

单宁的抗氧化调控机制及其在肉品中的应用

韩云飞, 张雯雯, 张艳妮, 郭月英, 苏琳, 段艳*
(内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 肉品的过度氧化严重影响产品质量, 给肉品企业造成巨大的经济损失。单宁作为天然抗氧化剂具有资源丰富、可再生、价格低廉、食用安全等优势, 且抗氧化效果与合成抗氧化剂相当。单宁在生物体内对机体具有抗氧化作用, 其调控机制是一个多途径、多靶点的复杂过程。在肉品加工贮藏过程中, 单宁也可通过清除自由基、螯合金属离子等机制发挥抗氧化作用。因此单宁不仅可添加到动物日粮中减缓屠宰后肉的氧化, 而且可通过直接添加到肉或肉品包装材料中等方式发挥作用。本文综述单宁在动物体内及肉品加工贮藏过程中的抗氧化调控机制和氧化评价方法, 并分析单宁的抗氧化作用在肉品中的应用现状, 以期单宁作为抗氧化剂的广泛应用提供理论参考。

关键词: 单宁; 天然抗氧化剂; 氧化还原系统; 抗氧化信号通路; 肉品

Antioxidant Mechanism of Tannin and Its Application in Meat Products

HAN Yunfei, ZHANG Wenwen, ZHANG Yanni, GUO Yueying, SU Lin, DUAN Yan*
(College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: Excessive oxidation of meat products seriously and negatively affects their quality, causing huge economic losses to meat companies. As a natural antioxidant, tannin has the advantages of rich sources, renewability, low price, and being safe for humans to eat, and its antioxidant effect can be comparable to that of synthetic antioxidants. Tannin has an antioxidant effect in living organisms, and the underlying mechanism is a complex process with the involvement of multiple pathways and targets. During meat processing and storage, tannin can exert an antioxidant effect by removing free radicals, chelating metal ions, and so forth. Therefore, tannin can not only be added to animal diets to retard the oxidation of meat after slaughter, but also can be used directly by adding it to meat or meat packaging materials. This article reviews the antioxidant mechanism of tannin in animals and in meat products during processing and storage as well as the methods used to evaluate its antioxidant effect, and it also summarizes the current status of the application of tannin as an antioxidant in meat products, hoping to provide scientific reference for the widespread application of tannin as an antioxidant.

Keywords: tannins; natural antioxidant; oxidation-reduction system; antioxidant signaling pathway; meat products

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200417-097

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123(2020)07-0091-06

引文格式:

韩云飞, 张雯雯, 张艳妮, 等. 单宁的抗氧化调控机制及其在肉品中的应用[J]. 肉类研究, 2020, 34(7): 91-96.

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200417-097. <http://www.rlyj.net.cn>

HAN Yunfei, ZHANG Wenwen, ZHANG Yanni, et al. Antioxidant mechanism of tannin and its application in meat products[J]. Meat Research, 2020, 34(7): 91-96. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200417-097. <http://www.rlyj.net.cn>

单宁, 又称单宁酸, 是一类结构复杂的植物次级代谢产物, 属于酚类聚合物^[1]。人类对单宁的应用始于鞣革, 将这种能够将动物的皮转化为柔软的革的植物提

取物描述为植物多酚^[2]。虽然经研究, 多酚概念明确但单宁很难被准确定义, 因为它是包含多种不同寡聚物和多聚物的一类聚合物的总称。目前, 普遍认为分子质量

收稿日期: 2020-04-17

基金项目: 内蒙古自然科学基金面上项目(2018MS03050; 2018MS03054); 内蒙古自治区科技创新引导项目(KCJB2018068);

国家自然科学基金地区科学基金项目(31660439)

第一作者简介: 韩云飞(1994—)(ORCID: 0000-0003-2205-589X), 女, 博士研究生, 研究方向为肉品科学与技术。

E-mail: hanyunfei122@163.com

*通信作者简介: 段艳(1980—)(ORCID: 0000-0002-9554-4240), 女, 副教授, 博士, 研究方向为畜产品加工。

E-mail: duanyannmg@126.com

500~3 000 Da、可与蛋白质、生物碱及明胶发生沉淀反应的酚类聚合物为单宁^[3-4]。单宁存在于植物的各个部位, 高温、干旱、紫外线照射及贫瘠土壤等条件会使植物中单宁的含量增加, 我国西部单宁资源丰富, 优质植物品种中单宁含量在40%以上, 如五倍子中单宁含量约为70%^[5-7]。单宁的基本结构是苯环上连接邻-二羟基或邻-三羟基, 分为水解单宁和缩合单宁两类。水解单宁由酚酸和羟基通过苷键或酯键形成, 容易在酸或酶的作用下水解。根据水解产物的不同, 水解单宁可分为没食子单宁和鞣花单宁。没食子单宁的产物是没食子酸, 鞣花单宁的产物是六羟基联苯二酸和鞣花酸。水解单宁主要来源于坚果、栗子、橡树、石榴树皮等^[8-10]。缩合单宁, 又称原花青素, 由羟基黄酮类化合物以碳-碳键相连缩合而成, 其主要来源于蔬菜、水果和茶叶, 如葡萄中的单宁、柿单宁、茶叶中的儿茶素等^[11-14]。

