

# 酶技术在食品加工中应用研究进展

夏文水\*, 高沛, 刘晓丽, 葛藜红, 许艳顺

(江南大学食品学院, 食品科学与技术国家重点实验室, 无锡 214122)

**摘要:** 酶技术是一种绿色安全高效的生物技术, 对食品工业的技术革新和水平提高具有重要的作用。食品加工过程涉及许多复杂的理化变化, 受热时营养素、颜色、质构、风味等方面容易受到破坏, 这就为酶技术的应用提供了必要。目前, 酶技术已经广泛应用于乳制品工业、肉制品工业、焙烤工业、饮料和果汁工业、淀粉和糖工业、油脂工业及安全检测等食品领域。本文主要从改善食品加工工艺、提高食品品质、提高食品安全性、增强食品质量控制等方面介绍了酶技术在食品加工中的应用进展, 并对酶技术在食品行业中的发展作了展望。

**关键词:** 酶技术; 食品加工; 应用

## Application research progress of enzyme technology in food processing

XIA Wen-Shui\*, GAO Pei, LIU Xiao-Li, GE Li-Hong, XU Yan-Shun

(State Key Laboratory for Food Science and Technology, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**ABSTRACT:** Enzyme technology is a kind of green, safe and efficient biological technology, which has been playing an important role in technical innovation and improvement of food industry. Food processing involves many complicated physical and chemical changes. Nutrients, color, quality, structure, and flavor are susceptible to be damaged during thermal treatment, those providing the necessary for the application of enzyme technology. At present, enzyme technology has been widely used in dairy industry, meat industry, drinks and fruit juices industry, baking industry, starch and sugar industry, oil industry, safety testing, and so on. This article mainly introduces the application of enzyme technology in food processing. In terms of improving food processing technology, food quality, food safety, food quality control, and development of enzyme technology in the food industry in the future is also discussed.

**KEY WORDS:** enzyme technology; food processing; application

## 1 引言

酶技术(enzyme technology)是指在一定的反应器内, 利用生物所产酶或直接添加酶的催化作用, 进行物质转化的技术。其特点是大多数酶通过降低反应活化能或激活底

物成为活化分子使反应速率提高上百万倍, 极大地提高反应效率。这种催化作用比无机催化剂作用更大更强, 而酶本身在反应过程中不被消耗, 也不影响反应的化学平衡; 酶与底物结合因有特异的结构要求而具有高度的专一性, 只催化特定的反应或产生特定的构型产物; 反应条件温和,

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS-46-22)、国家自然科学基金项目(31371823, 31171709)

**Fund:** Supported by the Special Construction of Modern Agricultural Industry Technology System(CARS-46-22)and National Natural Science Foundation of China (NSF31371823, 31171709)

\*通讯作者: 夏文水, 教授, 主要研究方向为食品加工技术。E-mail: xiaws@jiangnan.edu.cn

\*Corresponding author: XIA Wen-Shui, Professor, School of Food Science & Technology, State Key Lab for Food Science & Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China. E-mail: xiaws@jiangnan.edu.cn

可以在室温下或温热条件下进行,大大减少热破坏作用;由于酶来源于生物、安全生物或可食用生物,其安全性得到保证。因此,与传统化学反应相比,酶技术展现了较大的优越性,其高效、温和、安全等特性非常符合食品工业的发展思路,为食品加工提供了一条更加健康、环保、安全有效的解决途径。

食品加工是将食物或可食用的农副产品加工成具有营养、美味、安全、方便的食用产品,由于食物都是复合物或混合物,成分随品种和地区性、季节性而各异,大多是活体,水分含量高而易腐败变质,特别是食品加工的保鲜保藏是关键。在加工过程中会涉及许多复杂理化变化,受热时营养素破坏,颜色改变、质构变差、风味变坏等,这就为酶技术的应用提供了机会。

毋庸置疑,酶技术在食品工业中起着重要的作用。在古老的酿酒和奶酪生产过程中,多个步骤都有酶的参与并依赖酶的活性。已有许多报道,酶技术已经广泛地应用于乳制品工业、肉制品工业、焙烤工业、饮料和果汁工业、淀粉和糖工业、油脂工业及安全检测等食品领域。

本文综述了近年来酶技术在食品加工中应用的研究进展。研究主要集中在复合酶澄清水果汁的工艺优化、固定化脂肪酶技术定向合成高纯度油脂产品及脂肪替代品、葡萄糖氧化酶和谷氨酰胺转氨酶增强面团筋力的作用、改善肉制品风味以及酶解制备壳寡糖和功能性水产蛋白产品及配料等。从酶技术改变食品工艺、提高食品质量、提高食品安全性、增强食品质量控制等方面介绍了酶技术在食品加工中的应用,以期进一步推动酶技术在食品加工中的广泛应用,提高食品加工技术革新和技术水平。

