

低温等离子体在食品中杀灭微生物与降解真菌毒素研究进展

周煜¹, 蔡瑞², 岳田利³, 袁亚宏⁴, 王周利^{1,*}

(1. 西北农林科技大学 食品科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 农业部农产品质量安全风险评估实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 国家杨凌农业综合试验工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 低温等离子体作为一种新型的食品加工处理方法, 在提高产品安全性、延长食品保质期方面具有广阔的应用前景。低温等离子体的作用机制决定其可以在低温状态下快速杀灭微生物、降解各类真菌毒素且不会留下任何已知的化学残留物。因此, 该文重点概述低温等离子体的作用机理与方式, 对微生物和真菌毒素的杀灭与降解效果及作用机制, 并总结其在新鲜农产品、液体食品、粮食和肉类等多个产业中杀菌及降解真菌毒素方面的研究进展, 以期为现有研究工作提供方法与思路。

关键词: 低温等离子体; 杀灭; 降解; 微生物; 真菌毒素

Research Progress of Cold Plasma in Killing Microorganisms and Degrading Mycotoxins in Food

ZHOU Yu¹, CAI Rui², YUE Tian-li³, YUAN Ya-hong⁴, WANG Zhou-li^{1,*}

(1. College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Agro-products (YangLing), Ministry of Agriculture, Yangling 712100, Shaanxi, China; 3. National Engineering Research Center of Agriculture Integration Test (Yangling), Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: As a new type of food processing method, cold plasma has broad application prospects in improving product safety and extending food shelf life. The mechanism of action of the cold plasma determines that it can rapidly kill microorganisms at low temperatures, degrade various mycotoxins and leave no known chemical residues. Therefore, this paper focused on the mechanism and mode of action of low temperature cold plasma, the killing and degradation effects and mechanisms of microbes and mycotoxins, and it was used in multiple industries such as fresh agricultural products, liquid foods, cereals and meat. Research progress in sterilization and degradation of mycotoxins provided a new view and idea for the control of bacteria and mycotoxins in food samples.

Key words: cold plasma; inactivate; detoxification; microorganisms; mycotoxins

引文格式:

周煜, 蔡瑞, 岳田利, 等. 低温等离子体在食品中杀灭微生物与降解真菌毒素研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(14): 209-218

ZHOU Yu, CAI Rui, YUE Tianli, et al. Research Progress of Cold Plasma in Killing Microorganisms and Degrading Mycotoxins in Food[J]. Food Research and Development, 2020, 41(14): 209-218

基金项目: 国家十三五重点研发计划课题(2018YFC1602203)

作者简介: 周煜(1999—), 女(汉), 本科, 研究方向: 农产品加工与安全控制。

* 通信作者

微生物及真菌毒素是谷物、饲料、果蔬及其加工制品中无法避免的污染物, 对食品安全、动物和人体健康等构成了严重威胁, 也影响了相关产品的出口贸易和流通, 阻碍了产业发展。随着经济贸易的全球化,

由微生物污染及真菌毒素引起的食品安全危害事件不断加剧,对食品行业产生了重大影响,严重阻碍了产品的国际化贸易和产业发展。因此,研究建立高效的杀菌技术与毒素降解方法至关重要。低温等离子体作为一种新型的非热加工处理方式,由于对微生物灭活效果显著,同时能够保证新鲜农产品品质而成为研究热点^[1-2]。

本文主要综述低温等离子体处理在食品微生物的灭活及真菌毒素降解及应用等方面的研究进展,结构如下:重点概述低温等离子体的作用机理与方式;基于理论模型和实际样品的微生物和真菌毒素的杀灭与降解效果及作用机制;低温等离子体技术在新鲜农产品、液体食品、粮食和肉类等多个产业中杀菌及降解真菌毒素方面的研究进展,以期为现有研究工作提供方法与思路。

1 等离子体简介

等离子体(plasma)是一种正离子和电子密度大致相等的电离气体,由离子、电子以及未电离的中性粒子集合组成,整体呈电中性的物质状态,被称为是除固态、液态、气态之外的第4状态。根据计算,宇宙中99.9%的物质处于等离子体状态,自然界中常见的等离子体如太阳、电离层、极光、雷电等;人工合成的等离子体主要为气体放电法产生的荧光灯、霓虹灯、电弧焊等^[3]。等离子体的应用在生活中随处可见,其与生活息息相关。

1.1 等离子体的产生及分类

等离子体的产生可表述为中性气体被施加足够的能量后气体分子发生电离而形成的混合物。通常气体中存在一定比例的原子(或分子)发生电离,因此可产生一定数量的初级电子。这些电子在外部电场的作用下获得能量,当其能量高于气体原子的电离电势时,电子与原子间的非弹性碰撞将导致电离,从而产生离子和电子,电子与周围的原子或分子继续发生碰撞,产生活性更高的激发态原子、离子以及自由电子,直至整个系统受带电离子的支配,此时的电离气体就被称为等离子体。等离子体产生示意图见图1。

等离子体主要含有带电粒子(电子、离子)和不带电粒子(分子、激发态原子、亚稳态原子、自由基)以及紫外线、 γ 射线、 β 射线等,其可以在较宽的气压和温度范围内产生,也可用微波、光脉冲、交流电和直流电等多种激发源产生^[4-5]。其中高电压放电是获得等离子体最普遍的途径。在两个电极之间施加高电压后,产生一定的电场强度分布,其间的气体被电离从而产生

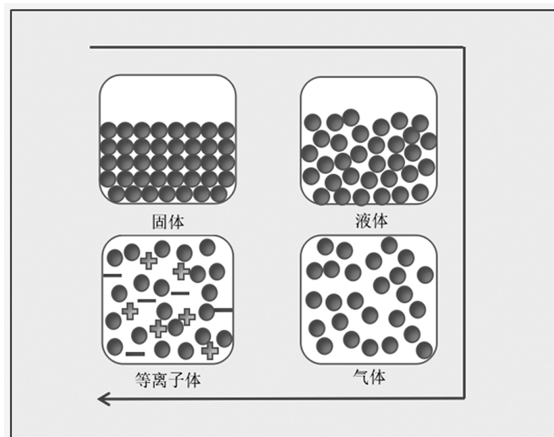


图1 等离子体产生示意图

Fig.1 Schematic diagram of plasma generation

放电等离子体。气体的电离程度与电场强度的大小以及高压电源的功率等因素有关^[6]。

根据电子温度和离子温度之间的关系,等离子体可以分为平衡等离子体和非平衡等离子体两大类。处于热力学平衡状态的等离子体,其电子和离子具有相似的温度和能量,这些等离子体的整体温度通常在 10^4 K左右,电离度(离子数超过等离子体总粒子数)接近或等于100%;相反,处于热力学非平衡态的等离子体,其中电子和离子具有不同的温度。电子的温度在 10^4 K左右,而离子和中性粒子的温度常常接近室温。作为一种活性气体介质,这些非热等离子体具有相对较低的电离度,可以安全使用且不会对周围的材料造成热损伤^[7]。同完全电离的高温等离子体相比,低温等离子体不仅包括电子、离子,还存在负离子(原子或分子为基体)、分子、自由基、激发态原子、光子。正由于这些化学活性粒子的存在,使低温等离子体成为能完成多种化学反应过程的系统^[8]。

