

# 微生物源 $\beta$ -葡萄糖苷酶在发酵食品中的应用

荆丰雪<sup>1,2</sup>, 钟斌<sup>2,3</sup>, 万娅琼<sup>2,4</sup>, 樊洪泓<sup>1</sup>, 程江华<sup>2,4</sup>, 徐雅芫<sup>2,4\*</sup>

(1. 安徽农业大学生命科学学院, 合肥 230036; 2. 安徽省农业科学院农产品加工研究所, 合肥 230031;  
3. 安徽农业大学茶与食品科技学院, 合肥 230036; 4. 安徽省食品微生物发酵与  
功能应用工程实验室, 合肥 230031)

**摘要:**  $\beta$ -葡萄糖苷酶是一种通过水解含有 $\beta$ -D-葡萄糖苷键的底物释放有强烈芳香特性的游离糖苷配体的水解酶, 可以制造活性芳香单体物质改善食品风味和提高营养价值。微生物来源的 $\beta$ -葡萄糖苷酶因具有优良的特性已广泛应用于谷物、果蔬、豆制品、饮料和功能食品产业中。本文重点综述了霉菌、酵母菌和其他微生物来源的 $\beta$ -葡萄糖苷酶的生产菌株以及不同微生物生产的 $\beta$ -葡萄糖苷酶的特异性, 总结和展望了 $\beta$ -葡萄糖苷酶在发酵食品领域中的应用及其发展趋势, 以期对 $\beta$ -葡萄糖苷酶产菌种选育、酶学特性改造、酶工业化生产及在发酵食品中的应用提供技术导向和理论依据。

**关键词:**  $\beta$ -葡萄糖苷酶; 微生物; 发酵食品; 食品工业

## Application of microbial $\beta$ -glucosidase in fermented food

JING Feng-Xue<sup>1,2</sup>, ZHONG Bin<sup>2,3</sup>, WAN Ya-Qiong<sup>2,4</sup>, FAN Hong-Hong<sup>1</sup>,  
CHENG Jiang-Hua<sup>2,4</sup>, XU Ya-Yuan<sup>2,4\*</sup>

(1. School of Life Sciences, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Institute of Agricultural Products Processing, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 3. College of Tea and Food Science and Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 4. Anhui Engineering Laboratory of Microbial Fermentation and Functional Application of Food, Hefei 230031, China)

**ABSTRACT:**  $\beta$ -glucosidase is a hydrolase that releases free glucosidase with strong aromatic properties by hydrolyzing substrates containing  $\beta$ -D-glucosidase bond, which can produce active aromatic monomer substances to improve food flavor or nutritional value. Microbial  $\beta$ -glucosidase has been widely used in cereal, fruit and vegetable, bean products, beverage and functional food industries due to its excellent properties. This paper reviewed the specificity of  $\beta$ -glucosidase produced by fungi, yeast and other microorganisms and  $\beta$ -glucosidase produced by different microorganisms, summarized and prospected the application and development trend of  $\beta$ -glucosidase in fermented food. In order to provide technical guidance and theoretical basis for the breeding of  $\beta$ -glucosidase producing strains, the transformation of enzyme characteristics, the industrial production of enzyme and its application in fermented food.

**KEY WORDS:**  $\beta$ -glucosidase; microorganism; fermented foods; food industry

**基金项目:** 科技部重点专项(SQ2020YFF0404523)、安徽省重大科技专项(201903a06020008、202003b06020027)、安徽省农业科学院青年英才计划项目(QNYC-202122)

**Fund:** Supported by the Key Project of Ministry of Science and Technology (SQ2020YFF0404523), the Major Science and Technology Project of Anhui Province (201903a06020008, 202003b06020027), and the Young Talents Program of Anhui Academy of Agricultural Sciences (QNYC-202122)

\*通信作者: 徐雅芫, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品加工。E-mail: AAASXYY1004@126.com

\*Corresponding author: XU Ya-Yuan, Ph.D, Assistant Professor, Anhui Academy of Agricultural Science, No.40, Agricultural South Road, Luyang District, Hefei 230031, China. E-mail: AAASXYY1004@126.com

## 0 引言

$\beta$ -葡萄糖苷酶是一类能够用来改善食物风味和形成生物活性单体成分的主要酶制剂<sup>[1]</sup>, 在食品、医疗和化学等领域均具有重大的使用价值<sup>[2]</sup>。 $\beta$ -葡萄糖苷酶主要作用于 $\beta$ -1,4-葡萄糖苷键, 在去除糖苷中的非还原末端糖基残体过程中起到关键作用, 能够催化各种物质中葡萄糖苷键的水解, 如烷基-*D*-糖苷、芳基-*D*-糖苷、氰糖苷、双糖和短链寡糖, 将葡萄糖从非还原端释放出来。 $\beta$ -葡萄糖苷酶作为纤维素酶的一种, 广泛分布于许多动植物和古菌、细菌、真核生物、病毒及某些未定义物种中, 并参与生物体的代谢活动<sup>[3]</sup>。在微生物中,  $\beta$ -葡萄糖苷酶在碳源利用过程中起到了关键作用; 在植物中,  $\beta$ -葡萄糖苷酶与细胞壁发育、代谢色素、植物激素激活和果实成熟都有关; 在哺乳动物中,  $\beta$ -葡萄糖苷酶与葡萄糖神经酰胺的水解有关<sup>[4]</sup>。不同来源的 $\beta$ -葡萄糖苷酶所属的家族也有所不同, 热稳定性和酶促反应所对应的最适温度以及动力学参数也存在一定差异, 相对分子量、结构与组成差别亦较大<sup>[1]</sup>。微生物来源的 $\beta$ -葡萄糖苷酶获得高纯度酶制剂的制备工艺较为简单且酶促效果更佳, 对实现发酵食品的标准生产, 提高食品的营养价值和经济价值具有重要的作用。本文主要阐述微生物来源的 $\beta$ -葡萄糖苷酶的特性及其在发酵食品中的应用, 以期为高产 $\beta$ -葡萄糖苷酶菌种的选育及产业化生产应用提供一定的参考。

## 1 $\beta$ -葡萄糖苷酶的分类和酶学特性

$\beta$ -葡萄糖苷酶的催化活性中心在与底物结合时会发生一定程度的结构变化, 基于结合底物的不同,  $\beta$ -葡萄糖苷酶可以分为: 芳香基- $\beta$ -葡萄糖苷酶、烃基- $\beta$ -葡萄糖苷酶, 还有多底物特异性的 $\beta$ -葡萄糖苷酶<sup>[5]</sup>, 目前已经报道和研究中的 $\beta$ -葡萄糖苷酶大多带有广泛的底物特异性。 $\beta$ -葡萄糖苷酶来源可分为微生物、动物和植物, 按照氨基酸序列

的同源性,  $\beta$ -葡萄糖苷酶大致上被分为糖苷水解酶 (glucoside hydrolase, GH) 1、3、5、9、30 和 116 家族<sup>[6]</sup>, 其中 GH1、GH3、GH5、GH9 和 GH30 家族的 $\beta$ -葡萄糖苷酶结构如图 1 所示<sup>[7]</sup>, GH16 家族 $\beta$ -葡萄糖苷酶的结构还未见分析。在目前已经发现的所有 $\beta$ -葡萄糖苷酶中, 以来源于细菌、植物以及哺乳动物的 1 家族居多, 第 3 家族次之; 动物源的 $\beta$ -葡萄糖苷酶则主要以哺乳动物和昆虫源为主; 植物源的 $\beta$ -葡萄糖苷酶基本覆盖了包括拟南芥、柑橘、大豆、水稻、茶鲜叶等在内的大部分植物; 微生物源的 $\beta$ -葡萄糖苷酶中, 霉菌、酵母菌及部分细菌来源是研究的重点。

