

天然酵母面包研究现状及发展趋势

Study on sourdough bread

王 立 虞桢芳 钱海峰 张 晖 齐希光

WANG Li YU Ya-fang QIAN Hai-feng ZHANG Hui QI Xi-guang

(江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122)

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:文章详细介绍了天然酵母面包的酸面团及其分类、天然酵母菌种中的主要微生物、天然酵母液制备工艺及其特点,国内外天然酵母面包研究现状,以期天然酵母面包的开发推广提供参考。最后,对天然酵母面包发展趋势进行了推测。

关键词:天然酵母面包;酵母菌;乳酸菌

Abstract: The sourdough and its main microorganism, together with the preparation technology, properties and research status of this kind of bread both domestic and overseas, were introduced in the paper, hoping to provide a new clue for its development and promotion. Finally, a possible development tendency of sourdough bread was also forecasted.

Keywords: sourdough bread; yeast; lactic acid bacteria

全球有很多国家以面包为日常主食,目前,全球消费人口超过 18 亿,在中国其消费量也在逐年增加^[1]。据统计^[2],中国大陆每年人均消费面包约 2.2 kg,远低于饮食习惯相近的日本(45 kg)以及中国台湾地区(10 kg)。面包是以小麦粉、酵母、食盐、水为主要原料,添加适量辅料,经面团调制、发酵、整型、醒发、烘烤等工序制成的食品,具有营养丰富、易于消化吸收、食用方便且便于储存等优点^[3]。随着经济的发展和消费观念的改变,市场上也出现了越来越多新型的面包产品,例如全谷物面包^[4]、无麸质面包^[5]、杂粮面包^[6-8]等。近年来,由于消费者对无添加、安全、健康食品的需求增加,天然酵母面包的研究也越来越受到重视。天然酵母面包是利用谷物、水果、发酵酸乳或者酒花中自带的天然微生物进行培养作为发酵剂来发酵面团制作成的面包^[9]。天然酵母中存在多种酵母菌和乳酸菌,这些菌在发酵过程中产生了多种有机酸和特有风味物质如醇类、醛类、酯类等,使得天然酵

母面包具有独特的风味。此外,天然酵母面包具有改善风味^[10-12]、质地^[13]、延长货架期^[14-15]以及提高营养价值^[16-17]等优点。文章从酸面团、天然酵母菌种主要微生物、天然酵母液制备工艺,以及天然酵母面包与商业酵母面包的区别等方面对国内外天然酵母面包研究现状进行综述分析,并对发展趋势进行展望,以期天然酵母面包的开发推广提供参考。

1 酸面团

1.1 酸面团基本概念

酸面团是指以谷物、水果或酒花等自带的野生酵母和乳酸菌培养发酵剂,加入面粉和水混合,经长时间发酵制成的酸味面团,这是最古老和最原始发酵食品所利用的生物技术之一^[18],国外许多传统烘焙食品如意大利焙烤糕点、德国黑麦面包、苏打饼干以及中国传统面食中的老面都采用了酸面团技术。到目前为止,依然有超过 30% 的意大利面包生产是利用酸面团^[19]。西方国家对酸面团发酵制作面包的历史比较久远,并且一直在对该技术进行深化研究,有不少学者发现非小麦类谷物同样适合培养乳酸菌酸面团^[20-21];Lhomme 等^[22]指出旧金山乳杆菌在法式有机酸面团中为主要优势菌群。随着面包产品畅销全球,中国对酸面团技术应用于面包也进行了大量研究,例如冷进松等^[23]优化研究乳酸菌—玉米酵子混合酸面团面包的工艺;有研究^[24-25]发现,利用植物乳杆菌研制乳酸菌发酵面包可以提高面包的营养价值和风味。随着时代发展,人们对焙烤产品的要求越来越高,但酸面团发酵技术因其自身所具有的优势使它并没有因此衰落。

1.2 分类及特点

根据不同的技术工艺,酸面团可分成 3 种类型^[26-27]:
① 传统的经典酸面团,其特点是通过连续(每天)增殖培养来保证微生物具有最高活性,一般在 23~30 ℃ 下通过三步发酵工艺可以最好地实现这一过程,使其发酵能力和代谢活性维持在较高水平,此类酸面团中常见的乳酸菌有旧金山乳杆菌、食果糖乳杆菌、发酵乳杆菌和短乳杆菌等异型发酵乳

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31471617);国家“十二五”科技攻关项目(编号:2012BAD37B08-3)

作者简介:王立(1978—),男,江南大学教授,博士。

E-mail: wl0519@163.com

收稿日期:2016-04-12

杆菌,主要酵母菌为梅林假丝酵母、霍氏假丝酵母、少孢酵母和啤酒酵母;② 工业化的酸面团,是通过加入面包酵母来进行发酵,适合大规模生产,一般将温度控制在 30℃ 以上,发酵 2~5 d,但天然微生物的活性受限制,此种酸面团主要提供面团酸化过程和风味物质,同时,由于这类酸面团的 pH 较低,故其菌种主要为耐酸型乳酸菌属;③ 商品化的酸面团产品,是进行干燥和稳定处理后得到的干燥制品,一般为粉状物,其性质较前两种稳定,使用便利,此类面团中的优势菌为戊糖片球菌、植物乳杆菌和短乳杆菌,它们在干燥状态下也能生存。

2 天然酵母菌种中的主要微生物

天然酵母菌种中的主要微生物为乳酸菌和酵母菌,是天然酵母发酵酸面团时所必需的微生物,也是面包特殊风味的主要贡献者^[28-30]。菌种的类型与数量受原料、酸度、培养温度、面粉组成等因素的影响。

影响酸面团中天然酵母生长和活性的因素见图 1^[31]。内在因素主要有原料中的碳水化合物、氮源、矿物质、脂质、游离氨基酸以及各种酶的酶活,特别是作为乳酸菌和酵母菌能量来源的碳水化合物具有很大影响。外在因素主要是一些工艺参数,包括温度、发酵时间、面团得率、氧化还原电势和繁殖次数等。

2.1 酵母菌

在稳定的天然酵母体系中常见的酵母有以下六类^[32]:啤酒酵母、少孢酵母、梅林假丝酵母、毕赤酵母、戴尔凯氏有孢圆酵母、异常威克汉姆酵母,其中最为常见的优势菌群为 *S. cerevisiae*,可称作商业酵母或面包酵母。酵母菌的种类和数量,除了受酵母本身特性的影响,还受菌种来源、面粉、