另外,等离子体中可用于电离的气体种类很多,如空气、氮气或者含有一定比例的惰性气体的混合物,例如氦气、氩气或氖气。这种广泛的涉及范围表明了低温等离子体系统的灵活性以及新形式的低温等离子体系统继续建立和评估的程度。当在进料气体中使用氧气时,低温等离子体的抗微生物功效趋于增强。与使用空气或其他氮和氧的混合物的冷等离子体系统相比,使用氮的低温等离子体系统在商业规模上运行要昂贵得多。即使用作整体混合气体的次要组分,这些气体之间的价格差异及灭菌效果也是影响扩大到商业加工的重要因素^[9]。

1.2 等离子体源

低温等离子体源的本质是向不同中性气体施加电场从而产生活性粒子以满足预期应用。由于食品加

工对灭菌技术是否影响食品感官指标和营养成分具有严格的要求,一般要求等离子灭菌在常温、常压下进行,这样才有工业化的价值。能在常压下产生低温等离子体的放电方式有直流辉光放电(glow discharges, DC)、电晕放电(corona discharge plasmas, CD)、介质阻挡放电(dielectric barrier discharges plasmas, DBD)、射频放电(radio frequency discharge plasmas, RF)、局部放电(partial discharges, PD)等^[10-11]。

等离子体源的设计也随着时间的推移而发展。目前也开发获得了一些新颖的等离子体源,如表面波等

离子体源、中性环路放电等离子体源,但还未进行实际应用^[12]。因此,探索并发展适合的等离子体源对其在食品工业中的应用具有重要的意义。

2 等离子体对微生物的杀灭机制

目前,对于等离子体灭活微生物的机制尚未彻底解析。诸多研究提出了不同的灭活机制,但均未得到证实。等离子体灭菌中微生物种类、性质(如耐酸性、耐热性等)、等离子体源、食品类型等诸多因素都会影响杀菌效果。低温等离子体灭菌机理见图2。

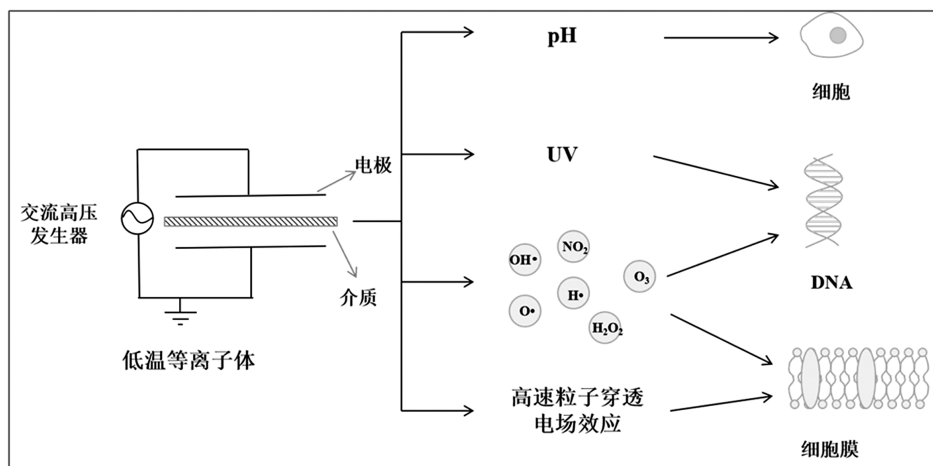


图2 低温等离子体灭菌机理

Fig.2 Sterilization mechanism of cold plasma

在等离子体中,一般认为高能电子、带电粒子、紫外线、氧自由基等物质与微生物的灭活有关:

1)高速粒子的穿透效应:等离子体装置持续不断的产生高浓度的正负离子,这些离子在微生物表面产生的剪切力大于其细胞膜表面张力,在能量释放的过程中,细菌的细胞壁因此而受到严重破坏,正离子穿透多孔的细胞壁,渗透至细胞内部,破坏细胞电解质,损害细胞膜,导致细胞死亡^[13]。

2)电场效应:当平均电场强度超过一定范围时,细菌细胞膜会被击穿。细胞膜很薄,当作用在细胞膜上的电场强度很高,将使细胞出现不可恢复的击穿,导致细菌死亡。但该机制仍存在争议,马跃等研究认为电场作用不是细菌灭活的主要因素,等离子体中的氧自由基可以破坏细胞壁和细胞膜,以及细胞质中的蛋白质和核酸,从而起到杀菌的效果^[14]。

3)紫外光作用:等离子体发生过程中伴随着光辐射,包括紫外线与可见光,其发射光谱与气体介质成分及其电离后的活性粒子种类密切相关。紫外线可影响细菌DNA链中的胸腺嘧啶碱基的二聚作用,这抑制了细菌正常复制的能力。但由于紫外线在常压空气和

水中很容易被介质吸收,故作用有限^[15-16]。

4)pH值变化:等离子体杀藻过程中pH值和酸度对细胞形态具有明显的破坏作用^[6]。但May KORACHI认为由于等离子体反应引起酸度水平增加不是细菌细胞死亡的原因。等离子体处理后观察到内容物的DNA显示扩增序列的恶化,表明可能发生DNA降解,认为等离子体放电产生的活性物质影响DNA导致细胞死亡为主要原因^[17]。同样,李娅西等研究发现pH值在等离子体微生物灭活中不起主要作用,分析后认为等离子体中的带电粒子和氧自由基(reactive oxygen species, ROS)才可能是导致菌类灭活的主要因素^[18]。