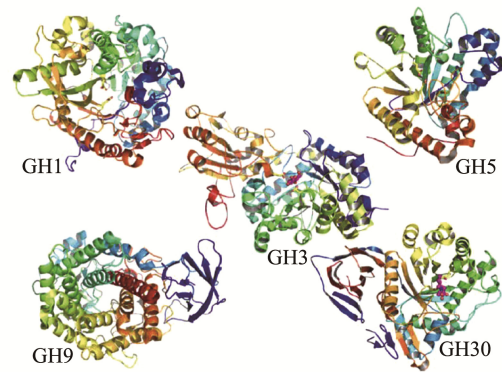


图 1 不同 GH 家族的 $\beta$ -葡萄糖苷酶的结构<sup>[7]</sup>  
Fig.1 Structures of  $\beta$ -glucosidases from different GH families<sup>[7]</sup>

同其他生物来源的 $\beta$ -葡萄糖苷酶比较, 来源于微生物的大部分 $\beta$ -葡萄糖苷酶在酸性范围内 (pH 3.5~5.5) 呈现较强活性, 少数 $\beta$ -葡萄糖苷酶在碱性范围呈现最佳活性,  $\beta$ -葡萄糖苷酶的最适反应温度一般在 40~60°C 之间, 但不同微生物来源的 $\beta$ -葡萄糖苷酶的生物酶学特征存在着一定的差别, 如表 1 所示。因此, 微生物源 $\beta$ -葡萄糖苷酶单独使用、或与其他商业酶制剂联合使用, 在发酵食品、酒精饮料和生物制药等领域发挥了巨大的作用<sup>[22]</sup>。

表 1 部分不同微生物来源的 $\beta$ -葡萄糖苷酶的性质  
Table 1 Characterization of  $\beta$ -glucosidase from different microbial sources

微生物	分离来源	代表菌种	酶最适温度/°C	酶最适 pH	酶其他特性	参考文献
酵母菌	奶酪、奶制品	马克斯克鲁维酵母	50~60	5.0~7.0	食品安全性、耐热性、乙醇耐受性	[8]
	葡萄表皮	毕赤酵母	40	5.0~6.0		[9]
	欧李果实表面	酿酒酵母	24	4.0~5.0		[10]
霉菌	腐烂水果	黑曲霉	40~55	大部分为酸性偏碱性	耐热性、环境稳定性、但部分会产生毒素	[11~12]
	腐烂木材、腐殖质土壤	米曲霉、烟曲霉	40~60			[13]
	植物组织	绿色木霉	70~80			6.5
细菌	浓香型大曲、发酵豆豉	枯草芽孢杆菌	30~40	3.0~5.5	耐碱性、耐酸性、降解亚硝酸盐、食品安全性	[15~16]
	发酵泡菜、老陈醋酒醪	植物乳杆菌、乳酸菌	30~40	5.0		[17]
	草食性动物肠道内容物	副干酪乳杆菌	37	6.0		[18]
部分其他微生物来源	森林土壤、腐殖土	放线菌	25~60	3~9	耐酸碱、耐低温、产酶活力受金属离子影响	[19~20]
	温泉	嗜热古菌	70~90	5~6.5		热稳定性、热激活性

## 2 不同微生物来源的 $\beta$ -葡萄糖苷酶

### 2.1 真菌来源 $\beta$ -葡萄糖苷酶

真菌来源的  $\beta$ -葡萄糖苷酶产生菌主要为酵母菌和霉菌。酵母菌有优异的发酵酿造特性, 常应用于食品酿造工业。与细菌相比, 酵母菌所产的  $\beta$ -葡萄糖苷酶多是胞外酶, 分离纯化更为方便, 这为酶制剂的大规模工业化生产提供了有利的条件。许多学者为便于研究将酵母菌分为非酿酒酵母和酿酒酵母两大类, 非酿酒酵母一般表现出较酿酒酵母更高的基础酶活力<sup>[23]</sup>, 如克鲁维酵母属 (*Kluyveromyces*) 和毕赤酵母属 (*Pichia*) 都能产生  $\beta$ -葡萄糖苷酶, 且基础酶活力也较高, 为耐热  $\beta$ -葡萄糖苷酶的高效生产者。杨文丹等<sup>[24]</sup>采用马克斯克鲁维菌株发酵麦麸制得功能配料, 测得其产胞外  $\beta$ -葡萄糖苷酶活力达 6.98 IU/g。但同属的不同菌种产酶量和酶活力会存在着一定的差别, 王凤梅等<sup>[9]</sup>在 4 种不同品种的葡萄浆果表面筛选出 66 株产  $\beta$ -葡萄糖苷酶活力不同的菌株均属于毕赤酵母属, 其中异常毕赤酵母的产酶活力最大, 而克鲁维毕赤酵母则缺乏  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性。酿酒酵母菌也是  $\beta$ -葡萄糖苷酶的高产菌种, 张家萌<sup>[10]</sup>从成熟的欧李果实表面及自然发酵液中分离筛选得到 4 株产  $\beta$ -葡萄糖苷酶且乙醇耐受性优良的酵母菌, 其中产酶活性较大的 G4 菌株经鉴定为酿酒酵母菌。

包括黑曲霉、米曲霉及绿色木霉等在内的霉菌也是生产  $\beta$ -葡萄糖苷酶的一种主要来源。黑曲霉所产纤维素酶系的  $\beta$ -葡萄糖苷酶的生物活性很强, 可以高效地降解纤维素, 并且不会对环境造成污染, 是常见的霉菌类工业性生产菌, 在食品、医疗等方面广泛应用<sup>[25]</sup>。郭慧女<sup>[26]</sup>采用 p-NPG 显色法, 从葡萄园的土壤和葡萄表皮筛选到的 3 种产  $\beta$ -葡萄糖苷酶的菌株中, 酶活最高的黑曲霉酶活力达 27.63 IU/mL。顾斌涛等<sup>[27]</sup>利用稻草的秸秆作为碳源的产酶培养基培养里氏木霉, 所产生的  $\beta$ -葡萄糖苷酶活力测定达到 8.9 IU/mL。米曲霉是美国食品与药物管理局和美国饲料公司协会发布的四十多个安全微生物菌种之一, 它的高安全性在未来食品领域将具备更好的应用前景<sup>[28]</sup>。郝伟伟<sup>[11]</sup>以雅安周公山腐殖层土壤为样品, 筛选出 3 株具有较高  $\beta$ -葡萄糖苷酶活力的米曲霉菌株。曲霉来源的  $\beta$ -葡萄糖苷酶最适的 pH 一般偏碱性, CAO 等<sup>[13]</sup>从腐烂的木材中分离出的烟曲霉具有高  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性, 酶促作用最适 pH 和温度分别为 9.0 和 50°C, 且酶活力在大多数测试金属离子和化学试剂中也保持稳定。

### 2.2 细菌来源 $\beta$ -葡萄糖苷酶

细菌产生的  $\beta$ -葡萄糖苷酶主要集中在芽孢杆菌和乳酸菌。李永博等<sup>[15]</sup>在浓香型大曲中筛选到一株高产  $\beta$ -葡萄糖苷酶的枯草芽孢杆菌 PT-1, 酶活力达 55.7 IU/mL。冯伦元等<sup>[16]</sup>在贵州的传统发酵酿造豆豉中分离并检测出一株

