

酵母热干燥法及其活性提高途径

Thermal drying methods of yeast and the ways to improve the activity

张鸿雁¹ 曾凯芳^{1,2} 周雅涵¹ 邓丽莉^{1,2} 姚世响^{1,2}

ZHANG Hong-yan¹ ZENG Kai-fang^{1,2} ZHOU Ya-han¹ DENG Li-li^{1,2} YAO Shi-xiang^{1,2}

(1. 西南大学食品科学学院, 重庆 400715; 2. 重庆市特色食品工程技术研究中心, 重庆 400715)

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Special Food Engineering and Technology Research Center, Chongqing 400715, China)

摘要:通过干燥的方法使酵母细胞脱水并进入休眠状态即固态活性干酵母,其储运方便,且可长期保存,广泛应用于酿酒、烘焙、生物防治等方面。在制备活性干酵母的过程中菌体干燥是一个重要环节,文章介绍了成本低、可行性高、能够长时间保存且能耗小的真空干燥、喷雾干燥、流化床干燥等热干燥方法的原理及应用进展;分析了整个热干燥过程前后影响活性干酵母活性的相关因素,包括酵母自身对外界环境的耐受力、酵母培养条件、保护剂添加、干燥工艺条件、贮藏及复水条件等;并进一步论述了提高其活性的方法。

关键词:活性干酵母;热干燥;活性

Abstract: Drying the yeast cells into a dormant state, that is, preparing solid active dry yeast, and the active dry yeast is convenient for transport and storage, and widely used in the fields of wine making, baking, biological control and so on. During the process of preparing active dry yeast, drying the yeast is an important step. It was introduced that the thermal drying methods, including drying methods of using vacuum, spray, and fluidized bed, which are economical, high in feasibility, low energy consumption, and can be preserve for a long time. Moreover, the factors affect the activity of dry yeast during the whole drying process were also analyzed, including the tolerance of the yeast to the external environment, the culture conditions of the yeast, the addition of the protective agent, the drying process, the storage and rehydration conditions, etc. finally, the methods to improve the activity of the yeast were discussed.

Keywords: active dry yeast; thermal drying; activity

酵母菌,生长繁殖较快,对环境的适应能力较强,与人类的生活紧密相关^{[1]-5}。数千年前,人类就已经利用酵母来酿酒,随后开发出一系列酵母菌产品,如非活性干酵母(inactive dry yeast, IDY)^[2]和活性干酵母(active dry yeast, ADY)^[3]。

开发的酵母菌菌剂产品有液体剂型和固体剂型。液体剂型的酵母活菌率高,但无法长期贮存,固体剂型酵母应用前需复水,存活率较低;但因其在室温下具有更强的遗传稳定性,运储简便,保质期较长而在生物技术应用中受到欢迎^[4]。

活性干酵母,主要应用于医学^[5]、烘焙^[6]、酿酒^[7]、净化环境^[8]、微生物固定化^[9]、生物防治^[10]等方面,还可以用作动物饲料^[11]生物吸附剂^[12]。生产活性干酵母即将酵母细胞脱水使之进入一个新陈代谢临时可逆暂停的低湿休眠状态^[13];制备活性干酵母过程中一个重要步骤是将酵母菌进行干燥,其中冷冻干燥作为一种较常用的方法,处理时间长,加工成本高,从经济实用的角度考虑,无法大规模生产活性干酵母产品,所以在实际生产中可考虑成本低、可行性高、能耗小的热干燥方法,如真空干燥、喷雾干燥、流化床干燥等。本文重点讨论几种生产活性干酵母的热干燥方法及热干燥过程中对酵母活性的影响因素和应对措施,旨在为活性干酵母产品的实际大规模生产提供一定的理论指导。

1 热干燥方法

1.1 活性干酵母的制备流程

活性干酵母的制备流程和在制备过程中影响酵母活性的因素及应对措施见图 1。

1.2 热风干燥

热风干燥,即将物料置于连续流动的空气流中,同时物料中的水分不断蒸发的过程^[15],该方法操作简单、成本低,且使用由来已久,但热风干燥对干酵母活性有很大的影响,因而该方法不太适合干燥酵母。

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(编号:2015BAD16B07);
重庆市科委柑桔主题专项课题(编号:cstc2016shms-ztzc80005)

