同干燥参数下,喷雾干燥过程中在单位时间内的出粉量,即:

$$\text{喷雾干燥出粉速率(g/h)} = \frac{\text{出粉质量(g)}}{\text{干燥时间(h)}} \quad \text{式(4)}$$

1.2.8 喷雾干粉分散性的测定 将盛有 50 mL 去离子水的烧杯置于磁力搅拌器上,设置离心力为 $13.98 \times g$,然后准确称取 1 g 蝙蝠蛾拟青霉喷雾干粉,均匀快速分散于水中,记录粉体全部分散于水中所用的时间,即为分散时间。

1.2.9 喷雾干燥综合评分 喷雾干燥后,根据喷雾干粉的出粉率和干粉理化性状进行综合评价,综合得分 = 出粉率得分 + 干粉性状得分 + 色泽得分 + 气味得分 + 分散性得分

表2 喷雾干粉综合评价评分标准
Table 2 Standards of comprehensive marks on spray drying power of fermented mesh

项目	理化性状	得分(分)
出粉率 (20分)	>75%	16~20
	65%~75%	10~15
	<65%	5分以下
干粉性状 (20分)	细粉或雪片状、疏松、干燥、无结块	16~20
	干燥、结块、大小不均匀	5~15
	潮湿发黏	5分以下
色泽 (20分)	白色微黄或淡黄色	16~20
	焦黄、稍暗	5~15分
	焦糊、发暗、发黑	5分以下
气味 (20分)	甜香味、具有愉悦的蘑菇香气、浓郁	16~20
	香甜味、香气稍弱	5~15
	焦糊味、香气淡	5分以下
分散性 (20分)	不结块、易分散、悬浊液稳定,分散时间<5 s	16~20
	易沉淀、分层、分布不均匀,分散时间5~7 s	5~15
	粘稠、结块、不分散,分散时间>7 s	5分以下

注:总分100分,各项得分合计后结果保留至整数位。

1.3 扫描电镜观察

将喷雾干燥后的干粉在红外灯下烘干后,置于SBC-12小型离子溅射仪的样品舱中,在15 mA的电流下喷金90 s。样品取出后,装入S-4800扫描电镜观察室,进行观察。

1.4 统计分析

采用Origin 8.0软件绘图,用SPSS 19.0软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 料液比对喷雾干燥效果的影响

对发酵全液适当稀释后,可以降低发酵全液的黏度,使发酵全液所喷射的雾滴均匀细腻,并可防止进料口的堵塞^[22]。为此,本研究比较了发酵全液稀释至不同固形物含量后的喷雾干燥效果,结果见图1。

由图1可以看出,将打浆后的发酵全液进行适当稀释后可以提高喷雾干燥的效率和改善干粉的品质性状。当100%的发酵全液(总固形物含量为64.53 g/L)直接进料时,由于料液黏度较大,喷雾干燥过程中可以发现雾化效果较差,而产生的干粉也易结块,同时,造成喷雾干粉含水量较高为8.58%,分散性测定结果表明分散时间为6.2 s,且溶液易分层沉淀从而造成综合评分下降。因此,对料液进行了不同比例的稀释,运行过程中可以发现稀释后的料液由于黏度下降,雾化效果较好,且当稀释至总固形物含量为25.81~51.62 g/L时(初始发酵全液浓度的40%~80%),干燥速率较高,干粉的色泽、气味和

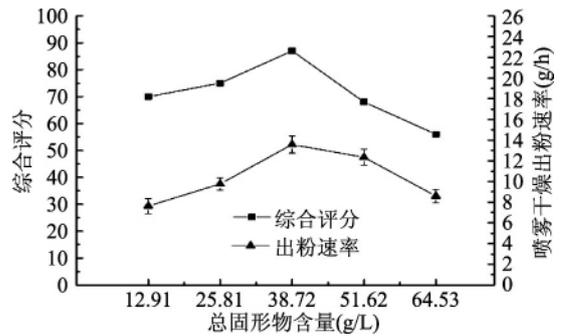


图1 发酵全液总固形物含量对喷雾干燥效果的影响

Fig.1 Effect of different total solid content of fermented mesh on the comprehensive marks of spray drying power

