

# 肉制品主要组分对嗜热脂肪芽孢杆菌耐热性影响 研究进展

马相杰<sup>1</sup>, 宋莲军<sup>2</sup>, 黄现青<sup>2\*</sup>, 赵越<sup>2</sup>

(1. 河南双汇投资发展股份有限公司, 漯河 462000;  
2. 河南农业大学/河南省食品加工与流通安全控制工程技术研究中心, 郑州 450002)

**摘 要:** 嗜热脂肪芽孢杆菌是一种兼性厌氧菌, 是导致肉制品腐败变质的主要微生物。由于其芽孢是耐热性最强的芽孢之一, 因此经常被用作验证湿热灭菌效果的生物指示剂。基于此, 本文主要综述了国内外近年来关于嗜热脂肪芽孢杆菌耐热性的研究进展, 主要包括嗜热脂肪芽孢杆菌的微生物学特性、肉类制品各主要组分对嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢耐热性的影响、几种“冷杀菌”方式与热杀菌方式的比较, 通过对这些研究成果的梳理, 希望在保障食品安全基础上的, 获得具有风味保持、营养价值保存优点的延长货架期技术, 为食品加工过程节能降耗提供新的思路。

**关键词:** 肉制品; 嗜热脂肪芽孢杆菌; 耐热性; “冷杀菌”

## Research progress on the influence of main components of meat products on the heat resistance of *Bacillus stearothermophilus*

MA Xiang-Jie<sup>1</sup>, SONG Lian-Jun<sup>2</sup>, HUANG Xian-Qing<sup>2\*</sup>, ZHAO Yue<sup>2</sup>

(1. Henan Shuanghui Investment Development Co., Ltd., Luohe 462000, China; 2. Henan Agricultural University, Henan Food Processing and Circulation Safety Control Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450002, China)

**ABSTRACT:** *Bacillus stearothermophilus* is a facultative anaerobic bacteria, which is the main microorganism that causes the spoilage of meat products. Because its spore is one of the most heat-resistant spores, it is often used as a biological indicator to verify the effectiveness of moist heat sterilization. Based on this, this paper summarized the research progress of the heat resistance of *Bacillus stearothermophilus* in recent years at home and abroad, including the microbial characteristics of *Bacillus stearothermophilus*, the influence of the main components of meat products on the heat resistance of *Bacillus stearothermophilus* spores, and the comparison of several “cold sterilization” methods and thermal sterilization. Through sorting out these research results, it is hoped that, on the basis of ensuring food safety, the extended shelf life technology with the advantages of preserving flavor and preserving nutritional value can be obtained, so as to provide new ideas for energy conservation and consumption reduction in food processing.

**KEY WORDS:** meat products; *Bacillus stearothermophilus*; heat resistance; cold sterilization

基金项目: 国家自然科学基金(31671916)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31671916)

\*通讯作者: 黄现青, 博士, 教授, 主要研究方向为食品营养与微生物安全。E-mail: hxq8210@126.com

\*Corresponding author: HUANG Xian-Qing, Ph.D, Professor, Henan Agricultural University, Henan Province Engineering Research Center for Food Safety Control of Processing and Circulation, No.95, Wenhua Road, Zhengzhou 450002, China. E-mail: hxq8210@126.com

## 1 引言

随着我国经济的快速发展和居民生活水平的大幅提高,国民的饮食结构发生了较大变化,由于购买能力的提升以及肉类丰富的营养组成,肉类逐渐成为人们膳食蛋白营养的主要来源<sup>[1]</sup>,肉制品消费也伴随着收入的快速增加处于持续增长状态<sup>[2]</sup>。近三十年我国经济和科技的快速发展,为肉制品加工工业化发展提供了坚实基础和保障,我国肉制品市场发展极其迅速,生产和消费总量长期处于国际前列。消费的多元化和需求的多样化,促使市场上出现了中式、西式、生鲜、低温、高温等品种繁多的各种肉制品,也最大限度的满足了消费者的个性化需求。但是,由于我国食品工业发展起步晚、时间短,我国肉类制品的生产形势不容乐观,肉类制品的品质、生物与化学安全已成为制约我国畜牧业健康发展,并危及食品工业和人民健康的第一要素<sup>[3]</sup>。其中作为具有兼性厌氧特性、能够形成最具耐热抵抗能力芽孢的嗜热脂肪芽孢杆菌,由于贴了肉制品高营养、真空包装、热杀菌的生产加工特性,成为了导致肉制品腐败变质的主要微生物之一,严重影响了产品的安全水平,并对消费者的身体健康造成了极大威胁。