## 2 酶技术改变食品加工工艺

### 2.1 酶法果汁澄清工艺

由水果或蔬菜加工制备果蔬汁时,其果蔬汁的稳定性是饮料生产的关键技术,为此需要将引起不稳定的因素如果胶蛋白质去除或减小颗粒半径增加稳定;以前工业化生产使用的方法就是通过外加硅藻土吸附絮凝沉淀再过滤。采用酶技术可以改变工艺。目前,食品加工行业普遍使用果胶酶、纤维素酶和木聚糖酶水解果胶、纤维素,澄清混浊果蔬汁,可提高果蔬汁的出汁率。酶法澄清最佳工艺条件的选取不仅能够提高果汁的感官品质,而且有利于果汁中Vc、花色苷等营养成分的保留。已有大量研究集中于果胶酶澄清水果汁最佳工艺条件的选取<sup>[1,2,3]</sup>。由于纤维素酶和木聚糖酶对果胶酶澄清果汁具有辅助作用,复合酶制剂的应用也为果汁澄清提供了更广泛的思路;刘莹<sup>[4,5]</sup>采用果胶酶、纤维素酶和木聚糖酶制备芒果混汁和苹果混汁,在降低酶用量的同时,温和的反应条件更好地保留了水果的营养成分,从而制备出了稳定性好、出汁率高、色泽诱人、高营养的果汁。

Sagu等<sup>[6]</sup>的研究着眼于香蕉汁的低温低酶量提取工艺,该工艺在一定程度上降低了酶解温度和加酶量,降低了工艺成本和能耗,建立了果胶水解动力学方程,为工业生产中果胶水解工艺的控制提供了理论指导。

### 2.2 油脂酶法改性工艺

脂肪酶在自然界广泛存在,它可催化三酰甘油酯的水解和合成。利用脂肪酶对天然油脂的定向催化作用来对其进行改性,可以提高天然油脂的使用价值,例如由脂肪酶催化高熔点的棕榈硬酯与植物油、向日葵油、大豆油、米糠油、棕榈油、可可油之间的酯交换作用得到具有较窄熔融范围的人造奶油。Zou等<sup>[7]</sup>以棕榈硬酯与硬脂酸、肉豆蔻酸和油菜籽、葵花籽、棕榈仁油为原料,采用固定化脂肪酶催化脂肪水解反应来合成结构化人乳脂肪,为婴儿配方奶粉中脂肪替代物的制备提供了新途径。

脂肪酶经固定化后可以明显增强使用稳定性和反复使用性,且酶反应易于控制,易于被分离和纯化,有利于自动化生产,在工业生产方面有着诱人的应用前景。Huang<sup>[8]</sup>应用固定化脂肪酶Novozym 435,经响应面法工艺优化后,可以多次反复进行催化合成柠檬酸单酯(可重复利用至少8次),有利于疏水性体系中柠檬酸及其衍生物的稳定应用。Wang<sup>[9,10,11,12]</sup>也采用该酶在最优条件下分别成功合成油酰乙醇胺、N-棕榈酰基乙醇胺、N硬脂酰产物、N-棕榈酰基乙醇胺、单油酸甘油酯和2-花生酰基甘油等生物功能性脂质,产物具有高得率、高纯度的特点,证明了固定化脂肪酶具有定向合成高纯度产物的潜力。

## 3 酶技术提高食品品质

### 3.1 改善烘焙食品品质

面制品品质包括体积、内部组织结构、贮藏稳定性等,既取决于面粉品质,也取决于生产工艺条件及品质改良剂。过去面团通常采用溴酸钾等氧化剂作为品质改良剂,由于近年来消费者对化学氧化剂的担忧,这些化学品质改良剂的使用正在减少,而酶制剂作为食品添加剂,正逐步成为广泛应用的面粉改良剂。

葡萄糖氧化酶(GOD)是近年来最受关注的新型面粉品质改良剂之一,属强筋剂类,能氧化葡萄糖生成葡萄糖酸和过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>),后者氧化面筋蛋白中的巯基生成二硫键,可明显增强面团面筋网络结构,从而大大改善面筋的组织结构。此外,固定化葡萄糖氧化酶也被广泛应用。随着微胶囊技术的发展,王霞<sup>[13,14]</sup>研究发现葡萄糖氧化酶经微胶囊固定化后,能够以更合理的反应速度作用于面团,从而相比较于游离酶,会发挥出更为突出的面团粉质以及拉伸特性改善作用,且有助于减缓面团氧化作用。Tang等<sup>[15]</sup>将固定化葡萄糖氧化酶用于增加面包比容,取得了与溴化钾相似的良好效果。

谷氨酰胺转氨酶又称转谷氨酰胺酶,可催化蛋白质分子内或分子间发生交联,蛋白质和氨基酸之间连接,促进面团形成紧密的三维空间网络,从而提高食品弹性和持水能力。Yang等<sup>[16]</sup>利用谷氨酰胺转氨酶的交联作用,与海藻糖结合改善冷冻面团的流变性质和烘焙品质。Huang<sup>[17]</sup>在研究燕麦面团的流变性质和发酵能力时,证明谷氨酰胺转氨酶能够有效交联燕麦面团中的球蛋白和燕麦蛋白,从而提高烘焙制品品质。

### 3.2 改善食品风味

肉制品加热后具有本身的肉鲜味。在肉制品腌制加工过程中,肉制品经过成熟后会产生腊香风味,深受消费者喜爱,特别是经过发酵的肉制品。但是这个过程如是自然进行所需时间比较漫长。通过应用蛋白酶、脂肪酶可以使肉制品产生游离氨基酸、脂肪酸等风味前体物质或中间产物,有利于肉制品风味的加快形成。