分散性等理化性质也较好,从而达到较高的综合评分。因此,选择发酵液的总固形物含量为32.27~45.17 g/L(即初始发酵全液总浓度的50%~70%)进行下一步优化。

2.2 进料速率对喷雾干燥效果的影响

进料速度也是影响喷雾干燥的重要参数,进料速度过快会使喷雾干燥不完全,造成物料结块^[23]。不同进料速率对喷雾干燥效果的影响见图2。

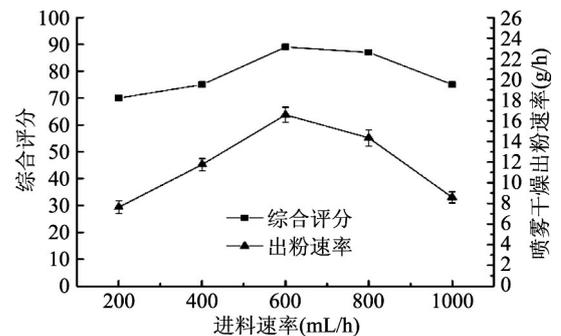


图2 不同进料速率对发酵全液喷雾干燥效果的影响

Fig.2 Effect of different flux rate on the comprehensive marks of spray drying power of fermented mesh

由图2可以看出,发酵全液的干燥速率随进料速度增加而增加,当进料速率达到600 mL/h时,干燥速率最高,且此时发酵全液干粉的综合评分也最高。分析原因是由于进料速度过慢时,同样的热风温度和风量易造成物料过度干燥,从而产生焦糊味等不良性状。而当进料速度过快超过800 mL/h时,由于物料得不到充分干燥,喷雾干粉的含水量超过7%,从而产生结块、发粘等现象,同时,分散性测试表明分散时间为6.0 s以上,从而造成喷雾干燥综合评分下降。因此,进一步实验选取进料速率500~700 mL/h作为进一步优化范围。

2.3 进风温度对喷雾干燥效果的影响

进风温度可以使喷雾干燥过程中物料水分瞬时气化,并对干粉物化性质产生影响^[24-25]。本研究实验了不同进料温度对喷雾干燥的影响,结果见图3。

由图3可以看出,喷雾干燥出粉速率随进风温度的增加而增加,但干粉的综合得分则在进风温度为180℃时达到最高值。喷雾干燥过程中可以发现该温度条件下的干粉色泽淡黄、香气浓郁,且干粉的

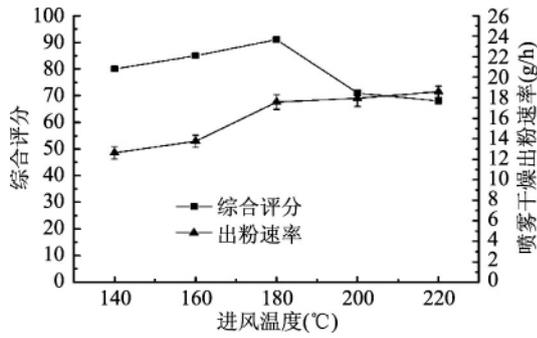


图3 不同进风温度对发酵全液喷雾干燥效果的影响

Fig.3 Effect of different inlet air temperature on the comprehensive marks of spray drying power of fermented mesh
分散性和复水性都比较好。而进风温度过高,由于干粉中菌体蛋白和发酵液中的残糖易发生过度的美拉德反应而产生色泽焦黄,香气也有所减弱,虽然喷雾干粉含水量较低,但喷雾干粉易结块,且大小不均匀,同时也造成分散时间过长,在溶液中稳定性减弱,从而造成综合评分下降。因此,选170~190℃的温度作为进一步的考察范围。