发酵温度以及贮藏温度的影响^[33]。天然酵母中的酵母菌比市售的新鲜酵母对酸和温度的抵抗性强^[34]。酵母菌的培养温度以 25~28℃ 为宜,超过 30℃ 可以产生柔和的酸味,但在 20℃ 左右会转变成刺鼻的醋酸味。

酵母菌的主要功能是作为生物疏松剂,产生大量 CO₂,增大面团体积,使面包具有疏松多孔的海绵状结构;它在发酵中生成的酒精以及多种有机酸、醇、醛、酮和酯等风味化合物会赋予面包特有的香气和发酵风味,同时这些有机物质会改变面团的延伸性和黏弹性等流变学特性,有利于进一步加工^[35]。杨秀琴等^[36]研究发现酵母菌对自然发酵酸面团面包中主要挥发性风味物质有较大影响,如酸类和酯类物质的相对含量有所下降,醛类的含量增加。王刚等^[37]发现从重庆泡菜及扬州豆酱等传统发酵食品中分离得到的产香酵母 YG28B 可用于面包发酵以改善面包囊的风味。通过以上学者的研究可知,酵母菌种的存在有利于改善自然发酵面包的风味。

2.2 乳酸菌

到目前为止,天然酵母中分离鉴定出的乳酸菌已超过 60 种^[32],从中可看出不同原料培养的发酵液中存在的乳酸菌种类也各不相同,其组成主要以乳酸杆菌属为主,其中最常见的是旧金山乳杆菌、植物乳杆菌及短乳杆菌,其余菌种如片球菌属、明串珠菌属及魏斯氏菌属有时也会出现。按发酵类型,乳酸杆菌可分为 3 种类型^[38]:专性同型发酵、兼性异型发酵和专性异型发酵(表 1),其中专性异型发酵乳酸菌在天然酵母发酵过程占据主导地位,因为这类菌可以代谢多种糖类,对氨基酸的同化作用专一以及应激反应好^[39-40]。

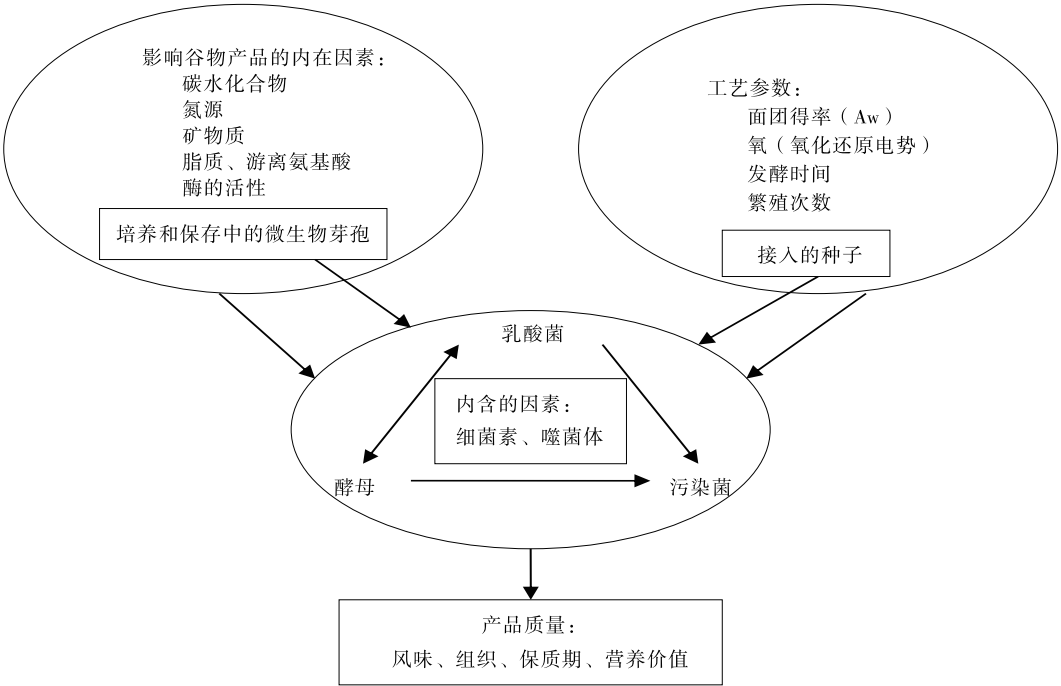


图 1 影响酸面团天然酵母生长与代谢活性以及酸面团质量的因素

Figure 1 Factors affecting growth and metabolic conditions of the sourdough microbiota and the quality of sourdough bread

表 1 与酸面团发酵有关的各种常见乳酸菌

Table 1 Lactobacillus species associated with sourdough fermentation	
发酵类型	乳酸菌种类
专性异型 发酵	<i>Lb. acidifarinae</i> , 短乳杆菌, 布氏乳杆菌, 发酵乳杆菌,
	食果糖乳杆菌, <i>Lb. frumenti</i> , 希氏乳杆菌, 面包乳杆菌,
	<i>Lb. Pontis</i> , 罗氏乳酸菌, <i>Lb. rossiae</i> , 旧金山乳杆菌, <i>Lb. siliginis</i> , <i>Lb. spicheri</i> , <i>Lb. zymae</i>
兼性异型 发酵	植物乳杆菌, 戊糖乳杆菌, <i>Lb. alimentarius</i> , <i>Lb. parali-mentarius</i> , 干酪乳杆菌
专性同型 发酵	食淀粉乳杆菌, 嗜酸乳杆菌, 德氏乳杆菌亚种, 德氏乳杆菌, 香肠乳杆菌, 明登乳杆菌, 卷曲乳杆菌, 约氏乳杆菌, 解淀粉类乳酸菌

天然酵母制备过程中, 乳酸杆菌之所以能成为优势菌是由于其能发酵利用的糖种类较多, 一般来说, 乳酸菌利用麦芽糖作为发酵基质, 和某些不能利用麦芽糖的酵母菌共生; 以及乳酸杆菌对酸、温度、渗透压、氧化及饥饿等恶劣环境有较好的适应能力; 在发酵过程中生成有机酸和细菌素等抗菌物质, 抑制杂菌生长。