目前国内外还没有关于加热杀灭嗜热脂肪芽孢杆菌方面的系统性研究,且关于食品成分对嗜热脂肪芽孢杆菌耐热性研究多集中在某种特定食品介质上。鉴于此,本文对不同食品组分对食品中芽孢致死率的影响进行总结,从而为未来实际食品生产过程中热杀菌条件的优化和制定提供理论依据,在保证食品安全性的同时提高产品的风味营养性提供优化途径,同时为食品加工过程降低能耗提供新的思路。

## 2 嗜热脂肪芽孢杆菌的研究

嗜热脂肪芽孢杆菌营养细胞宽 0.6~1.0  $\mu\text{m}$ 、长 2.0~3.5  $\mu\text{m}$ ,呈长杆状、圆端,多数为单个、少数成对或链状排列<sup>[4]</sup>,细胞壁呈 G+结构,但染色可在阳性和阴性之间发生变化。嗜热脂肪芽孢杆菌的芽孢呈椭圆形或呈柱状,一般为端生或次端生,孢囊膨胀或不膨胀,无伴孢晶体形成。生长呈嗜热性,最佳生长温度在 56~60  $^{\circ}\text{C}$ ,在 30~75  $^{\circ}\text{C}$ 之间均可以良好生长,在需氧或兼性厌氧均可生长,一般肉制品腐败并不发生涨袋现象,这是肉眼不能识别的食品安全威胁<sup>[5-7]</sup>。我国工业微生物菌种保藏管理中心(China Industrial Microbial species Conservation and Management Center, CICC)收藏的标准菌株为嗜热脂肪芽孢杆菌,编号为 CICC 10267 株,和 ATCC 7953 株等同。56  $^{\circ}\text{C}$ 培养 24 h,营养琼脂上为浅黄色、表面粗糙湿润、边缘不整状菌落形态。该菌株在 Cook 等<sup>[8]</sup>产孢培养基上 56  $^{\circ}\text{C}$ 培养 24 h,涂片后经芽孢染色法染色后,光学显微镜

下观察到多数染成红色仍为繁殖体状态,仅有部分染成蓝色形成芽孢形态;在产孢培养基上 56  $^{\circ}\text{C}$ 培养 5 d后,显微镜下观察显示 90%以上为染成蓝色,大部分形成芽孢,只有少数是繁殖体状态。

嗜热脂肪芽孢杆菌(ATCC 7953)所产芽孢具备无致病性、无热原、无毒等特性,并且对高压蒸汽的抵抗力在芽孢类微生物中最强,因此,我国 GB15981 将该菌株作为压力蒸汽灭菌效果评价的标准检测菌株列入《消毒与灭菌效果的评价方法与标准》<sup>[9]</sup>和《消毒技术规范》<sup>[10]</sup>中。嗜热脂肪芽孢杆菌是一种兼性厌氧菌,其芽孢是耐热性最强的芽孢之一,而肉类制品通常采用软罐头真空包装后经高温灭菌处理,由于芽孢耐过热杀菌工艺,极易导致肉制品腐败变质。ATCC7953 菌株在 121  $^{\circ}\text{C}$ 条件下, D 值为 2.1 min, Z 值为 8.5  $^{\circ}\text{C}$ <sup>[11]</sup>。虽然杀菌后的食品产品中低残存芽孢本身对食品工业来说并不会造成任何危害,但是在食品存储、流通过程中,如果条件适宜残存的芽孢得以萌发、生长,经大量繁殖后,最终将导致食品腐败变质,严重威胁食品安全,因此芽孢的耐热性是影响食品热杀菌技术的重要因素<sup>[12]</sup>。

## 3 灭活芽孢的方式

### 3.1 超高静压

超高静压是在处理过程中利用产生的高压直接作用于芽孢膜结构、改变芽孢膜蛋白理化性质、破坏芽孢通透性等,最终导致外部水分进入芽孢内部,并通过重新水合作用破坏芽孢衣结构。另一方面,极端压力环境可使芽孢受到外部拉伸或扁平挤压等效应而受到机械损伤。此外,保压结束后,通过瞬间卸压性物理作用也可导致芽孢的物理结构被破坏,破坏芽孢壁。通过以上综合作用效应,导致芽孢内容物外泄,产生生理紊乱,最终引起芽孢失活<sup>[13]</sup>。影响超高静压对芽孢的灭活效应的因素主要有微生物和处理两方面,微生物方面主要和芽孢菌的种类、芽孢的组成及其结构、芽孢的形态等有关,超高静压处理主要和处理温度、所处的环境介质、离子强度、pH 值等因素有关,此外,如结合其他条件进行协同处理如间歇超高静压(ultra-high static pressure, HHP)、HHP 结合热处理、HHP 结合其它物理杀菌技术(高压脉冲电场、超声波、辐照、细菌素、化学试剂)等,均可显著提高对芽孢的灭活效应<sup>[14,15]</sup>。