王三丽等<sup>[18]</sup>利用4.3%的外源中性蛋白酶和2.7%的中性脂肪酶组合水解腌制猪后腿,经过43℃下作用4h,制备类似金华火腿风味前体物,从而为相关风味调味料的研制提供了技术可行性。党亚丽、田怀香等<sup>[19,20]</sup>的研究发现,在复合酶Protamex和Flavourzyme的联合作用下,金华火腿与巴马火腿中风味前体物质能够被提取出来,从而大大提高水溶性的风味前体物质的得率,且酶处理过程中蛋白水解程度易控制,产品中富含的肽类、氨基酸等营养物质滋味完美。甘春生<sup>[21]</sup>则利用蛋白酶和脂肪酶的联合促成熟作用,研制具有金华火腿风味的火腿片,在蛋白酶添加量为0.8%和脂肪酶添加量0.8%、酶作用时间48h时,该样品28℃发酵40d后可得到风味评分不逊于金华火腿的火腿片。

酶在催化水解水果蔬菜风味物质的产生方面有其独特的效果。一些成熟的水果蔬菜有其相应的水果蔬菜风味,主要是成熟过程中具有挥发性的风味前体物,一般以糖苷键的形式存在,被糖苷酶催化水解而成游离态容易释放。因而在制备水果蔬菜相应的风味剂时,应用相应的糖苷酶处理水果蔬菜浆料,可使风味增强或提高<sup>[22]</sup>。

酶技术还能够有效解决食品加工过程中产生的不良风味,从而提高食品的商业价值。潘利华等<sup>[23]</sup>利用 $\beta$ -葡萄糖苷酶对胡柚汁进行脱苦实验,结果表明 $\beta$ -葡萄糖苷酶能够保证在对维生素C等营养物质损失不明显的情况下达到良好的脱苦效果,且酶的添加量对脱苦效果影响不明显。

### 3.3 改善食品色泽

在食品加工中因酶引起食品色泽变化大多是酶促褐变反应,如水果蔬菜在新鲜贮藏中主要是发生褐变致使降低食品品质,通常通过加热灭酶来达到保鲜效果,这里酶催化发生的反应是加工中需要防止和控制的重要方面。

另一方面通过添加酶制剂可以促进类胡萝卜素的氧

化,改善食品色泽。Yang<sup>[24]</sup>研究发现,葡萄糖氧化酶与木瓜蛋白酶和木聚糖酶复合使用,能够催化面团中类胡萝卜素氧化,从而较好地改善面团褐变现象。这为酶在改善食品色泽方面提供了新的思路。

## 4 酶技术提高食品安全性

### 4.1 生产食品级低聚糖

低聚糖是已被公认为具有保健作用的功能性成分,已形成了相应的产业。低聚糖的生产主要是将相应的大分子碳水化合物糖苷键降解成为聚合度低于10以下的小分子,比较有效的方法可以采用酸水解或氧化降解,这两种方法在生产食品级低聚糖时存在产品中会残留化学品或产物结构受到一定程度破坏,引起食品安全的疑虑。

壳寡糖在低聚糖中是一种具有很高生物活性和优越功能性质、可用于营养保健食品属于食品新资源的代表性低聚糖。过去工业上壳寡糖的制备方法主要是化学法,采用强酸加热水解或氧化降解,虽然生产成本低,但是产物质量差,活性低,更主要是存在安全隐患。

夏文水等<sup>[25]</sup>在国内率先对酶水解壳聚糖作用与特性进行了系列研究,采用麦胚脂肪酶(EC 3.1.1.3)对壳聚糖及其衍生物进行水解,生成低分子量的壳聚糖和壳寡糖。陈小娥等<sup>[26]</sup>用壳聚糖酶降解壳聚糖,得到以聚合度3-7为主的壳寡糖;刘靖等<sup>[27]</sup>从里氏木霉产纤维素酶中分离得到了一种既具有纤维素酶活又具有壳聚糖酶活性的双功能酶,并证实该双功能酶催化纤维素和壳聚糖降解的是同一个活性位点。李冬霞等<sup>[28]</sup>研究了4种不同来源脂肪酶中壳聚糖降解活力最高的脂肪酶降解壳聚糖的特性,结果表明该酶对不同脱乙酰度(DD)壳聚糖均有水解作用。白云鹏等<sup>[29]</sup>对酶法生产壳寡糖工艺中的关键技术难题进行了研究,提出了一种在较高底物浓度下酶法生产壳寡糖的工艺,解决了酶法生产壳寡糖过程中底物浓度低、生产能耗高的难题。

目前研究表明壳聚糖被酶水解的特点是除了壳聚糖酶外,一些非专一性酶如脂肪酶、蛋白酶、纤维素酶和溶菌酶等均可以被用于水解制备壳寡糖;酶解过程中壳聚糖浓度、酶用量、反应时间和pH对酶促反应速率和产物聚合度有影响。近年来酶水解法生产壳寡糖开始进入生产应用;相比较化学方法,该方法条件温和、分子量分布相对容易控制,并且反应无需加入大量的化学试剂,极大地提高了低聚糖产品的安全性<sup>[30]</sup>。