枯草芽孢杆菌 GUXN01, 其具有高  $\beta$ -葡萄糖苷酶水解酶活, 所产的  $\beta$ -葡萄糖苷酶与不同底物结合酶活力在 1~5 IU/g 范围内波动, 具有广泛的水解活性和相对专一的底物特异性。乳酸菌同样也是  $\beta$ -葡萄糖苷酶的一个重要产生菌, 绝大部分乳酸菌都对人体具有重要的生理功能, 是研究与应用最多的益生菌之一, 因此, 对乳酸菌来源  $\beta$ -葡萄糖苷酶的研究也被赋予更高的关注度<sup>[29]</sup>。乔健敏等<sup>[17]</sup>在韩国泡菜、日氏腌渍白菜等发酵食品中进行了产生  $\beta$ -葡萄糖苷酶乳酸菌的分离鉴定工作, 在厌氧环境下共筛选到了 5 种具有较高产酶能力的菌株, 其中 3 株植物乳杆菌、1 株副植物乳杆菌和 1 株粪肠球菌。

### 2.3 其他微生物来源的 $\beta$ -葡萄糖苷酶

除真菌和细菌外, 对产  $\beta$ -葡萄糖苷酶微生物的研究较多的是放线菌, 放线菌也是自然界中广泛存在的微生物之一, 放线菌产  $\beta$ -葡萄糖苷酶的能力与真菌和细菌相比稍弱, 但所产酶更具抗逆性, 且酶结构也相对简单更便于进行产酶基因的遗传分析和改造。放线菌所产的  $\beta$ -葡萄糖苷酶一般具有耐酸碱、温度耐受的特点。任大明等<sup>[30]</sup>从天柱山腐殖土中筛选到一株产酸性纤维素酶的放线菌, 此菌产  $\beta$ -葡萄糖苷酶的最大酶活达 8.05 IU/mL, 在 45~60°C 的温度范围内相对酶活都能保持在 70% 以上, 且实验发现金属离子  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$  对该放线菌产  $\beta$ -葡萄糖苷酶具有一定的激活作用。邵娜娜等<sup>[20]</sup>从内蒙大青沟的森林土壤中分离到一株在 10~35°C 条件下都能生长的放线菌 ND2-1, 其所产的纤维素酶在 20~40°C 之间的相对酶活都较高, 具有较好的酸碱适应性, 在 pH 3.0~9.0 范围内相对酶活都能保持在 85% 以上, 同时金属离子  $Mn^{2+}$  对酶活力有很明显的促进作用, 可提高至 1.5 倍以上, 与任大明等<sup>[30]</sup>关于金属离子对放线菌产酶活力的研究结果较为一致。

## 3 现代生物学技术提升 $\beta$ -葡萄糖苷酶活力

目前生产  $\beta$ -葡萄糖苷酶制剂时依然面临着酶活性低、产量不高等技术困难<sup>[31]</sup>, 因此, 利用现代生物学技术手段提升菌株产酶量和酶活性成为研究热点。基因工程育种可以定向地改变酶系的结构, 利用现代分子生物学技术对  $\beta$ -葡萄糖苷酶生产菌以及对  $\beta$ -葡萄糖苷酶基因进行改造, 是构建高效  $\beta$ -葡萄糖苷酶生产菌的有效手段。

### 3.1 诱变育种

通过物理或化学诱变剂的处理, 导致目的菌株的遗传物质发生不确定性突变<sup>[32]</sup>, 结合有效的筛选方法从处理后的突变体中筛选出具有优良目标特性的突变菌株, 在诱变前期准备过程中无需深入了解目的菌株及目的序列的代谢方式、遗传背景等信息<sup>[33]</sup>, 操作简便, 是科研人员快速获得目的菌株的常用方法。诱变育种包括物理诱变和化学诱变, 通过对具有某种目标特性的目的菌株进行筛选及

改造, 诱变效率更高且所得突变菌株性能更为集中。王婧等<sup>[34]</sup>以硫酸二乙酯作为化学诱导剂对酿酒酵母 UV-45 菌株进行诱导处理, 得到的突变菌株的  $\beta$ -葡萄糖苷酶酶活性提高了 22.74%; 由于酵母菌对紫外线照射处理的敏感性较强, 张莉等<sup>[35]</sup>用 3500  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$  剂量的紫外线进行物理诱变, 辐照处理高产  $\beta$ -葡萄糖苷酶的酿酒酵母 MQFSM-3 菌株后得到的突变菌株酶活力提高了 41.64%。化学诱变和物理诱变还可以联合诱变, AGRAWAL 等<sup>[36]</sup>利用联合化学诱变与物理诱变技术复合处理枯草芽孢杆菌, 发现联合暴露于紫外线和甲基磺酸乙酯化学诱变剂后开发出的枯草芽孢杆菌突变菌株比仅在紫外线和仅在甲基磺酸乙酯暴露后的突变体的产  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性提高了 1.2 倍。

### 3.2 基因改造育种

基因改造育种改造目的菌株的方式是在了解目标产物的特异性基因序列以及在菌株体内的合成途径的基础上引入外源基因<sup>[37]</sup>, 通过改善合成途径或提高基因剂量的方法, 实现  $\beta$ -葡萄糖苷酶蛋白表达量的提高。利用密码子优化、过量表达、竞争途径敲除等基因修饰的方法相比非定向育种准确率更高, 郭敬涵等<sup>[38]</sup>利用 CRISPR/Cas9 基因组编辑技术失活酿酒酵母 *An- $\alpha$*  菌株中的 *YPS1* 和 *YPS2* 基因, 之后导入  $\beta$ -葡萄糖苷酶表达质粒, 发现可以显著提高所得菌株的  $\beta$ -葡萄糖苷酶活力及表达量。沈凤飞等<sup>[21]</sup>将嗜热古菌中的 GH3 氨基酸序列进行重组质粒的构建, 并在大肠杆菌感受态细胞中诱导表达, 发现重组酶 TaBgl3 具有更好的热稳定性, 且高温可以激活 TaBgl3 的  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性, 在 80°C 的高温下  $\beta$ -葡萄糖苷酶活力提高了 68%。

传统改造  $\beta$ -葡萄糖苷酶的技术手段虽然已相对成熟但仍存在一定的局限性, 不能在菌体生长的环境条件发生改变时动态地调控体内代谢, 容易导致菌体自身代谢失衡, 可能会引起菌体的裂解死亡<sup>[39]</sup>, 而人工构建基因工程菌的新型手段—合成生物学技术可高效提升重组工程菌中目的产物的产量且缩短进化周期, 借助基因编辑工具和生物元件动态调控或移植菌体代谢通路, 之后将构建出的工程菌应用于产品生产中。微生物中的大肠杆菌、酵母菌因具有较高的生长率和已充分研究的基因组和代谢网络通常可被选择为合适的宿主菌进行  $\beta$ -葡萄糖苷酶的异源高效合成。范琴等<sup>[40]</sup>从真金丝猴粪便微生物基因组出发, 扩增得到  $\beta$ -

葡萄糖苷酶 GH1 家族的基因 *BglRBS\_26* 和 *BglRBS\_9* 并进行大肠杆菌异源表达, 得到的重组的酸性  $\beta$ -葡萄糖苷酶能在较广的酸碱范围内保持活力, 同时还具有较高的催化效率和 NaCl 稳定性。赵文萱<sup>[37]</sup>对诱变筛选出的高产  $\beta$ -葡萄糖苷酶黑曲霉菌株的  $\beta$ -葡萄糖苷酶基因序列进行克隆, 通过数字液滴聚合酶链式反应 (droplet digital polymerase chain reaction, dd-PCR) 技术对多拷贝的酿酒酵母工程菌的拷贝数进行鉴定, 筛选构建出表达水平高且遗传稳定性较好的产  $\beta$ -葡萄糖苷酶工程菌, 并将其应用于玉米秸秆发酵, 既避免了黑曲霉发酵产生毒素又解决了酿酒酵母先天表达量低的问题, 同时实现  $\beta$ -葡萄糖苷酶在发酵过程中的高效表达。