5)高能粒子和活性自由基的作用:高压放电非平衡等离子体中,反应物质通过电子冲击和离解等多种碰撞途径产生,使等离子体中含有大量原子氧(O)、臭氧(O₃)、羟基(OH)、NO、NO₂等活性氧和活性氮(reactive nitrogen species, RNS),这些活性物质对微生物细胞特别是其细胞膜具有直接影响。细胞膜为磷脂双分子层,其重要组分之一是不饱和脂肪酸,可赋予膜凝胶状性质,允许生化副产物跨膜传输。由于不饱和脂肪酸易受羟基自由基(·OH)的攻击,因此羟基自由

的存在可能会影响膜脂阻止离子和极性化合物跨膜运输的功能。另外,嵌入磷脂双分子层的蛋白质也控制各种化合物的通过。蛋白质是氨基酸的线性聚合物,氨基酸在富含自由基的等离子体环境中同样易于氧化变性。因此,等离子体产生的活性物质会极大地损害微生物细胞的完整性,易与细菌体内蛋白质和核酸发生反应,且易干扰细胞的呼吸作用,致细菌死亡^[16]。

刘红霞等通过电镜观察到,等离子体处理后细菌细胞壁和细胞膜破裂,造成细胞质泄漏。他们认为,强氧化性的氧自由基易与细胞作用,通过氧化作用破坏细胞壁和细胞膜,使细胞质泄漏。随着处理时间的增加,氧自由基不仅与细胞壁和细胞膜反应,还与细胞质中的物质反应,如破坏细胞质中的蛋白质和核酸^[19]。许子牧在分子生物层面研究了低温等离子体灭菌的机理,通过试验同样证明等离子体处理可能会影响细菌中与氧化应激反应、生物膜形成、抗生素抵抗和DNA损伤保护修复相关的基因表达,并且导致细菌内ROS的生成,从而诱导菌内氧化压力上升,当超过细菌氧化应激反应阈值时造成细菌失活^[20]。Nataša Hojnik等发现,等离子体中存在的各类自由基可以相互作用,产生ROS和RNS。在活细胞中,这些物质首先与细胞膜反应,然后进入细胞对细胞间成分如细胞器和生物分子(DNA、RNA和蛋白质等)造成损害。特别是当活性物质与水相互作用,将导致对细胞有害的·OH的形成,形成于DNA分子周围的水合层中的·OH能够造成90%的DNA损伤,随后·OH与附近的有机物反应,导致链式氧化,从而严重破坏DNA分子以及细胞膜和其他细胞成分。同样,当真菌毒素暴露于等离子体产生的ROS和RNS时,它们会通过次级反应直接或间接分解,降低其毒性^[2,21]。综上所述,以上研究均突出了低温等离子体灭菌中自由基的主导地位,其主要机理为自由基对细胞膜及细胞壁的损伤,并进入细胞影响DNA、RNA及蛋白质的正常生理活性,从而杀灭微生物。

食品灭菌除了需要杀灭微生物活体之外,还不得不考虑抗逆性极强的细菌休眠体——芽孢。在环境适宜时,其可重新萌发成为营养细胞,造成食品污染,影响食品的贮藏性。芽孢含水量极低,抗逆性强,能经受高温、紫外线、电离辐射以及多种化学物质灭杀等。石兴民等采用介质阻挡放电大气压低温等离子体杀灭枯草杆菌黑色变种芽孢,发现低温等离子体对细菌芽孢有良好的杀灭效果,且具有时间剂量依赖性。带电粒子的击穿作用和ROS的氧化作用可能在杀灭芽孢的过程中起主要作用,而高压电场效应可以忽略不计^[22]。

除此之外,等离子体处理对孢子也具有一定杀灭作用。孢子的存活率直接取决于其保护层的完整性,由于含水量低,孢子可有效抵抗高温。但在空气等离子体中,氧自由基提供的氧化环境可使孢子表面的蛋白质变性。当外壳失去其完整性时,孢子的核心易受自由基的攻击。造成孢子致死损伤的另一个机制可能是孢子表面带电粒子的积累和孢子表面上自由基的连续轰击,导致细胞壁破裂^[23]。

目前的研究大都认为低温等离子体杀灭微生物活体、芽孢、孢子等均依赖于氧自由基的强氧化作用,但这一说法仍旧较为局限,等离子体中的丰富活性物质的作用及交互作用有待研究,这对未来实践应用具有重要的参考价值。

3 等离子体技术在食品杀菌中的应用

3.1 新鲜农产品

新鲜农产品由田间采收直接与田间土壤、空气、昆虫等接触,受真菌污染的可能性极大;且新鲜农产品的品质是产品质量的基础,因此控制新鲜农产品中的微生物及真菌毒素以保障食品安全对于食品工业发展来说至关重要。下文将综述低温等离子体灭活新鲜农产品中微生物的广阔前景。

Daniela等研究了大气压低温等离子体技术(atmospheric pressure cold plasma, APCP)在生菜、胡萝卜、西红柿中的灭菌效果,发现APCP对新鲜农产品灭菌效果与其表面状态有显著关系。他们发现胡萝卜中大肠杆菌灭活大多 $\leq 0.5 \log \text{CFU/g}$,主要因为胡萝卜具有高度多孔的表面,细菌可以在其中迁移从而免受等离子体作用。同样,用APCP处理生菜,由于其叶状结构,微生物能够在叶片结构内迁移因此略具防止等离子体处理的保护作用。而当APCP作用于番茄表面,其光滑和均匀的表面不能保护微生物免受侵害,导致细胞的失活^[24]。R.X. Wang等的研究表明,等离子体灭活效果与样品表面水分含量有显著关系。用等离子体处理30 s可使胡萝卜片上90%的细菌被灭活。相反,相同情况下黄瓜片上仅约60%的细菌被灭活。至于梨片,微生物灭活效果甚至更低,只有约40%被灭活。处理1 min后,黄瓜和梨片上的细菌灭活率达到80%以上,进一步的等离子体处理导致存活细菌的进一步减少,但灭活率的变化显著降低。4 min等离子体处理使胡萝卜片上的所有病原体失活。然而,梨和黄瓜片上大约10%的沙门氏菌仍存活。他们将灭活效率的差异归因于表面液态水的差异,或更可能归因于从组织内部流出的汁液^[25]。底物形貌对细菌灭活效果有重要影

响。食物结构如莴苣的气孔,草莓表面的凸起和马铃薯组织的真核细胞壁可能产生物理屏障,从而保护细菌细胞。此外,食品表面的固有特征如蜡状表皮或其他组分也可有助于保护黏附的细菌^[7]。在食品生产中应用等离子体灭菌时,应根据原料性质设置适合的处理工艺参数或利用预处理技术以保证最佳灭菌效果。