但是,由于高压处理微生物研究起步较晚,目前缺乏对耐压指示菌的相关研究和标准化。因此,对于目前开展的超高压杀菌技术,尚无法像热杀菌一样建立较为完善的杀菌理论技术体系,导致工业上难以方便而有效的确定具体的高压杀菌参数及工艺<sup>[16]</sup>。而且超高压由于单纯依靠压力效应,作用途径单一,对芽孢菌的杀菌效应并不理想,

效果较差, 必须考虑压力和时间之外的其他因素进行协同处理, 如采取抑菌剂、热处理、其他物理处理等协同效应杀菌。此外, 超高静压处理还存在诸如无法实现大批量处理、不能连续化生产、相对于效果成本较高等问题, 也限制了其在食品工业中的推广和应用<sup>[17]</sup>。

### 3.2 高压 CO<sub>2</sub> 灭菌技术

高压 CO<sub>2</sub>(high pressure carbon dioxide, HPCD) 杀菌技术作为一种新型非热力杀菌技术, 不但能够有效杀死食品中细菌的营养体, 而且对于细菌芽胞也有一定的杀灭作用。由于 HPCD 杀菌技术具有处理温度温和、对食品口感影响小、对热敏物质破坏作用小、有利于最大限度保持食品原有品质等特点, 被广泛开展相关技术研究和应用研究<sup>[18]</sup>。相比于超高压杀菌技术的 300~600 MPa 压力, HPCD 杀菌技术处理压力较低, 一般低于 20 MPa, 具备了成本低廉、设备简单、安全性好、易于控制等优点, 逐渐成为了食品工业杀菌处理非热力杀菌研究的焦点之一。但是在较低的温度和压力下无法实现芽胞的高效、彻底灭活, 有研究显示结合 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 进行协同处理可实现对芽胞的有效灭活, 由于食品生产中化学性物质残留问题使用受到较大限制, 另外有研究显示过氧化氢添加到食品中也会改变部分食品的颜色<sup>[19]</sup>, 因此, 在实际工业生产中尚需加快更佳绿色替代品的研发与应用。在芽胞致死机理方面, 影响芽胞萌发的蛋白类物质、酶类物质以及对芽胞壁通透性、芽胞结构完整性、内容物泄漏等破坏效应还有待进一步深入系统研究。而且在实际工业生产中, 食品状态有液态的、固态的, 其穿透性、影响程度等方面, 均有待进一步研究确定<sup>[20,21]</sup>。

### 3.3 欧姆加热

欧姆加热利用食品物料的导电特性把物料作为电路中导体, 利用导电时电阻效应实现热处理效应、电流离子定向移动效应达成杀菌效应。欧姆加热杀菌具有不需要热交换表面、加热均匀性好、不存在温度梯度、快速积热效应等, 实现了对食品产品机械损伤小、产品质量保持效果好等优点<sup>[22]</sup>。欧姆加热通过温度升高、离子定向移动, 呈现出一定的杀菌效果, 可以有效延长产品货架期。具备能耗低、能效高、穿透力/渗透性强、加工范围广、成本低、投资回收快、绿色无污染等特点, 通过与无菌包装技术高效协同, 对于剪切力敏感、热稳定性差的产品极为适宜。虽然欧姆加热具有一系列的优点, 但是其推广和工业化应用尚存在较多问题, 如只能应用于匀质液体产品、耗电量较大、设备专一、效果不够优秀等缺陷, 此外人们对欧姆加热的高质量产品还没有充分的认识, 导致其商业应用不够成熟和广泛<sup>[23]</sup>。而对于非匀质食品、含颗粒液体食品, 如何实现均匀加热速度的控制、内部电流的均匀分布、颗粒物杀菌效果的准确评估、颗粒食品的输送与混合、产品的均匀装填等多种技术难题均有待进一步研究和解决, 也限