## 4 $\beta$ -葡萄糖苷酶在发酵食品中的应用

现代发酵工艺技术的主要目的是利用微生物和其代谢产生的酶完成食物材料的酸化、醇化、蛋白质水解和氨基酸转化等物质分解转化, 提高食物的营养价值, 从而总体改善产品的质地、口感、味道和颜色。 $\beta$ -葡萄糖苷酶是食品发酵过程中非常重要的功能酶, 一方面,  $\beta$ -葡萄糖苷酶有增香的作用, 与特异性底物反应使其结合态香气物质水解, 并释放游离苷元(图 2)<sup>[41]</sup>, 提高发酵产品的香气丰富度和风味品质; 另一方面,  $\beta$ -葡萄糖苷酶具有脱苦作用, 可以将柚皮苷、苦杏仁苷等苦味物质水解为葡萄糖和无苦味物质; 第三,  $\beta$ -葡萄糖苷酶还可以使木酚素、大豆异黄酮、人参皂苷和虎杖苷等糖苷类物质脱去糖基转化为具有更高生物利用度的苷元<sup>[41]</sup>, 从而提升发酵产品的品质和保健功能。

大多数微生物来源的  $\beta$ -葡萄糖苷酶抗酸性、糖耐受性以及乙醇耐受性能良好, 能够在复杂的发酵环境中发挥作用, 故成为研究的热点。

### 4.1 在酒类酿造中的应用

香气成分特别是挥发性香气物质的类型和浓度是判断果汁、酒类等食品饮料质量的一个关键因素<sup>[42]</sup>, 影响着消费者对产品的选择。发酵酒体适宜的温度、酸碱度和乙醇环境有利于  $\beta$ -葡萄糖苷酶的合成和释放,  $\beta$ -葡萄糖苷酶的酶促反应可以改善发酵酒体的口感、色泽和泡沫等性质,

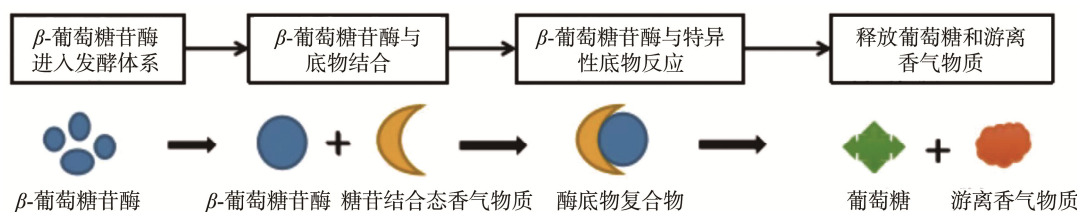


图 2  $\beta$ -葡萄糖苷酶水解风味前体物质作用机制示意图<sup>[41]</sup>

Fig.2 Schematic diagram of action mechanism of  $\beta$ -glucosidase hydrolyzing flavor precursor substance<sup>[41]</sup>



提高发酵酒的香气复杂性<sup>[43]</sup>, 利用酒体发酵环境的特点和  $\beta$ -葡萄糖苷酶的反应特点将产酶菌株应用于不同的发酵酒体中可以发挥不同的作用, 如表 2 所示。DAENEN 等<sup>[51]</sup>研究表明当  $\beta$ -葡萄糖苷酶作用于酒花时, 可以大量释放出酒花中存在的苷元, 所得苷元物质的质量浓度大于 0.005 mg/L。部分微生物产生的  $\beta$ -葡萄糖苷酶在强酸性介质环境下能够保持稳定高效, 因此可以作为风味添加剂来改变发酵果汁产品的质地、味道和香气。但不同原料的果汁在  $\beta$ -葡萄糖苷酶作用过程中所产生的香气成分的类型与浓度有着一定的差别, 张亮<sup>[52]</sup>通过将  $\beta$ -葡萄糖苷酶加到荷叶饮品中分析其增香作用, 发现通过  $\beta$ -葡萄糖苷酶处理后的荷叶饮品中总香味成分上升了近百分之十二, 香味中主要酯类成分浓度占总香味成分的相对含量在酶处理后也提高了近 2.38 倍, 使得经酶处理过的荷叶饮料香味更为醇厚, 味道也更为柔和。彭邦远等<sup>[53]</sup>将葡萄糖苷酶应用于龙里刺梨, 检测到  $\beta$ -葡萄糖苷酶酶解后刺梨汁中的风味前体物质含量更高, 主要是以酮类和醛类为主。

除香气特征之外, 酒体颜色也是发酵酒和果汁的主要属性之一。鲜果酿造的酒和果汁因果实原材料的色泽不同, 会出现变色浑浊或者各个批次颜色都不相同的情况, 从而影响产品的质量和价值。 $\beta$ -葡萄糖苷酶对花色苷的分解作用可以作为一种改变酒体颜色的方法被进一步应用<sup>[46]</sup>, 且酒体中所含的乙醇在一定程度上可以提高花色苷的水解效率, 王兴吉等<sup>[47]</sup>在毛桃果酒酿造过程中加入  $\beta$ -葡萄糖苷酶水解花色苷, 发现毛桃果酒中含有的部分乙醇可以提高  $\beta$ -葡萄糖苷酶水解花色苷的效率, 增大花色苷和水解产物在发酵体系中的溶解度, 提高毛桃果酒颜色的稳定性。

## 4.2 在茶叶发酵中的应用

茶叶香气的纯度、浓度和持久度都是衡量茶叶品质的

重要指标, 许多香气成分都以糖苷类前体的形态存在于茶叶中。 $\beta$ -葡萄糖苷酶较一般蛋白类酶能够在相对较高的温度下保持稳定<sup>[54]</sup>, 能特异性地作用于糖苷类前体物质释放出游离的香气成分, 但并不影响其他风味成分, 是提升茶叶香气品质的关键酶之一<sup>[55]</sup>。当茶叶细胞壁经  $\beta$ -葡萄糖苷酶等纤维素酶的破坏后, 茶叶细胞内挥发性化合物的释放率大大增加, 特征香味更加明显。廖凯<sup>[56]</sup>采用  $\beta$ -葡萄糖苷酶酶解红茶饮料, 发现酶处理后的红茶饮料香气更浓郁。陈寿松等<sup>[57]</sup>研究发现水仙和肉桂两种武夷岩茶的  $\beta$ -葡萄糖苷酶基因的平均相对表达量明显超过了  $\beta$ -樱草糖苷酶, 并导致糖苷类香气前体物质的相应变化。方可等<sup>[58]</sup>通过气相色谱-质谱法、感官品评和香气活性值(odor activity values, OAVs)分析方法, 研究了  $\beta$ -葡萄糖苷酶处理后的速溶乌龙茶水的香味变化情况, 发现经  $\beta$ -葡萄糖苷酶处理后的速溶乌龙茶水中的主要香气贡献成分如癸醛、顺式-3-己烯醇、香叶醇、2-甲基丁醛和 2-乙基呋喃等的浓度明显提高, 为速溶茶粉及其后续生产产品的香味改善提供了方法依据。