作者简介:张鸿雁,女,西南大学在读硕士研究生。

通信作者:曾凯芳(1972—),女,西南大学教授,博士。

E-mail: zengkaifang@163.com

收稿日期:2016—12—26

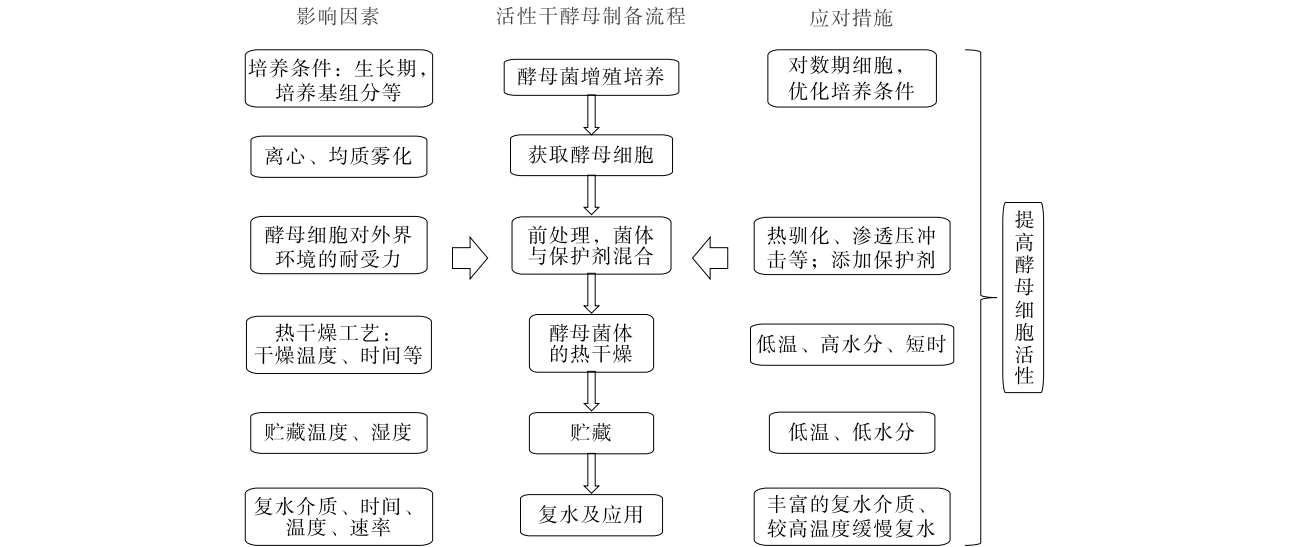


图 1 活性干酵母制备流程^[14]

Figure 1 The process to prepare active dry yeast

1.3 减压干燥

减压干燥,即真空干燥,干燥过程中物料处于负压状态且隔绝空气进行加热,物料内部的水分扩散到物料表面,水分子获得足够的动能而蒸发到低压空气中,从而避免了物料在干燥过程中发生氧化,保持其特性并减少物料品质损失。真空干燥成本较低、操作较为简单,干燥后酵母菌体存活率相对较高,因此可作为生产活性干酵母的干燥方法并对其工艺进行优化。

1.4 喷雾干燥

喷雾干燥是将湿物料在干燥室中高速雾化从而把浆状物料转变成干燥粉末的过程。喷雾干燥包括 4 个连续的过程:液体雾化、雾滴与热空气接触、雾滴水分快速蒸发、热空气与干粉的分离^[16];喷雾干燥成本较低、产品均一性好、效率高且操作简单,易于实现活性干酵母的商业化生产。

1.5 流化床干燥

流化床干燥是颗粒状固体物料的干燥方法,不能干燥液体物料。流化床干燥通过向上移动的热空气使含水量较高的物料在气流的作用下,将水分带入空气而达到干燥的目的;干燥过程中,酵母和干燥空气接触面积大,流化床内温度分布均匀,避免物料的局部过热,最终产品含水率也较为稳定,且流化床干燥的应用较久且更为广泛。但在生产活性干酵母过程中其生产工艺及相关参数还需进一步优化。

1.6 微波真空干燥

微波真空干燥是用微波辐射作为加热源在真空条件下对物料进行加热而使其脱水的过程^[17];干燥过程中,微波可直接渗入所干燥的物料中,物料整体由内而外的被快速均匀地加热,使水分快速蒸发达到干燥的目的^[18]。微波真空干燥过程中,传热和传质的方向相同,水分转移会大幅度提高,可在较低的温度、较短的时间内完成干燥;能较大幅度地保持物料性质,该方法适于加工热敏性物料^[19]。