2.4 通风量对喷雾干燥温度的影响

通风量的多少不但会影响喷雾干燥效率还会对出粉率产生影响^[26]。本研究实验了进风量为10~50 m³/h范围内不同进风量对喷雾干燥效果的影响,结果见图4。

由图4可以看出,蝙蝠蛾拟青霉发酵全液随着通风量的增加,干粉的综合评分和出粉速率快速增加,当通风量为30 m³/h时二者均可达到较高水平。同时,实验过程可以发现,通风量过低会造成发酵全液干燥不彻底,造成喷雾干粉含水量过高,出现发粘和结块现象,造成喷雾干粉的分散性降低,从而造成综合评分的下降;另外,通风量过高,则会造成干粉

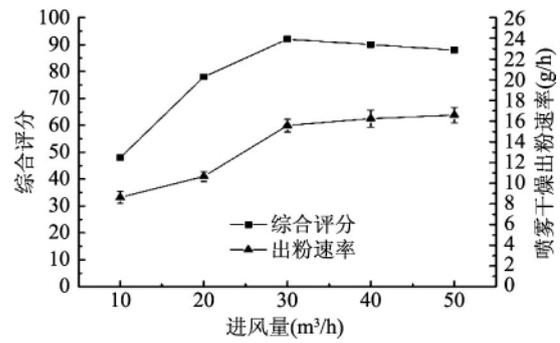


图4 不同进风量对发酵全液喷雾干燥效果的影响

Fig.4 Effect of different ventilation rate on the comprehensive marks of spray drying power of fermented mesh
被过多的出风带走,使出粉率下降,进而造成喷雾干燥效率的下降。因此,本研究选取25~35 m³/h的通风量作为进一步优化的范围。

2.5 正交实验

根据以上单因素实验结果,本研究进一步通过L₉(3⁴)正交实验对喷雾干燥各因素的最佳组合进行优化,结果见表3。本实验的目的是使喷雾干燥速率最高,同时所得到的喷雾干粉具有较高的综合评分,正交实验按所得结果按极差和方差分析法分别进行分析,结果见表4。

由表3的极差分析可以看出,不同操作参数对喷雾干燥干粉的综合性状影响的大小顺序为:进风温度>进料速率>料液总固形物含量>进风量,最佳的操作参数组合为A₂B₁C₂D₁。而对于喷雾干燥速率而言,各操作参数影响大小的顺序为:进料速率>进风温度>料液总固形物含量>进风量,最佳的操作参数组合为A₂B₃C₃D₂。表4的方差分析表明,对喷雾干粉的综合评分影响显著的因素为进料速度和进风温度,而这两个因素对喷雾干燥干燥速率的影

表3 发酵全液喷雾干燥 L₉(3⁴) 正交实验方案与结果

Table 3 L₉(3⁴) orthogonal plan and results on spray drying power of fermented mesh

实验号	A	B	C	D	综合评分	喷雾干燥出粉速率(g/h)
1	1	1	1	1	78	12.58 ± 0.74
2	1	2	2	2	88	14.67 ± 0.58
3	1	3	3	3	73	16.43 ± 0.81
4	2	1	2	3	93	14.37 ± 0.65
5	2	2	3	1	86	15.96 ± 0.87
6	2	3	1	2	76	16.64 ± 0.77
7	3	1	3	2	80	16.05 ± 0.91
8	3	2	1	3	81	13.39 ± 0.79
9	3	3	2	1	85	16.88 ± 0.68
综合评分	k ₁	79.7	83.7	78.3	83.0	
	k ₂	85.0	83.0	88.7	81.3	
	k ₃	82.0	78.0	79.7	82.3	
	R	5.3	7.0	10.3	1.7	
干燥速率	k ₁	14.56	14.33	14.20	15.14	
	k ₂	15.66	14.67	15.31	15.79	
	k ₃	15.44	16.65	16.15	14.73	
	R	1.10	2.32	1.94	1.06	