## 4.3 在发酵豆制品中的应用

中国传统的发酵豆制品主要有腐乳、豆豉、豆酱和酱油等。与未发酵的豆制品相比较, 发酵豆制品经过各种微生物的作用, 不仅口味特别、容易消化吸收, 同时还能够形成全新的功能性物质, 在营养健康方面具有价值优越性<sup>[59-60]</sup>。大豆异黄酮是存在于豆制品中的一种具有抗氧化、延缓衰老、防癌抗癌、提高抵抗力和提高动物生产性能等功能<sup>[61]</sup>的生物类黄酮物质, 而大豆异黄酮苷元则是大豆异黄酮发挥生理活性功能的重要活性成分。 $\beta$ -葡萄糖苷酶通过水解非还原性  $\beta$ -D-糖苷键产生葡萄糖与相应配基, 可将豆制品中的大豆异黄酮转化为具有生物活性的游离型异黄酮苷元<sup>[62-63]</sup>。张炳文等<sup>[64]</sup>研究豆豉与发酵酸豆乳等发酵大

表 2  $\beta$ -葡萄糖苷酶应用于不同发酵酒体中的作用  
Table 2 Application of  $\beta$ -glucosidase in different fermented wine bodies

酒体	作用	产 $\beta$ -葡萄糖苷酶微生物	参考文献
葡萄酒	增加糖苷萜烯类前体物质的水解和单萜类物质的释放	阿萨丝孢酵母	[41]
	将游离的花色素苷-单葡萄糖苷断裂糖苷键分解为无色物质, 改善色泽和澄清度	酿酒酵母	[42]
啤酒	水解啤酒酒花中的糖苷前体释放乙酸乙酯、橙花醇等结合态香气物质	布鲁塞尔酒香酵母、异酒香酵母	[44]
	产生降低 pH 的乳酸和对改善酒体香气和口感有重要作用的甘油	耐热克鲁维酵母	[45]
其他果酒	将影响果酒色泽观感的游离花色苷分解为无色物质, 提高果汁出汁率和澄清度	白曲霉	[46-47]
	产生辛酸、苯乙醇等其他影响香气的物质。	异常威克汉姆酵母	[43,48]
果汁	分解风味化合物前体, 产生有芳香特性的游离糖苷配体和独特的风味物质	戴尔有孢圆酵母	[49]
	和 $\alpha$ -L-鼠李糖苷酶组成柚苷酶用于果实中的苦味物质柚皮苷, 增加甜度、降低苦味, 提升产品口感	酿酒酵母	[50]

豆制品中异黄酮各组分的相互转化情况,发现  $\beta$ -葡萄糖苷酶作用过的豆制品中游离异黄酮苷元的浓度明显增加,糖苷型异黄酮的浓度则显著降低,表明糖苷型大豆异黄酮在  $\beta$ -葡萄糖苷酶的影响下可以转化为游离型大豆异黄酮苷元。上述研究证实了  $\beta$ -葡萄糖苷酶可以提高大豆发酵制品中的生物活性成分浓度,为进一步深入地研究发酵大豆食品,开发活性功能食品,奠定了有力的理论依据。

#### 4.4 在泡菜中的应用

发酵蔬菜是我国经典传统发酵食品的代表之一,蔬菜通过发酵不仅可以减少烹饪时间和燃料需求,还可以获得多种香味、口味和质地。发酵蔬菜酸脆爽口且能提高食欲,同时具有防动脉硬化、抗癌、抗衰老等作用受到广大消费者的青睐,如四川泡菜、东北酸菜、“宁波三臭”等<sup>[65-66]</sup>。

$\beta$ -葡萄糖苷酶可以高效利用植物组织中淀粉和多糖,软化植物纤维的同时酶解产生独特的风味物质<sup>[67-68]</sup>。传统泡菜中微生物种类是复杂多样的,其中含有具  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性的优势菌株。植物乳杆菌 NCU116 是一株分离自我国传统泡菜的典型优势菌株,对这一乳酸菌菌株进行全基因组测序发现基因组中编码了多个与寡/聚糖水解相关的糖苷水解酶,具有较高的  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性<sup>[69]</sup>。除了泡菜中优势微生物本身产生的  $\beta$ -葡萄糖苷酶,外源加入  $\beta$ -葡萄糖苷酶产生菌对发酵蔬菜品质的提升也起到重要的作用。屠梦婷<sup>[70]</sup>将在不同地区腌黄瓜中分离到的优势菌株通过接种发酵分析其对发酵黄瓜风味的影响,发现接种了具有高  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性的 Pku\_Y4 菌株的发酵黄瓜中含特殊香气的挥发性物质的种类最多,其中酯类物质中的乙酸乙酯含量达 2.182%,赋予了发酵黄瓜特殊的风味。

## 5 结束语

随着微生物源  $\beta$ -葡萄糖苷酶特性与功能机制研究的不断深入,以及该类酶生产工艺技术的逐步完善与提升,应选用适当的发酵方法以进一步增加产量和减少成本,如液态发酵生产的酶相对单一,技术产业化水平普遍高一些,但容易大量染菌;而固态发酵虽同时生产多个酶,操作简便、能耗小,但微生物生长速度缓慢,工业化程度低<sup>[31]</sup>,故可以综合考虑,研究更有效的发酵方式。另外采用人工模拟酶技术可以更加深入地研究  $\beta$ -葡萄糖苷酶在各个领域应用中的效率和催化机理,这个技术将会成为未来研究工作的重要手段,在日益发达的食品制造领域有着广泛的发展应用空间,在促进纤维素转变为生物燃料乙醇、疾病的诊断和治疗、降解土壤有机质、天然色素和非离子表面活性剂的生产以及化工制药等方面的市场前景也十分广阔。

#### 参考文献

[1] 张媛媛,苏敏,朴春红. 微生物来源的  $\beta$ -葡萄糖苷酶在食品工业中应用进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16): 329-335.

- ZHANG YY, SU M, PU CH. Application of  $\beta$ -glucosidase from microbial sources in food industry [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(16): 329-335.
- [2] 刘晓柱,张远林,黎华.  $\beta$ -葡萄糖苷酶在酒类酿造中研究进展[J]. 中国酿造, 2020, 39(6): 8-12.
- LIU XZ, ZHANG YL, LI H. Research progress of  $\beta$ -glucosidase in wine brewing [J]. Chin Brew, 2020, 39(6): 8-12.
- [3] 缪婷婷. 植物乳杆菌 WU14 和嗜热古菌来源的 GH1 家族的  $\beta$ -葡萄糖苷酶的克隆表达及酶学性质研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2021.
- MIU TT. Cloning, expression and characterization of  $\beta$ -glucosidases from *Lactobacillus plantarum* WU14 and GH1 family derived from thermophilic archaea [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2021.
- [4] HIDEYUKI T, SAYAKA KF, YOSHIDA C, et al. Gtgen3A, a novel plant GH3  $\beta$ -glucosidase, modulates gentio-oligosaccharide metabolism in *Gentiana* [J]. Biochem J, 2018, 475(7): 1309-1322.
- [5] 曹慧方,李新新,张玥琦. 来源于脂环酸芽孢杆菌的 GH1 家族  $\beta$ -葡萄糖苷酶的葡萄糖耐受性分子改造[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(5): 26-33.
- CAO HF, LI XX, ZHANG YQ. Molecular modification of  $\beta$ -glucosidase from GH1 family derived from *Bacillus aliphacycloxylic acid* [J]. J Chin Agric Sci Technol, 2018, 20(5): 26-33.
- [6] 杨芯卓. 嗜热微生物来源的葡萄糖苷酶和木糖苷酶性质及功能研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- YANG XZ. Studies on the properties and functions of glucosidase and xylosidase derived from thermophilic microorganisms [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [7] KETUDAT JR, ESEN A.  $\beta$ -glucosidases [J]. Cell Molecul Life Sci, 2010, 67: 3389-3405.
- [8] 苏敏,朴春红,霍越. 产  $\beta$ -葡萄糖苷酶酵母菌的分离鉴定及其在人参皂苷 Rg3 转化中的应用[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 172-178.
- SU M, PU CH, HUO Y. Isolation and identification of  $\beta$ -glucosidase producing yeast and its application in ginsenoside Rg3 transformation [J]. Food Sci, 2018, 39(14): 172-178.
- [9] 王凤梅,张邦建,岳泰新. 葡萄酒相关酵母  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性及影响因素研究[J]. 中国酿造, 2018, 37(7): 83-87.
- WANG FM, ZHANG BJ, YUE TX. Study on  $\beta$ -glucosidase activity of wine-related yeast and its influencing factors [J]. Chin Brew, 2018, 37(7): 83-87.
- [10] 张家萌. 产  $\beta$ -葡萄糖苷酶欧李酿酒酵母菌的筛选及欧李酒发酵工艺研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2021.
- ZHANG JM. Screening of *Saccharomyces cerevisiae* L. producing  $\beta$ -glucosidase and study on fermentation technology of *Saccharomyces cerevisiae* [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.
- [11] 郝伟伟. 产  $\beta$ -葡萄糖苷酶真菌的筛选鉴定及其酶的分离纯化和基因的克隆[D]. 雅安: 四川农业大学, 2011.
- HAO WW. Screening and identification of  $\beta$ -glucosidase producing fungi, isolation and purification of  $\beta$ -glucosidase producing fungi and gene cloning [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2011.
- [12] ABDELLA A, EL-BAZ AF, IBRAHIM IA, et al. Biotransformation of soy flour isoflavones by *Aspergillus niger* NRRL 3122  $\beta$ -glucosidase enzyme [J]. Nat Prod Res, 2018, 32(20): 2382-2391.
- [13] CAO PH, WANG L, WANG YY, et al. Alkali-tolerant  $\beta$ -glucosidase