乳酸菌与天然酵母发酵密切相关, 对面包的品质、风味、保质期有着重要的影响。通常来说, 乳酸菌是通过产生有机酸酸化体系, 影响内源蛋白酶、 α -淀粉酶的活性, 同时还通过产生类细菌素抑制物、胞外多糖、风味物质(如有机酸、醇、醛)等来改善面包的风味、质地、老化和营养等^[41-42]。一些研究者^[43-45]发现乳酸菌发酵对面包的品质和贮藏特性均有改善作用。乳酸菌也可通过改良面团的流变学特性来影响面包的品质。Falade 等^[46]提出乳酸菌发酵会改变淀粉粒结构, 使得玉米面团更加紧密、柔软和低弹性, 进而提高其在发酵和烘焙过程中的持气能力, 面包芯结构的气孔大且分散, 硬度也较低。这可能成为不使用添加剂而提高无麸质玉米面包质量的关键。Plessas 等^[47]研究发现嗜酸乳杆菌和清酒乳杆菌协同发酵对面包的防腐作用更好, 比两者单独发酵可延长货架期 2~5 d。Moroni 等^[48]探究了乳酸菌发酵荞麦酸面团在面包生产中的应用, 与未酸化或化学酸化面包对比发现, 荞麦酸面团的加入使面筋网络结构增强, 弹性降低, 面包的总体质量和营养特性提高。张思佳等^[49]也发现植物乳杆菌能够显著改善荞麦面团面包的抗氧化特性, 而发酵乳杆菌对荞麦面包的烘焙特性有明显的改善作用。从现有的研究分析, 乳酸菌发酵有利于改善杂粮粉在烘焙中的应用。

2.3 酵母菌与乳酸菌协同发酵

大部分情况下, 自然发酵的酸面团同时存在酵母菌和乳酸菌, 两者处于互利共生的生态位, 互为协同或拮抗作用。发酵能力强的酸面团中乳酸菌菌数通常为 $10^8 \sim 10^9$ lg CFU/g, 酵母菌菌数为 $10^6 \sim 10^7$ lg CFU/g^[50]。一般认为乳酸菌与酵母菌数量的比例达到 100 : 1^[51], 酸面团体系达到稳定。Guel 等^[52]收集了 14 种酸面团样品, 从中分离鉴别出 33 种乳酸菌, 包括肉杆菌属(2 种)、乳酸杆菌属(23 种)、片球菌属(7 种)和四联球菌属(1 种), 其中短乳杆菌为主要优势菌种;

另外, 分离鉴别出 37 种酵母菌, 包括啤酒酵母(32 种)和球拟酵母(5 种), 啤酒酵母为优势菌。张薇^[53]鉴定发现葡萄干自然发酵酸面团中的乳酸菌为清酒乳杆菌以及少量的植物乳杆菌和戊糖片球菌, 而苹果自然发酵酸面团中的乳酸菌为植物乳杆菌, 且两种自然发酵酸面团中的酵母菌皆为酿酒酵母。Lattanzi 等^[54]从 18 种用于制作意大利传统烘焙食品的自然发酵酸面团中分离鉴定出了旧金山乳杆菌、植物乳杆菌、柠檬明串珠菌、酿酒酵母、霍氏假丝酵母等微生物。

相比于乳酸菌和酵母菌单独发酵, 两者协同发酵的面包在许多品质方面都有不同程度的改善。李慧东等^[55]研究发现乳酸菌和酵母共同发酵的面包, 具有浓郁的发酵香味和柔和的酸味, 其复合风味明显比目前用快速发酵法生产的面包的发酵风味更受消费者青睐, 且老化较慢, 保质期有所延长。Aplevicz 等^[56]发现利用副干酪乳杆菌单独发酵的面包品质并不理想, 但和啤酒酵母组合后发酵的面包在颜色、感官、结构和保质期方面有所改善。熊俐等^[57]研究发现复合菌(酵母、乳酸菌粉和甜酒曲)发酵能改善麸皮面包的质量, 延缓其老化。研究^[58]表明, 天然酵母还可用于有机面包的制作以提升风味。从搜集的资料分析, 接种特定乳酸菌和酵母菌, 两者组合发酵能赋予面包更特殊的风味以及改善其品质。尽管现已有较多关于接种特定菌种制备酸面团的研究, 但到目前为止都只停留于实验室阶段, 如何从实验室过渡到产业化生产亟需深化研究。

3 天然酵母面包制备工艺

3.1 制作工艺

面包是由面粉、水、酵母经过混合, 在酵母发酵作用下膨胀, 烘烤定制而成的面团。目前普通面包的制作工艺^[59]为: 原料选择与处理→面团调制→发酵→整型→醒发→烘焙→冷却→包装。天然酵母面包和普通面包的制作除了酵母外, 基本一致。普通面包一般使用干酵母, 而天然酵母面包使用的酵母需要预先培养, 制作工艺一般分成 3 个阶段^[60-61]: 培养天然酵母液、原种制备和面包制作。第一阶段发酵液的培养, 将原料与水混合均匀, 以水刚没过原料为宜, 醒发温度控制在 28~32 ℃, 发酵 3~7 d, 待发酵液表面有大量气泡, 并带有酒精与酸混合的香味, 表示发酵成功。第二阶段的天然酵母种的制备是利用前面的天然酵母液与面粉和水混合, 连续增殖培养制备天然酵母种。最后就是将天然酵母种混入面包原辅料中制作面包。在 3 个阶段中, 天然酵母液的培养对最终产品性质的影响最大。而天然酵母液由于培养时间长、过程复杂, 容易出现污染问题。因此, 规范培养工艺、稳定产品质量是加快天然酵母面包工业化发展亟待解决的问题。

3.2 天然酵母液制备

不同原料制作的天然酵母面包风味各有特色, 对原料一般要求含糖量较高, 以便乳酸菌和酵母菌能利用其中的糖作为能量来源进行新陈代谢和发酵。

3.2.1 谷物来源 谷物培养的天然酵母是最常见的, 如自然发酵的小麦或黑麦面包, 是将面粉与水混合, 在一定温度下

经发酵增殖培养制作发酵剂。这种天然酵母发酵能力较弱，产生的有机酸和 CO₂ 不仅可以抑制杂菌生长，还能使制作的面包具有酸味和独特的风味。黄卫宁等^[62]研究了一种由面粉自然发酵酸面包的制备方法，在简化工艺的同时改善酸面包的风味与质地。Banu 等^[63]从比容、水分、总滴定酸度、瓢芯特性和感官等方面分析黑麦天然酵母面包的品质，发现添加 20%天然酵母种的面包拥有更好的品质。除了常用的黑麦外，大麦、燕麦等也可用于天然酵母的培养。Mariotti 等^[64]发现大麦粉培养天然酵母制作的面包虽然比容较小，面包芯结构紧实，但有利于提高可溶性纤维含量，增加面包的营养价值，且与小麦面包的可接受度相近。另有研究^[65]提出燕麦酸面团在 35℃下自然发酵 β-葡聚糖含量较高。这些研究为非小麦类谷物在烘焙工业中的应用提供了可能性，有利于生产健康的焙烤产品。