### 4.2 副产物增值利用

水产品如鱼虾贝等加工中通常会产生大量的副产物或下脚料,在小龙虾仁加工中有60%-80%下脚料,而其中蛋白质的质量分数大约为30%~40%<sup>[31,32]</sup>。过去主要是用碱煮与酸浸方法来除去蛋白质再提取甲壳素。碱煮液中水解溶出的蛋白质受到破坏营养价值低,只能作为饲料或肥料;

同时要回收这部分蛋白质比较难且不易完全分离出来, 而造成排放后引起严重的环境污染。

采用酶法取代化学法, 是通过添加蛋白酶来水解虾加工下脚料中的蛋白质, 以达到去除蛋白质、制备甲壳素的目的。姜启兴等<sup>[33]</sup>研究报道, 采用碱性蛋白酶、复合酶等不同的酶, 提高蛋白酶对蛋白质水解效果, 从而使虾壳甲壳素中蛋白质降解完全, 以利于蛋白质的去除, 将蛋白酶水解液浓缩回收, 可得到高含量蛋白质产品。与碱法去除回收蛋白质相比, 酶法水解回收蛋白质得率高, 一般可达 85%左右; 酶法回收得到的蛋白质中富含谷氨酸、天门冬氨酸、甘氨酸、丙氨酸等呈味氨基酸, 必需氨基酸中赖氨酸的含量高, 可作为食品级蛋白质而适合于制作海鲜调味料, 具有浓郁的虾风味, 营养成分丰富。极大地提高了回收蛋白质质量, 增加料利用价值。与化学法相比, 酶法反应条件温和, 对甲壳素的主链结构没有影响与改变; 更主要的是没有碱煮液的排放, 不会对环境造成污染。

### 4.3 降低食品过敏原的致敏性

食品过敏问题严重威胁着人们的身体健康。据不完全统计, 大约有 5%~8%的小于三岁的儿童, 以及 1%~2%的成年人对食物过敏<sup>[34]</sup>。目前, 在实际的食品生产加工中, 主要采用物理化学法和酶解法去除食品过敏原; 但物理化学法对降低某些蛋白制品(像花生)的变应原性效果不理想, 且会引起原料营养成分的损失, 感官质量下降, 加工特性降低, 而酶解法以其高效、反应温和、可控等优点广泛地应用于过敏蛋白的修饰中。

鸡蛋是人类生活中重要的蛋白来源, 但同时被认定为八大类主要过敏食品之一。研究发现, 蛋白酶可以有效降低鸡蛋过敏原的致敏性。毕井辉等<sup>[35]</sup>考察了四种蛋白酶对鸡蛋中主要过敏原卵白蛋白的抗原性降低效果, SDS-PAGE 和间接竞争 ELISA 检测结果表明, 木瓜蛋白酶和中性蛋白酶能够有效降低卵白蛋白抗原性, 分别达到了 57.8%和 49.6%。聂君<sup>[36]</sup>研究了不同酶处理鸡蛋蛋清的致敏性影响, 发现产品的抗原性与产品中二硫键含量呈负相关, 当向复原蛋清液中加入酶活为 122 U/mL 的葡萄糖氧化酶, 控制 pH 为 5.5、温度为 55 °C 时, 蛋清致敏性可降低 25.92%。

蛋白酶水解还可去除虾蟹等水产中原肌球蛋白等过敏原, 董晓颖等<sup>[37]</sup>用风味蛋白酶、胃蛋白酶、碱性蛋白酶、木瓜蛋白酶、中性蛋白酶等 5 种酶对虾过敏蛋白进行处理, 发现风味蛋白酶和中性蛋白酶对虾过敏蛋白的降敏效果最好, 致敏性几乎完全消失。另外, 蛋白酶水解还应用在大豆、花生、大米、小麦等食品脱敏中。

## 5 酶技术增强食品质量控制

目前, 食品检测中常用到的酶技术是酶联免疫吸附分析法。酶联免疫吸附分析法(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)是在免疫酶技术的基础上发展起来的一种新

型免疫测定技术。它是一种最常用的固相酶免疫测定方法, 即可检测抗原, 也可检测抗体, 可进行定性和定量测定; 与传统的仪器检测和以化学试剂为基础的分析检测相比, 它具有特异性强、灵敏度高、操作简单、携带方便和成本低等优点。现在, ELISA 结合大量的修饰格式(或其它检测方法)被广泛地应用于检测食品中微生物的和非微生物的分析物, 非微生物主要包括食品中的过敏原、毒素和残留药物等。

### 5.1 食品中过敏原的检测

ELISA 可以检测食品中的过敏原。Faeste<sup>[38]</sup>采用兔的抗鳕鱼小清蛋白的抗体的多克隆产物成功地检测出多种鱼类过敏原; Peng 等<sup>[39]</sup>建立了食品中最常见的过敏原卵白蛋白(OVA)的单克隆抗体 ELISA 检测方法, 其最低检出限为 0.51 ng/mL, 线性动态范围为 1.95~500 ng/mL, 回收率 85.6~115.2%。Peng 等<sup>[40]</sup>还建立了食品中花生过敏原 Ara h 1 的 ELISA 检测方法, 该方法与 Ara h 2 无交叉反应。

