

肉制品中杂环胺的形成机制及植物提取物对其抑制作用的研究进展

阿丽雅, 温荣欣, 刘馨屿, 秦立刚, 孔保华, 刘 蹇, 陈 倩*
(东北农业大学食品学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要: 肉制品中杂环胺(heterocyclic aromatic amines, HAAs)主要是由其中的氨基酸、葡萄糖与肌酸(肌酸酐)在高温长时间加工处理下产生的一类多环芳香族化合物, 该类物质具有强致癌、致突变作用以及神经、心肌毒性等。本文主要介绍HAAs的分类、危害、形成机制及影响因素, 并综述植物提取物对肉制品中HAAs的抑制作用及研究进展, 旨在为减控肉制品中的HAAs提供理论依据。

关键词: 肉制品; 杂环胺; 形成机制; 植物提取物; 抑制作用

Formation Mechanism of Heterocyclic Amines in Meat Products and Inhibition by Plant Extracts: A Review

A Liya, WEN Rongxin, LIU Xinyu, QIN Ligang, KONG Baohua, LIU Qian, CHEN Qian*
(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Heterocyclic aromatic amines (HAAs) are a series of polycyclic aromatic compounds mainly produced from amino acids, glucose and creatine (creatinine) in meat products during high-temperature processing for a long time. HAAs have strong carcinogenicity, mutagenicity, neurotoxicity, and myocardial toxicity. In this paper, the classification, harms and formation mechanism of HAAs as well as the factors influencing their formation are described, and recent progress in the inhibition of HAAs in meat products by plant extracts is reviewed, with the aim to provide a theoretical basis for the reduction and regulation of HAAs in meat products.

Keywords: meat products; heterocyclic amines; formation mechanism; plant extracts; inhibition effect

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210309-058

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2021) 05-0070-08

引文格式:

阿丽雅, 温荣欣, 刘馨屿, 等. 肉制品中杂环胺的形成机制及植物提取物对其抑制作用的研究进展[J]. 肉类研究, 2021, 35(5): 70-77. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210309-058. <http://www.rlyj.net.cn>

A Liya, WEN Rongxin, LIU Xinyu, et al. Formation mechanism of heterocyclic amines in meat products and inhibition by plant extracts: a review[J]. Meat Research, 2021, 35(5): 70-77. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210309-058. <http://www.rlyj.net.cn>

肉和肉制品是人类获取蛋白质、必需氨基酸、多不饱和脂肪酸及维生素等重要营养成分的来源之一, 但经高温长时间加工处理会使肉中的氨基酸、葡萄糖与肌酸(肌酸酐)发生反应, 生成一类具有强致癌、致突变作用的多环芳香族化合物, 称为杂环胺(heterocyclic aromatic amines, HAAs)^[1]。HAAs结构中含有杂环和含氮基团, 长期摄入含HAAs的食物会增加结肠癌、肺癌、

肝癌、皮肤癌和乳腺癌等疾病的风险, 研究发现, 经常食用熟透烤肉会提高患结肠癌的几率^[2], 特别是在烤牛肉中检测出含量较高的HAAs。此外, 一些传统肉制品, 包括腊肉、风鸡、酱猪肉、熏肉、炸鸡、肉松等均含有不同含量的HAAs。在关于肉制品HAAs的减控策略报道中, 选择安全性较高的植物提取物成为当前的主要研究趋势^[3]。植物提取物种类丰富且具有良好的抗氧化活性,

收稿日期: 2021-03-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31972139); “十三五”国家重点研发计划重点专项(2018YFD0401200);

黑龙江省“百千万”工程科技重大专项(2020ZX07B02); 东北农业大学SIPT大学生创新实践训练项目(122)

第一作者简介: 阿丽雅(2000—)(ORCID: 0000-0002-5008-8747), 女, 本科生, 研究方向为食品科学与工程。

E-mail: ALY13634776440@163.com

*通信作者简介: 陈倩(1988—)(ORCID: 0000-0001-6412-3315), 女, 副教授, 博士, 研究方向为畜产品加工。

E-mail: chenqianego7@126.com

在抑制肉制品中HAAs方面具有广阔的应用前景。本文对HAAs的分类、危害及形成机制等方面展开介绍,综述植物提取物对肉制品中HAAs的抑制机理及研究进展,旨在为控制肉制品中HAAs提供理论依据。

1 HAAs概述

目前,在食品中已发现30多种不同类型的HAAs,并已明确其结构和分类。其中,在肉制品中已鉴定出20多种HAAs,它们的形成与加热方法、加热时间及温度、前体物和肉的类型等密切相关^[4],然而,关于HAAs的具体形成机制尚未明确,影响了抑制HAAs有效措施的建立^[5-6]。目前,关于HAAs的抑制主要包括添加外源抑制剂、控制加工条件、优化加工工艺和原料肉预处理等方法。

1.1 HAAs的结构与分类

HAAs由碳、氢、氮原子组成,含有2~5个含氮杂环(一般为3个)、1个环外的氨基(除9H-吡啶[2,3-*b*]吡啶(9H-pyrido[4,3-*b*]indole, norharman)和1-甲基-9H-吡啶[2,3-*b*]吡啶(1-methyl-9H-pyrido[4,3-*b*]

indole, harman))及若干不同位置的甲基。根据化学结构的差异,HAAs可分为氨基咪唑氮杂芳烃(aminoimidazoazarene, AIA)和氨基咪唑氮杂芳烃(aminocarboline, ACs)两大类^[7]。根据其形成温度的范围,在100~300℃形成的AIA也被称为热型HAAs,在300℃以上形成的ACs被称为热解型HAAs。AIA与喹啉(quinolines congeners, IQ)性质类似,其氨基均耐受重氮化处理,因此被称为IQ型HAAs,即极性HAAs,而ACs环上的氨基在重氮化处理时脱落转变成C-羟基,因此被称为非IQ型HAAs,即非极性HAAs^[8]。目前已发现存在近30多种不同形式的HAAs^[9],如表1所示。