- produced by newly isolated *Aspergillus fumigatus* WL002 from rotten wood [J]. *Int Biodegr Biodegr*, 2015, 105: 276–282.
- [14] 彭利沙, 张永祥, 闫青. 绿色木霉耐热  $\beta$ -葡萄糖苷酶分离纯化及酶学性质研究[J]. *生物技术通报*, 2016, 32(9): 189–196.
- PENG LS, ZHANG YX, YAN Q. Isolation, purification and characterization of heat-resistant  $\beta$ -glucosidase from *Trichoderma viridis* [J]. *Biotechnol Bull*, 2016, 32(9): 189–196.
- [15] 李永博, 李星, 唐敏. 浓香型大曲中产  $\beta$ -葡萄糖苷酶微生物的筛选鉴定及其产酶条件优化[J]. *食品科技*, 2017, 42(12): 17–22.
- LI YB, LI X, TANG M. Screening, identification and optimization of  $\beta$ -glucosidase production conditions in luzhou-flavor Daqu [J]. *Food Technol*, 2017, 42(12): 17–22.
- [16] 冯伦元, 何腊平, 李翠芹. 贵州传统发酵豆制品中水解银杏黄酮苷的微生物  $\beta$ -葡萄糖苷酶筛选[J]. *微生物学报*, 2020, 60(2): 320–332.
- FENG LY, HE LP, LI CQ. Screening of microbial  $\beta$ -glucosidase for hydrolysis of ginkgo biloba flavonoid glycosides in traditional fermented soybean products in Guizhou [J]. *Acta Microbiol Sin*, 2020, 60(2): 320–332.
- [17] 乔健敏, 张和平. 发酵食品中产  $\beta$ -葡萄糖苷酶的乳酸菌的分离和鉴定 [C]. 益生菌: 技术及产业化—第十二届益生菌与健康国际研讨会摘要集, 2017.
- QIAO JM, ZHANG HP. Isolation and identification of *Lactobacillus* producing  $\beta$ -glucosidase from fermented food [C]. *Probiotics: Technology and Industrialization-Abstracts from the 12th International Symposium on Probiotics and Health*, 2017.
- [18] 姜兰. 产  $\beta$ -葡萄糖苷酶乳酸菌的筛选及其富含黄酮苷元酸奶的研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- JIANG L. Screening of *Lactobacillus* producing  $\beta$ -glucosidase and study on flavone aglycone rich yogurt [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2019.
- [19] 秦雯娜, 赵坤, 郭立忠. 1 株产纤维素酶嗜盐放线菌的鉴定、发酵优化及酶学性质的研究[J]. *青岛农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 33(1): 27–34.
- QIN WN, ZHAO K, GUO LZ. Identification, fermentation optimization and enzymatic properties of a cellulase-producing halophilic actinomycetes [J]. *J Qingdao Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 2016, 33(1): 27–34.
- [20] 邵娜娜, 轩换玲, 罗锋. 一株产低温纤维素酶放线菌的分离与产酶研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(24): 159–163, 168.
- SHAO NN, XUAN HL, LUO F. Isolation and enzyme-producing study of a low-temperature cellulase producing actinomycetes [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(24): 159–163, 168.
- [21] 沈凤飞, 缪婷婷, 张晓晓, 等. 嗜热古菌 *Thermofilum adornatum* 来源的高温热激活  $\beta$ -葡萄糖苷酶 TaBgl3 的原核表达及酶学性质研究[J]. *微生物学报*, 2022, 62(7): 2555–2567.
- SHEN FF, MIU TT, ZHANG XX, *et al.* Prokaryotic expression and characterization of thermoactivated  $\beta$ -glucosidase TaBgl3 from thermophilic archaea *Thermofilum adornatum* [J]. *Acta Microbiol Sin*, 2022, 62(7): 2555–2567.
- [22] 尹守亮, 杨镒, 徐文.  $\beta$ -葡萄糖苷酶检测方法及其应用进展[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(13): 336–344.
- YIN SL, YANG YY, XU W. Progress in the detection of  $\beta$ -glucosidase and its application [J]. *Food Ferment Ind*, 2022, 48(13): 336–344.
- [23] 汤晓宏, 胡文效, 蒋锡龙. 葡萄酒酿造过程中产  $\beta$ -葡萄糖苷酶酵母菌研究进展[J]. *中国酿造*, 2020, 39(4): 7–12.
- TANG XH, HU WX, JIANG XL. Research progress of  $\beta$ -glucosidase producing yeast in winemaking process [J]. *Chin Brew*, 2020, 39(4): 7–12.
- [24] 杨文丹, 张宾乐, 庄靓. 发酵麦麸对面包面团生化特征及烘焙学特性的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(3): 6–11.
- YANG WD, ZHANG BL, ZHUANG L. Effects of fermented wheat bran on biochemical and baking characteristics of bread dough [J]. *Food Mach*, 2018, 34(3): 6–11.
- [25] 张海娟, 李军, 朱凤妹. 耐热黑曲霉 3.316 产外切葡聚糖苷酶培养基优化及酶学性质研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(22): 93–100.
- ZHANG HJ, LI J, ZHU FM. Study on the optimization of medium for production of ectoglucosidase from heat-resistant *Aspergillus niger* 3.316 [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(22): 93–100.
- [26] 郭慧女.  $\beta$ -葡萄糖苷酶生产菌的选育及其对葡萄酒中结合态香气的影响 [D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- GUO HN. Breeding of  $\beta$ -glucosidase producing bacteria and its effect on the bound aroma of wine [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.
- [27] 顾斌涛, 熊大维. 里氏木霉固态发酵产  $\beta$ -葡萄糖苷酶的研究[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(18): 1–3.
- GU BT, XIONG DW. Study on  $\beta$ -glucosidase production by solid State fermentation of *Trichoderma reesei* [J]. *Anhui Agric Sci*, 2020, 48(18): 1–3.
- [28] MACHIDA M, ASAI K, SANO M, *et al.* Genomesequencing and analysis of *Aspergillus oryzae* [J]. *Nature*, 2005, 438(7071): 1157–1161.
- [29] 陈功, 张其圣, 李恒. 中国泡菜发酵态相对稳定性的研究及应用[J]. *食品与发酵科技*, 2020, 56(1): 53–63, 72.
- CHEN G, ZHANG QS, LI H. Study on the relative stability of Chinese pickle fermentation state and its application [J]. *Food Ferment Technol*, 2020, 56(1): 53–63, 72.
- [30] 任大明, 赵钰, 白炜琪. 一株产纤维素酶放线菌的分离鉴定及酶学性质研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2016, 47(6): 667–672.
- REN DM, ZHAO Y, BAI WQ. Isolation, identification and enzymatic properties of a cellulase-producing actinomycetes [J]. *J Shenyang Agric Univ*, 2016, 47(6): 667–672.
- [31] 唐开宇, 张全, 佟明友.  $\beta$ -葡萄糖苷酶发酵技术的进展[J]. *纤维素科学与技术*, 2009, 17(3): 65–70.
- TANG KY, ZAHNG Q, TONG MY. Progress of  $\beta$ -glucosidase fermentation technology [J]. *Cell Sci Technol*, 2009, 17(3): 65–70.
- [32] 陈亚光, 高朝辉, 陈勇, 等. 沪酿 3.042 米曲霉紫外诱变及高活力蛋白酶菌株选育[J]. *中国调味品*, 2005, (3): 15–18.
- CHEN YG, GAO ZH, CHEN Y, *et al.* UV mutagenesis of *Aspergillus* 3.042 m and breeding of high activity protease strain [J]. *China Cond*, 2005, (3): 15–18.
- [33] 胡杰, 潘力, 罗立新, 等. 米曲霉孢子原生质体复合诱变及高活力蛋白酶菌株选育[J]. *食品工业科技*, 2007, (5): 116–118, 122.
- HU J, PAN L, LUO LX, *et al.* Combination mutagenesis of *Aspergillus oryzae* protoplasts and breeding of strains with high activity protease [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2007, (5): 116–118, 122.
- [34] 王婧, 张莉, 张宏海, 等. 产  $\beta$ -葡萄糖苷酶酿酒酵母菌株的化学诱变选