目前工业上鲜切果蔬多采用氯消毒替代防腐剂,但其潜在危害还未有明确报道。而等离子体在满足灭活新鲜农产品上微生物条件的同时,对产品质量的影响较小,且安全可控,因此在食品工业中将具广阔的发展前景。Silvia Tappi 等评估了介质阻挡放电等离子体处理对储存期间鲜切瓜稳定性的影响,评估其质量参数、代谢和微生物指标。试验结果表明在鲜切瓜保质期限明显增长的同时,其定性参数(可滴定酸度、可溶性固形物含量、干物质、颜色、质地)仅受等离子体处理的微弱影响^[26];Ah Young Song 等研究低温等离子体处理(cold plasma treatment, CPT)对食源性病原体的抑制和对新鲜生菜贮藏时间的延长作用,结果表明, CPT 抑制生菜上的病原体可达 2.8 log CFU/g 的效果。N₂-CPT 对大肠杆菌的生长产生抑制作用,但在储存期间不影响生菜的理化性质和感官品质。CPT 显示出在不损失新鲜蔬菜理化或感官特性的情况下改善其微生物安全的潜力^[27]。王卓等研究了介质阻挡放电低温等离子体对蓝莓果实的杀菌效果,发现在 45 kV 工作电压下处理蓝莓 50 s,可使细菌和真菌数量分别下降 1.75 log(CFU/g)和 1.77 log(CFU/g),降低了蓝莓腐烂的发生,同时诱导了蓝莓抗氧化活力,有利于提高蓝莓贮藏期间的品质^[28]。总体而言,低温等离子技术为食物链中的多个应用点提供了机会,同时确保了微生物安全和化学安全。

3.2 液体食品

基于对天然和营养食品日益增长的需求,并伴随食品加工和包装技术的不断发展,液体食品愈来愈受广大消费者喜爱。为使这些食品具有优良的感官品质及营养成分,新的灭菌技术不断发展^[29]。目前的工业普遍应用的杀菌方法如巴氏杀菌法、高温瞬时灭菌法等均基于热处理,虽然能够满足灭菌要求,但在灭菌过程中往往易引起食品品质的变化。现存的替代方案主要有:脉冲电场(pulsed electric fields, PEF)、辐射、UV 光、高压、冻融。这些方法由于对食品品质的保护不足和加工成本过高而存在缺陷。因此,需要寻求一种新的替代方案。

Tyczkowska-Sieron E 等研究了 20 株从患有临床或亚临床乳腺炎的奶牛采集的牛奶样品中分离出的

中型无绿藻(*P. zopfii*)。研究证实每种菌株均显示出对低温大气等离子体的高度易感性,开辟了利用低温等离子体对抗 *P. zopfii* 的新方法^[30]。当奶牛摄食由真菌毒素污染的饲料后,可能会导致牛奶产量的下降以及乳成分的改变,并使牛奶中含有真菌毒素。牛奶中真菌毒素的存在严重威胁着人类和动物的健康^[31]。李娅西等研究发现低温等离子体可以快速有效地杀灭橙汁(OJ)中的微生物(金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和白色念珠菌)以延长橙汁储存的货架期,而且对橙汁营养及理化性质的影响甚微^[18]。Lei Xu 等研究探讨高压大气低温等离子体(high voltage atmospheric cold plasma, HVACP)对 OJ 中鼠伤寒沙门氏菌(*S. enterica*)的灭活效果。结果表明 HVACP 可以有效地灭活 OJ 中的沙门氏菌,同时对橙汁质量影响最小^[32]。Pankaj 等在 80 kV 下使用 HVACP 对葡萄汁进行 4 min 处理,结果显示酿酒酵母减少 7.4 log CFU/mL。随后对葡萄汁各项指标进行测定,发现果汁的 pH 值、酸度和电导率没有任何显著的变化($P>0.05$);非酶促褐变导致的总色差较低;总酚、总黄酮、DPPH 自由基清除和抗氧化能力降低,与热巴氏灭菌后的结果相当^[33]。Livia M. N. Paixão 等研究辉光放电等离子体对巴西金桔果汁品质的影响,在处理前后测定样品的理化性质和生物活性物质。结果显示维生素 C 没有显著变化,总酚、抗氧化活性和 B 族维生素增加,产品的颜色几乎不受影响^[34]。由此可见,低温等离子技术不仅可有效灭活液体食品中的微生物,保障食品安全,延长货架期,并且在处理过程中对食品营养成分和活性物质的影响极小,相较于传统灭菌方式可有效保存食品中的营养物质,未来在食品工业中的应用发展潜力巨大。

但低温等离子体技术针对不同产品有不同的工艺参数,生产者应根据实际情况加以应用。林向辉等研究表明,随着循环次数、橙汁温度及电压的升高,杀菌效果和酶的钝化作用逐渐增强。与金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌相比,大肠杆菌和沙门氏菌较易被杀灭^[35]。Björn Surowsky 等研究了低温等离子体灭活苹果汁中弗氏柠檬酸杆菌(*C. freundii*)的能力。在氩气和 0.1 % 氧气等离子体中暴露 480 s 并储存 24 h 后,苹果汁中的 *C. freundii* 减少约 5 个数量级。另外,研究发现细菌细胞和等离子体之间的直接接触不是实现灭活所必需的,液体中等离子体产生的化合物,例如过氧化氢和氢过氧自由基是微生物灭活的关键所在^[29]。食品行业需根据特定产品的加工工艺设计等离子体杀菌工艺参数以有效保障产品品质。

3.3 肉及肉制品

肉类食品是人们日常生活中必不可少的食品,由于其含有丰富的营养成分,在加工、贮藏、运输、销售过程当中极易遭受微生物的污染而导致产品的腐败变质,不仅造成了巨大的经济损失和严重的环境污染,严重时将危及消费者的健康甚至生命,因而肉类食品的保鲜及卫生安全是长期以来亟待解决的问题^[36]。肉类保鲜处理的传统方法各具一定的局限性,如热杀菌技术易导致肉的结构变化和质地损失;化学降解法易产生有毒有害副产物;辐照会对肉类的脂肪酸谱和感官特性产生不利影响等。在非热方法中,低温等离子体处理肉类和肉类产品以保障其安全和品质是一项创新^[37-38]。

