

香辛料的抗氧化活性及对肉制品中杂环胺的影响

曾茂茂, 王俊辉, 陈静, 张梦茹, 何志勇, 秦昉, 陈洁*

(食品科学与技术国家重点实验室, 江南大学, 江苏 无锡 214122)

摘要: 香辛料是一种重要的天然食品添加剂,被广泛应用于食品加工业中。大量研究表明:香辛料不仅具有增香和着色的效果,其中丰富的抗氧化活性成分还具有延长食品保质期的功效。作者综述了香辛料中的功能性成分,介绍了香辛料的抗氧化特性及其对肉制品中杂环胺类危害物生成的影响,为香辛料的抗氧化效应在肉制品加工过程中的安全控制应用提供参考。

关键词: 香辛料;抗氧化性;肉制品;杂环胺

中图分类号: TS 201.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673—1689(2018)01—0001—06

Antioxidant Capacity and Effect of Spices on Heterocyclic Amines Formation in Meat Products

ZENG Maomao, WANG Junhui, CHEN Jing, ZHANG Mengru, HE Zhiyong, QIN Fang, CHEN Jie*

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

Abstract: Spice is an important natural food additive, that widely used during food processing. A large number of researches have shown that it can not only enhance the fragrance and color, but also extend the shelf life of food since they are rich in phenolic compounds. This paper summarized the functional ingredients of spices, especially the antioxidant components and its effects on carcinogenic and mutagenic heterocyclic amine formation during meat processing, so as to provide references for the applications of spices in the safety control of meat processing procedures.

Keywords: spice, antioxidant properties, meat product, heterocyclic amines

香辛料是一类用于增加食品风味和颜色等的天然芳香植物的器官或组织及其提取物^[1],广泛用于改善食品的色香味及贮藏性等品质,其最早的应用可追溯至公元前几千年。天然香辛料是可直接使用的具有赋香、调香和调味功能的植物果实、种子、

花、根、茎、叶、皮或全株等天然植物性产品。根据其呈味特征可分为浓香型、辛辣型和淡香型天然香辛料。浓香型如丁香、八角茴香、牛至、罗勒等,辛辣型如大蒜、花椒、姜和辣椒等,淡香型如山柰、甘草、豆蔻等^[2]。由于香辛料在我国食品工业中得到了大

收稿日期: 2017-01-07

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2016689)。

作者简介: 曾茂茂(1982—),男,河南信阳人,工学博士,副教授,主要从事食品加工过程安全控制研究。E-mail: mmzeng@jiangnan.edu.cn

* 通信作者: 陈洁(1969—),女,江苏太仓人,工学博士,教授,博士研究生导师,主要从事食品蛋白质功能研究。

E-mail: chenjie@jiangnan.edu.cn

引用本文: 曾茂茂,王俊辉,陈静,等. 香辛料的抗氧化活性及对肉制品中杂环胺的影响[J]. 食品与生物技术学报,2018,37(01):01-06.

量的应用,因此国标中也列入了68种香辛料的名称(GB/T 12729.1-2008 香辛料和调味品)及其基本成分的测定方法^[3]。

杂环胺(Heterocyclic amines, HAs)是一大类致癌致突变的化学危害物,主要产生于富含蛋白质食品的加工过程中^[4]。肉制品是人们日常生活中的主要营养来源之一,烘烤、煎炸、微波等加工方式赋予肉类食品独特的风味,深受消费者青睐。然而,肉制品在经过高温加工后会产生多种杂环胺,长期大量摄入会对人体健康造成危害。香辛料是肉制品加工中经常使用的调味品,它们可以赋予肉制品独特的风味,同时也被证明可以显著影响杂环胺的生成,且可能与其抗氧化活性具有一定的关系^[5]。因此,作者总结了香辛料的抗氧化活性及其对肉制品中杂环胺生成的影响,并进一步探讨了目前相关研究的现状及发展趋势,为香辛料在肉制品中的应用提供一定的参考。

