

# 食物在烹饪过程中有害物质形成与 减控技术研究进展

林瑞榕<sup>1,2</sup>, 陈佳琪<sup>1,2</sup>, 刘思迪<sup>1,2</sup>, 郭泽镔<sup>1,2\*</sup>

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福州 350002;  
2. 福建农林大学中爱国际合作食品物质学与结构设计研究中心, 福州 350002)

**摘要:** 各式各样的烹饪方式在赋予食物不同风味的同时, 也会在烹调过程中产生一些有害化合物, 如丙烯酰胺、多环芳烃、醛、苯等, 这些有害化合物会损害人体健康。本文系统介绍了食物不同烹饪方式(水基烹饪、油基烹饪、熏烤腌制和其他烹饪方式)的优缺点, 综述了食物在不同烹饪过程中有害物质的形成与减控技术, 以期食物在烹饪过程中有害物质的控制以及产品品质的提升提供理论依据。

**关键词:** 烹饪; 有害物质形成; 减控技术

## Research progress on the formation and reduction and control of harmful substances in food during cooking

LIN Rui-Rong<sup>1,2</sup>, CHEN Jia-Qi<sup>1,2</sup>, LIU Si-Di<sup>1,2</sup>, GUO Ze-Bin<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. China-Ireland International Cooperation Centre for Food Material Science and Structure Design, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**ABSTRACT:** Various cooking methods not only give food different flavors, but also produce some harmful compounds during the cooking process, which can harm human health, such as acrylamide, polycyclic aromatic hydrocarbons, aldehyde, benzene and so on. These harmful compounds are seriously harmful to human body. This paper systematically introduced the advantages and disadvantages of different cooking methods of food (water-based cooking, oil-based cooking, fumigation, curing and other cooking methods) and summarized the formation and control technology of harmful substances in different cooking processes, in order to provide a theoretical basis for the control of harmful substances and the improvement of product quality.

**KEY WORDS:** cooking; formation of harmful substances; reduction and control technology

## 0 引言

随着人们生活水平不断提高, 人们对一道菜肴的评价不只停留在其种类多样性, 更注重其风味多样性以及营养

与健康。各式各样的烹饪方法都有其独有的烹饪工艺, 然而, 食物在不同烹饪过程中可能产生各种有害物质, 如丙烯酰胺、多环芳烃等, 长期食用含有有害物质的食品会对人体健康造成损害。因此, 了解有害化合物的形成及其减控技术成为

基金项目: 福建省区域发展项目(2019N3002)、福建省公益类科研院所专项(2019R1017-4)

**Fund:** Supported by the Regional Development Project of Fujian Province (2019N3002), and the Special Project for Public Welfare Research Institutes of Fujian Province (2019R1017-4)

\*通信作者: 郭泽镔, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品加工技术、食品营养与化学。E-mail: gzb8607@163.com

\*Corresponding author: GUO Ze-Bin, Ph.D, Associate Professor, College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China. E-mail: gzb8607@163.com

食品科学领域的研究热点。本文综述了食物在不同烹饪(水基烹饪、油基烹饪、熏烤腌制和其他烹饪方式)过程中有害物质的形成机制以及减控途径, 以期对食物在烹饪过程中有害物质的控制以及产品品质的提升提供理论依据。

## 1 食物不同烹饪方式研究现状

从古至今, 食物的烹饪方式一直发生着变化。远古时代人们通过燃烧木材作为热源熟制食物, 这种方法会造成大量污染油烟。随着电器的发明, 人们的烹饪方式从用火燃烧木材演变为利用电器熟制食物。电器的发明实现了煎、炒、炸等油基烹饪方式, 丰富了食品风味。

### 1.1 水基烹饪

水基烹饪是以水分或蒸汽为介质, 通过表面热传导将热量从食物表面传递到食物内部的一种食品加工技术<sup>[1]</sup>。以蒸、煮、煲、炖等为主的水基烹饪避免了高温下食品中营养成分分解, 保留了食物营养素并赋予更优的风味。在中国传统菜系中苏菜是这种烹饪方式中最具代表性的菜系, 其菜品追求食物的原汁原味, 菜肴味道清淡鲜美, 因此被誉为“东南第一佳味”。苏菜的烹饪手法以水基烹调为主, 低温蒸煮, 有利于保留原料的营养成分, 同时降低由于高温产生的有害物质含量。随着对健康饮食的追求, 人们对“煲汤”给予了很高的肯定。“无汤不成席”, 洛阳水席正是以菜带汤而闻名远扬。在水席上, 其菜肴有汤有水, 更新菜品如行云流水, 展示了洛阳独特的汤文化。煲汤中的“煲”, 即将食物长时间熬煮, 使原料的营养物质溶解在汤中, 易于消化吸收<sup>[2]</sup>, 如药食同膳、燕窝雪蛤等。长时间的熬制, 不仅保留了原料的美味, 而且提高了营养价值。有研究表明, 蒸(110±10)℃、煮(96±3)℃的烹饪方式有利于保留胡萝卜中的类胡萝卜素<sup>[3]</sup>。樊田利等<sup>[4]</sup>研究发现, 蒸制功率(1000 W 以上)越高, 西兰花营养品质越高。炖制也为水基烹饪方式之一, 以东坡肉为例, 其又称红烧肉, 通过将五花肉小火炖制而成, 是江南地区的特色菜品之一。其薄皮嫩肉, 味醇汁浓, 流传于全国各地。研究表明, 选择合理的锅具炖制食材, 其中炖制时间对食材品质、风味影响较大<sup>[5]</sup>。

### 1.2 油基烹饪

油基烹饪是指以食用油为介质, 通过高温煎、炸、炒等方式烹制原料。根据烹饪中食用油的用量, 油基烹饪可以分为煎制、浅炸和油炸。煎炸指用少量的油来润滑油锅, 浅炸是指用少量预热过的油来煎炸食物。与前 2 种方式相比, 油炸使用的食用油量更多。油炸时需将食物浸在足够油量的油锅中<sup>[6]</sup>。油炸食品具有含油量高、多脂肪等特点。油炸过程导致原料中的淀粉糊化、蛋白质变性, 从而将水分蒸发, 使其获得酥脆口感<sup>[7]</sup>。有研究发现高温油炸还会降低淀粉类食品的消化率, 影响油炸食品品质<sup>[8]</sup>。油脂在高温烹调的过程中会出现油脂氧化、热分解等劣变, 不

仅影响食物品质还会生成多种有害化合物, 长期食用会对人体健康造成危害, 如增加癌症发病率、导致营养不良以及肥胖等。随着食用油循环使用频率增加, 锅底食物残渣经过反复高温煎炸会产生油脂聚合物, 影响人体健康<sup>[7]</sup>。煎、炒也是传统油基烹饪的主要方法。赵文硕等<sup>[9]</sup>通过对比煎(170℃)、炒(170℃)土豆中 $\alpha$ -亚麻酸含量得出对于亚麻籽油来说, 炒比煎更加剧烈, 因此 $\alpha$ -亚麻酸在炒土豆中含量更低。NUGRAHEDI 等<sup>[10]</sup>认为翻炒是一个相对健康的烹饪方法, 因为在翻炒过程中可以防止蔬菜中硫代葡萄糖苷的损失。