Ulbin-Figlewicz 等研究了低温等离子体处理对肉表面微生物灭活的效果及其对肉色和 pH 值的影响,结果显示处理 10 min 后,氦等离子体处理的细菌总数减少约 3 log CFU/cm²,氩等离子体处理的微生物总数减少约 2 log CFU/cm²,且酵母和霉菌也有一定程度的减少,约为 3 CFU/cm²(氦)和 2.6 CFU/cm²(氩)^[39]。Lu Han 等研究表明在空气中使用大气压等离子体(80 kVRMS)处理 60 s 后,在 PBS 中检测不到大肠杆菌、单核细胞增生李斯特菌和金黄色葡萄球菌^[40]。Sara Katrine Rød 等研究了低温大气压等离子体对接种无害李斯特菌的切片即食(ready to eat, RTE)肉制品灭菌的应用。接种的样品在含有 30 % 氧和 70 % 氩的密封线性低密度聚乙烯袋中在 15.5、31 W 和 62 W 下处理 2 s~60 s,使李斯特菌的减少范围为(0.8±0.4) log CFU/g~(1.6±0.5) log CFU/g,不受处理时间和强度显著影响。而在 15.5 W 和 62 W 下每间隔 10 min 处理 20 s,多次处理后无害李斯特菌的减少随着处理次数的增加而提高^[41]。黄明明等采用高压电场低温等离子体杀菌(cold plasma cold sterilization, CPCS)对气调包装 O₂、CO₂ 与 N₂ 体积分数分别为 35 %、35 %、30 % 的生鲜牛肉在 72 kV 条件下处理 85 s,于 4 ℃ 条件下贮藏 10 d 后分析牛肉冷藏过程菌落总数、主要腐败菌属等变化。研究结果表明 CPCS 可显著降低贮藏过程中牛肉中的菌落含量,贮藏 10 d 菌落总数为 5.76 log CFU/g,显著低于对照组 7.46 log CFU/g^[42]。诸多研究均显示低温等离子体技术对肉及肉制品灭菌具有良好效果。

4 等离子体降解真菌毒素研究进展

4.1 真菌毒素的传统降解方式

常用的真菌毒素脱除方法有物理法、化学法和生物法。化学法主要是采用酸、碱、氧化剂、醛或亚硫酸

气体等以改变真菌毒素的结构,该方法虽然能够有效脱除毒素,但可能会对食品的营养价值和风味产生影响,且存在化学物质残留的安全隐患。无毒无害的植物精油灭菌也因此成为一大热点,研究证实了多种植物精油对多种真菌具有良好抑菌作用,但其成本较高,适用范围局限。除此之外,臭氧熏蒸处理也为控制真菌毒素污染的有效化学手段,但并非所有真菌毒素都可以利用臭氧处理达到脱毒目的,同样需要有针对性地选择脱毒方式。研究表明谷物等经过臭氧处理后,臭氧气体会部分残留,从而使样品带有难闻气味,且臭氧降解真菌毒素后,降解产物的结构和毒性也需要进一步研究。另外,ClO₂ 用于真菌毒素降解也会对食品品质造成损失。在实际生产中,由于 ClO₂ 的强氧化性还可能对腐蚀设备,高浓度的 ClO₂ 气体具有易燃易爆的特点,增大了生产过程中的安全隐患^[43-44]。

物理降解方法主要包括热处理、吸附剂吸附和辐照处理等。热处理易对产品的风味、营养成分造成不良影响,而吸附剂虽然较为安全,但稳定性差。吸附法主要通过活性炭、皂土、沸石等多孔性物质对真菌毒素进行吸附从而从食品中脱除。虽然有些吸附剂可以吸附真菌毒素,但其实用性与可操作性还需进一步探讨。尤其是将吸附剂作为饲料添加剂来吸附饲料中的真菌毒素,需考虑吸附剂对维生素和微量元素等营养元素的吸附,是否造成营养成分损失^[45-46]。许多文献已证实利用 γ -射线可以使黄曲霉毒素、赭曲霉毒素等真菌毒素得到一定程度的降解。辐照降解技术具备高效、快速和可避免二次污染等传统降解方法所无法比拟的优点,因而越来越多地被用于真菌毒素降解领域。但辐照技术仍具有一定的局限性,且需进一步对辐解产物的结构、组成及毒性进行分析并对安全性进行评估,从而建立完善的真菌毒素辐照降解机制^[47]。

生物法脱毒包括微生物法和生物酶法。微生物法利用微生物对毒素的吸附或代谢能力脱除毒素。微生物脱毒具有脱毒效果显著、反应条件温和、不会造成二次污染等优点,且成本相对低廉,但不适用于所有领域,如食品加工过程等^[48]。生物酶法脱毒是利用基因技术构建生物酶的高效表达工程菌,分离获得纯酶以进行食品和饲料中真菌毒素的脱除。利用微生物酶的降解作用,并结合生物型吸附剂的吸附作用可使毒素在被肠绒毛吸收之前在胃内快速转变成无毒或低毒化合物,且不影响饲料中营养成分的吸收,是解决饲料中真菌毒素发生危害的理想方法,也是清除饲料中真菌毒素的发展方向。相对于吸附法而言,利用微生物、酶以及酵母菌的生物降解法成本较高,其实际应

用的价值可能会有所限制,因此将吸附法与生物降解法有机地结合可为真菌毒素的脱除带来新的突破^[49-50]。

目前随着食品工业的发展,对食品安全问题的空前重视,对营养健康的追求,各种真菌降解方法正在不断革新,传统方法均具有一定的局限性,因此诸如等离子体这类更为安全、有效的真菌毒素降解方式的研究意义重大。

4.2 低温等离子体降解真菌毒素

真菌毒素可污染种类繁多的谷物,如小麦、大麦、玉米、燕麦、高粱、黑麦、小米及其相关产品,严重危及粮食食用安全,直接威胁人类健康。控制粮食中真菌毒素含量,降低真菌毒素污染水平,尽量减少直接或间接摄入真菌毒素,是保障人们健康的重要举措^[51]。由

于谷物、种子、坚果及其产品广泛用作人类食物和牲畜饲料,它们的微生物安全值得高度重视。

4.2.1 等离子体降解真菌毒素效果及影响因素

目前使用低温等离子体降解真菌毒素的研究主要集中于黄曲霉毒素上。黄曲霉毒素是黄曲霉、寄生曲霉在生长过程中产生、分泌的次级代谢产物,是一类毒性极强的物质,具有强致癌性和强免疫抑制性,广泛分布于发霉粮食及其制品中,特别是花生、花生油、玉米及其制品中^[52]。由于等离子体技术对不同的作用对象具有不同的处理效果,因此需要全面深入的研究利用等离子体降解真菌毒素的各项工艺参数以保证脱毒效果。等离子体处理效果影响因素见表 1。