制了欧姆加热技术在此类产品中的应用<sup>[24]</sup>。

## 4 肉制品主要组分对嗜热脂肪芽孢杆菌耐热性影响研究

肉制品按照化学组成主要由水分、蛋白质、脂肪、碳水化合物、维生素、矿物质等物质组成, 当存储条件不当或者受到其他不良因素的影响, 肉类食品会出现色泽变化、风味变化、表面触觉状态变化等腐败变质特征。导致肉制品发生腐败变质的因素很多, 内在的因素主要是物质的氧化, 特别是脂肪氧化与酸败, 外在的主要包括微生物污染与增殖, 各种因素叠加效应及互相促进效应导致肉的腐败变质速度极快<sup>[25,26]</sup>。Blixt 等<sup>[27]</sup>明确指出微生物利用肉制品中的营养物质增殖代谢产生各种类型的代谢产物和分解产物, 形成各种不良风味而导致肉制品呈现腐败变质的特征。因此, 杀菌工艺对于保障肉制品品质安全和货架期安全及食品的工业化生产尤为重要。为了确保食品安全, 减少微生物导致的腐败变质, 传统食品加工过程主要通过热处理进行微生物控制。随着食品工业的发展, 科研及食品从业人员逐渐研发了多种新型杀菌技术, 但是热杀菌由于具有成本低廉、操作简便、简单易行、安全系数高等优点, 目前依然是广大食品企业应用最普遍的技术<sup>[28]</sup>。但高强度长时间的热杀菌也存在较多的缺陷, 如营养组分及热敏功能组分被破坏、产品色泽的不良变化、优良质构特性的丧失等<sup>[29]</sup>, 故而对产品品质有一定的负面影响。目前, 我国大部分肉品企业生产过程中, 产品还主要以真空包装结合高温杀菌形式呈现, 一般会协同添加防腐剂获得较长的货架期, 例如可以实现常温存放 6~18 个月, 但是由于高温长时间杀菌具有较多缺陷, 导致产品的口感和风味有不同程度的损失或破坏。因此, 最大限度的杀灭产品中的有害微生物, 达到产品品质指标要求水平是目前食品杀菌发展的重要方向<sup>[30]</sup>。

为了适应不良环境的生存条件, 食品中的微生物对热都具有不同的抵抗能力。经过热杀菌处理后, 产品中尤其是一些嗜热微生物、产芽孢微生物并未被杀死, 当然其残存数量和热杀菌的温度和时间高度相关。产芽孢细菌的高浓度营养细胞用 80 °C 的温度处理 10 min 左右也能将其全部致死。但对于大多数芽孢, 即使经过高温灭菌(120 °C 以上), 也依然不会被彻底杀死。因此, 与传统的热杀菌相比, 现在杀菌工艺发展趋势在于保证安全性的同时最大程度地减小对食品组分的破坏<sup>[31]</sup>。而热杀菌工艺对微生物细胞、芽孢的杀菌效果除了与杀菌温度和处理时间有关, 还与加热时所处的环境条件, 如 pH、水分活度、碳水化合物、脂类、蛋白质、无机盐等紧密相关。

经过众多科学研究发现, 不同的食品组分对于微生物的耐热性有着不同的影响。如有研究发现在营养培养基

中的嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢的耐热性要明显高于在蒸馏水中的耐热性<sup>[32]</sup>；而也有研究表明在 pH 5.0 时番茄汁中嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢的耐热性要低于在磷酸盐缓冲液中时的耐热性<sup>[33]</sup>。因此对于食品组分对芽孢耐热性的影响还缺乏统一的认识和深入的了解，尤其对于食品组分之间相互作用对嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢耐热性的影响更有待进一步的研究确定<sup>[34]</sup>。

#### 4.1 碳水化合物的影响

在研究大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌、嗜热链球菌、藤黄八叠球菌、肉毒梭状芽孢杆菌、生孢梭菌时发现，高浓度可溶性碳水化合物的存在可显著提高微生物细胞对热的耐受能力。例如 14% 以下的蔗糖溶液对脱脂乳中的金黄色葡萄球菌的耐热性几乎没有影响，但超过这个浓度，D 值就增大，在牛奶中 D 值为 5.34 min，而在牛奶中加入 57% 的蔗糖则 D 值变为了 42.53 min。对鸭沙门氏菌进行了各种糖类(5%)添加效果的研究结果表明，这些糖类对微生物细胞具有保护作用<sup>[35]</sup>，但也有其他研究结果不支持这一结论，显示葡萄糖和木糖不具有这种保护作用，甚至还有反作用<sup>[36]</sup>。因此，碳水化合物对芽孢耐热性能的影响规律及其机制有待深入系统研究。