1 香辛料的活性组分及功能

香辛料主要来源于植物的花蕾、果实、根、茎、叶等组织和器官,其中含有大量的碳水化合物、蛋白质、脂肪和矿物质等组分及各种次生代谢产物。然而,香辛料的主要功能性组分为精油、辛辣味物质、色素和酚类等^[6]。香辛料精油是通过水蒸气蒸馏等物理方法提取香辛料植物的不同部位组织而得到的一类具有独特刺激性气味的天然香料,其成分非常复杂,大致可分为萜烯类、芳香族类、脂肪族和含氮含硫类。香辛料精油具有抗菌、抗氧化、驱虫和杀虫等生理功能而被用于食品的保鲜等^[7]。如采用体积分数0.1%八角精油、0.08%花椒精油和0.04%桂皮精油作为复合保鲜剂能使调理鸡肉串在4℃下保鲜达到20 d,25℃下保鲜16~18 h,同时能使鸡肉串产品保持复合香味浓郁、略带麻辣香味和风味协调宜人^[8]。复合香辛料精油成分(百里香酚、茴香脑、水杨醛、柠檬醛)可抑制花生仁霉变,在一定浓度以上时可完全抑制不同湿度下花生仁表面霉菌孢子的生长^[9]。香辛料的辛辣味物质主要为酰胺类物质,如辣椒中的辣椒碱、花椒中的花椒麻素和胡椒中的胡椒碱等。辣椒素可通过与辣椒素受体结合、调节褐色脂肪组织和白色脂肪组织、释放脂肪细胞因子、改变肠道菌群结构、调节饮食和肌肉组织功能等几种途径发挥降糖降脂作用^[10],花椒麻素

具有镇痛、麻醉、抗氧化、抗肿瘤和保护心血管等功效^[11];胡椒碱能明显改善胰岛素抵抗模型大鼠的脂代谢异常情况,降低大鼠甘油三酯和游离脂肪酸水平,也能通过上调中枢神经系统5-羟色胺的水平实现抗抑郁作用^[12]。香辛料色素如姜黄中的姜黄素、辣椒中的辣椒红素等,姜黄素能够通过调节肿瘤细胞的信号传递,从而调节肿瘤细胞中某些酶活性及蛋白质、基因的表达而具有显著的抗肿瘤作用^[13]。香辛料中的酚类物质则被认为具有抗氧化、抗菌、抗病毒和抗炎等作用^[14]。

2 香辛料及其活性成分的抗氧化性研究

2.1 香辛料中的抗氧化活性成分

香辛料的抗氧化性是其被研究最为深入和广泛的活性之一。香辛料的化学组成成分十分复杂,其主要的抗氧化性成分是由挥发油、酚类、黄酮类、萜类、醛类、酮类、酸类、醇类、酯类、生物碱类和不饱和烃类等组成^[15]。

2.2 香辛料中抗氧化物质的提取方法

香辛料中抗氧化成分的提取目前多采用有机溶剂浸提法、索氏提取法和超临界流体萃取法等,其中溶液浸提法和索氏提取法已经得到了广泛应用,而超临界流体萃取因其工艺简单,且不需要分离溶剂,大大缩短提取时间等优势,也越来越受到研究者的青睐^[16]。刘学武等^[17]采用超临界流体萃取提取胡椒油,并优化了工艺条件,获得了80%~90%的累积萃取率。陈建华等^[18]利用超临界CO₂萃取技术对黑胡椒中的有效成分进行了研究,研究结果表明超临界CO₂萃取黑胡椒油树脂的最佳条件为: m (原料): m (体积分数95%食用乙醇)=2:1、萃取压力30 MPa、萃取温度50℃、萃取时间4 h,在该条件下油树脂得率为7.88%,油树脂中胡椒碱质量分数为65.79%。柳中等人^[19]采用索氏提取法提取白胡椒油树脂,实验结果表明:使用氯仿提取白胡椒油树脂的得率最高,但因其有一定毒性所以综合考虑乙醇为最佳提取溶剂,并得出提取白胡椒油树脂的最优工艺条件:蒸馏萃取时间5 h、料液质量体积比15 g:100 mL、颗粒破碎度80目,此条件下胡椒油树脂的得率为12.06%。何文珊等人^[20]采用有机溶剂萃取法考察和比较了生姜等6种常用香辛料提取物的抗氧化作用。