### 5.2 食品中微生物的检测

ELISA 可用于检测食品中沙门菌、军团菌、大肠杆菌、李斯特菌及金黄色葡萄球菌等致病微生物<sup>[41]</sup>。Feng 等<sup>[42]</sup>利用单克隆抗体建立了检测大肠杆菌 O157:H7 的夹心 ELISA 方法, 当大肠杆菌 O157:H7 的浓度在  $10^5$ ~ $10^8$  cfu/mL 时表现良好的线性关系, 其检测敏感性为  $1 \times 10^4$  cfu/mL; 曹玮等<sup>[43]</sup>根据 PCR 目的片段序列设计特异性捕获探针建立了单增李斯特菌 PCR-ELISA 快速检测技术, 检测敏感性为传统 PCR 方法的 10~100 倍。

另外, ELISA 还可检测一些疾病病原体, 如海绵状病毒(BSE), ELISA 可以区分牛脑匀浆物中 BSE 特异性朊蛋白, 从而检测出无明显临床症状的 BSE 感染动物。我国也建立了禽流感免疫酶诊断方法和技术, 已形成试剂盒生产能力。

### 5.3 食品中毒素的检测

食品中的常见毒素一般包括真菌毒素、河豚毒素、贝类毒素、藻类毒素、胃肠毒素、血液毒素和神经毒素等。真菌毒素种类繁多, 其中十几种对人类危害最大(如黄曲霉毒素、伏马毒素、赭曲毒素、玉米赤霉烯酮、脱氧雪腐镰刀菌烯酮、展青霉素等), 它们常常和其他微生物在一起, 出现在各种食品中。针对以上真菌毒素的 ELISA 检测方法均已建立。Kuang 等<sup>[44]</sup>建立了葡萄球菌肠毒素 A 的夹心 ELISA 检测方法, 最低检出限为 0.0282 ng/mL, 线性范围为 0.06~2 ng/mL; 郭云昌等<sup>[45]</sup>建立了伏马毒素 B<sub>1</sub> 的直接竞争 ELISA 测定方法, 用于检测粮食和饲料中的伏马毒素 B<sub>1</sub>, 最低检出限为 10 ng/mL, 线性范围在 0.01~5 μg/mL。

### 5.4 食品中药物残留的检测

残留农药与残留兽药是食品中残留药物的两大来源。残留农药主要为除草剂、杀虫剂和杀菌剂。Chen 等<sup>[46]</sup>建立

了检测杀虫剂甲氰菊酯的 ELISA 分析方法, 其检出限为  $62 \pm 6$  mg/L, 回收率超过 80%。Katsoudas 等<sup>[47]</sup>建立了检测食品中氨基甲酸酯类杀虫剂的 ELISA 分析方法, 该方法检测水果中胺甲萘及虫螨威的检出限分别为 2.0 和 8.0 ng/g。

目前几乎所有兽药均已建立了 ELISA 检测方法, 如: 喹诺酮类、大环内酯类、磺胺类、磺胺增效剂、林可胺类、硝基咪唑类、喹噁啉类和多肽类。Cooper 等<sup>[48]</sup>用 ELISA 法测定了猪肾中 5 种镇静剂氮哌醇、氮哌酮、乙酰丙嗪、氯丙嗪、丙酰二甲氨基丙吩噻嗪和  $\beta$  阻断剂卡拉洛尔含量。Jeon 等<sup>[49]</sup>用生物素-亲和素 ELISA 法测定了牛奶中的四环素类药物残留。Cliquet 等<sup>[50]</sup>利用 ELISA 检测了猪组织中的磺胺氯吡嗪残留。

### 5.5 食品其他成分的检测

食品中三聚氰胺的检测, Sun 等<sup>[51]</sup>利用 2-氯-4,6-二氨基-1,3,5-三嗪建立了奶粉中三聚氰胺的 ELISA 快速检测方法, 其最低检出限为 50 ng/g; 食品添加剂的检测, Wang 等<sup>[52]</sup>建立了乳及乳制品中添加剂  $\beta$ -内酰胺酶残留的 ELISA 快速检测方法。另外, 饮用水中的重金属离子也可运用 ELISA 检测, Xing 等<sup>[53]</sup>建立饮用水中的 2 价铜离子的 CI-ELISA 检测方法, 其最低检出限为 0.24 ng/mL, 检出范围为 0.67-29 ng/mL, 回收率 94.4-117.2%。

显而易见, ELISA 将会成为食品检测的重要手段。基因工程和蛋白质工程的发展, 为生物酶标分析技术提供了新的技术思路和模式, 弥补了 ELISA 自身的局限性, 如对试剂的选择性高、无法设计没有结构特征物质相应的半抗原、对结构类似的化合物有一定程度的交叉反应等, 使其技术手段更加成熟。

## 6 展望

综上所述, 酶技术在食品加工和食品检测领域得到了广泛地应用, 为食品工业的发展做出了突出的贡献。酶技术的日趋成熟促进了食品新产品的开发, 降低生产成本, 提高产品质量, 保障了食品安全, 为食品工业带来了巨大的社会经济效益。