1.2 HAAs的危害

1.2.1 致突变性

HAAs经代谢活化后具有较强的致突变性,经人体摄入后会被快速消化吸收,通过血液立刻分散至全身,对人体的肝脏、淋巴组织等器官产生致突变性^[10]。HAAs的致突变性明显强于其他常见的致突变成分,其致突变能力是黄曲霉毒素的100多倍,是多环芳烃和亚硝酸盐的10~100倍^[11]。不同结构的HAAs致突变程度不同,AIA

表1 HAAs的分类和结构
Table 1 Classification and structure of HAAs

类别	结构	R ₁	R ₂	R ₃	中文名称	英文名称	名称缩写
AIA		CH ₃	H	H	2-氨基-1-甲基咪唑[4,5- <i>f</i>]喹啉	2-amino-1-methylimidazo[4,5- <i>f</i>]quinoline	Iso-IQ
		H	CH ₃	H	2-氨基-3-甲基咪唑[4,5- <i>f</i>]喹啉	2-amino-3-methylimidazo[4,5- <i>f</i>]quinoline	IQ
		H	CH ₃	CH ₃	2-氨基-3,4-二甲基咪唑[4,5- <i>f</i>]喹啉	2-amino-3,4-dimethylimidazo[4,5- <i>f</i>]quinoline	MeIQ
		—	—	—	2-氨基-1-甲基咪唑[4,5- <i>b</i>]喹啉	2-amino-1-methylimidazo[4,5- <i>b</i>]quinoline	IQ[4,5- <i>b</i>]
		H	H	H	2-氨基-3-甲基咪唑[4,5- <i>f</i>]喹啉	2-amino-3-methylimidazo[4,5- <i>f</i>]quinoline	IQx
		CH ₃	H	H	2-氨基-3,4-二甲基咪唑[4,5- <i>f</i>]喹啉	2-amino-3,4-dimethylimidazo[4,5- <i>f</i>]quinoline	4-MeIQx
		H	H	CH ₃	2-氨基-3,8-二甲基咪唑[4,5- <i>f</i>]喹啉	2-amino-3,8-dimethylimidazo[4,5- <i>f</i>]quinoline	8-MeIQx
		CH ₃	H	CH ₃	2-氨基-3,4,8-三甲基咪唑[4,5- <i>f</i>]喹啉	2-amino-3,4,8-trimethylimidazo[4,5- <i>f</i>]quinoline	4,8-DiMeIQx
		H	CH ₃	CH ₃	2-氨基-3,7,8-三甲基咪唑[4,5- <i>f</i>]喹啉	2-amino-3,7,8-trimethylimidazo[4,5- <i>f</i>]quinoline	7,8-DiMeIQx
		CH ₃	CH ₃	CH ₃	2-氨基-3,4,7,8-四甲基咪唑[4,5- <i>f</i>]喹啉	2-amino-3,4,7,8-tetramethylimidazo[4,5- <i>f</i>]quinoline	TriMeIQx
ACs		CH ₂ OH	H	CH ₃	2-氨基-4-羟基-3,8-二甲基咪唑[4,5- <i>f</i>]喹啉	2-amino-4-hydroxymethyl-3,8-dimethylimidazo[4,5- <i>f</i>]quinoline	4-CH ₂ OH-8-MeIQx
		CH ₃	H	H	2-氨基-1,6-二甲基咪唑[4,5- <i>b</i>]吡啶	2-amino-1,6-dimethylimidazo[4,5- <i>b</i>]pyridine	1,6-DMIP
		CH ₃	H	CH ₃	2-氨基-1,5,6-三甲基咪唑[4,5- <i>b</i>]吡啶	2-amino-1,5,6-trimethylimidazo[4,5- <i>b</i>]pyridine	1,5,6-TMIP
		H	CH ₃	CH ₃	2-氨基-3,5,6-三甲基咪唑[4,5- <i>b</i>]吡啶	2-amino-3,5,6-trimethylimidazo[4,5- <i>b</i>]pyridine	3,5,6-TMIP
		—	—	—	2-氨基-1,6-二甲基咪唑[3,2- <i>e</i>]咪唑并[4,5- <i>b</i>]吡啶	2-amino-1,6-dimethyl-furo[3,2- <i>e</i>]imidazo[4,5- <i>b</i>]pyridine	IFP
α-咪唑		H	—	—	2-氨基-9H-吡啶[2,3- <i>b</i>]吡啶	2-amino-9H-pyrido[2,3- <i>b</i>]indole	AaC
		CH ₃	—	—	2-氨基-3-甲基-9H-吡啶[2,3- <i>b</i>]吡啶	2-amino-3-methyl-9H-pyrido[2,3- <i>b</i>]indole	MeAaC
		H	—	—	9H-吡啶[2,3- <i>b</i>]吡啶	9H-pyrido[4,3- <i>b</i>]indole	Norharman
β-咪唑		CH ₃	—	—	1-甲基-9H-吡啶[2,3- <i>b</i>]吡啶	1-methyl-9H-pyrido[4,3- <i>b</i>]indole	Harman
		CH ₃	—	—	3-氨基-1,4-二甲基-5H-吡啶[4,3- <i>b</i>]吡啶	3-amino-1,4-dimethyl-5H-pyrido[4,3- <i>b</i>]indole	Trp-P-1
		H	—	—	3-氨基-1-甲基-5H-吡啶[4,3- <i>b</i>]吡啶	3-amino-1-methyl-5H-pyrido[4,3- <i>b</i>]indole	Trp-P-2
γ-咪唑		CH ₃	—	—	2-氨基-6-甲基-2-吡啶[1,2- <i>a</i> :3'-2'- <i>d</i>]咪唑	2-amino-6-methyldipyrro[1,2- <i>a</i> :3'-2'- <i>d</i>]imidazole	Glu-P-1
		H	—	—	2-氨基-2-吡啶[1,2- <i>a</i> :3'-2'- <i>d</i>]咪唑	2-amino-dipyrro[1,2- <i>a</i> :3'-2'- <i>d</i>]imidazole	Glu-P-2