真空干燥等热干燥方法干燥酵母过程中所使用酵母菌株、热干燥温度和时间、真空度、进料速度、干燥后活性干酵母的活菌率以及在干燥中使用的保护剂等热干燥工艺参数。

2 提高活性干酵母制剂活性的方法

从酵母培养到经热干燥制备活性干酵母过程中诸多因素影响着活性干酵母的最终活性,如高温、氧化应激等胁迫条件,最终干酵母制剂的活性大大降低,因此了解活性干酵母制剂在制备过程中对其活性影响的相关因素,并找出相应应对措施,对于制备高活性、高效率且贮存期长的活性干酵母制剂是很有必要的。

2.1 提高酵母菌株对外界环境的耐受力

酵母细胞本身是否具备耐受力是影响酵母热干燥后细胞活性的关键因素之一。酵母细胞细胞壁组分主要是葡聚糖、甘露聚糖和蛋白质,整体细胞壁结构较厚,因而对外界压力具有较好的耐受性^[32-33]。

在热干燥过程中酵母细胞需承受热应力、脱水应力、渗透应力、机械应力等压力,主要承受热应力,当酵母细胞经受的温度过高会破坏其大分子如蛋白质、核酸的高级结构;脱水应力通过改变细胞质膜的流动性或物理状态以及引起脂质过氧化而损伤细胞质膜^[34],最终导致细胞内容物外泄^[35];脱水还影响酵母细胞的水分活度,而水分活度的改变也会影响酵母的耐受性;如酵母细胞在水分活度为 0.4 时其耐热性最强^[36]。热干燥过程中酵母会同时受到多种胁迫压力而引起酵母细胞损伤,同时当温度或渗透压突然变化,酵母细胞也会通过调节自身代谢和基因表达来适应新环境;如酵母细胞会产生甘油、热激蛋白、海藻糖等^[37-38]应激保护性物质;因此在干燥前增强酵母对胁迫环境的适应性可改善细胞对干燥过程中胁迫压力的耐受性。如可通过热激^[39]来改善菌体对逆境的耐受力^[23],热激增强了酵母细胞脂质大分子和周围水分子的相互作用,稳定了脂质双分子层,最终使经受热激的细胞耐热性增加^[40];还可使用钙、抗坏血酸、过氧化

表 1 酵母热干燥方法及其干燥条件
Table 1 Thermal drying methods and drying conditions of yeasts

热干燥方法	酵母菌株	干燥温度及时长	其他参数	酵母活性(活菌率)	保护剂
真空干燥	<i>Pichia guilliermondii</i> ^[20]	35 ℃, 6 h	真空度: 0.08 MPa	86%	2% 山梨醇 + 4% 蔗糖酯 + 0.45% 没食子酸丙酯
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ^{[21]25-32}	38.86 ℃, 5 h	真空度: 0.071 MPa	85.58%	10% 蔗糖 + 10% 海藻糖 + 12% 乳糖 + 8% 山梨醇
	<i>Pichia anomala</i> J121 ^[22]	40 ℃, 16 h	\	75%	0.25 M 海藻糖 + 1.5% 聚乙烯吡咯烷酮
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ^[23]	40 ℃, 48 h	0.013 MPa	约为 80%	40% 海藻糖
喷雾干燥	<i>Candida sake</i> (strain CPA-1) ^[24]	进口/出口: 150/77.8 ℃	进料速度: 500 mL/h	约为 8%	10% 脱脂奶粉
	<i>Rhodospiridium paludigenum</i> ^[25]	进口/出口: 100/50 ℃	进料速度: 800 mL/h	\	20% 脱脂乳 + 0.5% 的氯化钠
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ^[26]	进口/出口: 110/55 ℃	\	约为 16%	1.75% 的麦芽糖 + 3.5% 的淀粉
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ^[27]	进口/出口: 100/65 ℃	进料速度: 40 mL/min	80.5%	10% 麦芽糖糊精
流化床干燥	<i>Pichia anomala</i> ^[28]	50 ℃, 20 min	\	70%	10% 脱脂乳 + 100% 棉籽粉
	commercial com-pressed baker's yeasts ^[29]	Yeast 1 35 ℃ Yeast 2 30 ℃	\	37% 46%	\
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> CBS 1171 ^[30]	30 ℃, 30 min	\	100%	酵母: 小麦粉(质量比) = 1: 1.2
	<i>Pichia caribbica</i> ^[31]	30~35 ℃, 212 min	真空度: 8 kPa, 微波功率: 200 W (26 min) — 100 W (54 min) — 200 W (12 min)	100%	\