刘真等探究不同处理时间、处理功率、水分含量、

表 1 等离子体处理效果影响因素
Table 1 Factors affecting plasma treatment

影响因素	处理条件	处理效果	文献序号
功率及时间	介质:花生油	降解率:70 %(40 W 15 min)	[53]
	处理时间:15 min,12 min	降解率:90 %(60 W 12 min)	
	处理功率:40 W,60 W		
真菌毒素	真菌毒素:AFB ₁		[54]
	介质:灭菌枣椰果	处理 6 min 时 FB ₂ 完全降解	
	真菌毒素:FB ₂ 、OTA	处理 7.5 min 时 OTA 完全降解	
介质	介质:花生、玉米	降解率:88.3 %(花生)	[23]
	处理时间:500 s	降解率:92.2 %(玉米)	
	处理功率:150 W		
	真菌毒素:AFB ₁		

颗粒大小、种类的花生对 AFB₁ 降解的影响。结果表明,相同时间下处理功率越大,花生中 AFB₁ 降解得越多,400 W 时降解率为 73.45 %,相同处理功率下,处理时间越长,花生中的 AFB₁ 降解越多,8 min 后降解率为 79.26 %;相同条件下,花生中水分含量、花生颗粒大小与降解率呈正相关,而含油量与降解率成负相关^[55-56]。除了处理功率及时间、真菌毒素种类影响外,介质中含有的物质成分也会影响低温等离子体处理的效果。Salama A 等用双气压低温等离子体(double atmospheric pressure cold plasma,DAPCP)处理水果洗涤剂以研究其真菌脱毒效果,发现处理 7.5 min 可使樱桃洗涤剂中真菌菌落减少 74.7 %~100 %,但研究发现不同样品的处理效果取决于洗涤剂中抗氧化剂的含量,抗氧化剂的存在减少了等离子体产生的活性物质的寿命,降低了处理效果^[57]。刘真等探究花生中的蛋白质、脂肪酸、维生素和水分对低温射频等离子体去除 AFB₁ 的影响,发现食品各成分对等离子体脱毒效果存在影响^[55]。

4.2.2 低温等离子体处理对产品品质影响及安全性评估

在控制农产品中的真菌毒素方面低温等离子体技术已显示出良好的真菌灭活及真菌毒素降解效果,并且研究表明等离子体处理对产品品质影响较小。刘真等评估低温射频等离子体去除黄曲霉毒素过程中其对花生油品质的影响。试验结果表明,经 100、200 W 和 300 W 的等离子体处理花生油 10 min 后,花生油的酸价从 0.87 mg KOH/g 分别减少到 0.28、0.25、0.26 mg KOH/g,差异显著($p>0.05$)。在试验所处理的范围内,花生油的过氧化值均未超出 6 mmol/kg。通过高效液相色谱分析,等离子体对花生油中的维生素 E 和反式脂肪酸含量的影响较小。这说明低温射频等离子体技术降解花生油中的 AFB₁ 的方法不仅安全、有效,且不会影响花生油的品质^[58]。斯兴开等研究低温等离子体对草鱼鱼肉品质的影响,结果表明,低温等离子体处理后的菌落总数明显下降,鱼肉的感官评分和持水性略有下降,但无大影响。综合鱼肉挥发性和非挥

发性变化,表明该方法对草鱼鱼肉品质的影响较小^[59]。

在操作安全性方面,等离子体被封闭在系统内,它可使所产生的电磁辐射不外泄,通过气体循环系统可将杀死的微生物或残余物带走,不会对操作人员造成伤害,安全可靠^[60];在产品安全性方面,赵玲玲等研究 AFB₁ 经低温射频等离子体处理后降解产物的安全性。发现等离子处理 AFB₁ 后降解产物毒性较 AFB₁ 本身的毒性有所降低。同时,等离子体处理 AFB₁ 的降解率与毒性成正相关,今后可以在提高降解率的基础上进一步深入研究降解产物的安全性^[61]。

除此之外,一些研究者也对谷物中其他真菌毒素进行了研究。Ten Bosch Lars 研究了低温大气压等离子体(cold atmospheric pressure plasma, CAPP)在以环境空气作为工作气体的条件下降解真菌毒素的效果,结果表明暴露于 CAPP 的所有纯真菌毒素在 60 s 内完全降解,降解速率随真菌毒素结构而变化,而杂色曲霉素表现出最高的降解抗性^[62]。

综上,多种因素共同作用于低温等离子体技术降解真菌毒素的最终效果,而实际应用中每种食品具有不同的特性,因此还需进一步研究不同电压、处理时间、样品组成成分、样品理化指标、真菌毒素浓度等的影响,并全面深入研究降解产物的安全性,以更快推动等离子体技术有效的应用于食品工业。

5 低温等离子体应用前景展望

低温等离子体技术可以有效减少食品中微生物数量并有效降解食品和饲料中的真菌毒素,对于食品工业而言成本较低,且其在安全性和稳定性方面具有良好的表现。然而,实际应用低温等离子体技术以减少食品和饲料原料中的病原性微生物和真菌毒素将需要进一步研究以解决目前存在的问题。

1) 等离子体渗透深度较低,迁移到食物组织中以及附着在粗糙的食物表面的细菌存在无法彻底杀灭的隐患,需要进一步研究等离子体处理技术及底物前处理方式以保证处理。

2) 低温等离子体技术应该能够批量处理食品,以适应目前工业化、机械化生产的需要。因此,需要进一步研究探索等离子体系统批量或连续处理大量食品的可行性。低温等离子体处理效果取决于多种内在和外在参数,包括食品原料表面特性、食物类型、食品加工工艺、真菌毒素的性质和结构、微生物的类型及表面附着性、微生物特性、等离子体处理工艺参数、成本效益等等。

3) 等离子体处理食品的灭菌效果、真菌毒素降解

效果良好,且对食品品质影响极小,但目前还未研究清楚其灭活及降解机制,因此无法肯定其降解真菌毒素后分解产物是否对人体存在危害,存在遗留隐患。

6 结论

与几种常规和非热(例如,UV 光、 γ 辐射、脉冲光)方法相比,低温等离子体处理对微生物灭活速度极快,处理条件温和,对食品品质影响微乎其微。低温等离子体可作为抑制食物材料(包括谷物、水果、蔬菜、肉类等)上微生物生长的潜在替代技术。与 UV,热处理或化学处理相比,低温等离子体可作为降解真菌毒素的快速、有效和安全可行的技术,且可与现存技术结合,研究探索杀灭微生物及降解真菌毒素的最优工艺。未来的研究应拓展低温等离子体在食品工业的应用范围,对其实践性进行评估,并深入研究其微生物灭活及真菌毒素降解机理,为该技术投入实际生产应用提供参考。