3.2.2 水果来源 用水果培养天然酵母是利用其表皮附着的天然微生物，不仅可以利用新鲜水果如葡萄、苹果等含糖量较高的品种，也可以利用干果类如葡萄干、桂圆等，但用干果类培养天然酵母时要注意先将其用水软化。利用水果培养天然酵母需将果实带皮捣碎，再将其与水充分混合制备发酵液。大多数水果的含糖量比谷物高，适合用作天然酵母的培养，并且制作的面包还会带有水果的天然风味，更受消费者的喜爱。Hou 等^[34]对比了苹果与黑麦来源的天然酵母发酵过程，发现虽然在最开始黑麦种产气较快，但之后苹果的产气速率加快，且就产气总量来说，苹果种更大。Aplevicz 等^[66]研究利用甘蔗、苹果和葡萄作为底物培养天然酵母液，对比三者及制作面包的发酵活性、物化、微生物和感官特性，表明不同来源的天然酵母具有不同特性，制作的面包的感官特性也各不相同，其中葡萄天然酵母液发酵活性和面包的感官特性最佳。也有研究^[67-68]表明利用葡萄干发酵汁制作的面包能达到类似的效果。但整体来说，新鲜水果往往容易受季节限制，因此干果类天然酵母的培养更适合工业化生产。

3.2.3 花卉来源 最常见用于天然酵母培养的花是啤酒花。在培养过程中，需将酒花在水中煮沸，滤掉酒花的沸水加入小麦粉用于天然酵母种的培养，也可与马铃薯并用制作发酵剂。酒花中含有的酒花树脂可以抑制天然酵母培养时的杂菌生长，有利于酵母繁殖和发酵；其他成分如酒花油具有挥发性好且带有特异香味的特点，可以给面包增加风味。唐佳碧^[69]采用三次发酵法制作了一种具有植物芳香的啤酒花面包。吴微^[70]提出啤酒花发酵液还可改善杂粮面包的制备。目前有关其他花种天然酵母液培养的研究报道较少。李志斌^[71]发现可以选用玫瑰花、樱花或菊花中的一种或多种的混合物制备天然酵母粉。

4 天然酵母面包的特点

4.1 发酵能力较弱

商业面包酵母是选用天然酵母中发酵能力最强的菌种培养得到的，故发酵力强，短时间就能产生大量二氧化碳，完成发酵作用。天然酵母中由于菌种类型繁杂，不同菌种之间还会互相影响生长与发酵，因此比商业酵母发酵能力弱、发

酵时间长。Hwang 等^[72]研究葡萄干天然酵母面包的特性时发现普通面团在 150 min 内体积从 50 cm³膨大到 210 cm³，而含有不同比例的天然酵母的面团需要至少 270 min。王金水等^[73]也通过 F3 流变式发酵仪分析酸面团和酵母菌的发酵特性，发现酸面团的发酵时间(2.9 h)为酵母菌(1.4 h)的两倍，但是发酵稳定性要高于酵母菌。Marti 等^[74]在酸面团用于改善无麸质面包的研究中发现，酸面团的 CO₂ 产生量只有面包酵母的 60%~70%，发酵最大高度为面包酵母的 80%~85%左右。如何改善天然酵母的发酵能力是扩大工业化生产面临的一大问题。因此，许多学者致力于研究从自然发酵面团中筛选强化关键菌种，以稳定发酵过程，缩短加工时间，为工业化生产打下良好基础。

4.2 赋予独特风味

由于天然酵母中存在着多种酵母菌和乳酸菌等有益菌群，在发酵过程中，会生成特有的有机酸和酯类，使产品带有独特的风味，烘烤后其外皮和瓢芯也具有独特的口感。面团中乳酸菌及酵母菌通过分解蛋白质释放出不同种类的氨基酸及小分子肽，参与美拉德反应和作为烘焙制品香气化合物前体物。天然酵母发酵过程中酵母菌主要合成 2-甲基-1-丙醇，2,3 甲基-1-丁醇和其他异醇等挥发性风味成分；异型发酵乳酸菌主要产生乙酸乙酯和少量醇类以及醛类，而同型发酵乳酸菌合成二乙酰和其他羰基化合物^[75]。涂雅骏等^[76]利用固相萃取和气-质联用技术研究发现葡萄干发酵液面包中的风味物质种类多达 29 种，是普通面包的 1.6 倍，与葡萄干面包相比，发酵液面包含有甲乙酐、癸醛等 12 种独有的风味物质，且酯类物质含量更高，香味更丰富。类似研究^[77]发现植物乳杆菌燕麦酸面团面包中的风味物质类别为 45 种，比普通面包多 9 种。Thiele 等^[78]通过试验得出自然发酵产生的游离氨基酸能改善面包风味，尤其是鸟氨酸。因此，利用天然酵母赋予产品独特的风味，可能会成为天然酵母焙烤制品的一个方向。

4.3 改善面包质地

天然酵母由于发酵能力不如商业酵母，需要的发酵时间长，使得淀粉颗粒充分肿胀，面包内部不规则孔洞多。但天然酵母面包的比容大，弹性好，且能维持较长时间的柔软口感。Rózyło 等^[79]研究发现不管是新鲜酸面团或冻干后的荞麦酸面团都使得无麸质面包的比容显著大于普通面包，面包片内部的气孔较大且多，瓢芯硬度也比普通面包的有所降低，弹性较好，显著改善面包的质地。简思平等^[80]选用柠檬和香蕉培养天然酵母液用于制作天然酵母面包，结果表明天然酵母面包的质地较软，孔洞明显，比容显著大于商业酵母面包，并且在储存过程中变硬程度明显低于商业酵母面包。研究^[81-83]发现，乳酸菌在发酵过程中产生的代谢产物如胞外多糖能提高面团的粘弹性，增大面包体积，降低面包芯硬度。所以，乳酸菌产生的胞外多糖可以替代其他昂贵的亲水胶体，用作面包改良剂，在减少添加剂使用的同时降低面包的成本。