近年来, 学者对抗氧化剂的研究越来越多, 常用的合成抗氧化剂已被证明与肠胃疾病及癌变有关, 因此, 天然抗氧化剂的开发利用势在必行^[15-16]。目前, 单宁的抗氧化作用被广泛应用于食品包装、酿酒、医学、化妆品等各个领域^[17-20]。单宁在食品中的抗氧化效果与合成抗氧化剂相当, 并且具有资源丰富、价格低廉等优势, 可作为天然抗氧化剂深度开发应用^[21]。本文综述单宁清除自由基、螯合金属离子、诱导氧化还原系统及调控Kelch样环氧氯丙烷相关蛋白1-核因子E2相关因子2/抗氧化反应元件(Kelch-like epoxy chloropropane-associated protein 1-nuclear factor erythroid 2-related factor/antioxidant response elements, Keap1-Nrf2/ARE)抗氧化信号通路等抗氧化机制, 分析单宁的抗氧化作用在肉品中的应用现状, 为其广泛应用提供参考。

1 单宁抗氧化机制

1.1 清除活性氧(reactive oxygen species, ROS)

在机体代谢及肉品氧化过程中会产生大量ROS, 因其含不成对电子而具有较强的氧化反应活性, 单宁可通过提供氢或电子增强其稳定性^[22]。国内外对单宁的自由基清除作用已有较多报道, 如咎志惠^[23]研究表明, 核桃揪外果皮及叶单宁提取物具有羟自由基、超氧阴离子自由基清除能力, 且在质量浓度1~7 mg/mL范围内清除能力随提取物质量浓度增大而增强。Panzella等^[24]研究栗树纤维、枯竭的栗树木、新鲜的栗树木、白坚木纤维、枯竭的白坚木、新鲜的白坚木等材料中提取单宁的抗氧化性, 发现所提取单宁均具有1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除能力。Cao Peng等^[25]研究发现, 原花青素二聚体可降低由过量乙醇诱导的细胞损伤过程中ROS的

生成, 减少细胞的氧化损伤。综上所述, 单宁具有较强的ROS清除能力。

1.2 螯合金属离子

在机体及肉品中, 金属离子不仅可以催化过氧化物进一步氧化, 还可以通过Fenton反应产生大量自由基, 是促进氧化反应的重要因素之一^[26]。单宁中2个相邻的酚羟基能以氧负离子的形式与金属离子形成稳定的五元环螯合物, 第3个酚羟基虽未参与络合, 但可促进另2个酚羟基的离解, 增强络合物的形成及稳定, 从而降低金属离子催化能力^[27-28]。根据Chen^[29]、孙世利^[30]等的报道, 儿茶素(单宁的一种)可以与 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 形成稳定的络合物, 是很好的金属螯合剂。单宁可以增强机体及肉品的金属离子螯合能力, 因此可降低金属对脂质氧化的催化作用, 进而发挥抗氧化效果。

1.3 诱导氧化还原系统

还原型谷胱甘肽(glutathione, GSH)系统和硫氧还蛋白(thioredoxin, Trx)系统是机体中2个主要氧化还原系统, 二者相互关联, 共同维护机体的还原状态以及保护其免受氧化损伤^[31-32]。还原型GSH系统主要由GSH、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GPx)、谷胱甘肽还原酶及谷胱甘肽转硫酶组成, 是抗氧化损伤的第1道防线^[33]。GSH是一种非蛋白肽(Glu-Cys-Gly), 通过上调抗凋亡基因*Bcl-2*、下调促凋亡基因*Bcl-2*相关*Bax*基因表达, 调节*Bcl-2/Bax*比值, 清除机体内自由基, 发挥抗氧化作用^[34]。GPx在GSH的激活下可降解过氧化物 H_2O_2 ^[35]。Cao Peng等^[25]用原花青素二聚体饲喂大鼠, 其脂肪组织中脂肪沉积减少, GSH水平显著提高, ROS含量减少。贾玉洁等^[35]研究显示, 将原花青素以低(100 mg/kg)、中剂量(200 mg/kg)灌胃大鼠, 大鼠大脑皮质*Bcl-2*基因表达量明显增加, *Bax*基因表达量明显减少。可见, 单宁可调控机体GSH系统发挥抗氧化作用。