参考文献:

- [1] Bennett J W, Klich M. Mycotoxins[J]. Encyclopedia of Microbiology, 2009, 16(3): 559-565
- [2] Thirumdas R, Sarangapani C, Annapure U S. Cold Plasma: A novel Non-Thermal Technology for Food Processing[J]. Food Biophysics, 2015, 10(1): 1-11
- [3] 菅井秀郎, 张海波, 张丹. 等离子体电子工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [4] 王佳媚, 黄明明, 乔维维, 等. 冷源等离子体冷杀菌技术及其在食品中的应用研究[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(5): 55-62
- [5] 方益荣, 叶冬青. 低温等离子灭菌技术的应用[J]. 中华医院感染学杂志, 2006(8): 958-960
- [6] 郑超. 低温等离子体和脉冲电场灭菌技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2013
- [7] Surowsky B, Schlüter Oliver, Knorr D. Interactions of Non-Thermal Atmospheric Pressure Plasma with Solid and Liquid Food Systems: A Review[J]. Food Engineering Reviews, 2015, 7(2): 82-108
- [8] 任兆杏, 丁振峰. 低温等离子体技术[J]. 自然杂志, 1996(4): 201-207
- [9] Niemira, Brendan A. Cold Plasma Decontamination of Foods[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2012, 3(1): 125-142
- [10] 马挺军, 史喜成, 贾昌喜. 低温等离子体在食品杀菌中的研究进展[J]. 农产品加工·创新版, 2009(6): 8-11
- [11] 孟月东, 钟少锋, 熊新阳. 低温等离子体技术应用研究进展[J]. 物理, 2006, 35(2): 140-146
- [12] 苟本鹏, 邱海军, 姜斌. 新型等离子体源及其应用[J]. 微细加工技术, 2006(4): 1-4
- [13] 倪盈. 低温等离子体杀菌的实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009
- [14] 马跃, 张冠军, 石兴民, 等. 介质阻挡放电用于细菌灭活的机理

- 研究[J]. 高电压技术, 2008(2): 154–158
- [15] 郑超, 徐羽贞, 黄逸凡, 等. 低温等离子体灭菌及生物医药技术研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(9): 2185–2193
- [16] Laroussi M, Leipold F. Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2004, 233(1/3): 81–86
- [17] Korachi M, Aslan N. The Effect of Atmospheric Pressure Plasma Corona Discharge on pH, Lipid Content and DNA of Bacterial Cells[J]. 等离子体科学和技术:英文版, 2011, 13(1): 99–105
- [18] 李娅西, 邵先军, 彭兆裕, 等. 介质阻挡放电对橙汁灭菌及其品质的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 211–216
- [19] 刘红霞, 刘云. 低温氧等离子体灭活机理分析[C]//智能信息技术应用学会.Proceedings of 2010 First International Conference on Cellular, Molecular Biology, Biophysics and Bioengineering (Volume 5). Washington, D C: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2010
- [20] 许子牧. 大气压低温等离子体失活金黄色葡萄球菌及其机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015
- [21] Nataša Hojnik, Uroš Cvelbar, Gabrijela T K, et al. Mycotoxin Decontamination of Food: Cold Atmospheric Pressure Plasma versus “Classic” Decontamination[J]. Toxins, 2017, 9(5): 151–170
- [22] 石兴民, 张冠军, 袁育康, 等. 低温等离子体对细菌芽孢的灭活研究[J]. 南方医科大学学报, 2009, 29(10): 2033–2036
- [23] Devi Y, Thirumdas R, Sarangapani C, et al. Influence of cold plasma on fungal growth and aflatoxins production on groundnuts[J]. Food Control, 2017, 77: 187–191
- [24] Daniela Bermúdez-Aguirre, Wemlinger E, Pedrow P, et al. Effect of atmospheric pressure cold plasma (APCP) on the inactivation of *Escherichia coli* in fresh produce[J]. Food Control, 2013, 34(1): 149–157
- [25] Wang R X, Nian W F, Wu H Y, et al. Atmospheric-pressure cold plasma treatment of contaminated fresh fruit and vegetable slices: inactivation and physiochemical properties evaluation[J]. European Physical Journal D, 2012, 66(10): 276
- [26] Cold plasma treatment for fresh-cut melon stabilization[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 33: 225–233
- [27] Cold plasma treatment for microbial safety and preservation of fresh lettuce[J]. Food Science and Biotechnology, 2015, 24: 1717–1724
- [28] 王卓, 周丹丹, 彭菁, 等. 低温等离子体对蓝莓果实的杀菌效果及其品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 111–117
- [29] Björn Surowsky, Antje Fröhling, Gottschalk N, et al. Impact of cold plasma on *Citrobacter freundii* in apple juice: Inactivation kinetics and mechanisms[J]. International journal of food microbiology, 2014, 174(11): 63–71
- [30] Tyczkowska-Sieron E, Markiewicz J, Grzesiak B, et al. Short communication: Cold atmospheric plasma inactivation of *Prototheca zopfii* isolated from bovine milk[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(1): 118–122
- [31] 高亚男, 王加启, 郑楠. 牛奶中霉菌毒素来源、转化及危害[J]. 动物营养学报, 2017, 29(1): 34–41
- [32] Xu L, Garner A L, Tao B, et al. Microbial Inactivation and Quality Changes in Orange Juice Treated by High Voltage Atmospheric Cold Plasma[J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10: 1778–1791
- [33] Pankaj S K, Wan Z, Colonna W, et al. Effect of high voltage atmospheric cold plasma on white grape juice quality[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(12): 4016–4021
- [34] Paixão, Livia M N, Fonteles T V, et al. Cold Plasma Effects on Functional Compounds of Siriguela Juice[J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 12: 110–121
- [35] 林向阳, 李雁晖, 黄彬红, 等. 介质阻挡放电等离子体 (DBDP) 对橙汁杀菌及钝化酶的影响[J]. 中国食品学报, 2010, 10(6): 20–27
- [36] 孙承锋, 戴瑞彤, 曲富春, 等. 微生物与肉类食品的腐败[J]. 肉类研究, 2001, 1(1): 32–35
- [37] Misra N N, Jo C. Applications of Cold Plasma Technology for Microbiological Safety in Meat Industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 64: 74–86
- [38] Ulbin-Figlewicz N, Brychey E, Jarmoluk A. Effect of low-pressure cold plasma on surface microflora of meat and quality attributes[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(2): 1228–1232
- [39] 王雄, 吴继宗, 果旗, 等. 农产品中真菌毒素 γ 辐照降解的研究进展[J]. 农产品加工·学刊, 2011(8): 142–146
- [40] Lu H, Dana Z, Caitlin H, et al. Controlling Microbial Safety Challenges of Meat Using High Voltage Atmospheric Cold Plasma[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7(41): 989–997
- [41] Rød S K, Hansen F, Leipold F, et al. Cold atmospheric pressure plasma treatment of ready-to-eat meat: Inactivation of *Listeria innocua* and changes in product quality[J]. Food Microbiology, 2012, 30(1): 233–238
- [42] 黄明明, 乔维维, 章建浩, 等. 低温等离子体冷杀菌对生鲜牛肉主要腐败菌及生物胺抑制效应研究[J]. 食品科学技术学报, 2018, 36(4): 17–23
- [43] 成博伦, 赵玉濛, 胡锦涛, 等. 几种常见真菌毒素脱毒方法的研究进展[J]. 基因组学与应用生物学, 2015, 34(11): 2338–2344
- [44] 陈冉, 周天智, 吴秋蓉, 等. 臭氧在粮油真菌毒素污染防控方面的应用[J]. 粮油仓储科技通讯, 2016(1): 47–50
- [45] 徐进, 计融, 罗雪云. 吸附剂与真菌毒素的去除(综述)[J]. 中国食品卫生杂志, 2001(3): 35–37
- [46] 李慧芸, 王军, 张宝善. 真菌毒素对食品的污染及防止措施[J]. 食品研究与开发, 2004, 25(3): 26–30
- [47] 李萌萌, 关二旗, 卞科, 等. 真菌毒素的辐照降解及产物解析研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2013(1): 14–18
- [48] 张子沛, 顾楠, 赵国华. 生物方法去除真菌毒素研究进展[J]. 粮食与油脂, 2012(1): 43–45
- [49] 卢丹, 徐晴, 江凌, 等. 生物酶降解真菌毒素的研究进展[J]. 生物加工过程, 2018, 16(2): 49–56
- [50] 孙长坡, 代岩石, 王松雪, 等. 利用生物技术防控、消减粮食及其制品中的真菌毒素[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(11): 97–101
- [51] 尹青岗, 王锋, 陈井旺. 粮食中真菌毒素污染现状及控制[J]. 粮食与油脂, 2009(4): 31–34
- [52] 宫春波, 姜连芳, 张永翠, 等. 黄曲霉毒素在食品中的危害及去除方法[J]. 食品研究与开发, 2004, 25(1): 120–123