4.4 提高营养价值

天然酵母发酵过程中多种微生物(特别是异型发酵乳酸

菌)共同作用减少面筋蛋白质的二硫键和酸化,提高了内源蛋白酶的活性和底物可及性,诱导蛋白质降解成各种游离氨基酸,使得面包中氨基酸含量显著提高。张薇等^[84]研究发现天然酵母面包中有 12 种氨基酸的含量显著高于普通酵母发酵面包,包括人体必需氨基酸,其中蛋氨酸的含量增长最大。世界上约有 1% 的人患有乳糜泻,即麸质过敏症(一种免疫介导性肠病)。乳糜泻病人一般只能食用无谷蛋白食品,因此无麸质食品的生产质量一直是引人关注的问题^[85-87]。有学者^[88]发现天然酵母发酵也可改善无麸质面包的质量,乳酸菌可以分解面包中的面筋蛋白来为乳糜泻病人提供天然无添加的安全食品。Coda 等^[89]研究发现天然酵母发酵还可促进内源性植酸酶对植酸的分解,提高面包的营养价值。钟京^[90]通过试验发现植物乳杆菌发酵对麸皮和添加麸皮的面包面团以及面包中植酸含量影响显著,植酸含量随着发酵时间的增加而降低,提高了高纤维面包中矿物质利用率。因此,天然酵母面包符合 21 世纪食品工业发展的基本要求——“营养、安全、美味”。

4.5 延长保存期限

天然酵母发酵改善面包的老化特性,延缓面包的老化,主要是通过显著降低面包在贮藏期内的硬度和老化焓值。Corsetti 等^[91]利用质构仪和 DSC 研究储藏过程中天然酵母面包的硬度变化和老化焓值,结果发现 *S. cerevisiae* 141 和 *L. plantarum* DC400 组合发酵的面包虽然在最初 24 h 的硬度最大,但在之后的储存过程中变化最慢,192 h 后的硬度值也最小;乳酸菌和酵母菌组合发酵的面包在 144 h 的储藏过程中老化焓值增长较缓,低于商业酵母面包的焓值。这可能是乳酸菌的存在,使天然酵母在发酵过程中产生乳酸、醋酸等多种有机酸降低体系的 pH,提高体系中一些酶如淀粉酶和蛋白酶的活性,促进淀粉和蛋白质分解成小分子物质,而且乳酸菌还可产生胞外多糖,影响储藏过程中体系的淀粉和蛋白质组分的分布,抑制淀粉回生,延缓老化过程。Katina 等^[92]研究发现麸皮酸面团与酶结合使用对抑制高纤维面包老化有积极影响。

面包的保存期限主要受老化和微生物污染的影响,后者的影响更大。天然酵母中一些乳酸菌可产生细菌素等抗菌物质^[93-94],可抑制多种致病菌和腐败菌,如 Gänzle 等^[95]研究发现 *Lb. reuteri* 产生的 Reuterin 可抑制细菌、酵母菌和真菌等,从而延长面包的保质期。Axel 等^[96]研究发现利用 *L. amylovorus* DSM19280 发酵酸面团制作的面包可抑制霉菌生长,保存期限延长将近 4 d。Denkova 等^[97]发现添加 10% 特定天然酵母发酵种的面包可以延缓细菌性腐败,而如果想要抑制其他腐败菌的生长则需添加 15% ~ 20% 左右。Lynch 等^[98]提出天然酵母发酵时产生的有机酸、CO₂、乙醇和过氧化氢可抑制霉菌生长。Kam 等^[99]通过试验探究 4 种天然酵母发酵剂对 5 种常见霉菌污染的抑菌性质,结果表明天然酵母对黄曲霉和枝孢样枝孢霉生长的抑制作用最强。因此,天然酵母在面包生产中可以兼作生物防腐剂,满足消费者不添加防腐剂的需求。

5 结论与展望

天然酵母发酵虽然是一种古老的生物发酵技术,但是与现代技术结合可为消费者生产不含防腐剂和更有利于肠道健康的食品。相关研究表明天然酵母发酵虽然发酵能力不如商业酵母,但是多种微生物协同作用释放多种风味物质使得天然酵母面包具有浓郁的风味;乳酸和醋酸的产生降低了体系的 pH,有利于内源蛋白酶和淀粉酶分解蛋白质和淀粉,增加面包的总氨基酸含量和抑制淀粉老化;植酸酶在低 pH 条件下降解植酸,提高了人体对矿物质的利用率;乳酸菌可以分解面包面团中的面筋蛋白从而为乳糜泻病人提供健康食品;天然酵母发酵过程中产生的胞外多糖可以替代亲水胶体作为面包改良剂,降低面包的成本和减少添加剂的使用;天然酵母也可用作生物防腐剂,其发酵产生的有机酸(特别是乳酸和醋酸)、CO₂、乙醇、过氧化氢以及一些细菌素等抗菌物质,可以延缓面包在储存期间的腐败。

目前,天然酵母面包仍存在以下问题:培养过程时间较长、培养过程复杂、菌种受到原料种类或产地等多重因素的影响、发酵过程不易控制、最终产品的风味不稳定,使得这种方法难以用于大规模生产而被局限于家庭及手工作坊。为克服这些缺点,建议从以下几个方面着手:① 接种特定菌种。向发酵液接种性能优越、风味稳定的酵母或乳酸菌进行发酵可以适当缩短时间,控制最终产品的稳定化。目前,虽然已有较多关于接种特定菌种制备酸面团的报道,但现有的研究还仅停留在实验室阶段,因此,深化相关研究,形成产业化生产将是下一步的目标。② 规范生产工艺。只有保证工艺条件一致的情况下,才可能使天然酵母液的菌种稳定,从而得到风味稳定的产品。目前天然酵母面包的生产还没有统一化的生产工艺和标准,因此规范生产工艺对扩大生产规模至关重要。③ 筛选强化关键菌种。利用分子生物学技术分析和鉴定天然酵母中的关键菌种,再研究其强化方法,稳定发酵过程和产品风味,为工业化生产打下良好基础。创建稳定的天然酵母体系,保障产品品质,应用于工业化和自动化生产是目前和未来的研究热点和方向。

参考文献

[1] 杨海燕. 主食面包带来的健康新机遇[J]. 食品工业科技, 2015, 36(22): 37.

[2] 朱念琳. 中国焙烤食品行业现状及发展趋势[DB/OL]. [2010-07-24]. <http://www.doc88.com/p-291365668392.html>.

[3] 陈洪华, 李祥睿. 面包配方与工艺[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2009: 4.

[4] BARROS F, ALVIOLA J N, ROONEY L W. Comparison of quality of refined and whole wheat tortillas[J]. Journal of Cereal Science, 2010, 51(1): 50-56.

[5] PACYNSKI M, WOJTASIAK R Z, MILDNER-SZKUDLARZ S. Improving the aroma of gluten-free bread[J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 63(1): 706-713.

[6] 袁蕾蕾, 郑志, 徐添, 等. 杂粮面包的制备工艺优化研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(13): 235-240.

[7]NDAYISHIMIYE J B, 卢桂义, 黄卫宁, 等. 添加剂对甘薯—小麦复合面包面团发酵流变学及烘焙特性的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 15-26.