#### 4.2 蛋白质的影响

关于食品基质中蛋白质的存在对微生物耐热性的影响研究较多，但其作用机制并不够明晰。目前有部分研究者认为，由于蛋白质分子之间互相结合交联成网络，影响了细胞的周围微环境，从而实现了不同程度的对微生物细胞耐热性保护作用<sup>[37]</sup>。Lopez 等<sup>[38]</sup>在研究微生物芽孢耐热性变化时发现，ATCC7946 与 RGI 1 在 pH 7.2 磷酸盐缓冲液中的 D121 分别为 3.3 min 和 1.1 min，而将产品中基质改为改性大豆蛋白时，其 D121 则分别改变为了 5.6 min 和 22.7 min，显示出改性大豆蛋白能显著提高微生物芽孢的热抵抗能力。也有研究结果显示牛肉膏、蛋白胨等类蛋白质物质对产气荚膜梭菌的芽孢具有不同程度的保护作用<sup>[39,40]</sup>。肉制品中组分也较为复杂，其蛋白质含量在 10%~20% 左右、脂肪多在 5%~25%，此外还含有一定量的矿物盐类及乳糖等成分，有学者将肉制品中各组分单一作用在芽孢上，结果发现在低浓度 Surfactin 时，低浓度 NaCl(1%) 有保护芽孢效应，而高浓度 NaCl 则有促进芽孢被灭活效应。而在高浓度 Surfactin 时，只有 9% NaCl 浓度显示出协同保护芽孢效应。蛋白质表现出一定程度的保护作用，而脂肪则只有在高浓度组(25%以上)才显示出对芽孢的保护效应<sup>[41]</sup>。

#### 4.3 脂类的影响

脂类物质对微生物细胞具有保护作用，研究表明从肉类罐头中分离出来的无芽孢细菌在脂肪介质中热杀菌的温度和时间均需要增加才能对其有效致死<sup>[42]</sup>。在大豆油、

橄榄油、液态石蜡中对蜡样芽孢杆菌、肉毒梭状芽孢杆菌 E 型芽孢的受热死亡过程进行了研究，结果表明，蜡样芽孢杆菌芽孢在磷酸缓冲液中，100 °C 时，D 值不超过 8 min，但在脂类物质中，其耐热性显著增强，121 °C 时，D 值为 7~30 min，而且还因脂类物质种类的不同表现出较大差异<sup>[43]</sup>。但若在脂类物质中加入微量的水，则显著促进了微生物热死亡速度。Samelis 等<sup>[44]</sup>提出脂肪对细胞耐热性保护作用仅仅是由于降低了水分活度的缘故，这种假设也被大豆油中芽孢耐热性变化研究结果所支持。但是有研究显示在相同水分活度下，改变脂类物质的种类后，对芽孢的耐热性能进行测定，结果发现芽孢耐热性并不一致，说明脂类物质对芽孢耐热性能的影响不一定是降低水分活度或者不仅仅是降低水分活度一中途径实现的<sup>[45]</sup>。

#### 4.4 无机盐的影响

无机盐对微生物的热响应和盐浓度关系较为密切，因此，盐类的存在对微生物热耐受具有保护作用也具有促进效应，此外和无机盐的种类、微生物菌种也有较大关系。盐类对微生物热耐受性产生的影响效应主要有以下几方面<sup>[46,47]</sup>：

无机盐的浓度较为适宜，将细胞内外渗透压调节得恰到好处，从而有效减少了一些重要、主要成分在加热过程中向细胞外的渗出，达成了对细胞热耐受的保护效应；不同的盐类对基质的离子强度、pH 值影响不同，对细胞内 pH 值的影响也不相同；一般来讲无机盐中的二价阳离子(如  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等)能够与蛋白质结合形成复合体，通过提高蛋白质的热稳定性实现芽孢耐热性的增强；而 NaCl、KCl 类型的盐类具有较强的蛋白质水合效应，可提高蛋白质或者酶蛋白的稳定性，从而改变芽孢的耐热能力；当盐浓度提高较大时，可使水分活度大大降低，通过水分活度的变化改变芽孢对热的耐受能力。因此，无机盐对芽孢耐热性的影响是多方面的也是双向的。

NaCl 是食品中使用最多的盐类，关于其对微生物耐热性的影响特点、影响规律研究报道较多，研究表明其对微生物耐热性的影响和微生物的种类、NaCl 浓度、渗透压、pH 值、食品状态及组成等因素有关。一般来讲，在较低 NaCl 浓度下，对微生物细胞显示具有保护效应，而当浓度提高到 5% 以上时则使微生物细胞耐热性减弱，但是当浓度进一步增加到 10% 左右时，其影响又反而减小<sup>[48]</sup>。