氢或甜菜碱来诱导酵母的抗氧化应激能力^[41-44]以提高酵母在随后逆境中的耐受性。Liu 等^[37]将拮抗酵母置于 40 ℃ 热水浴 30 min, 或使用 0.4 mol/L 过氧化氢处理 20~60 min, 提高了酵母在 45 ℃ 热环境下的耐受力, 经处理的酵母其海藻糖-6-磷酸合酶基因上调, 海藻糖积累较多, 活性氧积累量减少, 另外在培养基中加入某些酵母细胞不可利用的组分如氯化钠可诱导细胞的渗透压休克反应^[45-46]; 因此短暂的暴露于一个非致死逆境条件下, 可诱导酵母对更极端环境的耐受力。

2.2 改良酵母培养条件

酵母培养条件如生长期、培养基组分等是影响细胞存活率的基本因素。微生物生长稳定期的微生物细胞具有更好的抗逆能力^[47]; 不同的培养基组分对酵母细胞有不同的作用, Teixeira 等^[48]使用添加甘油的培养基, 降低了酵母生长环境的水分活度, 酵母细胞内积累了较多的糖醇和海藻糖等糖类, 从而提高了酵母(*Candida sake*)在胁迫环境中的生存力; 还可添加适量的 Ca²⁺ 促进酵母生长^[49]。

2.3 热干燥前预处理及添加保护剂

在实验室将酵母离心配置悬浮液, 该步骤对酵母菌干燥后活性也有一定的影响^{[21]20-21}。而在工业规模上对酵母进行预处理时, 影响酵母活性的主要因素是均质、雾化等^[33]。

为提高干酵母活性还可在干燥前添加保护剂, 所添加保护剂按照保护剂的穿透性^[50], 可将其分为可渗透细胞壁和细胞膜的保护剂, 能渗透细胞壁但不能渗透细胞膜的保护剂和既不能渗透细胞壁又不能渗透细胞膜的保护剂; 还可按照保护剂的用途^{[1]236-242}, 将其分为增加渗透压的保护剂、乳化剂和抗氧化剂。

在热干燥过程中添加的保护剂是影响酵母干燥后活性的最大因素之一。如添加外源海藻糖可在干燥过程中稳定细胞结构, 提高酵母细胞对外界压力的耐受力, 而酵母细胞内的海藻糖也会在酵母受到脱水应力、高温、渗透压等压力时为酵母细胞提供保护^[51-53]; 另外海藻糖具有较高的玻璃化转变温度, 因而会延缓一些化学反应如自由基氧化等^[54]; 海藻糖也是细胞组分的稳定剂^[51]。除了海藻糖, 脱脂乳、蔗糖^[55]、甜菜碱、阿东糖醇、乳糖、葡聚糖^[47], 山梨醇、麦芽糖、

甘露醇、麦芽糖糊精、阿拉伯树胶、淀粉等也是有效的保护剂。

2.4 优化热干燥工艺条件

当正式进行热干燥时,影响干燥后酵母细胞活性的主要因素包括干燥温度,水分含量,干燥时间、脱水速率等。

干燥温度即干燥过程中干燥物料所承受的温度;在流化床干燥和真空干燥中,干燥温度可维持在一个较低的范围,可降低对酵母细胞潜在的热损伤。Mille等^[30]通过流化床干燥酵母(*Saccharomyces cerevisiae*),发现在低于8℃或高于25℃的温度下对酵母进行干燥时,干燥后酵母活性更高;Bayrock等^[56]也通过流化床干燥酵母,当酵母细胞在低于40℃下进行干燥时,酵母活性几乎没有损失;喷雾干燥中,进口温度一般在100℃以上,出口温度约为50~120℃,高于酵母的致死温度,其中出口温度对酵母活性的影响较大,且酵母存活率随温度的升高而降低^[24];因此为保证干酵母活性应尽量避免细胞暴露在高温环境中。

水分含量,包括干燥空气中水分含量及干燥物料含水量;据报道,湿热空气干燥比干热空气干燥更容易让微生物失活^[24]。流化床干燥时,当酵母水分含量高于15%,30~80℃的干燥温度对酵母细胞活性没有影响,当酵母水分含量低于15%时,干燥温度决定了酵母最终的活性,且温度越高,其活性越低^[29]。