[8] ADAM K M, 王凤, 贾春利, 等. 高粱—小麦粉复合面包面团发酵流变学与烘焙特性[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 1-8.

[9] 李楠. 面包生产大全[M]. 北京, 化学工业出版社, 2011: 149.

[10] GOBBETTI M, SIMONETTI M S, CORSETTI A, et al. Volatile compound and organic acid productions by mixed wheat sour dough starters: influence of fermentation parameters and dynamics during baking [J]. Food Microbiology, 1995, 12(6): 497-507.

[11] PARAMITHIOTIS S, TSIASIOTOU S, DROSINOSE H. Comparative study of spontaneously fermented sourdoughs originating from two regions of Greece: Peloponnesus and Thessaly [J]. European Food Research and Technology, 2010, 231(6): 883-890.

[12] 刘若诗. 乳酸菌酸面团发酵剂的制备及其发酵烘焙特性研究[D]. 江苏: 江南大学, 2010: 27-30.

[13] ARENDT E K, RYAN L A M, FABIOD B. Impact of sourdough on the texture of bread [J]. Food Microbiology, 2007, 24(2): 165-174.

[14] RIZZELLO C G, CASSONE A, CODA R, et al. Antifungal activity of sourdough fermented wheat germ used as an ingredient for breadmaking [J]. Food Chemistry, 2011, 127(3): 952-959.

[15] CEVOLI C, GIANOTTI A, TRONCOSO R, et al. Quality evaluation by physical tests of a traditional Italian flat bread Piatina during storage and shelf-life improvement with sourdough and enzymes [J]. European Food Research and Technology, 2015, 240(6): 1 081-1 089.

[16] GANZLE M G, LOPOMEN J, GOBBETTI M. Proteolysis in sourdough fermentation: mechanisms and potential for improved bread quality [J]. Trends in Food Science and Technology, 2008, 19(10): 513-521.

[17] KOPEC A, BORCZAK B, PYSZ M, et al. An addition of sourdough and whey proteins affects the nutritional quality of wholemeal wheat bread [J]. Acta scientiarum polonorum. Technologia alimentaria, 2014, 13(1): 43-54.

[18] TANNAHILL R. The history of sourdough [EB/OL]. [2016-01-18]. <http://www.kitchenproject.com/history/sourdough.htm>.

[19] 姚国强, 李慧, 高鹏飞, 等. 乳酸菌在发酵酸面团中的研究与应用[J]. 中国食品学报, 2013, 13(3): 163-170.

[20] CODA R, CAGNO R D, GOBBETTI M, et al. Sourdough lactic acid bacteria: Exploration of non-wheat cereal-based fermentation [J]. Food Microbiology, 2014, 37(2): 51-58.

[21] BARTKIENE E, SCHLEINING G, REKSTYTE T, et al. Influence of the addition of lupin sourdough with different lactobacilli on dough properties and bread quality [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2013, 48(12): 2 613-2 620.

[22] LHOMME E, ORAIN S, COURCOUX P, et al. The predominance of Lactobacillus sanfranciscensis in French organic sourdoughs and its impact on related bread characteristics [J]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 213: 40-48.

[23] 冷进松, 朱珠, 武腾. 乳酸菌-玉米酵母混合酸面团面包工艺研究[J]. 食品工业, 2015(6): 74-78.

[24] 黄卫宁, 王凤, 张庆, 等. 利用植物乳杆菌发酵酸面团生产酸面包的方法: 中国, 102487972A[P]. 2012-06-13.

[25] 孙国娟, 崔泰花, 王禹, 等. 乳酸菌发酵面包工艺研究[J]. 食品与机械, 2011, 27(1): 143-145.

[26] WOOD B J B. 发酵食品微生物学[M]. 徐岩, 译. 北京: 中国轻工业出版社, 2001: 152-153.

[27] 周春艳, 张华铮, 陈红兵, 等. 酸面团发酵技术应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2014, 35(17): 375-380.

[28] LUC D V, MARC V. Biodiversity and identification of sourdough lactic acid bacteria [J]. Food Microbiology, 2007, 24(2): 120-127.

[29] VUYST L D, NEYSENS P. The sourdough microflora: biodiversity and metabolic interactions [J]. Trends in Food Science and Technology, 2005, 16(1/3): 43-56.

[30] CORSETTI A, SETTANNI L. Lactobacilli in sourdough fermentation [J]. Food research international, 2007, 40(5): 539-558.

[31] HAMMES W P, GÄNZLE M G. Microbiology of Fermented Foods: Sourdough breads and related products [M]. [S.l.]: Springer US, 1998: 199-216.

[32] VUYST L D, KERREBROECK S V, HARTH H, et al. Microbial ecology of sourdough fermentations: Diverse or uniform? [J]. Food Microbiol, 2014, 37(2): 11-29.

[33] PULVIRENTI A, SOLIERI L, GULLO M, et al. Occurrence and dominance of yeast species in sourdough [J]. Letters in Applied Microbiology, 2004, 38(2): 113-117.

[34] HOU Guo-quan, HSU Ya-hsuan. Comparing fermentation gas production between wheat and apple sourdough starters using the Risograph [J]. Food Bioscience, 2013, 3: 75-81.

[35] 刘德海. 酵母在面包生产中的重要作用[J]. 粮食与食品工业, 2005, 12(6): 28-30.

[36] 杨秀琴, 邹奇波, 黄卫宁. 酵母菌对自然发酵酸面团面包中风味物质影响的研究[J]. 食品与机械, 2006, 22(3): 37-40, 43.

[37] 王刚, 邢家溧, 印伯星, 等. 泡菜、豆酱中产香酵母菌的筛选及其在面包制作中的应用[J]. 食品科学, 2014, 35(23): 155-160.

[38] 尹艳丽, 王金水, 杨森, 等. 酸面团中的微生物群落及发酵过程中的代谢反应[J]. 食品工业科技, 2014, 35(19): 368-372.

[39] GÄNZLE M G, VERMEULEN N, VOGEL R F. Carbohydrate, peptide and lipid metabolism of lactic acid bacteria in sourdough [J]. Food Microbiol, 2007, 24(2): 128-138.

[40] GOBBETTI M, ANGELIS M D, CORSETTI A, et al. Biochemistry and physiology of sourdough lactic acid bacteria [J]. Trends in Food Science and Technology, 2005, 16(1): 57-69.

[41] 许雅娟. 由水果中培养天然微生物应用于天然酵母面包制程之研究(II): 连续式液态培养法[D]. 台湾: 国立中兴大学, 2007: 275-276.