例如嗜热脂肪芽孢杆菌的芽孢，当 NaCl 的浓度按 2%、4%、8% 依次递增时，其 115 °C 时的 D 值有下降的趋势。而王涛研究表明<sup>[49]</sup>，NaCl 浓度从 2% 增加到 8% 时对枯草芽孢杆菌芽孢耐热性基本没有影响，但是却能显著降低嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢的耐热性。Briggs 等<sup>[50]</sup>研究表明 NaCl 浓度在 0.06% 时就能有效降低芽孢的耐热性，并且在各种缓冲液中，只有磷酸盐缓冲液浓度增大，D 值增大，其

他缓冲液几乎没有影响。

## 5 小 结

目前, 国内外尚没有对嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢物理化学多维控制技术、各种食品组分影响效应及程度等方面较为系统化的研究。本文通过综述不同的食品、不同的食品组分, 结合芽孢控制的不同技术、不同技术参数, 希望能够为从事于食品微生物安全控制技术研究的科学研究人员提供一定的科研思路和思考, 同时也希望能够为食品企业生产技术人员提供一定的技术参考和借鉴, 为确保食品的微生物安全, 延长产品货架期, 降低消费者饮食安全风险提供帮助。

## 参考文献

- [1] Song S, Hua C, Zhao F, *et al.* Purified dietary red and white meat proteins show beneficial effects on growth and metabolism of young rats compared to casein and soy protein [J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(38): 9942–9951.
- [2] He Y, Li Y, Yang X, *et al.* The dietary transition and its association with cardiometabolic mortality among Chinese adults, 1982–2012: A cross-sectional population-based study [J]. *Lancet Diabetes Endocrinol*, 2019, 7(7): 540–548.
- [3] 钟飞. 当前肉类食品安全存在的主要问题[N]. *中国畜牧兽医报*, 2005-8-21(7).  
Zhong F. Main problems of meat food safety [N]. *China Animal Husbandry and Veterinary Journal*, 2005-8-21(7).
- [4] Sun QL, Sun YY, Zhang J, *et al.* High temperature-induced proteomic and metabolomic profiles of a thermophilic *Bacillus manuseensis* isolated from the deep-sea hydrothermal field of Manus Basin [J]. *J Proteom*, 2019, 203: 103380.
- [5] Osman KM, Kappel AD, Ahmed O, *et al.* Poultry and beef meat as potential seedbeds for antimicrobial resistant enterotoxigenic *Bacillus* species: A materializing epidemiological and potential severe health hazard [J]. *Sci Reports*, 2018, 8(1): 11600.
- [6] Ahn J, Lee HY, Balasubramaniam VM. Inactivation of *Geobacillus stearothermophilus* spores in low-acid foods by pressure-assisted thermal processing [J]. *J Sci Food Agric*, 2015, 95(1): 174–178.
- [7] Wang BS, Li BS, Du JZ, *et al.* Combined pressure-thermal inactivation effect on spores in lu-wei beef—a traditional Chinese meat product [J]. *J Appl Microbiol*, 2015, 119(2): 446–454.
- [8] Cook AM, Gilbert RJ. Factors affecting the heat resistance of *Bacillus stearothermophilus* spores [J]. *Int J Food Sci Technol*, 1968, 3(3): 285.
- [9] GB 15981-1995 消毒与灭菌效果的评价方法与标准[S].  
GB 15981-1995 Methods and standards for evaluation of disinfection and sterilization effect [S].
- [10] 卫生部卫生法制与监督司. 消毒技术规范[S].  
Department of health legal system and supervision and ministry of health. Technical specification for disinfection [S].
- [11] 曾庆孝. 食品加工与保存原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.  
Zeng QX. Principles of food processing and preservation [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [12] Den-Besten HMW, Wells-Bennik MHJ, Zwietering MH. Natural diversity in heat resistance of bacteria and bacterial spores: Impact on food safety and quality [J]. *Rev Food Sci Technol*, 2018, 9(1): 383–410.