注: —. 结构中不含该基团。

被认为是过熟肉中的主要致突变物。Samarina等^[12]通过检测2-氨基-1-甲基-6-苯基-咪唑[4,5-*b*]吡啶(2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-*b*]pyridine, PhIP)、MeIQ和MeIQx对菌株的诱变活性,发现MeIQ与其他HAA相比具有最高的致突变性。此外,有研究表明HAA的致突变性还依赖于其在食品中的含量^[13]。

1.2.2 致癌性

具有致突变性的HAA类化合物并不一定具有致癌性,HAA的致癌性是在代谢过程中与DNA发生加合作用体现的^[14],流行病学研究表明,大量摄入过熟肉会增加致癌的风险^[15],HAA已被视为肉类消费与结直肠癌相关性的主要原因之一^[16]。根据国际癌症研究中心规定及各类HAA致癌能力的强弱,IQ属于2A级致癌物,PhIP、MeIQ等属于2B级致癌物^[17]。其中,Harman和Norharman在艾姆斯/沙门氏菌实验中没有诱变作用,但二者可以增强其他HAA的诱变活性^[18]。研究表明,每天食用50 g加工肉制品会增加某些癌症的患病率,如前列腺癌患病率增加4%,结肠癌增加18%,乳腺癌增加9%,胰腺癌增加19%^[19]。

1.2.3 心肌毒性和神经毒性

HAA具有一定的心肌毒性,虽然心肌不是致癌的靶器官,但PhIP和IQ会在心肌中形成高水平的DNA加合物,从而对心血管系统产生损伤作用,研究证实多种HAA亚类会产生选择性神经毒性^[20]。Agim等^[21]在哺乳动物系统中研究PhIP的神经毒性作用,结果表明,极性PhIP暴露会选择性地影响多巴胺神经传递,增加黑质多巴胺神经元的氧化损伤,而这些与帕金森症有潜在相关性。另有研究表明,PhIP暴露会引起淀粉样蛋白和Tau蛋白生物学神经毒性^[22],其中淀粉样蛋白和Tau蛋白均为诊断阿尔兹海默症的重要生物标志物,说明富含HAA的饮食和该疾病之间存在潜在联系。

1.2.4 其他危害

在人类代谢水平上,摄入过多HAA还会引发急性疾病,如非酒精性脂肪肝和神经元损伤等^[23]以及慢性疾病,如心血管疾病、肥胖等^[24];Harman和Norharman还会引起帕金森症、颤动、成瘾等一系列症状^[25]。动物实验表明,Harman和Norharman通过与肝脏、大脑的某些位点结合来影响动物的生理行为^[26]。在人体组织中检测到的HAA与DNA加合物,即使在含量低于十亿分之一的情況下也会引起遗传损伤^[27],其中PhIP已被证明可分散至哺乳啮齿动物的母乳中,并通过胎盘将PhIP转移到胎儿体内,从而对胎儿造成危害^[28]。此外,还有研究表明一些HAA不仅对啮齿动物危害极大,对其他高等哺乳动物也极具危害性^[29]。

2 HAA的形成机制

2.1 AIA类HAA的形成

2.1.1 喹啉类和喹啉咪类HAA的形成

喹啉类和喹啉咪类HAA属于热型HAA,其形成途径仅反映部分HAA类化合物的形成机制。途径一是加热条件下肌酸环化成肌酸酐,与还原糖和氨基酸通过美拉德反应中的Strecker降解反应形成的吡啶和吡嗪反应,再经过环化、脱水、去饱和作用产生咪唑喹啉和咪唑喹啉咪,其中醛类可与肌酸酐缩合生成席夫碱^[30]。途径二是肌酸酐分别与烷基吡啶自由基和二烷基吡啶自由基发生反应:糖与氨基反应形成烷基吡啶自由基,然后再与肌酸酐作用形成喹啉类HAA;糖与活性羰基反应形成二烷基吡啶自由基,然后再与肌酸酐作用形成喹啉咪类HAA,但该形成机制还存在争议^[31]。

2.1.2 吡啶类HAA的形成

苯丙氨酸和肌酸酐是形成PhIP的重要前体物质,此外,甲醛和氨也参与PhIP形成^[32]。具体途径为:苯丙氨酸经Strecker降解生成苯乙醛,苯乙醛与肌酸酐反应形成羟醛加合物,由于该物质不稳定,会进一步脱水形成羟醛缩合物,羟醛缩合物与苯乙醛反应生成甲醛,肌酸酐降解过程会产生氨,由甲醛和氨进一步反应,最终生成PhIP^[33]。

2.2 ACs类HAA的形成

ACs类HAA中,目前仅 β -吡啶类中的Norharman和Harman形成途径较明确,其前体均为葡萄糖和色氨酸。形成途径主要有2种,一是色氨酸经过Amadori重排后脱水,在环氧孤对电子存在条件下其生成产物发生 β -消除反应,从而生成共轭的氧鎓离子,反应的中间体可通过分子取代反应形成 β -吡啶类HAA;二是由色氨酸与乙醛或 α -酮酸反应先生成四氢化- β -吡啶,然后经氧化或脱羧反应形成^[34]。Norharman和Harman可在100℃以下生成,延长加热时间还会增加其生成量^[8]。从目前研究结果来看,ACs是人们日常饮食中摄入较为普遍的一类HAA,其形成途径复杂多变,对其形成机制还需进一步研究。

2.3 结合态HAA的形成

肉制品成分多样、结构复杂,因此除游离态HAA外还存在结合态HAA,且结合态HAA主要与肉中丰富的蛋白质有关,其形成途径可能有3种^[35]:第1种是由葡萄糖、肌酸、肌酸酐等HAA前体与蛋白质中的氨基酸残基反应生成;第2种是蛋白质或氨基酸中的羧基与游离态HAA中的氨基反应形成稳定的肽键;第3种是游离态HAA选择性吸附在蛋白质聚合物表面。