2.3 香辛料提取物抗氧化能力的评价方法

目前用来评价抗氧化能力的方法多种多样,主

要可分为体内和体外两大类。对于人体来说,自由基会不断产生,但同时也会以一定的方式被清除,当生成量大于清除量时即会对机体造成一定的损伤。因此体内抗氧化的评价可通过测定体内抗氧化酶活性或氧化应激的生物标志物的水平来衡量^[21]。抗氧化酶有超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)等,这些酶可清除特定的自由基,若这些酶的活性升高,则说明受试物具有抗氧化能力;氧化应激可导致机体的脂质、蛋白质和DNA等发生氧化损伤,如脂质发生过氧化反应可产生丙二醛(MDA),蛋白质氧化使得体系羰基含量增加,DNA氧化生成8-羟基-2'-脱氧鸟苷(8-OHdG)等,这些物质的水平降低程度可用于评价受试物的抗氧化能力。

体外评价方法根据其机理可分为基于脂质氧化的方法,基于清除自由基的方法和基于还原能力的方法^[22]。脂质在氧化后会生成不稳定的氢过氧化物,并继续分解生成醛类等小分子化合物,抗氧化剂则可以抑制这些小分子产物的生成,由此采用不同的方法测定这些氧化产物可以得到待测物的抗氧化能力,如过氧化值法(PV)、硫氰酸铁法(FTC)、共轭二烯法、硫代巴比妥酸法(TBARS)。清除自由基则包括生物体中存在的自由基如超氧自由基($O_2^{\cdot-}$)、过氧化氢(H_2O_2)、过氧自由基($ROO^{\cdot}$)、羟自由基($HO^{\cdot}$)和过氧化氮自由基($ONOO^{\cdot}$)以及人工合成的自由基如ABTS自由基和DPPH自由基等。基于还原能力的方法则包括铁离子还原能力(FRAP)、铜离子还原能力(CUPRAC)等。

2.4 香辛料的抗氧化效果

王冬冬等^[23]以DPPH自由基为指标,发现桂皮

的抗氧化性强于生姜和白果。吕美^[24]研究发现高良姜具有最强的抗氧化能力和最高的总酚含量。李婷等^[24]研究表明草果的抗氧化性最好,桂皮、香叶、檀香的抗氧化性次之。豆海港^[25]采用DPPH法评价了24种香辛料提取物的抗氧化活性,结果表明,丁香提取物、桂皮提取物和花椒提取物对DPPH自由基清除效果明显优于其它几种香辛料的提取物。据张恬静^[26]报道,就超氧阴离子清除能力来说肉桂精油强于丁香精油。王颖等^[27]比较了黑、白胡椒精油和合成的食用抗氧化剂的体外抗氧化和清除自由基性能,发现黑、白胡椒精油具有较好的清除超氧阴离子自由基能力。陈璐^[28]发现添加迷迭香、丁香和桂皮提取物能够显著延缓冷冻肉丸中的脂肪氧化。顾仁勇^[29]等的研究结果表明牛至、山苍子、丁香、连翘和肉桂五种香辛料精油均具有一定的抗氧化性能,但5种精油抗氧化能力均弱于TBHQ。

3 香辛料对肉制品中杂环胺的作用

3.1 杂环胺简介

杂环胺(Heterocyclic Amines, HCAs)是一大类致癌致突变化学危害物,主要产生于肉制品等富含蛋白质的食品加工过程中^[5]。杂环胺按其分子结构可分为氨基咪唑氮杂芳烃类和氨基吡啶类两大类,如表1所示,其中IQ被国际癌症研究机构划分为2A类致癌物^[30]。加工方式对杂环胺的生成影响较大,烧烤和油炸等温度较高的加工方式能生成较高水平的杂环胺,而炖煮等较温和的方式则会产生少量的杂环胺。此外,在食品加工过程中添加一些天然抗氧化剂等能对杂环胺的生成起到一定的抑制作用^[31]。