- [13] Georget E, Miller B, Callanan M, *et al.* (Ultra) high pressure homogenization for continuous high pressure sterilization of pumpable foods - a review [J]. *Front Nutr*, 2014, 1: 15.
- [14] Liang D, Zhang L, Wang X, *et al.* Building of pressure-assisted ultra-high temperature system and its inactivation of bacterial spores [J]. *Front Microbiol*, 2019, 10: 1275.
- [15] Fan L, Ismail BB, Hou F, *et al.* Thermosonication damages the inner membrane of *Bacillus subtilis* spores and impels their inactivation [J]. *Food Res Inter*, 2019, 125: 108514.
- [16] Burgess SA, Lindsay D, Flint SH. *Thermophilic bacilli* and their importance in dairy processing [J]. *Inter J Food Microbiol*, 2010, 144(2): 215–225.
- [17] Ju XR, Gao YL, Yao ML, *et al.* Response of *Bacillus cereus* spores to high hydrostatic pressure and moderate heat [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2009, 41(10): 2104–2112.
- [18] Bednarski DM, Lantz EE, Bobst CE, *et al.* Sterilization of epidermal growth factor with supercritical carbon dioxide and peracetic acid; analysis of changes at the amino acid and protein level [J]. *Biochim Et Biophys Acta*, 1868, (2): 140334.
- [19] 耿乙文, 哈益明, 靳婧, 等. 过氧化氢改性苹果渣膳食纤维的研究[J]. *中国农业科学*, 2015, (19): 3979–3988.  
Geng YW, Ha YM, Jin J, *et al.* Apple pomace dietary fibre modification by hydrogen peroxide [J]. *Chin Agric Sci*, 2015, (19): 3979–3988.
- [20] Puligundla P, Mok C. Inactivation of spores by nonthermal plasmas [J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 2018, 34(10): 143.
- [21] Lv R, Zou M, Chantapakul T, *et al.* Effect of ultrasonication and thermal and pressure treatments, individually and combined, on inactivation of *Bacillus cereus* spores [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2019, 103(5): 2329–2338.
- [22] Boldaji MT, Borghei AM, Beheshti B, *et al.* The process of producing tomato paste by ohmic heating method [J]. *J Food Sci Technol*, 2015, 52(6): 3598–3606.
- [23] Cho E, Kim S, Kang D. Inactivation kinetics and membrane potential of pathogens in soybean curd subjected to pulsed ohmic heating depending on applied voltage and duty ratio [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2020, 86(14): e656.
- [24] 刘琳. 生鲜调理鸡肉保鲜技术研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.  
Liu L. study on preservation technology of fresh and conditioned chicken [D]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [25] 郭淑珍, 哈益明, 刘书亮, 等. 影响熟肉制品辐照所致脂肪氧化因素分析[J]. *食品科技*, 2006, (9): 130–133.  
Guo SZ, Ha YM, Liu SL, *et al.* Analysis of factors affecting lipid oxidation induced by irradiation in cooked meat products [J]. *Food Sci Technol*, 2006, (9): 130–133.
- [26] Dominguez SA, Schaffner DW. Development and validation of a mathematical model to describe the growth of *Pseudomonas* spp. in raw poultry stored under aerobic conditions [J]. *Inter J Food Microbiol*, 2007, 120(3): 287–295.
- [27] Blixt Y, Borch E. Comparison of shelf life of vacuum-packed pork and bee