3 影响HAAs形成的因素

3.1 加热方法

一般而言,直接与热源接触的加热方法会生成较多的HAAs,而蒸煮等间接接触热源的加热方法生成的HAAs相对较少。研究表明,煎炸加热鸡肉和鱼肉制品中有45%的样品中HAAs检出量超过1.5 ng/g,而蒸煮加热的样品中未检出HAAs^[36]。Sinha等^[37]研究煎制、烤箱烤制和明火烤制对无皮无骨鸡胸肉HAAs含量的影响,结果表明,3种加热方式均产生了MeIQx、DiMeIQx和PhIP,且所有样品中PhIP含量最高,其含量分别为煎制25 ng/g、烤箱烤制131 ng/g、明火烤制36 ng/g。Iwasaki等^[38]也研究了经煎、烤处理后的鸡胸肉中HAAs含量,结果表明,烤鸡胸肉中PhIP含量最高。有研究表明,直接烧烤过程中产生的烟会促进香肠中HAAs的形成,这可能与烟中的成分有关^[39]。综上,各种加热方法对HAAs形成的促进程度依次为烤制>煎制>蒸煮。

此外,加热次数也会影响HAAs的形成。Wang等^[40]的研究表明,经过1次油炸的鱼肉饼中含有3种HAAs,而经过5次油炸后则含有6种HAAs。唐春红等^[41]研究反复卤煮对老汤品质及其中HAAs的影响,结果表明,虽然卤汤中营养物质含量随卤煮次数增加而呈上升趋势,但同时其中的HAAs含量也在上升。这与王震等^[42]研究结果一致,卤汤反复使用使得鸭肉和卤汤中肌酸、氨基酸和葡萄糖含量呈现上升趋势,同时HAAs含量也不断升高。综上,加热方法越直接、加热程度越高、加热次数越多,肉制品中形成的HAAs越多。

3.2 加热时间及温度

加热时间和温度是影响肉制品中HAAs形成的重要因素。一般对于任何一种加热方式,延长加热时间都会相对增加HAAs含量。李利洁^[43]发现,牛后腿肉中PhIP含量随微波加热时间增加、温度升高而增大。邵斌^[44]对传统烧鸡中9种HAAs类化合物形成规律展开研究,发现油炸8 min的鸡肉和鸡皮中HAAs总量比油炸1 min分别增加232.3%和758.6%。另有研究证明,HAAs在温度低于150℃条件下形成较少,当温度高于200℃则显著增加,且在加热后大部分HAAs迅速生成,其含量急剧上升,达到最高水平后趋于平稳^[45]。可见,延长加热时间、提高加热温度,特别是当温度高于200℃时会增加肉制品中HAAs的生成量。

3.3 前体物

氨基酸、肌酸、肌酸酐等HAAs前体物对其形成有着重要影响, Lee等^[46]发现5种氨基酸(谷氨酰胺、酪氨酸、甘氨酸、丙氨酸和苏氨酸)和2种单糖(核糖和葡萄糖)均是HAAs形成的前体物,将肌酸和肌酸酐加入牛肉汁中加热12 h,发现肌酸和肌酸酐对HAAs的形成有

一定促进作用。Zamora等^[47]发现,添加半胱氨酸、丝氨酸、天冬氨酸、苏氨酸、天冬酰胺、酪氨酸、脯氨酸和甲硫氨酸可显著提高PhIP的含量。另有研究表明,氨基酸对于HAAs形成的影响与氨基酸自身化学结构及含量有关^[48]。糖对HAAs形成的影响具有双重性,表现为低含量促进HAAs形成,高含量抑制其形成^[49]。Dennis等^[50]通过建立模型研究糖的种类对HAAs形成的影响,发现乳糖对HAAs形成影响最大,蔗糖对PhIP形成影响最大。因此,多数前体物的添加对肉制品中HAAs的形成有促进作用,但也有部分前体物对HAAs形成的影响还取决于前体物的结构和含量。

3.4 肉的类型

HAAs形成也与肉的类型密切相关,如肉的种类和部位等。采用同样方法烹制的肉制品中,鸡肉的PhIP含量明显高于牛肉和猪肉^[51]。李兰杰等^[52]采用相同煎炸方式处理驴排、牛排和猪排,结果表明,驴排中HAAs含量最低。不同部位的肉也会影响HAAs的形成,盖圣美等^[53]研究表明,传统熏烤的鸡胗、鸡爪和鸡翅中,鸡胗的HAAs含量最高。另有研究^[54]证明鸡皮中HAAs的含量是鸡肉中的3倍,这可能是由于肉表皮所受处理温度更高、时间更长,且与肉内部相比表皮组织疏松,使得内容物更易流出,从而导致肉表皮HAAs含量较高。

3.5 其他因素

脂肪可以通过影响前体物质的运输和传热进而影响HAAs的形成,一般脂肪含量越高,HAAs生成量越大^[55]。肉的pH值也会影响HAAs含量, Buła等^[56]发现, pH值5.6~5.8的肉类在不超过180℃的温度下加工可以减少HAAs的生成量。此外,外源添加剂对HAAs的影响也尤为显著。Lu Fei等^[57]总结得出,添加香辛料(包含黑胡椒、大蒜、姜、辣椒及洋葱)可以降低加工肉制品中HAAs含量,且抑制效率与香辛料抗氧化能力相关。此外, Balogh等^[58]发现,煎炸前在肉饼表面添加VE可有效抑制HAAs的形成。综上,HAAs的形成还会受到肉的pH值、脂肪含量和外源添加剂等因素的影响。

4 植物提取物对HAAs的抑制

植物提取物是指采用溶剂和相关工艺对植物整体或有效部位经过物理化学提取分离后,在不改变其有效成分的同时定向收集的植物中一种或多种有效活性成分,这些有效活性成分是植物在生长发育过程中的次级代谢产物^[59]。植物提取物主要包括多酚类、色素类、生物碱类和植物多糖类等^[60],除生物碱类外,大多数植物提取物均具有抗氧化功能^[61],这也是其可抑制HAAs形成的主要原因。另外,植物提取物通过与HAAs前体物形成稳定加合物,从而抑制HAAs的形成。