随着生物技术的日益发展, 酶的潜力将进一步得到开发。新的酶源、新的酶种类和功能不断开发, 将满足新的工艺与加工要求。随着人们对于食品安全品质的日益注重, 安全高效的酶制剂越来越受到食品生产者的青睐。不久的将来, 酶技术将会更多更广泛地进入食品领域, 为经济发展和社会造福的发挥更大的作用。

### 参考文献

- [1] 邬敏辰, 王瑾, 刘月等. 果胶酶生产及其在苹果汁澄清中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2006, 12:134-137.  
Wu MC, Wang J, Liu Y, et al. Production of pectinases and its application in clarification of apple juice [J]. Food Ferment Ind, 2006,12:134-137.
- [2] 王卫东, 许时婴. 黑莓澄清汁的酶解工艺[J]. 食品与发酵工业, 2006, 10: 156-159.  
Wang WD, Xu SY. Study on enzymatic maceration processing of blackberry jice [J]. Food Ferment Ind, 2006, 10: 156-159.
- [3] Mehraj Pasha K, Anuradha P, Subbarao D.Applications of pectinases in industrial sector [J]. Int J Pure Appl Sci Technol, 2013, 16: 89-95.
- [4] 刘莹, 王璋, 许时婴. 酶法制取芒果混汁的工艺[J]. 食品工业科技, 2007, 10: 167-170+93.  
Liu Y, Wang Z, Xu SY. Process of enzymatic preparation of Mango mixed juice [J]. SciTechnol Food Ind, 2007, 10: 167-170+93.
- [5] 刘莹, 王璋, 许时婴. 复合酶制剂在混浊苹果汁加工中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2007, 9: 164-168.  
Liu Y, Wang Z, Xu SY. Application of enzymes in production of cloudy apple juice [J]. Food Ferment Ind, 2007, 9: 164-168.
- [6] Sagu, ST, Nso, EJ, Karmakar, S, et al. Optimisation of low temperature extraction of banana juice using commercial pectinase [J]. Food Chem, 2014, 151: 182-190.
- [7] Zou XQ, Huang JH, Jin QZ, et al. Lipase-catalyzed synthesis of human milk fat substitutes from palm stearin in a continuous packed bed reactor [J]. J Am Oil Chem Soc, 2012, 89: 1463-1472.
- [8] Huang JH, Song ZH, Liu YF, et al. Enzymatic synthesis of monoacylglycerol citrate optimized by response surface methodology [J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2011, 113: 609-615.
- [9] Wang XS, Li M, Wang T, et al. An improved method for the synthesis of 2-arachidonoylglycerol [J]. Process Biochem, 2014, 49(9): 1415-1421.
- [10] Wang XS, Jin QZ, Wang T, et al. An improved method for the synthesis of 1-monoolein [J]. J Mol Catal B-Enzym, 2013, 97: 130-136.
- [11] Wang XS, Wang T, Wang XG. An improved method for synthesis of N-stearoyl and N-palmitoyl ethanolamine [J]. J Am Oil Chem Soc, 2012, 89:1305-1313.
- [12] Wang XS, Wang XG, Wang T. Synthesis of oleoyl ethanolamide using lipase [J]. J Agric Food Chem, 2012, 60: 451-457.
- [13] 王霞, 朱科学, 钱海峰, 等. 微胶囊化葡萄糖氧化酶对面粉烘焙品质的改良研究[J]. 食品与发酵工业, 2008, 5: 66-70.  
Wang X, Zhu KX, Qian HF, et al. Improvement of immobilized glucose oxidase on quality of wheat flour's baking [J]. Food Ferment Ind, 2008, 5: 66-70.
- [14] 王霞, 张天亮, 周惠明. 微胶囊化葡萄糖氧化酶对面团氧化作用研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 7: 17-21+41.  
Wang X, Zhang TL, Zhou HM. Research on the effects of microencapsulated glucose oxidase on the oxidation of Dough [J]. J Chin Cereal Oil Assoc. 2012, 7: 17-21+41.
- [15] Tang LL, Yang RJ, Hua X, et al. Preparation of immobilized glucose oxidase and its application in improving breadmaking quality of commercial wheat flour [J]. Food Chem, 2014, 161: 1-7.
- [16] Kim YS, Huang WN, Du GC, et al. Effects of trehalose, transglutaminase, and gum on rheological, fermentation, and baking properties of frozen dough [J]. Food Res Int, 2008, 41: 903-908.
- [17] Huang WN, Li LL, Wang F, et al. Effects of transglutaminase on the rheological and Mixolab thermomechanical characteristics of oat Dough [J]. Food Chem, 2010, 121: 934-939.