[42] Wehrle K, Crowe N, Boeijen I V, et al. Screening methods for the proteolytic breakdown of gluten by lactic acid bacteria and

enzyme preparations [J]. European Food Research and Technology, 1999, 209(6): 428-433.

[43] 方靖, 陈中, 林伟锋. 乳酸菌发酵对面包品质的影响[J]. 现代食品科技, 2011, 27(6): 634-636, 706.

[44] 方靖, 陈中, 林伟锋, 等. 乳酸菌发酵剂对直接发酵法生产面包品质的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(10): 212-214.

[45] 方靖, 陈中, 林伟锋, 等. 乳酸菌发酵剂对直接发酵法生产面包贮藏特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(5): 101-105.

[46] FALADE A T, EMMAMBUX M N, BUYS E M, et al. Improvement of maize bread quality through modification of dough rheological properties by lactic acid bacteria fermentation [J]. Journal of Cereal Science, 2014, 60(3): 471-476.

[47] PLESSAS S, ALEXOPOULOS A, MANTZOURANI I, et al. Application of novel starter cultures for sourdough bread production [J]. Anaerobe, 2011, 17(6): 486-489.

[48] MORONI A V, ZANNINI E, SENSIDONI G, et al. Exploitation of buckwheat sourdough for the production of wheat bread [J]. European Food Research and Technology, 2012, 235(4): 659-668.

[49] 张思佳, 张薇, 苏晓琴, 等. 乳杆菌发酵对荞麦面包抗氧化及烘焙特性影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(19): 49-53.

[50] HAMMES W P, BRANDT M J, FRANCIS KL, et al. Microbial ecology of cereal fermentations [J]. Trends in Food Science and Technology, 2005, 16(1/3): 4-11.

[51] SADEGHI A. The Secrets of Sourdough: A Review of Miraculous Potentials of Sourdough in Bread Shelf Life [J]. Biotechnology, 2008, 7(3): 413-417.

[52] GUEL H, OEZCELIK S, SAGDIC O, et al. Sourdough Bread Production With Lactobacilli And S. Cerevisiae Isolated From Sourdoughs [J]. Process Biochemistry, 2005, 40(2): 691-697.

[53] 张薇. 葡果自然发酵酸面团菌群结构及发酵面包烘焙品质研究[D]. 江苏: 江南大学, 2015: 20-23.

[54] LATTANZI A, MINERVINI F, CAGNO R D, et al. The lactic acid bacteria and yeast microbiota of eighteen sourdoughs used for the manufacture of traditional Italian sweet leavened baked goods [J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 163(2/3): 71-79.

[55] 李慧东, 刘冠勇. 用乳酸菌和酵母共同发酵法生产面包的研究[J]. 食品工业, 2007(6): 25-26.

[56] APLEVICZ K S, SILVA T D, FRITZEN-FREIREC B, et al. Effect of the incorporation of different freeze-dried cultures on the properties of sourdough bread [J]. Journal of Culinary Science and Technology, 2014, 12(4): 354-367.

[57] 熊俐, 曹新志, 吕开斌, 等. 复合菌和酶制剂在麸皮面包品质改良上的应用[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(16): 22-25.

[58] LHOMME E, URIEN C, LEGRAND J, et al. Sourdough microbial community dynamics: An analysis during French organic bread-making processes [J]. Food Microbiology, 2016, 53(Pt A): 41-50.

[59] 王晓强. 图解面包制作技术[M]. 北京: 中国物资出版社, 2010: 32.

[60] 李志斌. 天然酵母面包及其制作方法: 中国, 104782702A[P]. 2015-07-22.

[61] 张梅霞. 一种天然酵母的制作方法: 中国, 103503938A[P]. 2014-01-15.

[62] 黄卫宁, 杨秀琴. 一种自然发酵酸面包及其制备方法: 中国, 1650721A[P]. 2005-08-10.

[63] BANU I, VASILEAN I, APRODU I. Quality evaluation of the sourdough rye breads [J]. Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI: Food Technology, 2011, 35(2): 94-105.

[64] MARIOTTI M, GAROFALO C, AQUILANTI L, et al. Barley flour exploitation in sourdough bread-making: A technological, nutritional and sensory evaluation [J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 59(2): 973-980.

[65] 张坤. 乳酸菌发酵燕麦酸面团发酵剂冷冻干燥与发酵烘焙特性的研究[D]. 江苏: 江南大学, 2009: 3-4.

[66] APLEVICZ K S, MAZO J Z, DOS SANTOS NETON K, et al. Evaluation of sourdoughs for the production of bread using spontaneous fermentation technique [J]. Acta Scientiarum: Technology, 2014, 36(4): 713-719.

[67] 涂雅俊. 葡萄干发酵汁的性质及其对面包烘焙特性的影响[D]. 江苏: 江南大学, 2013: 37-44.

[68] 刘晋嘉. 探讨葡萄乾天然种最适条件对土司品质之影响[D]. 台湾: 高雄餐旅大学, 2012: 69-74.

[69] 唐佳碧. 一种面包的制作方法: 中国, 102450295A[P]. 2012-05-16.

[70] 吴微. 面包及其制备方法: 中国, 1736211A[P]. 2006-02-22.

[71] 李志斌. 纯天然酵母粉的制备方法: 中国, 103243036A[P]. 2013-08-14.

[72] HWANG Jean-yu, SHYU Yung-shin. Influence of raisin starter syrup concentrations on the properties of sourdough and sourdough bread [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 23(4): 443-450.

[73] 王金水, 杨森, 尹艳丽, 等. 植物乳酸菌 M616 对发酵酸面团发酵特性的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(4): 83-87.

[74] MARTI A, BOTTEGA G, FRANZETTI L, et al. From wheat sourdough to gluten-free sourdough: a non-conventional process for producing gluten-free bread [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2015, 50(5): 1 268-1 274.

[75] REHMAN S, PATERSON A, PIGGOTT J R. Flavour in sourdough breads: a review [J]. Trends in Food Science and Technology, 2006, 17(10): 557-566.

[76] 涂雅俊, 黄田苗, 赵宝, 等. 发酵葡萄干对面包烘焙特性及风味的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(5): 80-84.

[77] 张庆, 钟京, 王凤, 等. 植物乳杆菌燕麦酸面团发酵面包风味化合物的特征[J]. 北京工商大学学报: 自然科学版, 2011, 29(4): 12-18.

[78] THIELE C, GANZLE M G, VOGELR F. Contribution of sourdough lactobacilli, yeast, and cereal enzymes to the generation of amino acids in dough relevant for bread flavor [J]. Cereal Chemistry, 2002, 79(1): 45-51.