干燥时间即酵母细胞暴露于干燥设备中的时间。将酵母置于40~56℃的不同温度下流化床干燥20~120 min,发现酵母菌株在40~48℃温度范围内干燥不等时长,其活性没有显著变化,50℃下干燥40~60 min之后酵母活性出现明显下降的趋势^[57];对于脱水速率,缓慢脱水的酵母细胞具备更好的活性^[57]。

2.5 最佳贮藏及复水条件

理想的干酵母制剂作为一种商品,其复水后迅速增殖至显著水平是其具备良好应用价值的基本要求;因此需要评估其活性以确保所制备的活性干酵母制剂具有良好的应用效果,一般通过平板计数法来评估酵母复水后的存活率。为在随后的贮藏及复水阶段保持干酵母产品的活性,需要采取一些措施来保证酵母的活性。

贮藏期间对干酵母细胞活性的影响因素包括贮藏温度、湿度、所添加保护剂等;贮藏温度影响最大,贮存于37℃时细胞存活率大幅度下降,而贮存于4℃时,酵母干粉的贮存时间可长达1年且存活率没有明显的下降^[30]。随着贮藏温度升高(4~37℃),菌体存活率损耗也升高;且具有高水分含量的活性干酵母较低水分含量的活性干酵母的活性下降更快。干燥后酵母在低温或真空中或氮气中贮存,其活性较高^[58-59]。

干酵母细胞复水时渗透压变化、复水介质、复水时间、复水温度、复水速率^[59]等是其活性恢复的重要影响因素。干酵母复水过程中细胞会因渗透压的变化而失去活性,因而较为丰富的复水介质对其复水活性更好;Abadias等^[24]使用富集培养基复水干燥酵母,其复水后活性相较于于无菌水复水活性高,而以脱脂奶粉作为复水介质时活性最高。复水时间对

酵母细胞的活性也有很大影响,Poirier等^[60]发现,将干燥后酵母立即复水其活性仅为28%,而将酵母缓慢复水14 d,酵母活性为91%,因此酵母细胞缓慢复水可使酵母细胞活性最大限度地恢复。当复水温度低于38~40℃,酵母细胞会因吸胀而遭受损害,导致细胞内容物的泄漏,酵母活性丧失^[61],Poirier等^[60]还在50℃下将干燥后的酵母复水时,其存活率可达65%,对于啤酒酵母,其最佳复水温度为43℃,因此复水时,应尽量提高酵母复水温度。

3 展望

活性干酵母在食品方面应用广泛,其作为固态菌剂易于储运,可长时间贮存。目前市场上虽然已有一些活性干酵母制剂的市售品,但大多数活性低,且贮存要求较高,因此,在生产过程中所涉及的干燥方法和工艺参数还需进行优化,可通过提高酵母对外界环境耐受力的方式提高其活性,以更经济高效的方法制备活性干酵母可拓展干酵母的应用市场,从而使活性干酵母更广泛地应用到医学、微生物固定化、生物防治等领域,真正实现其应用价值,有益于环境和人体健康。

参考文献

[1] 于景芝, 陈尧燊, 俞学锋. 酵母生产与应用手册[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005.

[2] POZO-BAYO'N M A, ANDUJAR-ORTIZ I, ALCAIDE-HI-DALGO J M, et al. Characterization of commercial inactive dry yeast preparations for enological use based on their ability to release soluble compounds and their behavior toward aroma compounds in model wines[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(22): 10 784-10 792.

[3] QUEROL A, BARRIO E, HUERTAT, et al. Molecular monitoring of wine fermentations conducted by active dry yeast strains[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1992, 58(9): 2 948-2 953.

[4] RODRÍGUEZ-PORRATA B, NOVO M, GUILLAMÓN J, et al. Vitality enhancement of the rehydrated active dry wine yeast[J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 126(1): 116-122.

[5] BLANQUET S, GARRAIT G, BEYSSAC E, et al. Effects of cryoprotectants on the viability and activity of freeze dried recombinant yeasts as novel oral drug delivery systems assessed by an artificial digestive system[J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2005, 61(1): 32-39.

[6] ATTFIELD P V. Stress tolerance: the key to effective strains of industrial baker's yeast[J]. Nature Biotechnology, 1997, 15(13): 1 351-1 357.

[7] DEL BARRIO-GALÁN R, PÉREZ-MAGARIÑO S, ORTEGA-HERAS M, et al. Polysaccharide characterization of commercial dry yeast preparations and their effect on white and red wine composition[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 48(2): 215-223.