表4 方差分析结果

Table 4 Variance analysis of orthogonal test results

	因素	平方和	自由度	均方	F 值	F 临界值	显著性
综合评分	A	42.89	2	21.45	10.16		
	B	82.89	2	41.45	19.63	$F_{0.01}(2, 2) = 99$	*
	C	189.56	2	94.78	44.90	$F_{0.05}(2, 2) = 19$	*
	D	4.22	2	2.11	1.00		
干燥速率	A	5.86	2	2.93	4.51		*
	B	32.35	2	16.17	31.71	$F_{0.01}(2, 18) = 6.01$	**
	C	17.26	2	8.63	16.92	$F_{0.05}(2, 18) = 3.55$	**
	D	4.02	2	2.01	3.94		*
	误差 e	9.12	18	0.51			

响也达到极其显著的水平。可以看出,对喷雾干粉性质和干燥速率而言,发酵全液总固形物含量选择在第2水平即38.72 g/L为最佳;而对于喷雾干燥温度的选择,虽然第3水平即200℃条件下喷雾干燥速率有显著提高,但我们发现在此温度下喷雾干粉的综合评分会快速下降,而选在稍低的第2水平即180℃的喷雾干燥温度为宜;另外,从正交实验结果可以看出虽然B₃C₃条件下喷雾干燥速率达到最高,但从实验号3的组合可以看出喷雾干粉的综合评分很低,同时从喷雾干燥的极差分析可以看出B₁和B₂对喷雾干粉评分影响较小,因此,同时考虑到干粉综合特性和喷雾干燥速率可选择B₂水平即600 mL/h为佳;另外,研究中发现虽然通风量在D₁水平下喷雾干粉香气和色泽有较好保留,但同时发现其分散性和含水率较高,为了更好地保证产品储藏和运输,选择为D₂水平即进风量为30 m³/h为宜。因此,最终综合考虑选取最佳的喷雾干燥参数条件为:A₂B₂C₂D₂,即发酵全液固形物含量38.72 g/L、进料速率600 mL/h、喷雾干燥温度180℃、进风量30 m³/h。

2.6 验证实验

对上述实验得出的最佳喷雾干燥操作参数即发酵全液总固形物含量38.72 g/L,进料速率:600 mL/h,喷雾干燥温度180℃,进风量30 m³/h条件下进行了实际验证,结果表明在该条件下,蝙蝠蛾拟青霉发酵全液的喷雾干燥出粉速率达到17.89 g/h,出粉率达到76.3%,含水量在2.3%,干粉在4.7 s内可均匀分散,表明该喷雾干粉具有良好的分散性,同时色泽淡黄、疏松多孔、香甜味浓等特性,综合评分为95分。

2.7 扫描电镜观察

进一步通过扫描电镜观察比较了蝙蝠蛾拟青霉发酵全液喷雾干粉和直接烘箱干燥后的干粉特征,结果见图5。

由图5可以看出,所得到发酵全液喷雾干燥干粉均匀颗粒较小且均匀且具有较密的多孔特性,平均直径在30 μm左右,而直接干燥后得到的干粉平均直径则超过150 μm,同时分散性实验表明其在水中的分散时间超过3 min。从而也显示了该喷雾干燥工艺在制备蝙蝠蛾拟青霉发酵全液喷雾干粉中具有产品分散性能好、均匀疏松、色泽和气味好等优点,且与产品的微观形态特征相符^[27-28]。

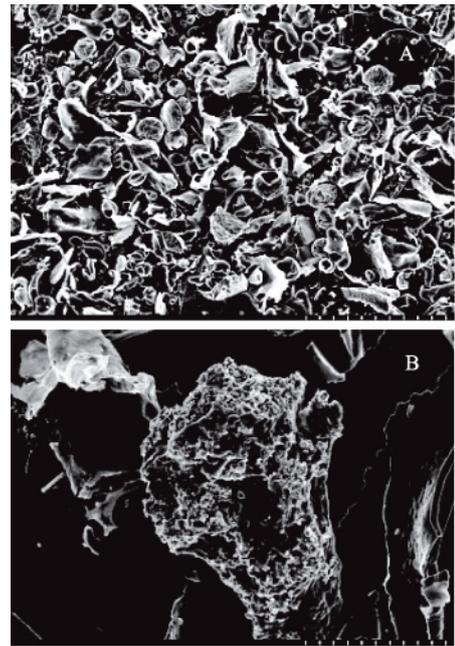


图5 发酵全液喷雾干燥后干粉的扫描电镜图(A)和烘干后的干粉结构的扫描电镜图(B)比较(5000×)