### 1.3 熏烤与腌制

熏制是以具有特殊气味的熏材引火, 使其发烟来调制食料。常见的烟熏方法有: 冷熏( $\leq 20$ ℃)、热熏(35~50℃)和液熏<sup>[11]</sup>。熏制食品会产生许多种挥发性化合物, 其中烃类化合物如苯并芘等, 是一种难以被降解的化合物, 并对人体有致癌作用。GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中有明确规定, 熏、烧、烤肉类和熏、烤水产品中苯并(a)芘的含量不得大于 5  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

烤制, 以干燥空气为介质对食物进行烘烤。该过程中食物表面水分蒸发但内部水分被保留, 使食物表面香脆, 内部多汁美味。袁亚明等<sup>[12]</sup>比较了烤制和蒸制对明虾营养成分与风味的影响, 发现相比于蒸制明虾, 焙烤明虾中 $\alpha$ -螺旋含量降低程度更大, 因此焙烤明虾营养成分损失较多。张舒等<sup>[13]</sup>研究了不同烘焙条件下对绿豆结构、功能的影响, 结果表明高温烘烤会影响绿豆蛋白质结构, 但提高了其功能特性。

腌制是一种通过加入高含量食盐、微生物发酵等过程抑制食物腐败的食品贮藏技术<sup>[14]</sup>。食品在盐或酒等腌渍中通过微生物作用将盐还原为亚硝酸钠, 过量的亚硝酸钠会对人体造成严重危害。腌制技术分为干制和湿制, 干制有腊肉、火腿等; 湿制主要有泡菜、果蔬糖制品等。董士楷等<sup>[14]</sup>研究得出超高压腌制可以有效解决传统腌制工艺耗时久、易滋生细菌等缺点。王正莉等<sup>[15]</sup>对腊肉、火腿、板鸭、腊鱼等腌制品进行微生物多样性研究得出, 腌制品中存在既能改善食品风味的微生物, 也存在能降低食品品质的微生物。

### 1.4 其他烹饪技术

真空油炸技术是现代烹饪技术的重要组成部分之一, 其技术核心为在真空或低氧条件下低温油炸食品, 将食品中水分以低于 100℃的温度蒸发进而熟化熟食品<sup>[16]</sup>。与传统常压油炸方法相比, 真空油炸技术能减少由高温油炸引起的营养素损失和有害物质生成<sup>[17-18]</sup>, 够抑制微生物生长, 实现生产标准化<sup>[19]</sup>。王文成等<sup>[20]</sup>对比了真空油炸技术与常压油炸技术对山药脆片的品质影响。研究结果表明, 真空油炸技术下的山药脆片含油量与色泽低于常压油炸技术下山药脆片的含油量。FANG 等<sup>[21]</sup>研究空气煎炸、真空煎炸、

静电煎炸和传统深脂煎炸等不同煎炸方式对油炸鱼皮的吸油率、失水率、破断力、色泽和微观结构特性的影响。得出结论:真空油炸与空气煎炸能够降低食品含油量。

微波加热技术是一种依靠物体吸收微波能将其转换成热能,使自身整体同时升温的介电加热方式<sup>[22]</sup>。通过微波加热,食物能在短时间内均匀受热,微波加热是一种绿色高效的热加工方法<sup>[23]</sup>。付婷婷等<sup>[22]</sup>研究表明,微波加工过程会对食品的营养成分、活性成分、品质等造成不同程度的影响。MARTINS 等<sup>[24]</sup>用微波加热代替传统的巴氏杀菌法处理橙汁-牛奶饮料。结果表明,与巴氏杀菌后的饮料相比,微波加热后的饮料褐变程度较低,抗坏血酸、总酚和类胡萝卜素含量较高,抗氧化活性较高。另有研究表明,使用微波烹饪技术加热牡蛎,能最大限度地保留牡蛎原有的贝类香味和鲜味,并且由于尽可能地减少了传统蒸煮过程中的汁液流失

而保留了牡蛎的营养物质,同时保证了较好的口感<sup>[25]</sup>。

不同烹饪方式因其原理不同所制得的食物形式、风味等相关特征也不同,表 1 总结了以上 7 种烹饪方式的原理及优缺点。了解各种烹饪方式的原理及优缺点,可以为解决食物在烹饪过程中的营养损失、有害物质产生等不良情况奠定基础。

## 2 食物在不同烹饪过程中有害化合物的形成

食物在不同烹饪过程中产生各种各样的有害化合物,如挥发性有机化合物(油烟)、丙烯酰胺、多环芳烃、反式脂肪酸等。为了更清晰地了解其特征,可以从其形成途径、危害,并通过对比不同烹饪条件下有害化合物含量等方面着手。如表 2 所示,这些有害化合物对人体有不同程度的危害,如神经毒性、发育毒性、致癌等。

表 1 不同烹饪方式原理与优缺点  
Table 1 Principles and advantages and disadvantages of different cooking methods

烹饪方式	原理	优点	缺点
水基烹饪(蒸、煮、煲、炖等)	以水分或蒸汽为介质,通过表面热传导将热量从食物表面传递到食物内部	保留食物原有的营养价值并赋予更佳的风味	降低水溶性维生素含量 <sup>[26]</sup>
油基烹饪(炸、煎、炒)	以食用油为介质,通过高温煎、炸、炒等方式烹制原料	赋予食品酥脆口感、迷人香味、金黄色泽	含油量高;增加疾病风险
熏	以具有特殊气味的熏材引火,使其发烟来调制食料	抑制食物腐败、赋予食品独特风味 <sup>[11]</sup>	危害健康;污染环境 <sup>[11]</sup>
烤	以干燥空气为介质对食物进行烘烤	使食物表面香脆,内部多汁美味	降低营养成分 <sup>[12]</sup>
腌	通过加入高含量食盐、微生物发酵等过程抑制食物腐败	赋予食物良好的色泽、诱人的气味以及独特的风味	腌制耗时久,容易滋生细菌 <sup>[14]</sup>
真空油炸技术	在真空或低氧条件下低温油炸食品,将食品中水分以低于 100 °C 的温度蒸发进而熟化熟食品	降低营养素损失、减少有害物质生成 <sup>[17-18]</sup> 、降低含油量 <sup>[20-21]</sup>	成本高
微波加热技术	依靠物体吸收微波能将其转换成热能,使自身整体同时升温	加热速度快,均匀受热,效率高 <sup>[1]</sup>	降低食品营养价值 <sup>[27]</sup>

表 2 有害化合物的毒理学研究  
Table 2 Toxicological studies of harmful compounds

有害化合物	研究对象	危害	参考文献
挥发性有机化合物(油烟)	小鼠、甲醛工作岗位的人	呼吸系统炎症	[28]
		癌症	
丙烯酰胺	小鼠原代神经胶质细胞	遗传毒性、致突变	[29]
	大鼠海马组织	通过氧化应激反应导致神经毒性	
	糖尿病小鼠和肥胖小鼠	抑制了新生大鼠海马的发育,导致发育毒性	
多环芳烃	虾夷扇贝幼体	干扰糖脂代谢,导致机体肥胖和肝脏损伤	[30]
	大鼠	降低受精率、致死性	[31]
反式脂肪酸	大鼠	记忆力下降、神经损伤	[32]
	大鼠母胎、胎仔	孕期血脂水平提高,胎仔非正常发育	[33]
	3T3-L1 鼠前脂肪细胞	损害胰岛素依赖性葡萄糖摄取	[34]
亚硝酸盐	单环刺螠幼体	血液载氧能力和基础代谢	[35]
	大鼠	急性肝损伤	[36]
	小鼠大脑皮质	神经细胞损伤	[37]