- 育及产酶条件优化[J]. 食品工业科技, 2016, 37(9): 139-146.
- WANG J, ZHANG L, ZHANG HH, *et al.* Breeding of *Saccharomyces cerevisiae* strains producing  $\beta$ -glucosidase by chemical mutagenesis and optimization of enzyme production conditions [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2016, 37(9): 139-146.
- [35] 张莉, 王婧, 杨婷, 等. 产 $\beta$ -葡萄糖苷酶酿酒酵母菌株紫外诱变选育及酶学性质分析[J]. 食品工业科技, 2015, 36(20): 220-224.
- ZHANG L, WANG J, YANG T, *et al.* Breeding of *Saccharomyces cerevisiae* strains producing  $\beta$ -glucosidase by UV mutagenesis and analysis of enzymatic properties [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(20): 220-224.
- [36] AGRAWAL R, SATLEWAL A, VERMA AK. Development of a  $\beta$ -glucosidase hyperproducing mutant by combined chemical and UV mutagenesis [J]. *3 Biotech*, 2013, 3(5): 381-388.
- [37] 赵文萱. 高产 $\beta$ -葡萄糖苷酶工程菌构建及对酿酒酵母 WXY12 发酵产乙醇的影响研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019.
- ZHAO WX. Construction of engineering strain with high  $\beta$ -glucosidase yield and its effect on fermentation of *Saccharomyces cerevisiae* WXY12 to produce ethanol [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019.
- [38] 郭敬涵, 陆海燕, 洪解放. YPS1/YPS2 失活改进酿酒酵母 An- $\alpha$  菌株 $\beta$ -葡萄糖苷酶分泌表达[J]. 微生物学通报, 2021, 48(12): 4485-4495.
- GUO JH, LU HY, HONG JF. YPS1/YPS2 inactivation improves  $\beta$ -glucosidase expression in *Saccharomyces cerevisiae* An- $\alpha$  strain [J]. *Microbiol China*, 2021, 48(12): 4485-4495.
- [39] 高欣, 柳羽哲, 江泽沅. 合成生物学构建微生物工程菌研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 256-264.
- GAO X, LIU YZ, JIANG ZY. Progress in the construction of microbe engineering bacteria by synthetic biology [J]. *Food Sci*, 2022, 43(15): 256-264.
- [40] 范琴, 杨金茹, 唐湘华, 等. 粪便微生物宏基因组来源 GH1  $\beta$ -葡萄糖苷酶的重组表达及酶学性质[J]. 微生物学通报, 2021, 48(12): 4581-4599.
- FAN Q, YANG JR, TANG XH, *et al.* Recombinant expression and enzymatic properties of GH1  $\beta$ -glucosidase derived from fecal microbial metagenomes [J]. *Microbiol China*, 2021, 48(12): 4581-4599.
- [41] 姚瑶, 刘庆, 刘福.  $\beta$ -葡萄糖苷酶的性质及其在食品加工中的应用研究进展[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(2): 132-135.
- YAO Y, LIU Q, LIU F. Research progress on the properties of  $\beta$ -glucosidase and its application in food processing [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2018, 46(2): 132-135.
- [42] 覃秋杏, 韩小雨, 黄卫东. 非酿酒酵母产生的 $\beta$ -葡萄糖苷酶在发酵中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(3): 306-314.
- TAN QX, HAN XY, HUANG WD. Research progress of  $\beta$ -glucosidase produced by non-*Saccharomyces cerevisiae* in fermented wine [J]. *Food Sci*, 2022, 43(3): 306-314.
- [43] LU Y. Effects of spontaneous fermentation on the microorganisms diversity and volatile compounds during 'Marselan' from grape to wine [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2020, 134: 110193.
- [44] COLOMER MS, FUNCH B, FORSTER J, *et al.* The raise of *Brettanomyces* yeast species for beer production [J]. *Curr Opin Biotechnol*, 2019, 56: 30-35.
- [45] PORTER TJ, DIVOL B, SETATI ME, *et al.* Lachancea yeast species: Origin, biochemical characteristics and oenological significance [J]. *Int J Food Res*, 2019, 119: 378-389.
- [46] LANGSTON J, SHEEHY N, XU F, *et al.* Substrate specificity of *Aspergillus oryzae* family 3  $\beta$ -glucosidase [J]. *Biochim Biophys Acta*, 2006, 5: 972-928.
- [47] 王兴吉, 王克芬, 闫宜江. 水解毛桃果酒中花色苷的 $\beta$ -葡萄糖苷酶酶学特性[J]. 食品科技, 2019, 44(2): 270-273.
- WANG XJ, WANG KF, YAN YJ. Enzymatic characteristics of  $\beta$ -glucosidase for the hydrolysis of anthocyanin in peach fruit wine [J]. *Food Technol*, 2019, 44(2): 270-273.
- [48] 刘晓柱, 张远林, 李银凤. 高产 $\beta$ -葡萄糖苷酶酵母菌的诱变选育及对刺梨果酒香气特性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 118-125.
- LIU XZ, ZHANG YL, LI YF. Breeding of  $\beta$ -glucosidase producing yeast by mutagenesis and its effect on aroma characteristics of *Roxburgh roxburgh* wine [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(19): 118-125.
- [49] 曾朝珍, 康三江, 张雾红. 德尔布有孢圆酵母与酿酒酵母纯种及混合发酵苹果酒过程中的酶活变化[J]. 现代食品科技, 2020, 36(1): 143-149.
- ZENG ZZ, KANG SJ, ZHANG JH. Changes of enzyme activity during the fermentation of apple cider with pure and mixed *Saccharomyces delbes* and *Sporomyces cerevisiae* [J]. *Mod Food Technol*, 2020, 36(1): 143-149.
- [50] 高丽. 葡萄(霞多丽)浆果中糖苷酶分布的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- GAO L. Study on the distribution of glycosidase in grape (Chardonnay) berries [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2007.
- [51] DAENEN L, SAISON D, STERCKX F, *et al.* Screening and evaluation of the glucoside hydrolase activity in *Saccharomyces* and *Brettanomyces* brewing yeasts [J]. *J Appl Microbiol*, 2008, 104(2): 478-488.
- [52] 张亮. 莲子 $\beta$ -葡萄糖苷酶特性及其对荷叶饮料增香作用的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- ZHANG L. Study on the characteristics of lotus seed  $\beta$ -glucosidase and its effect on aroma enhancement of lotus leaf beverage [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [53] 彭邦远, 罗昱, 张洪礼.  $\beta$ -葡萄糖苷酶对刺梨汁香气物质的影响[J]. 中国酿造, 2017, 36(7): 172-177.
- PENG BY, LUO Y, ZHANG HL. Effects of  $\beta$ -glucosidase on aroma substances of *Roxburgh rose* juice [J]. *Chin Brew*, 2017, 36(7): 172-177.
- [54] 薄佳慧, 张杨玲, 宫连瑾. 外源酶在茶叶深加工中的应用进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 396-404.
- FU JH, ZHANG YL, GONG LJ. Application of exogenous enzymes in deep processing of tea [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(9): 396-404.
- [55] FANG XY, DONG YR, XIE YY, *et al.* Effects of  $\beta$ -glucosidase and rhamnosidase on the contents of flavonoids, ginkgolides, and aroma components in ginkgo tea drink [J]. *Molecules*, 2019, 24(10): 2009.
- [56] 廖凯. 超声酶法对红茶饮料风味品质的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- LIAO K. Effect of ultrasonic enzymatic method on flavor quality of black tea beverage [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.