Trx系统是由Trx、硫氧还蛋白还原酶(thioredoxin reductase, TrxR)、过氧化物酶等组成的还原系统, 对清除ROS、维持氧化还原系统具有重要作用^[31,36]。Trx是一种分子质量为12 kDa的蛋白质, 包括还原型和氧化型2种形式, 氧化型Trx- S_2 可被TrxR还原成还原型Trx-(SH)₂, 调节多种底物的氧化还原状态, 并且还原型Trx-(SH)₂还可直接清除ROS^[37]。此外, Trx通过调控细胞凋亡信号调节激酶1(apoptosis signal regulating kinase 1, ASK1)促进丝裂原活化蛋白激酶的表达或调控核因子 κB (nuclear factor κB , NF- κB)通路等参与氧化还原反应。黄卫梅^[38]研究表明, 原花青素B₂(缩合单宁)可使氧化损伤细胞超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、GPx、过氧化氢酶(catalase, CAT)活性和GSH含量升高, 丙二醛、ROS含量降低, 同时ASK1蛋白的表达下降, 因此证明原花青素B₂具有抗氧化保护作用。Tyagi等^[39]

报道, 葡萄籽提取的原花青素B₂可抑制前列腺癌细胞NF-κB的表达, 发挥抗氧化作用。

1.4 调控氧化应激相关信号通路

单宁能够调控机体与氧化应激相关的信号通路, 以缓解氧化损伤。目前, 单宁主要调控通路为Keap1-Nrf2/ARE。Nrf2是CNC-bZip家族的一员, 是维持氧化还原反应必不可少的转录因子, 其上游调控基因有JNK、ERK、p38^[35,40]。正常状态下Nrf2与Keap1结合存在于细胞质中, 当发生氧化应激时, Nrf2迅速转移到细胞核中, 与ARE结合, 诱导SOD、CAT、GPx、NAD(P)H: 醌氧化还原酶1、血红素加氧酶-1 (heme oxygenase-1, HO-1)、Trx、p53等抗氧化酶/蛋白的表达, 如图1所示^[33,40-43]。单宁可通过调控JNK、p38基因激活Keap1-Nrf2/ARE信号通路, 产生抗氧化酶及蛋白, 发挥抗氧化作用。Xu Haiyan^[40]、Han Hedan^[41]等通过细胞诱导实验表明, JNK、p38基因调控原花青素, 激活Nrf2。根据Han Shan等^[42]研究报道, 原花青素A₁可降低RAW264.7细胞中Keap1的表达, 促进Nrf2进入细胞核, 增强HO-1的表达。Truong等^[43]报道, 经杏仁皮提取的原花青素诱导细胞Nrf2和ARE调控基因表达量增高, 而且抗氧化蛋白SOD-2、CAT、GPx的表达量显著提高。可见, 单宁可通过激活机体Keap1-Nrf2/ARE信号通路, 从而产生抗氧化酶等, 对机体发挥抗氧化作用。

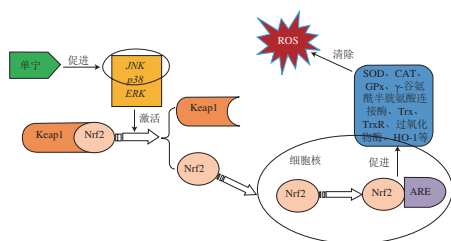


图1 单宁在Keap1-Nrf2/ARE信号通路发挥抗氧化作用的途径^[33,40-43]

Fig. 1 Tannins play an antioxidant role in the Keap1-Nrf2/ARE signaling pathway^[33,40-43]

2 单宁抗氧化作用评价方法

2.1 化学评价法

化学评价法简单易行, 费用较低, 适用于物质抗氧化活性的初步探究, 且实验条件单一, 评价指标更具针对性。通过供氢原子和电子发挥抗氧化作用进行实验设计, 目前常用的化学抗氧化评价法有DPPH自由基、2,2'-联氮-双(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐(2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS) 阳离子自由基、羟基、超氧阴离子自由基、总氧自由基、过氧化氢自由基清除法、铁还原法、氧化自由基吸收能力法、金属离子螯合能

力法等^[26,44]。Zarin等^[45]通过铁离子还原能力、DPPH和ABTS阳离子自由基清除能力测定研究表明, 单宁具有较强的抗氧化性。

2.2 生物评价法

生物学评价方法包括细胞模型、动物模型和人体实验, 价格相对较昂贵, 实验要求较高, 因此不适于抗氧化剂抗氧化活性的初步研究工作, 生物评价法可模拟人体生长环境, 更接近生物体真实的调控系统, 在化学评价法基础上可应用于深入研究。目前建立细胞及动物模型研究单宁抗氧化作用的研究较多, 人体实验还有待探究。

2.2.1 细胞模型评价方法

细胞模型以细胞为载体, 因未脱离生物体本身, 故比化学评价法能更真实地体现氧化还原反应。相对于动物模型, 细胞模型周期短、影响因素少, 是现代生物学研究常用的实验评价方法之一^[46]。其基本原理是物质作用于细胞, 引起细胞内氧化还原反应, 监测特异性指标四甲基偶氮唑盐、乳酸脱氢酶、三磷酸腺苷等标志物及荧光值的变化, 反映物质的细胞抗氧化活性^[41,47]。Ho^[47]、Han Hedan^[41]等分别采用人骨骼肌细胞和人胚胎肾细胞研究单宁对人体细胞ROS、抗氧化酶/蛋白等的影响, 发现单宁具有较强的抗氧化活性。