## 2.1 挥发性有机化合物(油烟)

食物原料与食用油在高温烹饪过程中生成污染物, 包括气态污染物和固态污染物<sup>[39]</sup>。烹饪排放物通过 3 种主要途径在高温下与食用油或食物发生强烈的化学反应而产生<sup>[39]</sup>: (1)脂质的热氧化和分解; (2)某些化学物质的美拉德反应; (3)中间体或最终产物的二次反应。挥发性有机化合物主要来自加热的油和脂肪酸。烹饪油烟中挥发性有机化合物的化学成分主要包括烃类、醛酮、醇类及其他杂环化合物<sup>[40]</sup>。其中甲醛、苯、多环芳烃等物质对人体有致癌作用。ZHAO 等<sup>[41]</sup>研究了中国家庭烹饪中苯、甲醛、结合 PM 2.5 的多环芳烃和结合 PM 2.5 的重金属等致癌物的暴露情况, 得出结论: 中国家庭烹饪油烟总吸入性增量终生癌症风险 (95% 置信区间) ( $2.45 \times 10^{-4} \sim 1.61 \times 10^{-3}$ ) 远远超过  $1.00 \times 10^{-6}$  的可接受限度。童梦雪<sup>[42]</sup>研究中式菜肴在不同烹饪过程中挥发性有机化合物的排放物组成和浓度, 研究结果表明在中式菜肴烹饪过程中挥发性有机化合物排放浓度最高的烹饪方式是炸, 其次是煎和炒; 其中烷烃和芳香烃的含量最高。PENG 等<sup>[43]</sup>通过比较 3 种不同烹饪方式(翻炒、煎锅和油炸), 研究土豆和猪里脊肉在烹饪过程中油烟中的醛。结果表明, 烹饪方法中总醛排放量最高的是油炸, 其次是煎, 然后是翻炒, 即使用温和的烹饪方法(如翻炒)可以减少烹饪油烟中醛的排放。

## 2.2 丙烯酰胺

丙烯酰胺是一种国际公认的化学污染物, 被列为对人类可能的致癌物<sup>[44]</sup>。研究表明, 丙烯酰胺不仅对人体的免疫功能<sup>[45]</sup>、生殖功能<sup>[46]</sup>、神经毒性<sup>[47]</sup>等有严重破坏性, 还对人体具有致癌作用。在食品加工中, 相比于动物原料, 植物原料富含淀粉和蛋白质, 经过高温烹饪(如烘焙、煎炒、烤制等)发生美拉德反应更易生成丙烯酰胺<sup>[48]</sup>。除了美拉德反应, 油脂在煎、炸、烤等烹饪过程中发生氧化反应也会促进丙烯酰胺的产生<sup>[49]</sup>。近年来, 许多研究对比不同烹饪方式对丙烯酰胺形成的影响。MICHALAK 等<sup>[50]</sup>研究了烘烤、煎炸、油炸等不同加热方式对即食丸子中丙烯酰胺形成的影响。通过监测褐变程度、游离天冬酰胺水活性和糖含量, 结果表明: 在家庭中加热已准备好的食物都不能避免丙烯酰胺的进一步形成, 其中丙烯酰胺的含量为: 烤制>油炸>煎制。豆康宁等<sup>[51]</sup>分析对比了面制品在蒸、煮、焙烤、油炸 4 种烹饪方式下丙烯酰胺的含量, 发现焙烤>油炸>蒸>煮。这是由于不同烹饪方式的温度和水分不一致导致丙烯酰胺生成量不同。LIYANAGE 等<sup>[52]</sup>在对油炸薯片中丙烯酰胺的形成的研究中发现: 随油炸时间和温度的增加, 丙烯酰胺的含量也随之增加, 且在高温条件下短时间油炸的薯片中丙烯酰胺的含量明显低于低温条件下长时间油炸的薯片。

## 2.3 多环芳烃

多环芳香烃是由 2 个或多个芳香环组成的一组具有 200 多种疏水化合物的物质总称。它们来源于有机物的不完全燃烧和热解, 是普遍存在的环境污染物, 可以进入食物链, 通常以复杂的混合物形式出现<sup>[53]</sup>。导致食品中多环芳烃污染的主要过程包括吸烟、烧烤、烘烤、油炸等。脂肪是多环芳烃的主要前体物质, 被认为是影响多环芳烃生成的重要因素<sup>[54]</sup>, 因此在烹调过程中食用油的特征会影响熟制食品(油炸食品等)中多环芳烃的含量。研究发现, 油炸食品中多环芳烃以高分子量(三环、四环、五环)为主<sup>[55]</sup>, 其中苯并芘具有强致癌性, 常被作为检测食品中多环芳烃的重要指标<sup>[53]</sup>。熏烤食品如烤肉中产生的多环芳烃主要以二环、三环、四环为主<sup>[56]</sup>。ARFAEINIA 等<sup>[57]</sup>对比了烤鸡和炸鸡中多环芳烃的总含量, 发现烤鸡中的多环芳烃明显多于炸鸡中的多环芳烃。CHIANG 等<sup>[58]</sup>研究发现: 通过木炭烧烤、煤气炉烧烤和烟熏加工的产品会产生较高水平的多环芳烃, 油炸和电炉烘烤或烘焙食品多环芳烃含量较低。BINELLO 等<sup>[53]</sup>提出烘焙咖啡时, 多环芳烃主要是在干燥和烘焙等加工阶段中形成。低分子多环芳烃主要是在温和的焙烤条件下观察到的, 这些低分子化合物在较高的焙烤温度下会导致毒性更大的重环芳烃。从毒理学的角度来看, 脱咖啡因过程似乎对焙烤过程中产生的多环芳烃有积极的影响。

## 2.4 反式脂肪酸

反式脂肪酸是一种羧酸类化合物, 与顺式双键形成的不饱和脂肪酸(如植物油等)不同, 反式脂肪酸在常温下一般呈现固态。自然界中天然反式脂肪酸存在于反刍动物体内, 或存在于食品高温烹饪过程中<sup>[59]</sup>, 如植物油氢化、精炼以及不同烹调过程。研究表明, 反式脂肪酸会引起人体心脑血管疾病<sup>[60]</sup>、糖尿病<sup>[35]</sup>等疾病。并且有学者研究发现反式脂肪酸的摄入与中国女性的抑郁症有关<sup>[61]</sup>, 反式脂肪酸的摄入对人体的健康存在不良影响。MENCIN 等<sup>[62]</sup>研究不同烘焙食品中反式脂肪酸含量。结果表明, 相比于面包类、面团零食类的烘焙食品, 饼干类的烘焙食品中反式脂肪酸的含量最高, 这可能是因为制造过程中使用了不同的起酥油和脂肪。张兰等<sup>[63]</sup>研究蒸、煮、炸、烤等 8 种不同的烹饪方式对肉类中反式脂肪酸含量的影响, 结果表明: 烤、煎、炸的烹饪方法中反式脂肪酸的含量最高。杨雪莲等<sup>[64]</sup>研究表明油炸过程中的反式脂肪酸主要来源于食用油中不饱和脂肪酸的氧化裂解和异构化。食用油中反式脂肪酸的含量随着煎炸时间的延长而增加。