- [J]. *Meat Sci*, 2002, 60: 371–378.
- [28] Wang MS, Wang LH, Bekhit AEDA, *et al.* A review of sublethal effects of pulsed electric field on cells in food processing [J]. *J Food Eng*, 2018, 223: 32–41.
- [29] Makroo HA, Rastogi NK, Srivastava B. Ohmic heating assisted inactivation of enzymes and microorganisms in foods: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 97: 451–465.
- [30] Marquez O, Mittal GS, Griffiths MW. Destruction and inhibition of bacterial spores by high voltage pulsed electric field [J]. *J Food Sci*, 2010, 62(2): 399–401.
- [31] 周卫民, 杨世忠, 牟伯中. *Geobacillus* 研究进展[J]. 微生物学杂志, 2005, 25(3): 46–49.  
Zhou WM, Yang SZ, Mou BZ. Research progress of *Geobacillus* [J]. *J Microbiol*, 2005, 25 (3): 46–49
- [32] Mathys A, Heinz V, Schwartz FH, *et al.* Impact of agglomeration on the quantitative assessment of *Bacillus stearothermophilus* heat inactivation [J]. *J Food Sci*, 2007, 81(2): 380–387.
- [33] Donnelly LS, Busta FF. Heat resistance of *Desulfotomaculum nigrificans* spores in soy protein infant formula preparations [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1980, 40(4): 721.
- [34] 李玉峰, 马涛. 食品杀菌新技术[J]. 农产品加工学刊, 2007, 30(1): 89–91.  
Li YF, Ma T. New technology of food sterilization [J]. *Farm Prod Process*, 2007, 30(1): 89–91.
- [35] 凡文. 包装食品杀菌新技术的应用[J]. 包装世界, 2005, (2): 55.  
Fan W. Application of new sterilization technology for packaged food [J]. *Packag World*, 2005, (2): 55.
- [36] 徐怀德, 王云阳. 食品杀菌新技术[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2004.  
Xu HD, Wang YY. New technology of food sterilization [M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 2004.
- [37] Eota FX, Michiel L. Heat-induced resistance of *Bacillus stearothermophilus* spores [J]. *Lett Appl Microbiol*, 1988, 6(3): 43–45.
- [38] Lopez M, Mazas M, GonzBlez I. Thermal resistance of *Bacillus stearothermophilus* spores in different heating systems containing some approved food additives [J]. *Lett Appl Microbiol*, 1996, 23(3): 187–191.
- [39] Donnelly LS, Busta FF. Heat resistance of *Desulfotomaculum nigrificans* spores in soy protein infant formula preparations [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1980, 40(4): 721–725.
- [40] 杨家蕾. 低温重组酱肉加工工艺优化及微波杀菌工艺的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.  
Yang JL. Study on Optimization of processing technology and microwave sterilization technology of low temperature recombinant soy sauce meat [D]. Chongqing: Southwest University, 2010.
- [41] Nielsen HJS, Zeuthen P. Influence of lactic acid bacteria and the overall flora on development of pathogenic bacteria in vacuum-packed, cooked emulsion-style sausage [J]. *J Food Protect*, 1985, 48(1): 28–34.
- [42] Jo C, Lee JI, Ahn DU. Lipid oxidation, color changes and volatiles production in irradiated pork sausage with different fat content and packaging during storage [J]. *Meat Sci*, 1999, 51(4): 355–361.
- [43] 孙翠焕, 王艳华, 朱万芹, 等. 肉制品腐败变质原因分析[J]. 微生物学杂志, 2011, 31(3): 106–109.  
Sun CH, Wang YH, Zhu WQ, *et al.* Analysis of spoilage of meat products [J]. *J Microbiol*, 2011, 31(3): 106–109.
- [44] Samelis J, Kakouri A, Georgiadou KG, *et al.* Evaluation of the extent and type of bacterial contamination at different stages of processing of cooked ham [J]. *J Appl Microbiol*, 2010, 84(4): 649–660.
- [45] 黄现青, 乔明武, 宋莲军, 等. 肉制品主要组分对 Surfactin 抑制蜡样芽孢杆菌芽孢效果的影响研究[J]. 肉类工业, 2020, (4): 40–43, 48.  
Huang XQ, Qiao MW, Song LJ, *et al.* Study on the effect of main components of meat products on the inhibition effect of surfactin on *Bacillus cereus* spores [J]. *Meat Ind*, 2020, (4): 40–43, 48.
- [46] Samelis J, Kakouri A, Rementzis J. Selective effect of the product type and the packaging conditions on the species of lactic acid bacteria dominating the spoilage microbial association of cooked meats at 4 °C [J]. *Food Microbiol*, 2000, 17(3): 329–340.
- [47] Kumar M, Flint SH, Palmer JS, *et al.* The effect of phosphate on the heat resistance of spores of dairy isolates of *Geobacillus stearothermophilus* [J]. *Inter J Food Microbiol*, 2019, 309: 108334.
- [48] 李晓波. 肉及肉制品中的细菌[J]. 肉类研究, 2009, (3): 42–46.  
Li XB. Bacteria in meat and meat products [J]. *Meat Res*, 2009, (3): 42–46.
- [49] 王涛. 食品组分与抑菌剂对嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢耐热性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2011.  
Wang T. Effects of food components and antimicrobial agents on heat resistance of *Bacillus stearothermophilus* spores [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011
- [50] Briggs A, Yazdanyd S. Effect of sodium chloride on the heat and radiation resistance and on the recovery of heated or irradiated spores of the *Genus bacillus* [J]. *J Appl Microbiol*, 1970, 33(4): 621–632.

(责任编辑: 韩晓红)

## 作者简介



马相杰, 高级工程师, 主要研究方向为肉制品加工与品质控制。

E-mail: zjs4567@163.com



黄现青, 博士, 教授, 主要研究方向为食品营养与微生物安全。

E-mail: hxq8210@126.com