4.1 多酚类植物提取物

多酚类植物提取物具有羟基取代的高反应性和清除自由基能力,因此对肉制品中HAAs的形成有抑制作用。多项研究表明,多酚类植物提取物,如石榴籽、朝鲜蓟等提取物均能抑制肉制品加工过程中HAAs的形成^[62]。多酚类植物提取物通过与苯丙氨酸反应来阻止苯丙氨酸的降解,进而抑制PhIP的生成,其中多酚类植物提取物中丁香酚和槲皮素是抑制PhIP活性的关键化合物,因此含有这2种成分的黑胡椒乙醇提取物被认为可有效抑制肉制品中PhIP的产生^[63]。制糖过程中被低估的副产物甘蔗糖蜜也富含酚类化合物,Cheng Yiqun等^[64]研究表明,在鸡翅上涂抹不同浓度的甘蔗糖蜜提取物-麦芽糖溶液,可显著降低炸鸡翅中HAAs的总含量和多种HAAs的含量,并遵循剂量效应关系。上述具有较强抗氧化活性的酚类植物提取物大多来自植物的籽、梗和果皮等,这不仅说明能够抑制HAAs形成的酚类植物提取物来源广泛,而且为植物副产品的开发和利用提供了新思路。

多酚类化合物也包括黄酮类化合物,大多数黄酮类植物提取物具有较强的抗氧化性,能通过清除自由基起到抑制HAAs形成的作用。研究表明,含有黄酮类化合物的提取物,如菊花提取物^[65]、山楂提取物^[66]、干果皮提取物^[67]和马尾甘蓝提取物^[68]等均能有效抑制HAAs的形成;此外,甘薯叶提取物^[69]和紫苏叶提取物^[70]等可以显著抑制PhIP的形成。姜黄素属于二酮类物质,Jain等^[71]研究证实,姜黄素可以显著抑制PhIP诱导DNA加合物的形成,PhIP还会诱导多种抗氧化剂和DNA修复基因的表达,而与姜黄素共处理则抑制了上述表达,这些结果表明,姜黄素可能通过多个分子靶点发挥对PhIP的抑制作用。综上,黄酮类植物提取物对HAAs的抑制作用显著,特别是对PhIP的抑制效果尤为明显,但是对于其他种类的HAAs化合物作用效果尚不明确。

4.2 酰胺类植物提取物

酰胺类植物提取物对肉制品中HAAs的抑制作用主要表现为阻止蛋白质或氨基酸中的羧基与游离态HAAs中的氨基反应形成肽键。研究表明,不同添加量的辣椒素、三香酰胺和胡椒碱对烤牛肉饼中游离的DMIP、MeIQx、4,8-DiMeIQx和Harman的形成均有显著抑制作用^[72]。另外,四川胡椒提取物不仅能抑制热制备肉制品中HAAs的形成,还可能会降低长期摄入含肝素的食品导致的慢性疾病的风险^[73]。山椒也可有效抑制肉饼高温烹饪过程中IQ、Harman、Norharman和PhIP的产生^[74]。

4.3 其他类植物提取物

类胡萝卜素是一类重要的天然色素,能够清除自由基、抑制活性氧生成,具有抗氧化作用。在冷冻牛肉汁中加入从番茄中提取的类胡萝卜素,可减少肉汁中MeIQx和4,8-DiMeIQx的形成^[75]。橄榄提取物主要成分

为环烯醚萜,Rounds等^[76]在鸡胸肉油炸前加入8%橄榄水提取物,能够分别将MeIQ、MeIQx和PhIP的形成量降低79%、51%和23%。李君珂等^[77]研究发现,绿原酸能抑制油炸草鱼中HAAs的形成,添加0.001 5%和0.045%绿原酸对HAAs形成的抑制率分别为50%和94.85%。另外,提取自香荚兰豆的香兰素,可通过氧化产物香草酸清除自由基,起到抗氧化作用,将其加入到卤煮牛肉中可减少HAAs的形成^[78]。此外,Beata等^[79]研究表明,十字花科植物提取物所含的异硫氰酸酯可以抑制HAAs的代谢活化过程,从而减少其在肉制品中的含量。

综上,大多数植物提取物均具有一定抗氧化活性,能够不同程度地抑制肉制品中HAAs的生成。然而,植物提取物种类繁多,目前仅研究个别植物提取物对HAAs的作用效果,还不能系统揭示各类型植物提取物具体的抑制机理。

5 结 语

富含蛋白质的肉制品易在高温长时间处理下产生HAAs,目前已证实通过添加具有抗氧化活性的物质,或者添加可与HAAs前体物形成稳定加合物的物质可抑制HAAs的形成。天然植物提取物作为一种天然、安全的抗氧化剂可用于肉制品中HAAs的减控。虽然植物提取物对HAAs的抑制作用已取得一定的进展,但仍存在以下几方面问题:1) HAAs的具体抑制机理不够系统、完整,如极性HAAs与非极性HAAs的抑制原理是否类似;2) 基于当前普遍认可的2种抑制途径可确定某种植物提取物对HAAs形成的抑制效果,但该提取物的抑制机理不明确;3) 多数研究是以一种特定的HAAs为目标物,研究植物提取物对其的抑制作用,但HAAs种类较多,植物提取物对于其他类型HAAs的抑制效果仍需探究。此外,可以扩大植物提取物的研究范围,同时考虑其使用安全性。

参考文献:

- [1] 江黎雯,薛超轶,何志勇,等.肉制品中3类有害物质的来源与控制方法研究进展[J].肉类研究,2020,34(4):77-87. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200131-028.
- [2] SABALLY K, SLENO L, JAUFFRIT J A, et al. Inhibitory effects of apple peel polyphenol extract on the formation of heterocyclic amines in pan fried beef patties[J]. Meat Science, 2016, 117: 57-62. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.02.040.
- [3] VIDAL N P, MANFUL C, PHAM T H, et al. Novel unfiltered beer-based marinades to improve the nutritional quality, safety, and sensory perception of grilled ruminant meats[J]. Food Chemistry, 2019, 302: 2-6. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.125326.
- [4] 董学文. 酱牛肉中杂环胺的控制及其品质影响因素研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 35-60. DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2020.006361.
- [5] 张晨霞. 油炸鸡肉中杂环胺的形成及控制[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020: 20-51. DOI:10.27791/d.cnki.ghegy.2020.000346.