[8] MARTINS F F, FERREIRA T F, AZEVEDO D A, et al. Evaluation of crude oil degradation by *Yarrowia lipolytica* [J]. Chem Eng Trans, 2012, 27: 223-228.

[9] SHAKIR M, NASIR Z, KHANM S, et al. Study on immobi-

- lization of yeast alcohol dehydrogenase on nanocrystalline Ni-Co ferrites as magnetic support [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 72: 1 196-1 204.
- [10] DROBY S, WISNIEWSKI M, MACARISIND, et al. Twenty years of postharvest biocontrol research: Is it time for a new paradigm? [J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 52 (2): 137-145.
- [11] LIMA L S, ALCALDE C R, FREITAS H S, et al. Performance of dairy goats fed diets with dry yeast from sugar cane as protein source[J]. Revista Brasileira de Zootecnia, 2012, 41(1): 232-236.
- [12] MUTER O, LUBINYA I, MILLERS D, et al. Cr (VI) sorption by intact and dehydrated *Candida utilis* cells in the presence of other metals[J]. Process Biochemistry, 2002, 38 (1): 123-131.
- [13] RAPOPORT A, TURCHETTI B, BUZZINI P. Application of anhydrobiosis and dehydration of yeasts for non-conventional biotechnological goals[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2016, 32(6): 1-10.
- [14] NAN Fu, CHEN Xiao-Dong. Towards a maximal cell survival in convective thermal drying processes [J]. Food Research International, 2011, 44(5): 1 127-1 149.
- [15] RATTI C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review[J]. Journal of food engineering, 2001, 49(4): 311-319.
- [16] CAL K, SOLLOHUB K. Spray drying technique. I: Hardware and process parameters[J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 2010, 99(2): 575-586.
- [17] 李辉, 袁芳, 林河通, 等. 食品微波真空干燥技术研究进展[J]. 包装与食品机械, 2011, 29(1): 46-50.
- [18] HU Qing-guo, ZHANG Min, MUJUMDAR A S, et al. Drying of edamames by hot air and vacuum microwave combination[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(4): 977-982.
- [19] TANG Da-wei. Techniques and application of microwave vacuum drying[J]. Pharmaceutical and Engineering Design, 2002, 23(6): 3-6.
- [20] 秦丹. 生防制剂在葡萄保鲜中的应用与抑菌机理研究[J]. 长沙: 湖南农业大学, 2007: 37-58.
- [21] 南博. 活性酿酒酵母的真空干燥技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [22] MELIN P, HÅKANSSON S, SCHNÜRER J. Optimisation and comparison of liquid and dry formulations of the biocontrol yeast *Pichia anomala* J121[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, 73(5): 1 008-1 016.
- [23] CERRUTTI P, DE HUERGO M S, GALVAGNO M, et al. Commercial baker's yeast stability as affected by intracellular content of trehalose, dehydration procedure and the physical properties of external matrices[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2000, 54(4): 575-580.
- [24] ABADIAS M, TEIXIDÓ N, USALL J, et al. Survival of the postharvest biocontrol yeast *Candida sake* CPA-1 after dehydration by spray-drying[J]. Biocontrol Science and Technology, 2005, 15(8): 835-846.
- [25] 唐飞. 海洋生防酵母 *Rhodospiridium paludigenum* 干燥工艺研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2012: 14-23.
- [26] APONTE M, TROIANIELLO G D, DICAPUA M, et al. Impact of different spray-drying conditions on the viability of wine *Saccharomyces cerevisiae* strains[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2016, 32(1): 1-9.
- [27] CHANDRALEKHA A, TAVANANDI A H, AMRUTHA N, et al. Encapsulation of yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) by spray drying for extension of shelf life[J]. Drying Technology, 2016, 34(11): 1 307-1 318.
- [28] MOKIOU S, MAGAN N. Physiological manipulation and formulation of the biocontrol yeast *Pichia anomala* for control of *Penicillium verrucosum* and ochratoxin A contamination of moist grain[J]. Biocontrol Science and Technology, 2008, 18 (10): 1 063-1 073.
- [29] BAYROCK D, INGLEDEW W M. Fluidized bed drying of baker's yeast: moisture levels, drying rates, and viability changes during drying[J]. Food Research International, 1997, 30 (6): 407-415.
- [30] MILLE Y, GIRARD J P, BENEY L, et al. Air drying optimization of *Saccharomyces cerevisiae* through its water-glycerol dehydration properties[J]. Journal of Applied Microbiology, 2005, 99(2): 376-382.
- [31] 庞水秀, 张红印, 杨其亚, 等. 卡利比克毕赤酵母活细胞制剂加工工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2012(2): 303-306.
- [32] GECIOVA J, BURY D, JELEN P. Methods for disruption of microbial cells for potential use in the dairy industry: a review [J]. International Dairy Journal, 2002, 12(6): 541-553.
- [33] DONSI F, FERRARI G, LENZA E, et al. Main factors regulating microbial inactivation by high-pressure homogenization: Operating parameters and scale of operation[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(3): 520-532.
- [34] COX C S. Roles of water molecules in bacteria and viruses[J]. Origins of Life and Evolution of the Biosphere, 1993, 23(1): 29-36.
- [35] SANTIVARANGKNA C, KULOZIK U, FOERST P. Inactivation mechanisms of lactic acid starter cultures preserved by drying processes[J]. Journal of Applied Microbiology, 2008, 105(1): 1-13.
- [36] LAROCHE C, FINE F, GERVAIS P. Water activity affects heat resistance of microorganisms in food powders[J]. International Journal of Food Microbiology, 2005, 97(3): 307-315.
- [37] LIU Jia, WISNIEWSKI M, DROBY S, et al. Effect of heat shock treatment on stress tolerance and biocontrol efficacy of *Metschnikowia fructicola* [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2011, 76(1): 145-155.
- [38] ABEE T, WOUTERS J A. Microbial stress response in minimal processing[J]. International Journal of Food Microbiology, 1999, 50(1): 65-91.
- [39] CHENG Zhe, CHI Meng-shan, LI Guang-kun, et al. Heat shock improves stress tolerance and biocontrol performance of *Rhodotorula mucilaginosa* [J]. Biological Control, 2016, 95: 49-56.
- [40] PIPER P W. Molecular events associated with acquisition of heat tolerance by the yeast *Saccharomyces cerevisiae*[J]. FEMS