## 2.5 亚硝酸盐

亚硝酸盐是由硝酸盐还原转化而成, 特别是在食物腌渍或长期贮存中, 硝酸盐在微生物作用下还原为亚硝酸

盐<sup>[65]</sup>。进入人体中的亚硝酸盐不仅会阻碍血红蛋白运输氧气,还会与次级胺结合形成具有强致癌性的亚硝胺<sup>[66]</sup>。腌渍食品在贮藏过程中会产生大量亚硝酸盐。HOU 等<sup>[67]</sup>研究发现,新鲜的、未受损害的、储存良好的蔬菜中的亚硝酸盐浓度极低,不良的贮存环境会使食品中亚硝酸盐的含量增加。DING 等<sup>[68]</sup>研究表明除了卷心菜,大多数其他腌制的水果和蔬菜都是在保存或成品加工过程中腌制的,与生蔬菜相比,这有可能将成品的硝酸盐含量稀释 30%~70%,从而降低了亚硝酸盐危害风险。

### 3 有害化合物减控措施

食物在烹饪过程中产生的有害物质对人体有不同程度的损害,深入研究有害物质的抑制途径十分重要。通过添加外源抑制剂来抑制有害物质是当今研究热点,如适量柠檬酸和天然氧化剂能够抑制丙烯酰胺;香料、酒等能够抑制多环芳烃等。

#### 3.1 挥发性有机化合物(油烟)

ZHAO 等<sup>[41]</sup>建议在蒸、煮的过程中完成必要的操作后盖上锅盖。这种方法不仅可以减少热损失,还可以降低 PM 2.5 的直接暴露浓度。对于油基烹饪方法,建议安装瞬时捕获效率高的抽油烟机,通过良好的局部通风干预降低 PM 2.5 暴露浓度。不同吸油烟机对菜品油烟中油脂和固体颗粒物的净化率不同,实验表明侧吸式吸油烟机较欧式吸油烟机净化效率高<sup>[69]</sup>。在高温烹饪中,食用油的种类不同所产生的挥发性有机化合物(油烟)含量也不同,其中富含不饱和脂肪酸的食用油产生挥发性有机化合物(油烟)浓度最高,如大豆油<sup>[40]</sup>。对于油烟这类挥发性有机化合物,通过人为减控更为普遍。

#### 3.2 丙烯酰胺

JUNG 等<sup>[70]</sup>探究降低食物体系 pH 对食物中丙烯酰胺的影响。使用柠檬酸对玉米和马铃薯进行预处理,发现柠檬酸处理对油炸玉米、烤玉米片、马铃薯切片中丙烯酰胺产生有明显抑制效果。在磷酸缓冲液中加入 1 mL 含天冬酰胺和葡萄糖的溶液,体系的 pH 从 7.0 降至 4.0,对丙烯酰胺抑制可达 99.1%。因此,通过降低 pH 来限制油炸和烘焙食品中丙烯酰胺形成是一种有效且实用的方法。植物多酚抗氧化剂是多羟基酚类化合物的总称,可以作为有害化合物抑制剂添加在食品当中。刘李春等<sup>[71]</sup>发现天然氧化剂茶多酚在浓度为 0.015% 时能有效抑制红烧肉烹饪过程中的丙烯酰胺和反式脂肪酸的产生。此外竹叶提取物对味噌有抑制作用,但同时会增加食物中丙烯酰胺和反式脂肪酸含量。因此,不同种外源抑制剂对不同有害化合物的作用效果并不一致。

谷物产品中丙烯酰胺形成的主要决定因素是谷物中游离天门冬酰胺的含量。*L*-天冬酰胺酶水解 *L*-天冬酰胺为 *L*-

天冬氨酸和氨,从而抑制丙烯酰胺的形成。因此,使用 *L*-天冬酰胺酶(*L*-天冬酰胺酰胺水解酶)可以作为一种有用的加工助剂来减少食品中丙烯酰胺的形成。研究发现,使用益生菌是减缓丙烯酰胺的有效方法。益生菌可以减少食品中丙烯酰胺形成的另一个可能的机制是 *L*-天冬酰胺酶的生产<sup>[72]</sup>。ONISHI 等<sup>[73]</sup>用枯草芽孢杆菌 *L*-天冬酰胺酶可将切片马铃薯中约 40% 的 *L*-天冬酰胺转化为 *L*-天冬氨酸。RIVAS-JIMENEZ 等<sup>[74]</sup>比较乳杆菌和干酪乳杆菌去除薯片中丙烯酰胺的能力,结果发现干酪乳杆菌可以有效清除 70% 丙烯酰胺。

#### 3.3 多环芳烃

食品烹调过程中,食用油经高温处理会产生多环芳烃。因此,多环芳烃的减控策略既可以在烧烤或吸烟前(或期间)采用阻隔法,也可以在烧烤或吸烟后采用去除法。在烧烤或吸烟前,可采用的主要策略是使用腌料、预热产品、适当的燃料(木质素较差)、过滤、果汁和脂肪的收集系统(避免它们滴入余烬)。在腌制过程中使用腌料来减少多环芳烃,如果汁、香料、茶和酒等<sup>[75]</sup>。MIN 等<sup>[76]</sup>研究表明抗氧化剂可以通过防止脂质氧化来减少多环芳烃的生成,其中芝麻醇和二叔丁基对甲酚对多环芳烃的还原力最强。OLGA 等<sup>[77]</sup>用比尔森啤酒、不含酒精的比尔森啤酒和黑啤酒腌制炭烤猪肉,评价其中多环芳烃形成的影响。结果表明黑啤酒对炭烤猪肉中多环芳烃的清除能力最佳。陈炎等<sup>[78]</sup>通过添加不同量的愈创木酚来研究牛肉中多环芳烃的含量。结果表明,愈创木酚能够抑制并降低牛肉中多环芳烃的含量。

#### 3.4 反式脂肪酸

食品中添加替代脂肪是降低反式脂肪酸摄入的方法之一,如低反式脂肪酸和低游离脂肪酸<sup>[62]</sup>。油脂加氢反应后得到氢化油<sup>[79]</sup>。氢化油具有良好的烹饪特性,对油脂热稳定性和抗氧化性有极大提升。但是氢化油在烹饪过程中会产生反式脂肪酸。PUPRASIT 等<sup>[80]</sup>对传统的加氢催化过程进行改进,利用平行平板结构的非热介质阻挡放电等离子体成功地实现了棕榈油加氢的低反式脂肪酸生成的新技术。金属催化剂作为油脂氢化改性必不可少的物质,但是使用催化剂会导致氢化油中反式脂肪酸的含量增加。为解决这一现象,IIDA 等<sup>[81]</sup>发现 Ni/TiO<sub>2</sub> 催化剂在碘值为 70 时既能够有效地将氢化油中反式脂肪酸水平降低到 10.5%,又能提高催化活性。食品中的天然抗氧化剂能有效抑制食品在贮存过程中发生氧化反应导致油脂腐败变质,防止有害物质形成。刘李春等<sup>[71]</sup>研究发现对于由不饱和脂肪酸异构化产生的反式脂肪酸,0.015% 茶多酚可以抑制红烧肉中反式脂肪酸的形成,抑制率高达 91%。

#### 3.5 亚硝酸盐

王蕾等<sup>[82]</sup>将降低食品中亚硝酸盐的措施分为化学降解

法和生物降解法。皮佳婷等<sup>[83]</sup>在此分类基础上添加了物理降解法, 即对腌制品如泡菜进行预处理, 直接降低原料中的亚硝酸盐含量, 减少腌制和贮存过程中亚硝酸盐的生成。化学降解法即添加外源物质降低腌制品中亚硝酸盐的含量。白及多糖提取自多年生草本植物白及的块茎, 武洪敏等<sup>[84]</sup>研究得出白及多糖对食品亚硝酸盐的清除能力随白及多糖浓度升高而增强。赵强等<sup>[85]</sup>研究表明, 各类香辛调味料能降低亚硝酸盐的浓度, 如大蒜、辣椒、大葱等。生物降解法即利用乳酸菌等功能性菌株降低发酵体系中亚硝酸盐的含量。李共和国等<sup>[86]</sup>研究表明, 短乳杆菌能够还原亚硝酸盐进而降低体系中亚硝酸盐的含量, 达到减控目的。ZHENG 等<sup>[87]</sup>利用噬菌体与乳酸菌混合发酵从而控制泡菜发酵中亚硝酸盐的产生。以上 3 种方法分别从不同角度降解腌制食品中亚硝酸盐的含量, 提高了腌制食品的质量和安全性。表 3 概括了以