- [57] 陈寿松, 邓慧莉, 何水平. 武夷岩茶加工过程中  $\beta$ -樱草糖苷酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶基因表达与香气前体物质的差异性[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2017, 46(5): 502–507.  
CHEN SS, DENG HL, HE SP. Differences of  $\beta$ -primrose glycosidase and  $\beta$ -glucosidase gene expression and aroma precursor substances in Wuyi rock tea during processing [J]. J Fujian Agric Univ (Nat Sci Ed), 2017, 46(5): 502–507.
- [58] 方可, 李婷, 朱艳冰.  $\beta$ -葡萄糖苷酶和  $\alpha$ -L-鼠李糖苷酶对速溶绿茶粉水溶液香气的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(1): 36–44.  
FANG K, LI T, ZHU YB. Effects of  $\beta$ -glucosidase and  $\alpha$ -L-rhamnosidase on the aroma of instant green tea powder aqueous solution [J]. J Food Sci Biotechnol, 2019, 38(1): 36–44.
- [59] BLAND A, ASEERI ME, PANDIELLA SS, *et al.* Cereal-based fermented foods and beverages [J]. Food Res Int, 2003, 36(6): 527–543.
- [60] 贾璠, 郭霞, 何晨. 传统发酵豆制品营养成分研究进展[J]. 中国酿造, 2019, 38(4): 1–6.  
JIA F, GUO X, HE C. Research progress on nutritive functional components of traditional fermented soybean products [J]. Chin Brew, 2019, 38(4): 1–6.
- [61] 刘宏丽, 郭晓军, 狄聪颖. 产  $\beta$ -葡萄糖苷酶芽孢杆菌的筛选及水解大豆异黄酮糖苷研究[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2017, 37(6): 621–629.  
LIU HL, GUO XJ, DI CY. Screening of  $\beta$ -glucosidase producing *Bacillus* and its hydrolysis of soybean isoflavone glycosides [J]. J Hebei Univ (Nat Sci Ed), 2017, 37(6): 621–629.
- [62] 曹慧方, 李新新, 张玥琦. 来源于脂环酸芽孢杆菌的 GH1 家族  $\beta$ -葡萄糖苷酶的葡萄糖耐受性分子改造[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(5): 8.  
CAO HF, LI XX, ZHANG YQ. Molecular modification of  $\beta$ -glucosidase from GH1 family derived from *Bacillus aliphacycloxylic acid* [J]. J Chin Agric Sci Technol, 2018, 20(5): 8.
- [63] 许铭洙, 张勇, 严鸿林. 大豆异黄酮对骨骼肌发育的影响及其对动物肉品质的调控作用[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(6): 15–19, 163.  
XU MZ, ZHANG Y, YAN HL. Effects of soybean isoflavones on skeletal muscle development and their regulatory effects on animal meat quality [J]. Chin J Anim Sci, 2019, 55(6): 15–19, 163.
- [64] 张炳文, 宋永生, 郝征红. 发酵处理对大豆制品中异黄酮含量与组分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2002, (7): 6–9.  
ZHANG BW, SONG YS, HAO ZH. Effects of fermentation treatment on isoflavone content and composition in soybean products [J]. Food Ferment Ind, 2002, (7): 6–9.
- [65] JUNG KO, PARK KY, LLOYD BB. Anticancer effects of leek kimchi on human cancer cells [J]. Pre Nutr Food Sci, 2002, 7(7): 250–254.
- [66] 李文斌, 唐中伟, 宋敏丽. 韩国泡菜营养价值与保健功能的最新研究[J]. 农产品加工(学刊), 2006, (8): 83–84.  
LI WB, TANG ZW, SONG ML. The latest research on the nutritional value and health function of kimchi [J]. Acad Period Farm Prod Process, 2006, (8): 83–84.
- [67] 唐垚, 蔡地烽, 陈功. 拉萨不同贮藏时间泡菜的菌相构成及筛选乳酸菌特性解析[J]. 中国调味品, 2019, 44(9): 107–110.  
TANG Y, CAI DF, CHEN G. Bacterial phase composition of lhasa pickles with different storage time and analysis of lactic acid bacteria characteristics [J]. China Cond, 2019, 44(9): 107–110.
- [68] 云琳. 不同发酵方式的萝卜泡菜风味特征解析及发酵剂菌种的筛选[D]. 无锡: 江南大学, 2020.  
YUN L. Analysis of flavor characteristics of radish kimchi with different fermentation methods and selection of starter strain [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.
- [69] 黄涛. 我国传统泡菜中植物乳杆菌 NCU116 的发酵特性及益生功能相关基因解析[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.  
HUANG T. Analysis of fermentation characteristics and probiotics related genes of *Lactobacillus plantarum* NCU116 in Chinese traditional pickle [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [70] 屠梦婷. 发酵黄瓜中酵母的分离鉴定及其对发酵黄瓜风味的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.  
TU MT. Isolation and identification of yeast from fermented cucumber and its effect on the flavor of fermented cucumber [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2019.

(责任编辑: 张晓寒 黄周梅)

## 作者简介



荆丰雪, 硕士, 主要研究方向为功能微生物筛选。

E-mail: 15664437889@163.com



徐雅芄, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品加工。

E-mail: AAASXYY1004@126.com