Fig.5 The comparison of 5000× scanning electron microscope of spray drying power(A) and oven drying of fermented mesh(B)

3 结论

通过单因素实验比较了不同发酵全液固形物含量、进料速率、进风温度和进风量对蝙蝠蛾拟青霉发酵全液喷雾干燥的影响,在此基础上,进一步结合正交实验分析,优化了蝙蝠蛾拟青霉发酵全液喷雾干燥的最佳操作参数:发酵全液总固形物含量为38.72 g/L,进料速率为600 mL/h,进风温度为180℃,进风量为30 m³/h,在此最优条件下发酵全液的喷雾干燥出粉速率达到17.89 g/h,出粉率达到76.3%,喷雾干粉的含水量在2.3%,在水中的分散时间为4.7 s,同时干燥后的干粉色泽淡黄、疏松多孔、香甜味浓郁。

参考文献

- [1] 蒋毅,姚一建.冬虫夏草无性型研究概况[J].菌物系统, 2003, 22(1): 161-176.
- [2] 詹小涛,赖桂萍,朱德霞.冬虫夏草及其发酵菌丝体药理作用研究进展[J].医学综述, 2012, 18(10): 1566-1569.

[3] Li Y, Wang X L, Jiao L, et al. A survey of the geographic distribution of *Ophiocordyceps sinensis* [J]. *The Journal of Microbiology* 2011, 49(6): 913-919.

[4] 朱佳石, 郭英兰, 姚艺桑, 等. 冬虫夏草成熟过程中中国被毛孢和蝙蝠蛾拟青霉 DNA 共存及竞争增殖力、化学成分变化 [J]. *菌物研究* 2007, 5(4): 215-224.

[5] 杨金玲, 肖薇, 何惠霞, 等. 蝙蝠蛾拟青霉与冬虫夏草关系的分子系统学研究 [J]. *药学报* 2008, 43(4): 421-426.

[6] Zhu J S, Gao L, Li X H, et al. Maturation alteration of oppositely orientated rDNA and differential proliferation of GC- and AT- biased genotypes of *Ophiocordyceps sinensis* and *Paecilomyces hepiali* in Natural *Cordyceps sinensis* [J]. *American Journal of Biomedical Sciences* 2010, 2(3): 217-238.

[7] Yan J K, Wang W Q, Wu J Y. Recent advances in *Cordyceps sinensis* polysaccharides: Mycelial fermentation, isolation, structure, and bioactivities: A review [J]. *Journal of Functional Foods* 2014, 6: 33-47.

[8] Zhao J, Xie J, Wang L Y, et al. Advanced development in chemical analysis of *Cordyceps* [J]. 2014, 87: 271-289.

[9] Liu Y, Wang J H, Wang W, et al. The chemical constituents and pharmacological actions of *Cordyceps sinensis* [J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2015, ID 575063.

[10] 中华人民共和国卫生部. 真菌类保健食品申报与审评规定(试行) [J]. *中国食品卫生杂志* 2005, 17(4): 367-368.

[11] Shashidhar G M, Girdhar P, Manohar B. Functional polysaccharides from medicinal mushroom *Cordyceps sinensis* as a potent food supplement: Extraction, characterization and therapeutically potential—a systematic review [J]. *RSC Advances*, 2015, 5: 16050-16066.

[12] Goula A M, Adamopoulos K G. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties [J]. *Journal of Food Engineering* 2005, 66(1): 35-42.

[13] Schmitz-schug I, Kulozik U, Foerst P. Modeling spray drying of dairy products—Impact of drying kinetics, reaction kinetics and spray drying conditions on lysine loss [J]. *Chemical Engineering Science* 2016, 141: 315-329.