核酸适配体技术在畜产品兽残检测中的应用

谢希杨, 孙万成, 罗毅皓*
(青海大学 农牧学院, 青海 西宁 810016)

摘要:畜产品是人们日常饮食中至关重要的一部分,畜产品中的兽残问题也吸引了越来越多的关注。核酸适配体技术包含筛选、特异性识别两个过程。核酸适配体是一段体外筛选获得的单链 RNA 或 DNA 序列,能与靶物质特异性结合,被称为“化学抗体”。与传统检测方法相比,具有检测周期短、成本低、不受环境制约等优点。该文围绕畜产品,在兽残传统检测方法的基础上,综述核酸适配体在各类兽药残留检测中的应用,并就核酸适配体在该领域的应用前景进行展望。

关键词:兽药残留;核酸适配体;体外筛选;抗生素检测;激素检测

Application of Nucleic Acid Aptamer Technology in Detection of Animal Products

XIE Xi-yang, SUN Wan-cheng, LUO Yi-hao*

(College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China)

Abstract: Animal products are a vital part of people's daily diet. The problem of veterinary drug residues in animal products has attracted more and more attention. Nucleic acid aptamer technology involves screening and specific recognition. The nucleic acid aptamer is a single-stranded RNA or DNA sequence, obtained by *in vitro* screening. Aptamer was referred to as a “chemical antibody”, which can specifically binds to a target substance. Compared with the traditional detection method, it has the advantages of short detection period, low cost, and no environmental constraints. This paper focused on animal products, based on the traditional detection methods of animal residues, reviewed the application of nucleic acid aptamers in the detection of various veterinary drug residues. At the end, the application prospects of nucleic acid aptamers in this field was prospected.

Key words: veterinary drug residues; aptamer; *in vitro* screening; antibiotic detection; hormone detection

作者简介:谢希杨(1993—),女(汉),硕士研究生,研究方向:食品加工与安全。

* 通信作者:罗毅皓(1976—),女,副教授,硕士,研究方向:功能食品。

- [53] 李玉鹏,王世清,肖军霞,等. 低温射频等离子体降解农产品中黄曲霉毒素 B₁ 效果的研究[J]. 粮油食品科技, 2014, 22(5): 54-57
- [54] Ouf S A, Basher A H, Mohamed A H. Inhibitory effect of double atmospheric pressure argon cold plasma on spores and mycotoxin production of *Aspergillus niger* contaminating date palm fruits.[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2015, 95(15): 3204-3210
- [55] 刘真,王世清,肖军霞,等. 花生中的物质成分对低温射频等离子体降解黄曲霉毒素 B₁ 的影响[J]. 食品科学,2016,37(21): 219-223
- [56] 刘真,王世清,肖军霞,等. 等离子体降解花生中黄曲霉毒素的影响因素[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(5): 44-48
- [57] Ouf S A, Mohamed A H, El-Sayed W S. Fungal Decontamination of Fleshy Fruit Water Washes by Double Atmospheric Pressure Cold Plasma[J]. CLEAN - Soil, Air, Water, 2016, 44(2): 134-142
- [58] 刘真,王世清,肖军霞,等. 等离子体处理对花生油品质的影响[J]. 现代食品科技, 2016(9): 203-208
- [59] 斯兴开,杨惠琳,韦翔,等. 低温等离子体对草鱼鱼肉品质的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(10): 185-190
- [60] 巴特,刘承初. 低温等离子灭菌新技术及其应用[J]. 生物技术通报, 2009(S1): 126-130
- [61] 赵玲玲,都启晶,王世清,等. 黄曲霉毒素 B₁ 的等离子体降解产物的急性毒性研究[J]. 食品科技, 2016(1): 325-330
- [62] Lars T B, Katharina P, Georg A, et al. Plasma-Based Degradation of Mycotoxins Produced by *Fusarium*, *Aspergillus* and *Alternaria* Species[J]. Toxins, 2017, 9(3): 97-109

收稿日期:2019-07-26