2.2.2 动物模型评价方法

化学评价和细胞模型评价方法等体外实验只能通过模拟机体内部的环境对单宁的抗氧化特性进行初步评价, 不能确定其在机体内部是否能够同样发挥作用, 因此需要建立动物模型, 测定其血液、组织中与氧化相关的指标, 验证单宁缓解氧化应激的能力^[48-49]。Tian Yan等^[48]将单宁添加到氧化损伤小鼠饲料中, 研究其抗氧化性, 结果表明, 摄取单宁小鼠血清中的SOD、CAT等抗氧化酶含量均显著上升。除利用动物模型评价单宁的抗氧化能力外, 对于食用性物质毒理实验的测试必不可少。Lluís等^[49]研究证明, 葡萄皮及种子中提取的原花青素无急性口服毒性, 致死剂量高于5 000 mg/kg, 可控制其添加量作为抗氧化剂。

上述抗氧化评价方法相对易于实行, 人体单宁抗氧化实验的实行受多重因素的影响, 还有待深入研究。抗氧化评价方法各具优势, 可根据目的、实际情况、研究进展采取合适的评价方法。

3 单宁抗氧化作用在肉品中的应用现状

天然抗氧化剂具有安全性高、无毒或低毒等特点, 有很大的应用前景^[15-16]。单宁不仅可添加到动物饲料中, 影响屠宰后肉质的氧化, 而且可通过直接添加到肉品中或以涂膜的形式包裹在肉品表面发挥抗氧化作用。

3.1 单宁在动物体内的抗氧化作用

目前单宁添加到饲料中应用于肉畜(肉禽)的饲养研究已相对广泛,诸多研究证明,饲喂单宁能显著增强动物体内的抗氧化酶活性和ROS清除能力,在动物屠宰后也可发挥作用,从而减缓肉的氧化反应,达到延长贮藏期的目的^[50-51]。Liu Huawei等^[50]将板栗单宁以5、10 g/kg添加量喂养羔羊,以饲料中不添加单宁为对照,结果表明,板栗单宁可提高肉中抗氧化酶(GPx、SOD)活性,降低羊血清中丙二醛浓度。García等^[51]研究表明,用2种富含单宁的植物提取物饲喂山羊,屠宰后将羊肉分别在26℃贮藏6 h和-18℃冷冻30 d,对羊肉DPPH自由基和硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substance, TBARs)值等指标进行测定,结果表明,羊肉的抗氧化活性及氧化稳定性显著提高。Mancini等^[52]在兔子基础日粮中添加0.3%和0.6%的单宁,饲养60 d后屠宰,将兔肉在4℃贮藏11 d, TBARs值测定结果显示,添加单宁可抑制肉的氧化。因此,单宁作为抗氧化剂添加于动物饲料中可有效降低宰后肉的氧化,延长保质期。

3.2 单宁在肉品中的抗氧化作用

目前,单宁作为抗氧化剂在食品领域应用于油脂和鱼肉制品较多,在加工及贮藏过程中,单宁可通过清除自由基、抑制微生物生长、螯合金属离子及抑制氧化酶活性等方式减缓产品氧化。许多研究证明,单宁在油脂中的抗氧化效果与市场上常用的抗氧化剂异抗坏血酸、二丁基羟基甲苯(butylated hydroxytoluene, BHT)、特丁基对苯二酚(tertiary butylhydroquinone, TBHQ)等相当。金帅坤^[21]将不同量的柿单宁添加到猪油中,与常用的人工合成抗氧化剂BHT、TBHQ的抗氧化效果进行对比发现,同一添加量下柿单宁的抗氧化能力大于BHT,而小于TBHQ,0.05%柿单宁的抗氧化效果与0.02%的TBHQ基本相同。Buamard^[53]研究表明,添加椰壳中提取的单宁可明显降低虾油的共轭二烯、硫代巴比妥酸含量和茴香胺值,抑制虾油氧化。单宁在油脂中的抗氧化作用不仅效果显著且相比于合成抗氧化剂安全性更高,因此单宁作为抗氧化剂应用于抑制肉制品的脂肪氧化具有巨大潜力。