上有害化合物的研究对象与减控措施。

#### 4 结论与展望

食物经不同烹饪方法会产生不同的有害物质, 本文列举了包括挥发性有机化合物(油烟)、丙烯酰胺、多环芳烃、反式脂肪酸等有害物质, 从有害物质形成机制、检测手法、抑制方法等方面介绍了烹调过程中有害物质形成与减控手段。虽然目前针对烹调中有害物质的研究报道较多, 但经过梳理后可从以下几个方面开展深入研究: (1)食物先蒸煮后煎制、先油炸后蒸煮等复合烹饪方式产生有害物质的研究较少。(2)尽管添加抑制剂能够抑制有害化合物形成, 但较少考虑到抑制剂的加入对食品品质、风味的影响。本研究结果可为食物在烹饪过程中有害物质的控制以及产品品质的提升提供理论依据。

表 3 不同有害物质减控措施  
Table 3 Reduction and control methods of different hazardous substances

有害化合物	研究对象	减控措施	参考文献
挥发性有机化合物(油烟)	蒸煮食物	蒸煮过程盖上锅盖	[41]
	尖椒炒肉	使用净化效率高的吸油烟机	[69]
	玉米片(180 °C下油炸、255 °C下烘焙) 土豆片(190 °C下用玉米油油炸)	柠檬酸	[70]
丙烯酰胺	红烧肉(爆炒、炖煮)	茶多酚	[71]
	马铃薯(170 °C煎炸)	枯草芽孢杆菌 L-天冬酰胺酶	[73]
	薯片 腌制品	干酪乳杆菌 腌料	[74] [75]
多环芳烃	肉类(80~200 °C加热)	芝麻醇和二叔丁基对甲酚	[76]
	炭烤猪肉(200~230 °C)	黑啤酒	[77]
	牛肉(100 °C卤煮)	愈创木酚	[78]
	棕榈油加氢(31~100 °C)	利用平行平板结构的非热介质阻挡放电等离子体	[80]
反式脂肪酸	氢化油	Ni/TiO <sub>2</sub> 催化剂	[81]
	红烧肉	0.015%茶多酚和 0.050%迷迭香酸	[71]
	芥菜(37 °C保温箱中培养 24 h)	短乳杆菌	[86]
亚硝酸盐	亚硝酸盐	各类香辛调味料	[85]
	泡菜	噬菌体和乳酸菌	[87]

#### 参考文献

- 王科瑜, 杨宏旭, 王超英, 等. 烘烤、蒸煮和微波加热技术在动物源性食品加工中的应用[J]. 食品工业科技, 2018, 39(13): 325-330.  
WANG KY, YANG HX, WANG CY, *et al.* Application of baking, steaming and microwave heating technology in animal-derived food processing [J]. Food Ind Technol, 2018, 39(13): 325-330.
- 谢程炜, 诸永志, 徐为民, 等. 我国汤煲类食品的现状和发展[J]. 内蒙古农业科技, 2010, (5): 4-5.  
XIE CW, ZHU YZ, XU WM, *et al.* The current situation and development of soups and pots in my country [J]. Inner Mongolia Agric Sci Technol, 2010, (5): 4-5.
- 鲍诗晗, 李诗雯, 何玉英, 等. 烹饪方式对胡萝卜感官品质及营养素含量的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(8): 149-156.  
BAO SH, LI SW, HE YY, *et al.* The effect of cooking methods on the sensory quality and nutrient content of carrots [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(8): 149-156.
- 樊田利, 刘若男, 王凤丽, 等. 不同蒸制功率对西兰花营养品质的影响研究[J]. 食品与发酵工业, 2021. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026765  
FAN TL, LIU RN, WANG FL, *et al.* The effect of different steaming power on the nutritional quality of broccoli [J]. Food Ferment Ind, 2021. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026765
- 徐艳, 钱祥羽, 朱文政, 等. 红烧肉炖制过程中的脂肪和脂肪酸变化[J]. 中国调味品, 2019, 44(2): 5-9.  
XU Y, QIAN XY, ZHU WZ, *et al.* Fat and fatty acid changes in braised pork stewing process [J]. China Cond, 2019, 44(2): 5-9.