Microbiology Reviews, 1993, 11(4): 339-355.

[41] AN Bang, LI Bo-qiang, QIN Guo-zheng, et al. Exogenous calcium improves viability of biocontrol yeasts under heat stress by reducing ROS accumulation and oxidative damage of cellular protein[J]. Current Microbiology, 2012, 65(2): 122-127.

[42] LI Chao-lan, ZHANG Hong-yin, YANG Qi-ya, et al. Ascorbic acid enhances oxidative stress tolerance and biological control efficacy of *Pichia caribbica* against postharvest blue mold decay of apples[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(30): 7 612-7 621.

[43] LIU Jia, WISNIEWSKI M, DROBY S, et al. Increase in antioxidant gene transcripts, stress tolerance and biocontrol efficacy of *Candida oleophila* following sublethal oxidative stress exposure [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2012, 80(3): 578-590.

[44] LIU Jia, WISNIEWSKI M, DROBY S, et al. Glycine betaine improves oxidative stress tolerance and biocontrol efficacy of the antagonistic yeast *Cystofilobasidium infirmominium*[J]. International Journal of Food Microbiology, 2011, 146(1): 76-83.

[45] GERVAIS P, MARECHAL P A, MOLIN P. Effects of the kinetics of osmotic pressure variation on yeast viability[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1992, 40(11): 1 435-1 439.

[46] TEIXIDÓ N, VINAS I, USALL J, et al. Ecophysiological responses of the biocontrol yeast *Candida sake* to water, temperature and pH stress [J]. Journal of Applied Microbiology, 1998, 84(2): 192-200.

[47] MORGAN C A, HERMAN N, WHITEP A, et al. Preservation of micro-organisms by drying; a review [J]. Journal of microbiological methods, 2006, 66(2): 183-193.

[48] TEIXIDÓ N, VINAS I, USALL J, et al. Improving ecological fitness and environmental stress tolerance of the biocontrol yeast *Candida sake* by manipulation of intracellular sugar alcohol and sugar content[J]. Mycological Research, 1998, 102(11): 1 409-1 417.

[49] 王学锋, 苑伟, 刘延琳. 培养基的主要成分对优选酿酒酵母生物量的影响[J]. 中国酿造, 2010, 29(8): 18-21.

[50] HUBALEK Z. Protectants used in the cryopreservation of microorganisms[J]. Cryobiology, 2003, 46(3): 205-229.