肉品因蛋白质、脂肪、水等物质含量较高,在贮藏不当或贮藏时间较长的情况下容易变质。鱼肉及其制品营养物质含量丰富,特别是多不饱和脂肪酸含量较高,但多不饱和脂肪酸易发生酶促氧化,因此鱼肉不易保存^[54]。单宁可抑制肉中氧化酶的活性, Maqsood等^[55]研究单宁对鱼肉糜脂肪氧化的影响,结果表明,单宁添加量越高,对脂肪氧化酶的抑制能力越强。Banerjee^[56]研究5种单宁(儿茶素、表儿茶素、表没食子儿茶素、表儿茶素没食子酸酯及表没食子儿茶素没食子酸酯)对鲤鱼脂肪氧化酶的抑制能力,发现表没食子儿茶素没食子酸酯的抑制作用最强。除鱼肉制品外, Jeong等^[57]研究添加

单宁对猪肉饼品质的影响,结果表明,缩合单宁(原花青素)能够降低猪肉饼的总挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)含量和TBARs值,延缓猪肉饼的氧化。上述研究证明,单宁作为抗氧化剂其抗氧化效果较好,可用于肉制品加工生产。

3.3 单宁在肉品包装中的抗氧化作用

消费者对食品安全及健康的追求不断增长,意识到不可生物降解包装会对环境产生不良影响,促使由多糖、蛋白质、脂质等组成的可食用涂膜在食品工业中的应用越来越广泛^[58-59]。可食用涂膜是在食品表面形成一层薄膜,通过控制食品系统中水分、气体、香气等,保证食品质量及安全^[60]。目前,可食用涂膜中添加单宁的研究已有很多,其抑菌、抗氧化效果也很显著^[59,61]。Ramziia等^[62]将不同质量浓度的原花青素添加到鱼明胶-壳聚糖制成的可食用膜中,结果显示,添加原花青素的可食用涂膜DPPH、ABTS阳离子、羟基等自由基的清除能力和还原能力均随原花青素质量浓度增大而增强,其中原花青素质量浓度为1 mg/mL的可食用涂膜的ABTS阳离子自由基清除率达95.63%,说明原花青素的添加显著增强了食用膜的抗氧化能力。Kim等^[61]报道,在可食用涂膜中添加0.0%、0.1%、0.3%原花青素,应用于猪腰肉的保藏,保藏7 d以后,添加原花青素的可食用涂膜能够降低猪腰肉TVB-N含量和TBARs值,抗氧化效果显著。Sáez等^[63]研究表明,单宁酸和白坚木单宁对虹鳟鱼鱼片的抗氧化作用与鲜鱼最常用的抗氧化剂抗坏血酸相当,并增加了鱼片亮度,但对鱼片劣化所涉及的其他参数几乎没有影响。因此,将单宁添加于藻酸盐涂层可增强抗氧化效果,尤其是在微生物和脂质氧化参数方面,可以延长鱼片保质期。将单宁添加于可食用膜不仅可以起到抗氧化、抑菌等作用,还可以提高水产品亮度,进而提高产品视觉效果。

4 结 语

植物单宁作为天然抗氧化剂具有资源丰富、安全等优势,且其抗氧化能力与合成抗氧化剂相当,必将成为将来广泛应用的抗氧化剂之一。单宁可以通过清除自由基、螯合金属离子、调控Trx和GSH氧化还原系统及Keap-Nrf2/ARE信号通路等途径发挥抗氧化作用。目前对单宁抗氧化性评价的化学实验、细胞实验及动物模型实验研究很多,但人体实验还有待研究。目前对单宁的抗氧化作用研究多拘于局部(特定通路、酶及蛋白),可利用组学分析技术进一步系统研究单宁对机体和肉品的抗氧化代谢物及调控基因的作用,全面剖析单宁的抗氧化调控系统。单宁作为抗氧化剂添加到油脂或鱼类产品中应用较多,在畜禽肉制品深加工方面应用较少,可进



一步研究,以期得到广泛应用。肉制品加工过程是否会减弱单宁活性尚不明确,单宁活性是否受温度、滚揉、高压等加工程序的影响有待深入研究。除抗氧化作用以外,单宁还有抑制有害微生物生长、抑制生物胺产生、改善肉品色泽、提高多不饱和脂肪酸比例和短链脂肪酸含量等作用,在肉品加工中具有良好发展前景和巨大发展空间。

参考文献:

- [1] ADDISU S. Effect of dietary tannin source feeds on Ruminal fermentation and production of cattle: a review[J]. Online Journal of Animal and Feed Research, 2016, 6(2): 45-56.
- [2] 陈志宏, 陈静, 张余, 等. 固定化单宁在食品领域的研究与应用[J]. 食品工业, 2018, 39(2): 289-292.
- [3] 艾庆辉, 苗又青, 麦康森. 单宁的抗营养作用与去除方法的研究进展[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011(增刊1): 33-40. DOI:10.16441/j.cnki.hdx.2011.z1.005.
- [4] MOLINARI R, BUONOMENNA M G, CASSANO A, et al. Recovery and recycle of tannins in the leather industry by nanofiltration membranes[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2004, 79(4): 361-368. DOI:10.1002/jctb.983.
- [5] KIM H, QUON M J, KIM J. New insights into the mechanisms of polyphenols beyond antioxidant properties; lessons from the green tea polyphenol, epigallocatechin 3-gallate[J]. Redox Biology, 2014, 2: 187-195. DOI:10.1016/j.redox.2013.12.022.
- [6] SALMINEN J. Two-dimensional tannin fingerprints by liquid chromatography tandem mass spectrometry offer a new dimension to plant tannin analyses and help to visualize the tannin diversity in plants[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(35): 9162-9171. DOI:10.1021/acs.jafc.8b02115.
- [7] CROFT K D. Dietary polyphenols: antioxidants or not?[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2016, 595: 120-124. DOI:10.1016/j.abb.2015.11.014.
- [8] EKAMBARAM S P, PERUMAL S S, BALAKRISHNAN A. Scope of hydrolysable tannins as possible antimicrobial agent[J]. Phytotherapy Research, 2016, 30(7): 1035-1045. DOI:10.1002/ptr.5616.
- [9] 舒畅, 赵韩栋, 焦文晓, 等. 植物单宁的生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(17): 328-334. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.17.055.
- [10] RAJA R R, SREENIVASULU M. Drugs containing tannins: an overview[J]. Indo American Journal of Pharmaceutical Research, 2016, 6(5): 5610-5621.
- [11] 范小曼. 白花败酱单宁的提取、分离及活性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 3-7.
- [12] BOSSO A, GUAITA M, PETROZZIELLO M. Influence of solvents on the composition of condensed tannins in grape pomace seed extracts[J]. Food Chemistry, 2016, 207: 162-169. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.03.084.
- [13] MAMET T, GE Z, ZHANG Y, et al. Interactions between highly galloylated persimmon tannins and pectins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 106: 410-417. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2017.08.039.
- [14] MOULS L, FULCRAND H. Identification of new oxidation markers of grape-condensed tannins by UPLC-MS analysis after chemical depolymerization[J]. Tetrahedron, 2015, 71(20): 3012-3019. DOI:10.1016/j.tet.2015.01.038.
- [15] HUGO C J, HUGO A. Current trends in natural preservatives for fresh sausage products[J]. Trends in Food Science and Technology, 2015, 45(1): 12-23. DOI:10.1016/j.tifs.2015.05.003.
- [16] RIBEIRO J S, SANTOS M J M C, SILVA L K R, et al. Natural antioxidants used in meat products: a brief review[J]. Meat Science, 2019, 148: 181-188. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2017.08.039.
- [17] YAZAKI Y. Utilization of flavonoid compounds from bark and wood: a review[J]. Natural Product Communications, 2015, 10(3): 513-520. DOI:10.1177/1934578x1501000333.
- [18] AJEBLI M, EDDOUKS M. The promising role of plant tannins as bioactive antidiabetic agents[J]. Current Medicinal Chemistry, 2019, 26(25): 4852-4884. DOI:10.2174/0929867325666180605124256.
- [19] ZHAI Yingxiang, WANG Jiangtao, WANG Hao, et al. Preparation and characterization of antioxidative and UV-protective larch bark tannin/PVA composite membranes[J]. Molecules, 2018, 23(8): 2073. DOI:10.3390/molecules23082073.
- [20] PICARIELLO L, GAMBUTI A, PICARIELLO B, et al. Evolution of pigments, tannins and acetaldehyde during forced oxidation of red wine: effect of tannins addition[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 77: 370-375. DOI:10.1016/j.lwt.2016.11.064.
- [21] 金帅坤. 柿子单宁的提取及其在油脂中抗氧化研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2014: 1-54.
- [22] BAJALAN I, ZAND M, GOODARZI M, et al. Antioxidant activity and total phenolic and flavonoid content of the extract and chemical composition of the essential oil of *Eremostachys laciniata* collected from Zagros[J]. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 2017, 7(2): 144-146. DOI:10.1016/j.apjtb.2016.11.022.
- [23] 咎志惠. 核桃楸外果皮有效成分的提取及生物活性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015: 40-43.
- [24] PANZELLA L, MOCCIA F, TOSCANESI M, et al. Exhausted woods from tannin extraction as an unexplored waste biomass: evaluation of the antioxidant and pollutant adsorption properties and activating effects of hydrolytic treatments[J]. Antioxidants, 2019, 8(6): 157. DOI:10.3390/antiox8040084.
- [25] CAO Peng, ZHANG Yu, HUANG Zi, et al. The preventative effects of procyanidin on binge ethanol-induced lipid accumulation and ROS overproduction via the promotion of hepatic autophagy[J]. Molecular Nutrition and Food Research, 2019, 63(18): e1801255. DOI:10.1002/mnfr.201801255.
- [26] ADELIN V, REYES G M, OLGA P, et al. Chemical characterization, antioxidant properties and oxygen consumption rate of 36 commercial oenological tannins in a model wine solution[J]. Food Chemistry, 2018, 268: 210-219. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.06.031.
- [27] 王晓梅, 奚宇, 范新光, 等. 绿原酸的生物利用率和抗氧化活性研究进展[J]. 中国食品学报, 2019, 19(1): 271-279. DOI:10.16429/j.1009-7848.2019.01.035.
- [28] 石闪闪, 何国庆. 单宁酸及其应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(4): 410-412. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2012.04.073.
- [29] CHEN X, AHN D U. Antioxidant activities of six natural phenolics against lipid oxidation induced by Fe²⁺ or ultraviolet light[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1998, 75(12): 1717-1721. DOI:10.1007/s11746-998-0322-2.
- [30] 孙世利, 杨军国, 张岚翠, 等. 儿茶素与金属离子相互作用及其生物学意义[J]. 细胞生物学杂志, 2007, 29(2): 225-228. DOI:10.3969/j.issn.1674-7666.2007.02.011.
- [31] XIE Weiling, MA Weijie, LIU Pan, et al. Overview of thioredoxin system and targeted therapies for acute leukemia[J]. Mitochondrion, 2019, 47: 38-46. DOI:10.1016/j.mito.2019.04.010.