[79] RÓZYŁO R, RUDY S, KRZYKOWSKI A, et al. Effect of adding fresh and freeze-dried buckwheat sourdough on gluten-free bread quality [J]. International Journal of Food Science and

Technology, 2015, 50(2): 313-322.

[80] 简思平, 曹志雄, 许秀华. 不同水果发酵液应用於天然酵母面包制备及其品质特性探讨[J]. 餐旅暨观光, 2012, 9(4): 171-178.

[81] SANDRA G, ARENDT E K. Exopolysaccharides from sourdough lactic acid bacteria [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 54(7): 891-901.

[82] POUTANEN K, FLANDER L, KATINA K. Sourdough and cereal fermentation in a nutritional perspective [J]. Food Microbiology, 2009, 26(7): 693-699.

[83] TORRIERI E, PEPE O, VENTORINO V, et al. Effect of sourdough at different concentrations on quality and shelf life of bread [J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 56(2): 508-516.

[84] 张薇, 程晓燕, 黄卫宁, 等. 含天然酵母粉发酵面包的营养与老化特性及风味化合物特征[J]. 食品科学, 2014, 35(23): 33-38.

[85] DŁUZEWSKA E, MARCINIAK-LUKASIAK K, KUREK N. Effect of transglutaminase additive on the quality of gluten-free bread [J]. CyTA: Journal of Food, 2015, 13(1): 80-86.

[86] PELLEGRINI N, AGOSTONIC. Nutritional aspects of gluten-free products [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(12): 2 380-2 385.

[87] 王坤, 路飞, 孟燕楠, 等. 无面筋食品研究进展[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(21): 181-185.

[88] MORONI A V, FABIO D B, ARENDT E K. Sourdough in gluten-free bread-making: an ancient technology to solve a novel issue? [J]. Food Microbiology, 2009, 26(7): 676-684.

[89] CODA R, CAGNO R D, RIZZELLO C G, et al. Utilization of african grains for sourdough bread making [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(6): 329-335.

[90] 钟京. 高纤维酸面团面包植酸变化及烘焙特性研究[D]. 江苏: 江南大学, 2013: 23-24.

[91] CORSETTI A, GOBBETTI M, BALESTRIERIF, et al. Sourdough lactic acid bacteria effects on bread firmness and staling [J]. Journal of Food Science, 1998, 63(2): 347-351.

[92] KATINA K, SALMENKALLIO-MARTTILA M, PARTANEN R, et al. Effects of sourdough and enzymes on staling of high-fibre wheat bread [J]. LWT - Food Science and Technology, 2006, 39(5): 479-491.

[93] 贡汉生, 孟祥晨. 乳酸菌细菌素分类与作用机制[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(1): 105-109.

[94] FAZELI M R, SHAHVERDI A R, SEDAGHAT B, et al. Sourdough-isolated Lactobacillus fermentum as a potent anti-mould preservative of a traditional Iranian bread [J]. European Food Research and Technology, 2004, 218(6): 554-556.

[95] GÄNZLE M G. Reutericyclin: biological activity, mode of action, and potential applications [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2004, 64(3): 326-332.

[96] AXEL C, RÖCKER B, BROSNAN B, et al. Application of Lactobacillus amylovorus DSM19280 in gluten-free sourdough bread to improve the microbial shelf life [J]. Food Microbiology, 2015, 47: 36-44.

[97] DENKOVA R, ILIEVA S, DENKOVA Z, et al. Production of wheat bread without preservatives using sourdough starters [J]. Biotechnology and Biotechnological Equipment, 2014, 28(5): 889-898.

[98] LYNCH K M, PAWLOWSKA A M, BROSNAN B, et al. Application of Lactobacillus amylovorus as an antifungal adjunct to extend the shelf-life of Cheddar cheese [J]. International Dairy Journal, 2014, 34(1): 167-173.

[99] KAM P V, BIANCHINI A, BULLERMAN L B. Inhibition of mold growth by sourdough bread cultures [J/OL]. [2007-05-01]. <http://digitalcommons.unl.edu/rurals/vol2/iss1/5>.

(上接第 125 页)

[20] 田给林. 连作草莓土壤酚酸类物质的化感作用及其生物调控研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015: 5-11.

[21] HELENO S A, FERREIRA I C F R, ESTEVES A P, et al. Antimicrobial and demelanizing activity of Ganoderma lucidum extract, *p*-hydroxybenzoic and cinnamic acids and their synthetic acetylated glucuronide methyl esters[J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 58: 95-100.

[22] FARHOOSH R, JOHNNY S, ASNAASHARI M, et al. Structure-antioxidant activity relationships of *o*-hydroxyl, *o*-methoxy, and alkyl ester derivatives of *p*-hydroxybenzoic acid [J]. Food Chemistry, 2016, 194: 128-134.

[23] 冉玥, 焦必宁, 赵其阳, 等. 超高效液相色谱法同时测定柑橘中 11 种类黄酮物质[J]. 食品科学, 2013(4): 168-172.

[24] BAUTISTA-BAÑOS S, HERNÁNDEZ-LÓPEZ M, BOSQUEZ-MOLINA E, et al. Effects of chitosan and plant extracts on growth of Colletotrichum gloeosporioides, anthracnose levels and quality of papaya fruit[J]. Crop Protection, 2003, 22(9): 1 087-1 092.

[25] ZHOU Ya-han, MING Jian, DENG Li-li, et al. Effect of Pichia membranaefaciens in combination with salicylic acid on postharvest blue and green mold decay in citrus fruits[J]. Biological Control, 2014, 74: 21-29.

[26] LIU Feng-juan, TU Kang, SHAO Xing-feng, et al. Effect of hot air treatment in combination with Pichia guilliermondii on postharvest anthracnose rot of loquat fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 58(1): 65-71.

[27] LUO Yang, ZENG Kai-fang, MING Jian. Control of blue and green mold decay of citrus fruit by Pichia membranaefaciens and induction of defense responses [J]. Scientia Horticulturae, 2012, 135: 120-127.

[28] 胡花丽, 梁丽松, 王贵禧, 等. 外源乙烯对 CA 贮藏桃果实 MDA 含量、PPO 和 LOX 活性变化的影响[J]. 西北林学院学报, 2007(3): 38-42.

[29] LIN Jin-he, GONG De-qiang, ZHU Shi-jiang, et al. Expression of PPO and POD genes and contents of polyphenolic compounds in harvested mango fruits in relation to Benzothiadiazole-induced defense against anthracnose[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 130(1): 85-89.