- [6] ZAMORA R, HIDALGO F J. Formation of heterocyclic aromatic amines with the structure of aminoimidazoarenes in food products[J]. Food Chemistry, 2020, 313: 2-6. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.126128.
- [7] EKIZ E, OZ F. The effects of different frying oils on the formation of heterocyclic aromatic amines in meatballs and the changes in fatty acid compositions of meatballs and frying oils[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(4): 1509-1518. DOI:10.1002/jsfa.9325.
- [8] 陈俏纯, 何志勇, 秦昉, 等. 肉制品加工过程风味和伴生危害物的生成及关联规律[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(15): 4848-4855.
- [9] 张玉霞, 周亚军, 李圣尧. 熟肉制品中杂环胺的形成与抑制研究进展[J]. 肉类研究, 2019, 33(8): 65-73. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190507-099.
- [10] 张苏苏, 苑冰冰, 赵子瑞, 等. 肉制品加工中有害物检测及控制技术进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(6): 18-24. DOI:10.3969/j.issn.2095-0381.2017.06.003.
- [11] PUESSA T. Toxicological issues associated with production and processing of meat[J]. Meat Science, 2013, 95(4): 844-853. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.04.032.
- [12] SAMARIA L G P, MARTIN V M, ADRIÁN H M, et al. Antimutagenic effect of an *Asclepias subulata* extract against heterocyclic aromatic amines commonly found in cooked meat and its heat stability[J]. Food Chemistry, 2020, 322: 2-5. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.126725.
- [13] KIM H S, HUR S J. Changes in the mutagenicity of heterocyclic amines, nitrite, and *N*-nitroso compound in pork patties during *in vitro* human digestion[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 92: 47-53. DOI:10.1016/j.lwt.2018.01.079.
- [14] 杜洪振, 陈倩, 刘骞, 等. 肉制品中杂环胺的形成及其机制[J]. 中国食品学报, 2020, 20(9): 323-336. DOI:10.16429/j.1009-7848.2020.09.037.
- [15] GIBIS M. Heterocyclic aromatic amines in cooked meat products: causes, formation, occurrence, and risk assessment[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2016, 15(2): 269-302. DOI:10.1111/1541-4337.12186.
- [16] GUTIÉRREZ-PACHECO S L, VALENZUELA-MELENDEZ M, HERNÁNDEZ-MENDOZA A, et al. Antimutagenic effect of an *Asclepias subulata* extract against heterocyclic aromatic amines commonly found in cooked meat and its heat stability[J]. Food Chemistry, 2020, 322: 2-3. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.126725.
- [17] 谢洋洋, 王小溪, 闫文杰, 等. 肉制品中杂环胺的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(15): 199-205. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2017.15.041.
- [18] ZHANG Lang, DU Hongzhen, ZHANG Pin, et al. Heterocyclic aromatic amine concentrations and quality characteristics of traditional smoked and roasted poultry products on the northern Chinese market[J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 135: 2-5. DOI:10.1016/j.fct.2019.110931.
- [19] BARZEGAR F, KAMANKESH M, MOHAMMADI A. Heterocyclic aromatic amines in cooked food: a review on formation, health risk-toxicology and their analytical techniques[J]. Food Chemistry, 2019, 280: 240-254. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.12.058.
- [20] CRUZ-HERNANDEZ A, AGIM Z S, MONTENEGRO P C, et al. Selective dopaminergic neurotoxicity of three heterocyclic amine subclasses in primary rat midbrain neurons[J]. Neuro Toxicology, 2018, 65: 68-84. DOI:10.1016/j.neuro.2018.01.009.
- [21] AGIM Z S, CANNON J R. Alterations in the nigrostriatal dopamine system after acute systemic PhIP exposure[J]. Toxicology Letters, 2018, 287: 31-41. DOI:10.1016/j.toxlet.2018.01.017.
- [22] SYEDA T, FOGUTH R M, LLEWELLYN E, et al. PhIP exposure in rodents produces neuropathology potentially relevant to Alzheimer's disease[J]. Toxicology, 2020, 437: 2-6. DOI:10.1016/j.tox.2020.152436.
- [23] WU Xingge, ZHANG Zhigang, HE Zhiyong, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the oxidation of protein and fat and its relationship with the formation of heterocyclic aromatic amines and advanced glycation end products in raw meat[J]. Molecules, 2021, 26: 1264. DOI:10.3390/molecules26051264.
- [24] CARVALHO A M, MIRANDA A M, SANTOS F A, et al. High intake of heterocyclic amines from meat is associated with oxidative stress[J]. British Journal of Nutrition, 2015, 113(8): 1301-1307. DOI:10.1017/S0007114515000628.
- [25] 刘甜甜, 姚瑶, 王未, 等. 模型体系中PhIP、Norharman、Harman 3种杂环胺的形成与抑制[J]. 肉类研究, 2020, 34(3): 1-7. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20191218-305.
- [26] ADELL A, BIGGS T A, MYERS R D. Action of harman (1-methyl- β -carboline) on the brain: body temperature and *in vivo* efflux of 5-HT from hippocampus of the rat[J]. Neuropharmacology, 1996, 35(8): 1101-1107. DOI:10.1016/S0028-3908(96)00043-3.
- [27] MARIA A S D S, DIERIC S A, LEANDRO A C, et al. Chitosan film containing an iron complex: synthesis and prospects for heterocyclic aromatic amines (HAAs) recognition[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(7): 1387-1394. DOI:10.1021/acs.jafc.6b03742.
- [28] SHENG Wei, ZHANG Biao, ZHAO Qiuxia, et al. Preparation of a broad-spectrum heterocyclic aromatic amines (HAAs) antibody and its application in detection of eight HAAs in heat processed meat[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(52): 15501-15508. DOI:10.1021/acs.jafc.0c05480.
- [29] ADEYEYE S A O. Polycyclic aromatic hydrocarbon profile, chemical composition and acceptability of suya (a west African grilled meat)[J]. Polycyclic Aromatic Compounds, 2018, 40(5): 1-11. DOI:10.1080/10406638.2018.1559208.
- [30] 李永, 何志勇, 高大明, 等. 热加工食品中杂环胺形成及抑制机制[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(2): 312-319. DOI:10.3969/j.issn.2095-0381.2019.02.006.
- [31] PEARSON A M, CHEN C, GRAY J, et al. Mechanism(s) involved in meat mutagen formation and inhibition[J]. Free Radical Biology and Medicine, 1992, 13(2): 161-167. DOI:10.1016/0891-5849(92)90078-U.
- [32] JINAP S, MOHD-MOKHTAR M S, FARHADIAN A, et al. Effects of varying degrees of doneness on the formation of heterocyclic aromatic amines in chicken and beef satay[J]. Meat Science, 2013, 94(2): 202-207. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.01.013.
- [33] ZAMORA R, ALCÓN E, HIDALGO F J. Ammonia and formaldehyde participate in the formation of 2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-*b*]pyridine (PhIP) in addition to creatine and phenylacetaldehyde[J]. Food Chemistry, 2014, 155: 74-80. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.01.039.
- [34] 孟圆, 孟醒, 夏秀芳. 酱卤肉制品中杂环胺的生成及分离检测技术研究进展[J]. 肉类研究, 2020, 34(8): 91-101. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200422-099.