- [32] 董瑞霞. 不同硒态小鼠转录组分析及儿茶素EGCG对其抗氧化系统的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019: 10-14.
- [33] SIJIA L, RUI D, PING N X. Assessment of oxidative stress of paracetamol to *Daphnia magna* via determination of Nrf1 and genes related to antioxidant system[J]. Aquatic Toxicology, 2019, 211: 73-80. DOI:10.1016/j.aquatox.2019.03.014.
- [34] 杨明阳, 田建军, 景智波, 等. 乳酸菌抗氧化调控体系研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 300-305. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201815042.
- [35] 贾玉洁, 闵连秋, 季占胜, 等. 原花青素对脑缺血后凋亡基因蛋白Bcl-2和促凋亡基因蛋白Bax的影响[J]. 中国组织工程研究, 2006, 10(23): 65-66.
- [36] YUMNAMCHA T, DEVI T S, SINGH L P. Auranofin mediates mitochondrial dysregulation and inflammatory cell death in human retinal pigment epithelial cells: implications of retinal neurodegenerative diseases[J]. Frontiers in Neuroscience, 2019, 13: 1065. DOI:10.3389/fnins.2019.01065.
- [37] FANNY C, MATEO V, DOMINIQUE C, et al. A thioredoxin-mimetic peptide exerts potent anti-inflammatory, anti-oxidant, and atheroprotective effects in ApoE2.Ki mice fed high fat diet[J]. Cardiovascular Research, 2019, 115(2): 292-301. DOI:10.1093/cvr/cvy183.
- [38] 黄卫梅. 原花青素B2对T-2毒素致TM3细胞损伤保护作用的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2018: 29-41.
- [39] TYAGI A, RAINA K, SHRESTHA S P, et al. Procyanidin B2 3,3'-di-O-gallate, a biologically active constituent of grape seed extract, induces apoptosis in human prostate cancer cells via targeting NF- κ B, Stat3 and AP1 transcription factors[J]. Nutrition and Cancer, 2014, 66(4): 736-746. DOI:10.1080/01635581.2013.783602.
- [40] XU Haiyan, FENG Xinhong, ZHAO Pengfei, et al. Procyanidin A₂ penetrates L-02 cells and protects against tert-butyl hydroperoxide-induced oxidative stress by activating Nrf2 through JNK and p38 phosphorylation[J]. Journal of Functional Foods, 2019, 62: 103562. DOI:10.1016/j.jff.2019.103562.
- [41] HAN Hedan, WANG Hai, DU Yuemei, et al. Grape seed procyanidins attenuates cisplatin-induced human embryonic renal cell cytotoxicity by modulating heme oxygenase-1 *in vitro*[J]. Cell Biochemistry and Biophysics, 2019, 77(4): 367-377. DOI:10.1007/s12013-019-00890-5.
- [42] HAN Shan, GAO Hongwei, CHEN Shaoru, et al. Procyanidin A1 alleviates inflammatory response induced by LPS through NF- κ B, MAPK, and Nrf2/HO-1 pathways in RAW264.7 cells[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 15087. DOI:10.1038/s41598-019-51614-x.
- [43] TRUONG V L, BAK M J, JUN M, et al. Antioxidant defense and hepatoprotection by procyanidins from almond (*Prunus amygdalus*) skins[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(34): 8668-8678. DOI:10.1021/jf5027247.
- [44] DENG Yitao, LIANG Ge, SHI Yan, et al. Condensed tannins from *Ficus altissima* leaves: structural, antioxidant, and antityrosinase properties[J]. Process Biochemistry, 2016, 51(8): 1092-1099. DOI:10.1016/j.procbio.2016.04.022.
- [45] ZARIN M A, WAN H Y, ISHA A, et al. Antioxidant, antimicrobial and cytotoxic potential of condensed tannins from *Leucaena leucocephala* hybrid-Rendang[J]. Food Science and Human Wellness, 2016, 5(2): 65-75. DOI:10.1016/j.fshw.2016.02.001.
- [46] 姚惠. 莲房原花青素对丙烯酰胺致神经细胞损伤的预防作用及机制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019: 16-17.
- [47] HO G T T, KASE E T, WANGZENSTEEN H, et al. Phenolic elderberry extracts, anthocyanins, procyanidins, and metabolites influence glucose and fatty acid uptake in human skeletal muscle cells[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(13): 2677-2685. DOI:10.1021/acs.jafc.6b05582.
- [48] TIAN Yan, ZOU Bo, YANG Li, et al. High molecular weight persimmon tannin ameliorates cognition deficits and attenuates oxidative damage in senescent mice induced by D-galactose[J]. Food and Chemical Toxicology, 2011, 49(8): 1728-1736. DOI:10.1016/j.fct.2011.04.018.