- [6] WU G, CHANG C, HONG C, *et al.* Phenolic compounds as stabilizers of oils and antioxidative mechanisms under frying conditions: A comprehensive review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2019, 92: 33–45.
- [7] 刘方圆. 浅论油炸食品的烹调工艺与营养控制研究[J]. *现代食品*, 2020, (11): 93–94, 99.  
LIU FY. Discussion on the cooking technology and nutrition control of fried food [J]. *Mod Food*, 2020, (11): 93–94, 99.
- [8] 王谊, 陈龙, 程昊, 等. 油炸高温处理对淀粉结构与性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(8): 137–159.  
WANG Y, CHEN L, CHENG H, *et al.* The effect of high-temperature frying treatment on the structure and properties of starch [J]. *J Chin Cere Oil Ass*, 2021, 36(8): 137–159.
- [9] 赵文硕, 孟繁盛, 宋慧钰, 等. 两种不同烹饪方式对亚麻籽油品质的影响[J]. *中国油脂*, 2020, 45(10): 132–134.  
ZHAO WS, MENG FY, SONG HY, *et al.* The effect of two different cooking methods on the quality of linseed oil [J]. *China Oils Fats*, 2020, 45(10): 132–134.
- [10] NUGRAHEDI PY, OLIVIERO T, HEISING JK, *et al.* Stir-frying of Chinese cabbage and pakchoi retains health-promoting glucosinolates [J]. *Plant Food Human Nutr*, 2017, 72(4): 439–444.
- [11] 闫晨红. 烟熏对肉制品风味及安全性的影响探析[J]. *现代食品*, 2020, (15): 38–39, 46.  
YAN CH. Analysis of the effect of smoking on the flavor and safety of meat products [J]. *Mod Food*, 2020, (15): 38–39, 46.
- [12] 袁亚明, 荀瑞珑, 于小番, 等. 两种烹调方式对明虾的营养品质及质构的影响[J]. *美食研究*, 2020, 37(3): 48–52.  
YUAN YM, XUN RL, YU XF, *et al.* The effect of two cooking methods on the nutritional quality and texture of prawns [J]. *Gastronomic Res*, 2020, 37(3): 48–52.
- [13] 张舒, 盛亚男, 冯玉超, 等. 焙烤对绿豆蛋白结构和功能性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(4): 44–49.  
ZHANG S, SHENG YN, FENG YC, *et al.* Effect of baking on the structure and functional properties of mung bean protein [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2021, 42(4): 44–49.
- [14] 董士楷, 张志祥, 尚海涛, 等. 腌制类食品的超高压处理研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(10): 14–16, 20.  
DONG SK, ZHANG ZX, SHANG HT, *et al.* Research progress on ultra-high pressure treatment of pickled foods [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2018, 46(10): 14–16, 20.
- [15] 王正莉, 王卫, 陈林, 等. 传统腌腊肉制品中微生物多样性研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(8): 202–206.  
WANG ZL, WANG W, CHEN L, *et al.* Research progress of microbial diversity in traditional cured meat products [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(8): 202–206.
- [16] 张俊艳. 真空油炸技术在食品加工中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(10): 129–132.  
ZHANG JY. Application of vacuum frying technology in food processing [J]. *Food Res Dev*, 2013, 34(10): 129–132.
- [17] 王园, 惠腾, 赵亚楠, 等. 传统熏鱼中反式脂肪酸的形成机理及控制措施[J]. *肉类研究*, 2013, 27(5): 40–44.  
WANG Y, HUI T, ZHAO YN, *et al.* The formation mechanism and control measures of trans fatty acids in traditional smoked fish [J]. *Meat Res*, 2013, 27(5): 40–44.
- [18] 李鹏飞, 朱香香, 李世娜, 等. 响应面法优化低温真空油炸红枣脆片工艺[J]. *食品与发酵科技*, 2021, 57(2): 97–102.  
LI PF, ZHU XX, LI SN, *et al.* Optimization of low-temperature vacuum frying red jujube chips technology by response surface methodology [J]. *Food Ferment Technol*, 2021, 57(2): 97–102.
- [19] 杨东松. 真空低温烹饪技术在烹饪中的应用进展[J]. *食品工程*, 2021, (1): 1–4, 10.  
YANG DS. Application progress of sous-vide cooking technology in cooking [J]. *Food Eng*, 2021, (1): 1–4, 10.
- [20] 王文成, 高惠安, 郑守斌, 等. 低温真空油炸山药脆片的工艺研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(4): 101–106.  
WANG WC, GAO HAN, ZHENG SB, *et al.* Study on the technology of low-temperature vacuum frying yam crisps [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(4): 101–106.
- [21] FANG M, HUANG GJ, SUNG WC. Mass transfer and texture characteristics of fish skin during deep-fat frying, electrostatic frying, air frying and vacuum frying [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2021, 137: 110494.
- [22] 付婷婷, 覃小丽, 刘雄. 食品的微波加工研究新进展[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(4): 187–194.  
FU TT, QIN XL, LIU X. New progress in research on microwave processing of food [J]. *J Chin Cere Oil Ass*, 2020, 35(4): 187–194.
- [23] 侯芳, 高红辉. 微波处理对食品营养成分的影响研究[J]. *食品安全导刊*, 2021, (3): 141–142.  
HOU F, GAO HH. Study on the influence of microwave treatment on food nutrition [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2021, (3): 141–142.
- [24] MARTINS CPC, CAVALCANTI RN, CARDOZO TSF, *et al.* Effects of microwave heating on the chemical composition and bioactivity of orange juice-milk beverages [J]. *Food Chem*, 2021, 345: 128746.
- [25] 陈成. 微波烹饪技术对牡蛎品质影响的研究[J]. *中国调味品*, 2020, 45(9): 122–124.  
CHEN C. Study on the influence of microwave cooking technology on the quality of oysters [J]. *China Cond*, 2020, 45(9): 122–124.
- [26] MEHMOOD A, ZEB A. Effects of different cooking techniques on bioactive contents of leafy vegetables [J]. *Int J Gastron Food Sci*, 2020, 22: 100246.
- [27] 袁蒲, 周昇昇, 张书芳, 等. 微波技术对食品营养成分的影响研究[J]. *科技创新导报*, 2018, 15(2): 85–86.  
YUAN P, ZHOU SS, ZHANG SF, *et al.* Research on the influence of microwave technology on food nutrition [J]. *Sci Technol Innov Herald*, 2018, 15(2): 85–86.
- [28] 樊冬梅, 谢华. 甲醛对呼吸系统毒性作用的研究现状[J]. *广东医学院学报*, 2009, 27(5): 584–586, 591.  
FAN DM, XIE H. Research status of the toxic effects of formaldehyde on the respiratory system [J]. *J Guangdong Med Coll*, 2009, 27(5): 584–586, 591.
- [29] 杨柳青, 董丽, 罗颖华, 等. 氧化应激参与丙烯酰胺致神经细胞凋亡及炎症反应的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(18): 6265–6270.  
YANG LQ, DONG L, LUO YH, *et al.* Oxidative stress participates in the research progress of acrylamide-induced neuronal apoptosis and inflammation [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(18): 6265–6270.
- [30] 张春梅, 李细霞, 贾会, 等. 丙烯酰胺母源性暴露对新生大鼠海马GFAP和S100 $\beta$ 表达的影响[J]. *神经解剖学杂志*, 2020, 36(6): 619–624.  
ZHANG CM, LI XX, JIA H, *et al.* Effects of maternal exposure to acrylamide on the expression of GFAP and S100 $\beta$  in the hippocampus of newborn rats [J]. *J Neuroanat*, 2020, 36(6): 619–624.
- [31] 罗应彪. 丙烯酰胺暴露对糖尿病小鼠和肥胖小鼠的毒性及机制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.  
LUO YB. Study on the toxicity and mechanism of acrylamide exposure in diabetic and obese mice [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [32] 刘帅, 刘欢, 魏海峰, 等. 4种多环芳烃对虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)幼体的急性毒性研究[J]. *生态毒理学报*, 2020, 15(5): 352–360.  
LIU S, LIU H, WEI HF, *et al.* Acute toxicity of four polycyclic aromatic hydrocarbons to the larvae of *Patinopecten yessoensis* [J]. *J Ecotox*, 2020, 15(5): 352–360.
- [33] 杨柳叶. 多环芳烃暴露致大鼠神经行为的改变及其机制探讨[D]. 太原:

- 山西医科大学, 2020.
- YANG LY. Changes in neurobehavior of rats induced by exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and its mechanism [D]. Taiyuan: Shanxi Medical University, 2020.
- [34] 丁晟, 夏芝璐, 吴争, 等. 反式脂肪酸对大鼠的致畸研究[J]. 毒理学杂志, 2018, 32(6): 511–513.
- DING S, XIA ZL, WU Z, *et al.* Study on teratogenicity of trans fatty acids in rats [J]. *J Toxicol*, 2018, 32(6): 511–513.
- [35] ISHIBASHI K, TAKEDA Y, NAKATA L, *et al.* Elaidate, a trans fatty acid, suppresses insulin signaling for glucose uptake in a manner distinct from that of stearate [J]. *Biochimie*, 2020, 177: 98–107.
- [36] 张赛赛, 宋晓阳, 尚宏鑫, 等. 氨氮和亚硝酸盐对单环刺蛾幼体的急性毒性实验[J]. 河北渔业, 2020, (7): 8–12, 29.
- ZHANG SS, SONG XY, SHANG HX, *et al.* Acute toxicity experiment of ammonia nitrogen and nitrite on the larvae of *Monocyclic moth* [J]. *Hebei Fish*, 2020, (7): 8–12, 29.
- [37] 赵肃, 吴兴泉, 黄继红, 等. 麦胚球蛋白对亚硝酸盐急性中毒大鼠肝损伤的保护作用研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(5): 52–57.
- ZHAO S, WU XQ, HUANG JH, *et al.* Study on the protective effect of wheat germ globulin on liver injury in rats with acute nitrite poisoning [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(5): 52–57.
- [38] 刘俊, 张丽丽, 石贞玉, 等. 小鼠大脑亚硝酸盐暴露与 DNA 甲基化和组蛋白去乙酰化[J]. 解剖学报, 2017, 48(6): 642–650.
- LIU J, ZHANG LL, SHI ZY, *et al.* Nitrite exposure in the brain of mice and DNA methylation and histone deacetylation [J]. *Chin J Anatomy*, 2017, 48(6): 642–650.
- [39] WANG H, XIANG Z, WANG L, *et al.* Emissions of volatile organic compounds (VOCs) from cooking and their speciation: A case study for Shanghai with implications for China [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 621: 1300–1309.
- [40] 王亚琪, 常甜, 陈庆彩. 餐饮源 VOCs 组成特征及处理技术研究进展[J]. 环境工程, 2021, 39(6): 90–98.
- WANG YQ, CHANG T, CHEN QC. Composition characteristics and treatment technology research progress of catering source VOCs [J]. *Environ Eng*, 2021, 39(6): 90–98.
- [41] ZHAO JJ, YOU XY. Probabilistic health risk assessment of exposure to carcinogens of Chinese family cooking and influence analysis of cooking factors [J]. *Sci Total Environ*, 2021, 779: 146493.
- [42] 童梦雪. 烹饪油烟挥发性有机物 VOCs 组分的排放特征研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2019.
- TONG MX. Study on the emission characteristics of cooking oil fume volatile organic compounds VOCs components [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [43] PENG CY, LAN CH, LIN PC, *et al.* Effects of cooking method, cooking oil, and food type on aldehyde emissions in cooking oil fumes [J]. *J Hazard Mater*, 2017, 324: 160–167.
- [44] 高瑜悦, 欧仕益, 张延杰, 等. 黄酮类化合物对食品中丙烯酰胺的抑制和毒性干预作用[J]. 轻工科技, 2021, 37(1): 9–14.
- GAO YY, OU SY, ZHANG YJ, *et al.* Inhibition and toxicity intervention of flavonoids on acrylamide in food [J]. *Light Ind Sci Technol*, 2021, 37(1): 9–14.
- [45] GUO J, YU D, LV N, *et al.* Relationships between acrylamide and glycidamide hemoglobin adduct levels and allergy-related outcomes in general US population, NHANES 2005–2006 [J]. *Environ Pollut*, 2017, 225: 506–513.
- [46] ALKARIM S, ELASSOULI S, ALI S, *et al.* Effects of low dose acrylamide on the rat reproductive organs structure, fertility and gene integrity [J]. *Asian Pac J Reprod*, 2015, 4(3): 179–187.
- [47] 欧阳宇, 赵扩权, 冯莹娜, 等. 美拉德反应产物的生物学活性和潜在健康风险[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 350–362.
- OU YY, ZHAO KQ, FENG YN, *et al.* The biological activity and potential health risks of Maillard reaction products [J]. *Food Sci*, 2021, 42(17): 350–362.
- [48] 时海波, 邹焱, 杨恒, 等. 美拉德反应产物生物活性及衍生危害物安全控制研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(22): 325–333.
- SHI HB, ZOU Y, YANG H, *et al.* Research progress on the biological activity of the rad reaction product and the safety control of derived hazards [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2019, 40(22): 325–333.
- [49] 王鹏璞, 朱雨辰, 刘炎冰, 等. 煎炸和焙烤过程中油脂对丙烯酰胺形成影响研究进展[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(2): 140–146.
- WANG PP, ZHU YC, LIU YB, *et al.* Research progress on the influence of fats and oils on the formation of acrylamide during frying and baking [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2017, 32(2): 140–146.
- [50] MICHALAK J, GUJSKA E, CZARNOWSKA-KUJAWSKA M, *et al.* Effect of different home-cooking methods on acrylamide formation in pre-prepared croquettes [J]. *J Food Compos Anal*, 2017, 56: 134–139.
- [51] 豆康宁, 赵丽芳, 王飞. 熟制方法对面制品中丙烯酰胺含量的影响[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(3): 72–74.
- DOU KN, ZHAO LF, WANG F. The effect of cooking methods on the content of acrylamide in flour products [J]. *J Cere Oils*, 2016, 29(3): 72–74.
- [52] LIYANAGE DWK, YEVTUSHENKO DP, KONSCHUH M, *et al.* Processing strategies to decrease acrylamide formation, reducing sugars and free asparagine content in potato chips from three commercial cultivars [J]. *Food Control*, 2021, 119: 107452.
- [53] BINELLO A, CRAVOTTO G, MENZIO J, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in coffee samples: Enquiry into processes and analytical methods [J]. *Food Chem*, 2021, 344: 128631.
- [54] 胡高峰, 蔡克周, 李雨竹, 等. 食品加工过程中多环芳烃生成的影响因素及控制研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(14): 196–201.
- HU GF, CAI KZ, LI YZ, *et al.* Influencing factors and control research progress of polycyclic aromatic hydrocarbons during food processing [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(14): 196–201.
- [55] 赵胜绪, 杨长江, 者文静, 等. 油炸食品中多环芳烃健康风险的定量评价[J]. 长江大学学报(自科版), 2014, 11(34): 21, 28–31, 34.
- ZHAO SX, YANG CJ, ZHE WJ, *et al.* Quantitative assessment of the health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in fried foods [J]. *J Yangtze Univ (Nat Sci Ed)*, 2014, 11(34): 21, 28–31, 34.
- [56] 王琬. 高效液相色谱法测定油炸熏烤食品中多环芳烃[J]. 中国卫生工程学, 2021, 20(1): 27–29.
- WANG W. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in fried and smoked food by high performance liquid chromatography [J]. *Chin Sanitary Eng*, 2021, 20(1): 27–29.
- [57] ARFAEINIA H, CHESHMAZAR E, KARIMYAN K, *et al.* Data on concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in roasted and fried chicken—A case study: Bushehr, Iran [J]. *Data Brief*, 2018, 21: 1842–1847.
- [58] CHIANG CF, HSU KC, TSAI TY, *et al.* Evaluation of optimal QuEChERS conditions of various food matrices for rapid determination of EU priority polycyclic aromatic hydrocarbons in various foods [J]. *Food Chem*, 2021, 334: 127471.
- [59] 李昌模, 张钰斌, 李帅, 等. 反式脂肪酸生成机理的研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(7): 141–146.
- LI CM, ZHANG YB, LI S, *et al.* Study on the formation mechanism of trans fatty acids [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2015, 30(7): 141–146.
- [60] ISLAM MA, AMIN MN, SIDDIQUI SA, *et al.* Trans fatty acids and lipid profile: A serious risk factor to cardiovascular disease, cancer and diabetes [J]. *Diabetes Metab Syndr*, 2019, 13(2): 1643–1647.
- [61] LI D, ZHENG H, TONG Y, *et al.* Prospective association between trans fatty acid intake and depressive symptoms: Results from the study of women's health across the nation [J]. *J Affect Disorders*, 2020, 264:



- 256–262.
- [62] MENCIN M, ABRAMOVIĆ H, ZLATIĆ E, *et al.* Content of trans-fatty acid isomers in bakery products on the Slovenian market [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2021, 143: 111095.
- [63] 张兰, 高天丽, 刘永峰, 等. 八种中式烹饪工艺对牛肉中多环芳烃、反式脂肪酸和亚硝酸盐的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(6): 1126–1138. ZHANG L, GAO TL, LIU YF, *et al.* Effects of eight Chinese cooking processes on polycyclic aromatic hydrocarbons, trans fatty acids and nitrite in beef [J]. *China Agric Sci*, 2017, 50(6): 1126–1138.
- [64] 杨雪莲, 张翔宇, 谢建春, 等. 部分食品煎炸用油的反式脂肪酸比较[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(1): 327–333. YANG XL, ZHANG XY, XIE JC, *et al.* Comparison of trans fatty acids in some food frying oils [J]. *Chin J Food Sci*, 2021, 21(1): 327–333.
- [65] 赵静, 王娜, 冯叙桥, 等. 蔬菜中硝酸盐和亚硝酸盐检测方法的研究进展[J]. *食品科学*, 2014, 35(8): 42–49. ZHAO J, WANG N, FENG XQ, *et al.* Research progress on detection methods of nitrate and nitrite in vegetables [J]. *Food Sci*, 2014, 35(8): 42–49.
- [66] 吕洁杰, 杜瑞英. 茶叶中硝酸盐和亚硝酸盐的研究进展[J]. *农产品质量与安全*, 2020, (6): 83–88. LV JJ, DU RY. Research progress of nitrate and nitrite in tea [J]. *Qual Saf Agric Prod*, 2020, (6): 83–88.
- [67] HOU JC, JIANG CG, LONG ZC. Nitrite level of pickled vegetables in northeast China [J]. *Food Control*, 2013, 29(1): 7–10.
- [68] DING Z, JOHANNINGSMEIER SD, PRICE R, *et al.* Evaluation of nitrate and nitrite contents in pickled fruit and vegetable products [J]. *Food Control*, 2018, 90: 304–311.
- [69] 郭浩, 张秀喜, 丁志伟, 等. 家庭烹饪油烟污染物排放特征研究[J]. *环境监测与预警*, 2018, 10(1): 51–56. GUO H, ZHANG XX, DING ZW, *et al.* Study on the emission characteristics of household cooking fume pollutants [J]. *Environ Monitor Early Warn*, 2018, 10(1): 51–56.
- [70] JUNG MY, CHOI DS, JU JW. A novel technique for limitation of acrylamide formation in fried and baked corn chips and in french fries [J]. *J Food Sci*, 2003, 68(4): 1287–1290.
- [71] 刘李春, 蒋玉洁, 申明月, 等. 天然抗氧化剂对红烧肉烹饪过程中热加工危害物形成的控制[J]. *食品科学*, 2021, 42(15): 50–57. LIU LC, JIANG YJ, SHEN MY, *et al.* Natural antioxidants control the formation of thermal processing hazards during braised pork cooking [J]. *Food Sci*, 2021, 42(15): 50–57.
- [72] KHORSHIDIAN N, YOUSEFI M, SHADNOUSH M, *et al.* Using probiotics for mitigation of acrylamide in food products: A mini review [J]. *Curr Opin Food Sci*, 2020, 32: 67–75.
- [73] ONISHI Y, PRIHANTO AA, YANO S, *et al.* Effective treatment for suppression of acrylamide formation in fried potato chips using *L-asparaginase* from *Bacillus subtilis* [J]. *3 Biotech*, 2015, 5(5): 783–789.
- [74] RIVAS-JIMENEZ L, RAMÍREZ-ORTIZ K, GONZÁLEZ-CÓRDOVA AF, *et al.* Evaluation of acrylamide-removing properties of two *Lactobacillus* strains under simulated gastrointestinal conditions using a dynamic system [J]. *Microbiol Res*, 2016, 190: 19–26.
- [75] IKO AOH, DOUNY C, KPOCLOU YE, *et al.* Insight about methods used for polycyclic aromatic hydrocarbons reduction in smoked or grilled fishery and meat products for future re-engineering: A systematic review [J]. *Food Chem Toxicol*, 2020, 141: 111372.
- [76] MIN S, PATRA JK, SHIN HS. Factors influencing inhibition of eight polycyclic aromatic hydrocarbons in heated meat model system [J]. *Food Chem*, 2018, 239: 993–1000.
- [77] OLGA V, IRIA YP, ELENA MC, *et al.* Effect of beer marinades on formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in charcoal-grilled pork [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(12): 2638–2643.
- [78] 陈炎, 杨潇, 屠泽慧, 等. 愈创木酚对卤煮牛肉中多环芳烃含量的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2017, 35(5): 32–40. CHEN Y, YANG X, TU ZH, *et al.* The effect of guaiacol on the content of polycyclic aromatic hydrocarbons in braised beef [J]. *J Food Sci Technol*, 2017, 35(5): 32–40.
- [79] 郭霞, 王晓辉, 葛赞. 氢化油的稳定性研究[J]. *广州化工*, 2018, 46(24): 75–76, 79. GUO X, WANG XH, GE Z. Study on the stability of hydrogenated oil [J]. *Guangzhou Chem Ind*, 2018, 46(24): 75–76, 79.
- [80] PUPRASIT K, WONGSAWAENG D, NGAOSUWAN K, *et al.* Non-thermal dielectric barrier discharge plasma hydrogenation for production of margarine with low trans-fatty acid formation [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2020, 66: 102511.
- [81] IIDA H, TAKAHASHI K, YANAGISAWA A, *et al.* Reduction of trans fatty acids in hydrogenated soybean oil using Ni/TiO<sub>2</sub> catalysts [J]. *Food Chem*, 2021, 340: 127927.
- [82] 王蕾, 田方, 孙志栋, 等. 芥菜传统腌制发酵工艺优化研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026862. WANG L, TIAN F, SUN ZD, *et al.* Research progress on optimization of traditional pickling and fermentation technology of mustard [J]. *Food Ferment Ind*, 2021. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026862.
- [83] 皮佳婷, 刘冬敏, 王建辉, 等. 乳酸菌降解泡菜中亚硝酸盐的机制及应用研究现状[J]. *食品与发酵工业*, 2021: 1–10. [2021-11-26]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.027488> PI JT, LIU DM, WANG JH, *et al.* The mechanism of degradation of nitrite in kimchi by lactic acid bacteria and its application research status [J]. *Food Ferment Ind*, 2021: 1–10. [2021-11-26]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.027488>
- [84] 武洪敏, 高青青, 陈庚, 等. 双水相法萃取白及多糖及其对亚硝酸盐的清除作用[J]. *北方园艺*, 2021, (3): 114–121. WU HM, GAO QQ, CHEN G, *et al.* Aqueous two-phase extraction of white and polysaccharides and its effect on nitrite removal [J]. *North Horticult*, 2021, (3): 114–121.
- [85] 赵强, 刘乐, 杨洁, 等. 香辛调味料清除亚硝酸盐研究进展[J]. *食品工业*, 2021, 42(4): 401–404. ZHAO Q, LIU L, YANG J, *et al.* Research progress in removing nitrite with spices [J]. *Food Ind*, 2021, 42(4): 401–404.
- [86] 李共国, 孙志栋. 乳酸菌影响腌制芥菜亚硝酸盐含量的途径分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(6): 2351–2356. LI GG, SUN ZD. Path analysis of the influence of lactic acid bacteria on the nitrite content of pickled mustard [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(6): 2351–2356.
- [87] ZHENG XF, YANG ZQ, ZHANG H, *et al.* Isolation of virulent phages infecting dominant mesophilic aerobic bacteria in cucumber pickle fermentation [J]. *Food Microbiol*, 2020, 86: 103330.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

## 作者简介



林瑞榕, 硕士研究生, 主要研究方向为食品科学与工程。

E-mail: 493393428@qq.com



郭泽镇, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品加工技术、食品营养与化学。

E-mail: gzb8607@163.com