- [18] 王三丽, 邹延军, 张国农. 外源酶调控生产金华火腿风味调味料的研究[J]. 食品科技, 2007, 10: 164-169.  
Wang SL, Huan YJ, Zhang GN. Research on producing Jinhua Ham flavor base by modulating the exogenous enzyme activity [J]. Food Sci Technol, 2007, 10: 164-169.
- [19] 党亚丽, 谭艳, 王璋. 酶法提取巴马火腿中的风味前体物质[J]. 食品工业科技, 2008, 5: 125-127, 130.  
Dang YL, Tan Y, Wang Z. Enzymatic extraction of flavor precursor from Parma ham [J]. Sci Technol Food Ind, 2008, 5: 125-127, 130.
- [20] 田怀香, 王璋, 许时婴. 酶法提取金华火腿中的风味前体物质[J]. 食品与机械, 2005, 2: 1-5.  
Tian HY, Wang Z, Xu SY. Enzymatic extraction of flavor precursor from jinhua ham [J]. Food Mach, 2005, 2: 1-5.
- [21] 甘春生, 邹延军, 邵利君, 等. 外源酶调控火腿片成熟技术研究[J]. 食品与发酵工业, 2010, 9: 155-160.  
Gan CS, Huan YJ, Shao LJ, *et al.* Research on producing sliced ham by modulating the exogenous enzyme activity [J]. Food Ferment Ind, 2010, 9: 155-160.
- [22] 刘苏苏, 吕长鑫, 李萌萌, 等. 酶制剂在果蔬汁澄清及加工中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 10: 3276-3283.  
Liu SS, Lv CX, Li MM, *et al.* Application progress of enzyme preparation in fruit and vegetable juice clarification and processing [J]. J Food Saf Qual, 2014, 10: 3276-3283.
- [23] 潘利华, 罗水忠, 杨阳, 等.  $\beta$ -葡萄糖苷酶对胡柚汁脱苦效果的研究[J]. 食品科学, 2008, 28(12): 125-128.  
Pan LH, Luo SZ, Yang Y, *et al.*  $\beta$ -glycosidase enzymes to Hu You juice debittering effect research [J]. Food Sci, 2008, 28(12): 125-128.
- [24] Yang TY, Bai YX, Wu FF, *et al.* Combined effects of glucose oxidase, papain and xylanase on browning inhibition and characteristics of fresh whole wheat dough [J]. J Cereal Sci, 2014, 60: 249-254.
- [25] 夏文水, Riccardo A, A. Muzzarelli. 脂肪酶解聚壳聚糖及其衍生物的研究[J]. 无锡轻工大学学报, 1996, 15(1): 1-5.  
Xia WS, Riccardo AM. Depolymerization of Chitosan and the derivatives by Lipase [J]. J Wuxi Univ Light Ind, 1996, 15(1): 1-5.
- [26] 陈小娥, 方旭波, 夏文水. 壳寡糖的酶法制备[J]. 功能高分子学报, 2007, 19-20: 204-208.  
Chen XE, Fang XB, Xia WS. Preparation of Chitooligosaccharides by Enzyme Hydrolysis [J]. J Funct Polym, 2007, 19-20: 204-208.
- [27] 刘靖, 夏文水. 纤维素酶水解壳聚糖的特性研究[J]. 食品工业科技, 2005, 26(12): 157-160.  
Liu J, Xia WS. Characterization of Chitosan hydrolysis catalysed by Cellulase [J]. Sci Technol Food Ind, 2005, 26(12): 157-160.
- [28] 李冬霞, 夏文水. 脂肪酶非专一性降解壳聚糖特性研究[J]. 食品科技, 2010, 11: 28-31.  
Li DX, Xia WS. Characterization of non-specific depolymerization of chitosan catalysed by lipases [J]. Food Sci Technol, 2010, 11: 28-31.
- [29] 白云鹏. 酶法生产壳寡糖及其质量控制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011.  
Bai YP. Preparation of chitooligosaccharides by enzymatic hydrolysis of chitosan and its quality control [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- [30] 马镛, 吴元华, 赵秀香. 壳寡糖的制备、分离分析方法及在农业上的应用[J]. 现代农药, 2007, 6(2): 1-5.  
Ma D, Wu YH, Zhao XX. Preparation and Purification and Analysis of Chito-oligosaccharide and Its Application in Agriculture [J]. Mod Agrochem, 2007, 6(2): 1-5.
- [31] Hong KN, Samuel PM. Preparation and characterization of chitin and chitosan-A review [J]. J Aquatic Food Prod T, 1995, 4(2): 28-29.
- [32] 陈宇, 马小军, 谢红国, 等. 去除甲壳素/壳聚糖中蛋白质的研究进展[J]. 现代化工, 2010, 30(2): 59-62.  
Chen Y, Ma XJ, Xie HG, *et al.* Progress in removal protein from chitin/chitosan [J]. Mod Chem Ind, 2010, 30(2): 59-62.
- [33] 姜启兴, 夏文水. 影响酶法回收螯虾加工下脚料中虾青素及蛋白质的因素研究[J]. 食品工业科技, 2004, 25(7): 54-56, 59.  
Jiang QX, Xia WS. Study on the influence factors of astaxanthin and protein from crawfish offal by enzyme recycling [J]. Sci Technol Food Ind, 2004, 25(7): 54-56, 59.
- [34] Gallo M, R Sayre. Removing allergens and reducing toxins from food crops [J]. Curr Opin Biotech, 2009, 20: 191-196.
- [35] 毕井辉, 汪何雅, 钱和, 等. 不同酶处理对鸡蛋清中卵白蛋白致敏性的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 19: 72-75.  
Bi JH, Wang HY, Qian H, *et al.* Effect of enzymatic proteolysis by different enzyme on the antigenicity of ovalbumin in egg white [J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 19: 72-75.
- [36] 聂君. 蛋清致敏因素的研究及低致敏蛋清制品的开发[D]. 无锡: 江南大学, 2011.  
Nie J. Studies on the factors that attribute to the allergenicity of egg white and development of egg white product with low allergenicity [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- [37] 董晓颖, 高美须, 潘家荣. 不同处理方法对虾过敏蛋白分子量及抗原性的影响[J]. 核农学报, 2010, 24(3): 548-554.  
Dong XY, Gao MX, Pan JR. Effects of different treatments on molecular weight and antigenicity of shrimp allergenic protein [J]. J Nucl Agric Sci, 2010, 24(3): 548-554.
- [38] Faeste, CK, Plassen, C. Quantitative sandwich ELISA for the determination of fish in foods [J]. J Immunol Meth, 2008, 329(1/2): 45-55.
- [39] Peng J, Meng X, Deng XF, *et al.* Development of a monoclonal antibody-based sandwich ELISA for the detection of ovalbumin in foods [J]. Food Agric Immunol, 2014, 25(1): 1-8.
- [40] Peng J, Song SS, Xu LG, *et al.* Development of a monoclonal antibody-based sandwich ELISA for peanut allergen Ara h 1 in food [J]. Int J Env Res Pub Heal, 2013, 10(7): 2897-2905.
- [41] 孔涛, 郝雪琴, 赵振升, 等. ELISA 在饲料及食品安全检测中的应用[J]. 饲料研究, 2012, 7: 73-75.  
Kong T, Hao XQ, Chao ZS, *et al.* Application of ELISA in the feed and food safety testing [J]. Feed Res, 2012, 7: 73-75.
- [42] Feng M, Yong QQ, Wang, WB, *et al.* Development of a monoclonal antibody-based ELISA to detect Escherichia coli O157:H7 [J]. Food Agric Immunol, 2013, 24(4): 481-487.
- [43] 曹玮, 王宁, 王晓英, 等. 单增李斯特菌 PCR-ELISA 快速检测技术研究[J]. 卫生研究, 2009, 38(6): 662-667.  
Cao W, Wang N, Wang XY, *et al.* Study on rapid detection techniques of PCR-ELISA for *Listeria monocytogenes* [J]. J Hyg Res, 2009, 38(6): 662-667.
- [44] Kuang H, Wang WB, Xu LG, *et al.* Monoclonal antibody-based sandwich elisa for the detection of staphylococcal enterotoxin A [J]. Int J Env Res