表1 杂环胺的分类、缩写、相对分子质量和CAS号

Table 1 Classification, abbreviation, molecular weight and CAS number of HCAs

中英文化学名称	缩写	MW	CAS
I. 氨基咪唑氮杂芳烃类(aminoimidazoarenes, AIAs)			
1. 吡啶类(imidazopyridine derivatives)			
2-氨基-1,6-二甲基咪唑[4,5-b]-吡啶 (2-amino-1,6-dimethylimidazo[4,5-b]-pyridine)	DMIP	162	132898-04-5
2-氨基-1,5,6-三甲基咪唑[4,5-b]-吡啶 (2-amino-1,5,6-trimethylimidazo[4,5-b]-pyridine)	1,5,6-TMIP	176	161091-55-0
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	224	105650-23-5
2. 喹啉类(imidazoquinoline derivatives)			
2-氨基-3-甲基咪唑[4,5-f]-喹啉 (2-amino-3-methyl-imidazo[4,5-f]-quinoline)	IQ	198	76180-96-6
2-氨基-3,4-二甲基咪唑[4,5-f]-喹啉 (2-amino-3,4-dimethyl-imidazo[4,5-f]-quinoline)	MeIQ	212	77094-11-2
2-氨基-1-甲基咪唑[4,5-b]-喹啉 (2-amino-1-methyl-imidazo[4,5-b]-quinoline)	IQ[4,5-b]	198	156215-58-6

续表 1

中英文化学名称	缩写	MW	CAS
3. 喹啉(imidazoquinoxaline derivatives)			
2-氨基-3-甲基咪唑[4,5-f]-喹啉 (2-amino-3-methyl-imidazo[4,5-f]-quinoxaline)	IQx	199	108354-47-8
2-氨基-3,8-二甲基咪唑[4,5-f]-喹啉 (2-amino-3,8-dimethyl-imidazo[4,5-f]-quinoxaline)	8-MeIQx	213	77500-04-0
2-氨基-3,4,8-三甲基咪唑 [4,5-f]-喹啉 (2-amino-3,4,8-trimethyl-imidazo [4,5-f]-quinoxaline)	4,8-DiMeIQx	227	95896-78-9
2-氨基-3,7,8-三甲基咪唑 [4,5-f]-喹啉 (2-amino-3,7,8-trimethyl-imidazo [4,5-f]-quinoxaline)	7,8-DiMeIQx	227	92180-79-5
2-氨基-3,4,7,8-四甲基咪唑[4,5-f]-喹啉 (2-amino-3,4,7,8-tetramethyl-imidazo[4,5-f]-quinoxaline)	4,7,8-TriMeIQx	241	132898-07-8
II. 氨基咪啉类(carbolines)			
1. α-咪啉类(α-carbolines)			
2-氨基-9H-吡啶并[2,3-b]咪啉 (2-amino-9H-pyrido[2,3-b]indole)	AαC	183	26148-68-5
2-氨基-3-甲基-9H-吡啶并[2,3-b]咪啉 (2-amino-3-methyl-9H-pyrido[2,3-b]indole)	MeAαC	197	68006-83-7
2. β-咪啉类(β-carbolines)			
1-甲基-9H-吡啶并[3,4-b]咪啉 (1-methyl-9H-pyrido[3,4-b]indole)	Harman	182	486-84-0
9H-吡啶并[3,4-b]咪啉 (9H-pyrido[3,4-b]indole)	Norharman	204	7259-44-1
3. γ-咪啉类(γ-carbolines)			
3-氨基-1,4-二甲基-5H-吡啶[4,3-b]咪啉 (3-amino-1,4-dimethyl-5H-pyrido[4,3-b]indole)	Trp-P-1	271	68808-54-8
3-氨基-1-甲基-5H-吡啶[4,3-b]咪啉 (3-amino-1-methyl-5H-pyrido[4,3-b]indole)	Trp-P-2	257	72254-58-1
4. δ-咪啉类(δ-carbolines)			
2-氨基-6-甲基二吡啶并[1,2-a:3',2'-d]咪唑 (2-amino-6-methyldipyrido-[1,2-a:3',2'-d]imidazole)	Glu-P-1	234	210049-10-8
2-氨基-二吡啶[1,2-a:3',2'-d]咪唑 (2-aminodipyrido-[1,2-a:3',2'-d]imidazole)	Glu-P-2	257	sc-479635
5. 苯基吡啶类(phenylpyridine derivatives)			
2-氨基-5-苯基吡啶 (2-amino-5-phenylpyridine)	Phe-P-1	170	33421-40-8