- [35] 陈静. 烤牛肉饼中不同结合状态杂环胺的生成、抑制及体外消化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 20-53.
- [36] ZIMMERLI B, RHYN P, ZOLLER O, et al. Occurrence of heterocyclic aromatic amines in the Swiss diet: analytical method, exposure estimation and risk assessment[J]. Food Additives and Contaminants, 2001, 18(6): 533-551. DOI:10.1080/02652030119545.
- [37] SINHA R, ROTHMAN N, BROWN E D, et al. high concentrations of the carcinogen 2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-*b*]pyridine (PhIP) occur in chicken but are dependent on the cooking method[J]. Cancer Research, 1995, 55(20): 4516-4519. DOI:10.1016/0165-4608(95)90004-7.
- [38] IWASAKI M, KATAOKA H, ISHIHARA J, et al. Heterocyclic amines content of meat and fish cooked by Brazilian methods[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2010, 23: 61-69. DOI:10.1016/j.jfca.2009.07.004.
- [39] YANG Diaodiao, HE Zhiyong, GAO Daming, et al. Effects of smoking or baking procedures during sausage processing on the formation of heterocyclic amines measured using UPLC-MS/MS[J]. Food Chemistry, 2019, 276: 195-201. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.09.160.
- [40] WANG Y, HUI T, ZHANG Y W, et al. Effects of frying conditions on the formation of heterocyclic amines and trans fatty acids in grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*)[J]. Food Chemistry, 2015, 167(15): 251-257. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.06.109.
- [41] 唐春红, 李海, 李侠, 等. 反复卤煮对老汤品质的影响研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(5): 187-192. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.5.030.
- [42] 王震, 张雅玮, 钱烨, 等. 反复卤煮对鸭胸肉和卤汤中杂环胺及其前体物的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(12): 58-64. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2019.12.010.
- [43] 李利洁. 微波加热中杂环胺PhIP的形成规律及抑制机制[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 34-58.
- [44] 邵斌. 传统烧鸡中9种杂环胺类化合物形成规律研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012: 27-66.
- [45] 洪燕婷, 王盼, 朱雨辰, 等. 肉制品中杂环胺形成与控制的研究进展[J]. 中国食品学报, 2014, 14(11): 149-156.
- [46] LEE H, LIN M Y, CHAN S C. Formation and identification of carcinogenic heterocyclic aromatic amines in boiled pork juice[J]. Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis, 1994, 308(1): 77-88. DOI:10.1016/0027-5107(94)90200-3.
- [47] ZAMORA R, ALCÓN E, HIDALGO F J. Effect of amino acids on the formation of 2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-*b*]pyridine (PhIP) in creatinine/phenylalanine and creatinine/phenylalanine/4-oxo-2-nonenal reaction mixtures[J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 4240-4245. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.06.036.
- [48] 詹春怡, 李圣鑫, 步梓瑞, 等. 肉制品加工中杂环胺形成与抑制研究进展[J]. 农产品加工, 2019(2): 68-74. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2019.02.053.
- [49] 董依迪, 邓思杨, 石硕, 等. 肉制品中杂环胺类物质的形成机制及控制技术的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 278-284; 291. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2019.08.047.
- [50] DENNIS C, KARIM F, SMITH J S. Evaluation of Maillard reaction variables and their effect on heterocyclic amine formation in chemical model systems[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(2): 472-478. DOI:10.1111/1750-3841.12737.
- [51] ZIMMERLI B, RHYN P, ZOLLER O. Occurrence of heterocyclic aromatic amines in the Swiss diet: analytical method, exposure estimation and risk assessment[J]. Food Additives and Contaminants, 2001, 18(6): 533-551. DOI:10.1080/02652030119545.
- [52] 李兰杰, 魏子翔, 张静静, 等. 驴排、牛排和猪排中杂环胺的差异性分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(10): 300-307; 49. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.10.0376.
- [53] 盖圣美, 张雪娇, 王南, 等. 3种熏烤鸡肉制品中杂环胺含量的检测与比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(23): 6182-6187. DOI:10.3969/j.issn.2095-0381.2018.23.018.
- [54] OZ F, KABAN G, KAYA M. Effects of cooking methods and levels on formation of heterocyclic aromatic amines in chicken and fish with Oasis extraction method[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(9): 1345-1350. DOI:10.1016/j.lwt.2010.04.014.
- [55] 张根生, 王铁钧, 谢春丽, 等. 肉制品熟制过程中杂环胺控制技术研究进展[J]. 肉类研究, 2019, 33(7): 67-73. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190516-108.
- [56] BULA M, PRZYBYLSKI W, JAWORSKA D, et al. Formation of heterocyclic aromatic amines in relation to pork quality and heat treatment parameters[J]. Food Chemistry, 2019, 276: 511-519. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.10.073.
- [57] LU Fei, KUHNLE G K, CHENG Qiaofen. The effect of common spices and meat type on the formation of heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons in deep-fried meatballs[J]. Food Control, 2018, 92: 399-411. DOI:10.1016/j.foodcont.2018.05.018.
- [58] BALOGH Z, GRAY J I, GOMAA E A, et al. Formation and inhibition of heterocyclic aromatic amines in fried ground beef patties[J]. Food and Chemical Toxicology, 2000, 38(5): 395-401. DOI:10.1016/S0278-6915(00)00010-7.
- [59] 李贞明, 张贝贝, 余苗, 等. 植物提取物的生物学功能及其在肉鸡生产中的应用进展[J]. 广东农业科学, 2019, 46(6): 110-117. DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2019.06.015.
- [60] 包志碧, 陈仁伟, 刘旺景, 等. 植物提取物的防腐作用及其机理研究进展[J]. 饲料工业, 2018, 39(12): 58-64. DOI:10.13302/j.cnki.fi.2018.12.011.
- [61] 王中杭, 李浩, 宋泽和, 等. 植物提取物的抗氧化功能[J]. 湖南畜牧兽医, 2018(2): 54-55. DOI:10.3969/j.issn.1006-4907.2018.00.024.
- [62] TENGILIMOGLU-METIN M M, KIZIL M. Reducing effect of artichoke extract on heterocyclic aromatic amine formation in beef and chicken breast meat[J]. Meat Science, 2017, 134: 68-75. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.07.018.
- [63] 鄢嫣, 焦叶, 曾茂茂, 等. 黑胡椒提取物中抑制PhIP活性关键化合物的筛选与鉴定[J]. 中国食品学报, 2020, 20(4): 215-223. DOI:10.16429/j.1009-7848.2020.04.027.
- [64] CHENG Yiqun, YU Yajie, WANG Chong, et al. Inhibitory effect of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) molasses extract on the formation of heterocyclic amines in deep-fried chicken wings[J]. Food Control, 2020, 119: 2-19. DOI:10.1016/j.foodcont.2020.107490.
- [65] KHAN I A, LIU D M, YAO M J, et al. Inhibitory effect of *Chrysanthemum morifolium* flower extract on the formation of heterocyclic amines in goat meat patties cooked by various cooking methods and temperatures[J]. Meat Science, 2019, 147: 70-81. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.08.028.
- [66] TENGILIMOGLU-METIN M M, HAMZALIOGLU A, GOKMEN V, et al. Inhibitory effect of hawthorn extract on heterocyclic aromatic