- Pub Heal, 2013, 10(4): 1598–1608.
- [45] 郭云昌, 刘秀梅, 刘江. 伏马菌素 B<sub>1</sub> 免疫检测方法的研究[J]. 卫生研究, 1999, 29(4): 47–49.
- Guo YC, Liu XM, Liu J. Studies on immunoassay for detecting fumonisin B<sub>1</sub> [J]. J Hyg Res, 1999, 29(4): 47–49.
- [46] Chen XJ, Liu LQ, Kuang H, *et al.* A strip-based immunoassay for rapid determination of fenpropathrin [J]. Anal Methods-UK, 2013, 5(21): 6234–6239.
- [47] Katsoudas E, Abdelmeseeh HH. Enzyme inhibition and enzyme-linked immunosorbent assay methods for carbamate pesticide residue analysis in fresh produce [J]. J Food Protect, 2000, 63(12): 1758–1760.
- [48] Cooper J, Delahaut P, Fodey TL, *et al.* Development of a rapid screening test for veterinary sedatives and the beta-blocker cara-zolol in porcine kidney by ELISA [J]. Analyst, 2004, 129: 169–174.
- [49] Jeon M, Kim J, Paeng KJ, *et al.* Biotin–avidin mediated competitive enzyme-linked immunosorbent assay to detect residues of tetracyclines in milk [J]. Microcem J, 2008, 88: 26–31.
- [50] Cliquet P, Cox E, Haasnoot W, *et al.* Extraction procedure for sulfachloropyridazine in porcine tissues and detection in a sul-fonamide-specific enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) [J]. Anal Chem Acta, 2003, 494: 21–28.
- [51] Sun FX, Liu LQ, Kuang H, *et al.* Development of ELISA for melamine detection in milk powder [J]. Food Agric Immunol, 2013, 24(1): 79–86.
- [52] Wang WB, Liu LQ, Xu LG, *et al.* Detection of beta-Lactamase Residues in Milk by Sandwich ELISA [J]. Int J Env Res Pub Heal, 2013, 10(7): 2688–2698.
- [53] Xing CR, HAO CL, Liu LQ, *et al.* A highly sensitive enzyme-linked immunosorbent assay for copper(II) determination in drinking water [J]. Food Agric Immunol, 2014, 25(3): 432–442.

(责任编辑: 白洪健)

### 作者简介



夏文水, 教授, 主要研究方向为食品加工技术。

E-mail: xiaws@jiangnan.edu.cn