- [49] LLUÍS L, MÒNICA M, NOGUÉS R M, et al. Toxicology evaluation of a procyanidin-rich extract from grape skins and seeds[J]. Food and Chemical Toxicology, 2011, 49(6): 1450-1454. DOI:10.1016/j.fct.2011.03.042.
- [50] LIU Huawei, LI Ke, LÜ Mingbin, et al. Effects of chestnut tannins on the meat quality, welfare, and antioxidant status of heat-stressed lambs[J]. Meat Science, 2016, 116: 236-242. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.02.024.
- [51] GARCÍA E M, LÓPEZ A, ZIMEMAN M, et al. Enhanced oxidative stability of meat by including tannin-rich leaves of woody plants in goat diet[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2019, 32(6): 1439-1447. DOI:10.5713/ajas.18.0537.
- [52] MANCINI S, MINIERI S, BUCCIONI A, et al. The influence of dietary chestnut and quebracho tannins mix on rabbit meat quality[J]. Japanese Society of Animal Science, 2019, 90(5): 680-689. DOI:10.1111/asj.13194.
- [53] BUAMARD N B S. Ethanolic coconut husk extract: *in vitro* antioxidative activity and effect on oxidative stability of shrimp oil emulsion[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2017, 119(11): 1700062. DOI:10.1002/ejlt.201700131.
- [54] ALI M, IARAN M, NADEEM M, et al. Oxidative stability and sensoric acceptability of functional fish meat product supplemented with plant-based polyphenolic optimal extracts[J]. Lipids in Health and Disease, 2019, 18(1): 1-16. DOI:10.1186/s12944-019-0982-y.
- [55] MAQSOOD S, BENJAKUL S. Comparative studies of four different phenolic compounds on *in vitro* antioxidative activity and the preventive effect on lipid oxidation of fish oil emulsion and fish mince[J]. Food Chemistry, 2010, 119(1): 123-132. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.06.004.
- [56] BANERJEE S. Inhibition of mackerel (*Scomber scombrus*) muscle lipoxygenase by green tea polyphenols[J]. Food Research International, 2006, 39(4): 486-491. DOI:10.1016/j.foodres.2005.10.002.
- [57] JEONG J Y, SEOL K H, SEONG P N, et al. Effects of procyanidin on meat quality and shelf-life for preserving pork patties during chilled storage[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2015, 35(4): 564-571. DOI:10.5851/kosfa.2015.35.4.564.
- [58] GOVINDASWAMY R, ROBINSON J S, GEEVARETNAM J, et al. Physico-functional and anti-oxidative properties of carp swim bladder gelatin and brown seaweed fucoidan based edible films[J]. Journal of Packaging Technology and Research, 2018, 2: 77-89. DOI:10.1007/s41783-017-0024-z.
- [59] VILAS D C, KUNAL P, PREETAM S, et al. Characterization of triphasic edible films from chitosan, guar gum, and whey protein isolate loaded with plant-based antimicrobial compounds[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2019, 58(3): 255-269. DOI:10.1080/03602559.2018.1466179.
- [60] FABRA M J, FALCÓ I, RANDAZZO W, et al. Antiviral and antioxidant properties of active alginate edible films containing phenolic extracts[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 96-103. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.02.026.
- [61] KIM H W, JEONG J Y, SEOL K H, et al. Effects of edible films containing procyanidin on the preservation of pork meat during chilled storage[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2016, 36(2): 230-236. DOI:10.5851/kosfa.2016.36.2.230.
- [62] RAMZIHA S, MA Hui, YAO Yunzhen, et al. Enhanced antioxidant activity of fish gelatin-chitosan edible films incorporated with procyanidin[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 135(10): 45781. DOI:10.1002/app.45781.
- [63] SÁEZ M I, SUÁREZ M D, MARTÍNEZ T F. Effects of alginate coating enriched with tannins on shelf life of cultured rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 118: 108767. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108767.