- amine formation in beef and chicken breast meat[J]. Food Research International, 2017, 99: 586-595. DOI:10.1016/j.foodres.2017.06.044.
- [67] SABALLY K, SLENO L, JAUFFRIT J A, et al. Inhibitory effects of apple peel polyphenol extract on the formation of heterocyclic amines in pan fried beef patties[J]. Meat Science, 2016, 117: 57-62. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.02.040.
- [68] JING Jing, HE Yonghui, WANG Yali, et al. Inhibitory effects of *Portulaca oleracea* L. and selected flavonoid ingredients on heterocyclic amines in roast beef patties and Density Function Theory calculation of binding between heterocyclic amines intermediates and flavonoids[J]. Food Chemistry, 2021, 336: 2-6. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127551.
- [69] 于春娣, 邵泽平, 张燕, 等. 模拟体系中PhIP的产生规律及抑制作用研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(7): 18-22. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2017.07.005.
- [70] 孔繁磊, 于迪. 紫苏叶提取物抑制PhIP形成的研究[J]. 食品与发酵科技, 2019, 55(5): 35-39. DOI:10.3969/j.issn.1674-506X.2019.05-007.
- [71] JAIN A, SAMYKUTTY A, JACKSON C, et al. Curcumin inhibits PhIP induced cytotoxicity in breast epithelial cells through multiple molecular targets[J]. Cancer Letters, 2015, 365(1): 122-131. DOI:10.1016/j.canlet.2015.05.017.
- [72] XUE Chaoyi, HE Zhiyong, QIN Fang, et al. Effects of amides from pungent spices on the free and protein-bound heterocyclic amine profiles of roast beef patties by UPLC-MS/MS and multivariate statistical analysis[J]. Food Research International, 2020, 135: 2-6. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109299.
- [73] ZENG Maomao, WANG Junhui, ZHANG Mmengru, et al. Inhibitory effects of Sichuan pepper (*Zanthoxylum bungeanum*) and sanshoamide extract on heterocyclic amine formation in grilled ground beef patties[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 111-118. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.06.097.
- [74] TENG Hui, CHEN Yi, LIN XiuJun, et al. Inhibitory effect of the extract from *Sonchus oleraceus* on the formation of carcinogenic heterocyclic aromatic amines during the pork cooking[J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 129: 138-143. DOI:10.1016/j.fct.2019.04.043.
- [75] VITAGLIONE P, MONTI S, AMBROSINO P, et al. Carotenoids from tomatoes inhibit heterocyclic amine formation[J]. European Food Research and Technology, 2002, 215: 208-113. DOI:10.1007/s00217-002-0506-1.
- [76] ROUNDS L, HAVENS C M, FEINSTEIN Y, et al. Plant extracts, spices, and essential oils inactivate *Escherichia coli* O157:H7 and reduce formation of potentially carcinogenic heterocyclic amines in cooked beef patties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(14): 3792-3799. DOI:10.1021/jf204062p.
- [77] 李君珂, 孙雪梅, 柳全文, 等. 绿原酸对不同加热方式的草鱼品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 80-85. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190715-196.
- [78] 聂文, 屠泽慧, 张静, 等. 香兰素和维生素C对卤煮牛肉中杂环胺含量的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(6): 1987-1992.
- [79] BEATA J, AGNIESZKA N, MAGDALENA S, et al. Human exposure to biologically active heterocyclic aromatic amines arising from thermal processing of protein rich food[J]. Wiadomosci Lekarskie, 2019, 72(8): 1542-1550. DOI:10.36740/WLek201908123.