[51] OBUCHI K, IWAHASHI H, LEPOCKJ R, et al. Calorimetric characterization of critical targets for killing and acquired thermotolerance in yeast[J]. Yeast, 2000, 16(2): 111-119.

[52] 李博强. 海藻糖提高酵母拮抗菌生活力和生防效力的作用机制[D]. 北京: 科学院植物研究所, 中国, 2005: 6-12.

[53] ELEUTHERIO E C A, ARAUJO P S, PANEKA D. Protective role of trehalose during heat stress in *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Cryobiology, 1993, 30(6): 591-596.

[54] CROWE J H, CARPENTER J F, CROWE L M. The role of vitrification in anhydrobiosis[J]. Annual Review of Physiology, 1998, 60(1): 73-103.

[55] LESLIE S B, ISRAELI E, LIGHTHART B, et al. Trehalose and sucrose protect both membranes and proteins in intact bacteria during drying[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, 61(10): 3 592-3 597.

[56] BAYROCK D, INGLEDEWW M. Mechanism of viability loss during fluidized bed drying of baker's yeast[J]. Food Research International, 1997, 30(6): 417-425.

[57] MARECHAL P A, GERVAIS P. Yeast viability related to water potential variation; influence of the transient phase[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1994, 42(4): 617-622.

[58] BEKER M J, RAPOPORT A I. Conservation of yeasts by dehydration[M]// MARTIN J Beker. Biotechnology Methods. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1987: 127-171.

[59] BOYAVAL P, SCHUCK P. Le séchage des microorganismes par atomisation [J]. Industries Alimentaires et Agricoles, 1994, 111(11/12): 807-818.

[60] POIRIER I, MARÉCHAL P A, RICHARDS, et al. *Saccharomyces cerevisiae* viability is strongly dependant on rehydration kinetics and the temperature of dried cells[J]. Journal of Applied Microbiology, 1999, 86(1): 87-92.

[61] VAN STEVENINCK J, LEDEBOER A M. Phase transitions in the yeast cell membrane the influence of temperature on the reconstitution of active dry yeast[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes, 1974, 352(1): 64-70.

(上接第 157 页)

参考文献

[1] 李斌, 雷月, 孟宪军, 等. 蓝莓营养保健功能及其活性成分提取技术研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 251-254.

[2] 曹雪丹, 方修贵, 赵凯, 等. 蓝莓花色苷研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(15): 221-226.

[3] 赵旭彤, 吴都峰, 季中梅, 等. 蓝莓加工的研究动态与应用前景[J]. 农产品加工: 学刊, 2013(14): 52-57.

[4] 刘华戎, 谷大海. 蓝莓果汁饮料加工工艺研究[J]. 农产品加工: 学刊, 2012(8): 76-78.

[5] LEE J, DURST R W, WRÖLSTAD R E. Impact of juice processing on blueberry anthocyan in sandpolyph enolics: Comparison of two pretreatments[J]. Journal of Food Science, 2002(67): 1 660-1 667.

[6] 刘玮, 钱慧碧, 辛秀兰, 等. 蓝莓果渣中总黄酮的提取纯化及抗氧化性能的研究[J]. 食品科技, 2011, 36(2): 216-219.

[7] 王玉洁, 陈敏, 张扬, 等. 蓝莓果渣中熊果苷提取工艺的研究[J]. 中国林副特产, 2012(2): 23-25.

[8] 陈成花, 张婧, 陈海燕, 等. 蓝莓果渣花色苷超声提取工艺优化及组成分析[J]. 食品科技, 2016, 41(4): 192-199.

[9] 唐杰, 焦淑清, 温馨, 等. 微波辅助提取蓝莓果渣中花青素的工艺研究[J]. 黑龙江医药科学, 2015, 38(1): 12-14.

[10] 李金星, 胡志和, 马立志, 等. 超声波辅助提取蓝莓果渣中花色苷的条件研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(20): 255-259.

[11] 王鸿飞, 程佑声. 蓝莓皮渣花色苷提取及抗氧化活性的研究[J]. 果树学报, 2015, 32(4): 696-704.

[12] 谢秋涛, 李高阳. 超声波辅助乙醇提取法提取玫瑰色素[J]. 食品与机械, 2012, 28(3): 148-150.

[13] 吕昱, 严敏. 紫薯花色苷的生理功能及分离纯化研究进展[J]. 食品与机械, 2013, 29(4): 250-253.