3.2 杂环胺的提取方法

由于杂环胺在烹调肉制品中的含量极低,且食品本身是一个非常复杂的体系,存在着众多的干扰物质,因此需要首先对样品中的杂环胺进行分离富集。样品前处理首先需要采用一定的方法去除蛋白质^[32],随后采用固相萃取等对杂环胺进行富集。1992年,Gross 等人^[33]提出了阳离子交换和 C₁₈ 反相固相萃取串联法,用于复杂样品中杂环胺的分离富集。为了简化杂环胺的分离富集步骤,混合型阳离子交换固相萃取 Oasis MCX 小柱最近被用来取代 Gross 法中的串联固相萃取,获得了较好的效果^[34]。

3.3 杂环胺的检测方法

目前,肉制品中杂环胺的分离检测主要采用色谱或色谱质谱法,如毛细管电泳法(CE),气相色谱(GC)和气相色谱质谱法(GC-MS),液相色谱(HPLC)和液相色谱质谱法(HPLC-MS/MS)等^[35]。由于大部分杂环胺极性较大且为难挥发的物质,因此采用 GC、GC/MS 检测时,需将杂环胺衍生化为挥发

性物质,因目前采用的酰基化等衍生化技术操作较为繁琐、检测灵敏度低,因而限制了此方法的应用。HPLC 特别适合于分析极性、难挥发和热不稳定化合物,与 GC 相比不需要做衍生处理,并且具有快速、高效、灵敏度高和应用范围广等特点。LC-MS 兼有色谱的高效分离和质谱的高灵敏特性,以及串联二级质谱的高选择性。由于杂环胺含量非常低,加之含有杂环胺的样品基质十分复杂,所以液质联用技术得到了广泛应用。

3.4 香辛料对杂环胺的作用效果

不同种类的香辛料对杂环胺的作用效果不同,即使是同一种香辛料,因作用机制不同,对杂环胺的作用效果也不相同。姚瑶等人^[36]用福林-酚法和 ABTS 法测定 20 种香辛料的总酚含量和抗氧化能力,并用 HPLC 法测定杂环胺含量,所选取的丁香、桂皮、良姜、红花椒和香叶对杂环胺种类和含量的影响具有特异性;5 种香辛料均能显著降低 Harman 和 Norharman 的含量 ($P<0.05$),对 7,8-DiMeIQx、

Trp-P-1 及 Trp-P-2 3 种杂环胺影响各不相同。此外,香叶还能促进对照样品中未检测出的 2-氨基-3,4-二甲基咪唑并[4,5-f]喹啉(MeIQ)的形成,而良姜和红花椒对总杂环胺的含量具有显著的抑制效果。Zeng 等人^[37]采用超高效液相色谱串联三重四极杆质谱技术,研究了 6 种中国家庭常用香辛料对烘烤牛肉饼中的 17 种杂环胺的影响,结果表明,花椒能够抑制杂环胺的形成,然而,八角、茴香、小茴香、辣椒和黑胡椒都能够促进杂环胺的形成。Jinap 等人^[38]研究表明,姜黄可以显著抑制极性杂环胺的产生,生姜可以使 MeIQX 减少到 83 ng/hg 牛肉。利用超高效液相和荧光检测技术,研究了牛至、墨角兰、迷迭香、香薄荷、香菜等 7 种香辛料提取物对牛肉中杂环胺的影响,结果表明,添加一定量的百里香、香薄荷和牛至提取物可一定程度上降低 PhIP 的生成,其他的香辛料提取物对 PhIP 的形成没有任何影响,然