[14] Krishnaiah D, Nithyanandam R, Sarbatly R. A critical review on the spray drying of fruit extract: effect of additives on physicochemical properties [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 2014, 54(4): 449-473.

[15] Baldinger A, Clerdent L, Rantanen J, et al. Quality by design approach in the optimization of the spray-drying process [J]. *Pharmaceutical Development and Technology*, 2012, 17(4):

389-397.

[16] Nandiyanto A B D, Okuyama K. Progress in developing spray-drying methods for the production of controlled morphology particles: From the nanometer to submicrometer size ranges [J]. *Advanced Powder Technology* 2011, 22(1): 1-19.

[17] Patel R P, Patel M P, Suthar AM. Spray drying technology: An overview [J]. *Indian Journal of Science and Technology* 2009, 2(10): 44-47.

[18] Elversson J, Millqvist-fureby A. Particle size and density in spray drying—effects of carbohydrate properties [J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences* 2005, 94(9): 2049-2060.

[19] 王平平, 陈元涛, 张炜, 等. 响应曲面法优化青海黄绿蜜环菌喷雾干燥制粉工艺 [J]. *食品科技* 2014, 39(9): 86-92.

[20] 陈君琛, 周学划, 赖谱富, 等. 大球盖菇漂烫液喷雾干燥制营养精粉工艺优化 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(21): 272-276.

[21] 武忠伟, 张明霞, 陆隽雯, 等. 超滤分离蝙蝠蛾拟青霉胞外多糖工艺优化 [J]. *中国食品学报* 2015, 15(12): 115-121.

[22] Hashib S A, Norazah A R, Suzihaque M U H, et al. Effect of slurry concentration and inlet temperature towards glass temperature of spray dried pineapple powder [J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 2015, 195: 2660-2667.

[23] Daza L D, Fujita A, Fávoro-trinidad C S, et al. Effect of spray drying conditions on the physical properties of Cagaita (*Eugenia dysenterica* DC.) fruit extracts [J]. *Food and Bioproduct Processing* 2016, 97: 20-29.

[24] Mishra P, Mishra S, Mahanta C L. Effect of maltodextrin concentration and inlet temperature during spray drying on physicochemical and antioxidant properties of amla (*Embolica officinalis*) juice powder [J]. *Food and Bioproduct Processing*, 2014, 92(3): 252-258.

[25] Zhang H, Xia W S, Xu Y S, et al. Effects of spray-drying operational parameters on the quality of freshwater mussel powder [J]. *Food and Bioproducts Processing* 2013, 91: 242-248.

[26] Qi Z G. Water retention and drainage on air side of heat exchangers—A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013, 28: 1-10.

[27] Duongthingoc D, George P, Katopo L, et al. Effect of whey protein agglomeration on spray dried microcapsules containing *Saccharomyces boulardii* [J]. *Food Chemistry*, 2013, 141: 1782-1788.

[28] Bhusari S N, Muzaffar K, Kumar P. Effect of carrier agents on physical and microstructural properties of spray dried tamarind pulp powder [J]. *Powder Technology* 2014, 266: 354-364.

(上接第 283 页)

大学 2013: 27-35.

[20] 马建锋, 张逊, 马静, 等. 生物质预处理过程中显微及显微光谱技术研究进展 [J]. *林产化学与工业* 2014, 34(6): 146-154.

[21] 吴定涛, 巨瑶君, 陆静峰, 等. 糖谱法比较不同产地竹荪多糖结构特征 [J]. *食品科学* 2014, 35(13): 98-102.

[22] 王丽娟, 杨雪飞, 黄毅, 等. 挤压工艺参数对膨化杂粮粉感官品质的影响 [J]. *食品科学* 2013, 34(12): 67-70.

[23] Rehrah D, Ahmedna M, Goktepe I, et al. Extrusion parameters and consumer acceptability of a peanut-based meat analogue [J]. *International Journal of Food Science and Technology* 2009, 44(10): 2075-2084.