而在某种情况下它们还可以促进 PhIP 的形成,尤其是罗勒提取物。

4 展望

香辛料是我国非常丰富的天然抗氧化剂资源,且我国自古就有采用香辛料用于食品加工的传统。因此,采用香辛料在增加食品色香味的同时抑制食品加工过程中杂环胺等有害物质的生成具有良好的前景。然而,目前关于香辛料对杂环胺等有害物质的研究多从其中酚类物质的抗氧化性入手,但大量研究表明,具有良好抗氧化性的香辛料及酚类物质不仅对杂环胺等有害物质的生成没有显著影响,甚至明显促进它们的生成,因此,关于香辛料对杂环胺等危害物的影响需要从非抗氧化理论来探讨,并进一步考察非酚类活性成分的作用。

参考文献:

- [1] ZHU Xinwu, ZENG Xiaofang, LU Changhai, et al. The antioxidant effectiveness of spices and their combination on lard oxidation [J]. **China Food Additives**, 2015(2): 146-150. (in Chinese)
- [2] PENG Lin, LI Mingze, REN Wenjin, et al. The advance of physiology functions of spices [J]. **Food and Fermentation Industries**, 2012, 38(2): 157-162. (in Chinese)
- [3] GB/T12729.1-2008, 香辛料和调味品 - 名称[S].
- [4] OVERVIK E, KLEMAN M, BERG I, et al. Influence of creatine, amino acids and water on the formation of the mutagenic heterocyclic amines found in cooked meat[J]. **Carcinogenesis**, 1989, 20(12): 2293-2301.
- [5] 吕美. 香辛料的抗氧化性及其对煎烤牛肉饼中杂环胺形成的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- [6] TONG Qingxuan, LUO Xiaofei, LIANG Shi. Spice plants and the main chemical components of spices [J]. **Chinese Wild Plant Resources**, 2009, 28(4): 60-68. (in Chinese)
- [7] GU Renyong, ZHANG Shifeng, LIU Yingying et al. Study on anti-oxidation and bacteriostasis of five spices essential oil[J]. **Food Science**, 2008, 29(3): 106-108. (in Chinese)
- [8] CAI Huazhen, HE Ling, WANG Qiao, et al. The preservative effect of several common spice essential oils on chilled chicken kebabs[J]. **Food and Fermentation Industries**, 2016, 42(7): 236-241. (in Chinese)
- [9] LIU Xiaoli, WU Kegang, CHAI Xianghua, et al. Effects of recomposed essential oils on fungi action and quality of peanuts during storage[J]. **Cereals & Oils**, 2012(6): 28-31. (in Chinese)
- [10] WANG Yuanwei, LIU Xiong. Advances in hypoglycemic and hypolipidemic mechanisms of capsaicin[J]. **Food Science**, 2016, 37(9): 227-231. (in Chinese)
- [11] CHEN Chaojun, LIU Yun, LU Hongjia, et al. Hypolipidemic effects of numb-tasting components of *Zanthoxylum bungeanum* combined with capsaicin at various ratios on rats[J]. **Food Science**, 2014, 35(19): 231-235. (in Chinese)
- [12] SONG Nali, WAN Chunping, WANG Hui, et al. Lipid metabolism and mechanism research of piperine on glucose metabolism of model rats with insulin resistance syndrome[J]. **Chinese Pharmacological Bulletin**, 2016, 32(12): 1746-1749. (in Chinese)
- [13] WANG Xiaoqing, LIANG Zhongqin, GU Zhenlun. Advances in studies on antitumor activity of curcumin [J]. **Chinese Traditional and Herbal Drugs**, 2004, 35(3): 347-350. (in Chinese)
- [14] SHAHIDI F, AMBIGAIPALAN P. Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: antioxidant activity and health effects-a review[J]. **Journal of Functional Foods**, 2015, 18: 820-897.

- [15] SRINIVASAN K. Antioxidant potential of spices and their active constituents [J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 2014, 54:352-372.
- [16] LI Ting, HOU Xiaodong, DOU Haigang, et al. The development of extraction and isolation about antioxidant activity for spices [J]. **China Condiment**, 2007(6):20-27. (in Chinese)
- [17] LIU Xuewu, LI Zhiyi, XIA Yuanjing, et al. Supercritical CO₂ extraction of pepper oil [J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2004, 19(6):57-59. (in Chinese)
- [18] CHEN Jianhua, WENG Shaowei, LI Zhong, et al. Comprehensive extraction of active components from black pepper by supercritical CO₂ [J]. **Fine Chemicals**, 2010, 27(10):991-995. (in Chinese)
- [19] LIU Zhong, LI Yincong. Soxhlet extraction of white pepper oleoresin technology [J]. **Food and Fermentation Technology**, 2011, 47(1):65-67. (in Chinese)
- [20] HE Wenshan, LI Yan, LI Lin, et al. Evaluation of antioxidative capacity of several spices on oil oxidation [J]. **Chinese Condiment**, 2011, 47(1):65-67. (in Chinese)
- [21] WOOD L G, GIBSON P G, GARG M L. A review of the methodology for assessing in vivo antioxidant capacity [J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2006, 86:2057-2066.
- [22] BUNACIU A A, DANET A F, FLESCHEIN S, et al. Recent applications for in vitro antioxidant activity assay [J]. **Critical Reviews in Analytical Chemistry**, 46(5):389-399.
- [23] 王冬冬. 香辛料提取物抗氧化性的研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2011.
- [24] LI Ting, HOU Xiaodong, CHEN Wenxue, et al. Antioxidant activities of the extracts of spices [J]. **Chinese Journal of Tropical Crops**, 2008, 29(3):295-298. (in Chinese)
- [25] 豆海港. 香辛料提取物抗氧化作用研究[D]. 儋州:华南热带农业大学, 2007.
- [26] 张恬静. 香辛料精油抗氧化作用对烤肉理化特性的影响[D]. 重庆:西南大学, 2010.
- [27] WANG Ying, JIANG Zitao, LI Rong, et al. Comparison of antioxidant activities and free radical scavenging potential of black pepper and white pepper (*Piper nigrum* L.) essential oils [J]. **China Condiment**, 2009, 34(5):50-58. (in Chinese)
- [28] 陈璐. 香辛料提取物在肉糜制品中抗氧化效果的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2012.
- [29] 顾仁勇. 五种香辛料精油的提取及用于冷却猪肉保鲜研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2007.
- [30] YAO Yao, PENG Zengqi, SHAO Bin, et al. Heterocyclic aromatic amines in processed meat products [J]. **Food Science**, 2010, 31(23):447-453. (in Chinese)
- [31] OGURI A, SUDA M, TOTSUKA Y, et al. Inhibitory effects of antioxidants on formation of heterocyclic amines [J]. **Mutagenesis Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis**, 1998, 402(1-2):237-245.
- [32] KNIZE M G, FELTON J S. Chromatographic methods for the analysis of heterocyclic amine food mutagens/carcinogens [J]. **Journal of Chromatography A**, 1992, 624(1-2):253-265.
- [33] GROSS G A, GRUTER A. Quantitation of mutagenic/carcinogenic heterocyclic aromatic amines in food products [J]. **Journal of Chromatography A**, 1992, 592(1-2):271-278.
- [34] 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.
- [35] QIN Chuan, ZHENG Zongping, ZENG Maomao, et al. Research progress in detection methods and control measures for heterocyclic aromatic amines in processed meat products [J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2013, 34(3):370-374. (in Chinese)
- [36] YAO Yao, PENG Zengqi, SHAO Bin, et al. Effects of the antioxidant capacities of 20 spices commonly consumed on the formation of heterocyclic amines in braised sauce beef [J]. **Scientia Agricultura Sinica**, 2012, 45(20):4252-4259. (in Chinese)
- [37] ZENG M M, HE Z Y, ZHENG Z P, et al. Effect of six Chinese spices on heterocyclic amine profiles in roast beef patties by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry and principal component analysis [J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2014, 62(40):9908-9915.
- [38] JINAP S, IQBAL S Z, SELVAM R M P. Effect of selected local spices marinades on the reduction of heterocyclic amines in grilled beef (satay) [J]. **LWT-Food Science and Technology**, 2015, 63(2):919-926.