

单宁的生物活性及其在畜禽生产中的应用

王吉^{1,2} 王湘林¹ 肖海思¹ 文利新^{1,3*} 邬静^{1*}

(1. 湖南农业大学 动物医学院畜禽保健湖南省工程研究中心,长沙 410128;

2. 长沙绿叶生物科技有限公司,长沙 410100;

3. 湖南畜禽安全生产协同创新中心,长沙 410128)

摘要 随着畜牧行业“禁抗”的落实,寻找合适的“替抗”饲料添加剂已然成为行业内的重要探索方向。单宁是一种植物源性多酚类化合物,广泛存在于多种植物中,在过去,由于过量摄入会影响机体对营养物质的消化与吸收,甚至产生一定的生理毒性,故其一直被归类为抗营养因子。但由于单宁的多酚属性,在适当的摄入量下,其具有抗菌、抗病毒、抗寄生虫和抗氧化等生物活性。近几十年来,大量的研究报道了适量的单宁可有效改善畜禽的饲料利用率和生产性能、促进肠道健康和提高动物产品品质,具有非常广阔的应用前景。但当前的研究显示,对于不同的动物类型、不同的动物生长阶段、不同的单宁来源及其不同的添加形式,单宁的最适添加剂量及其作用效果均不相同。本研究就单宁的理化性质和生物活性,以生猪、反刍动物以及家禽为例,对单宁在畜禽生产中的应用进行综述及展望,探讨单宁作为饲料添加剂的开发潜力及价值,为养殖生产中非粮饲料的应用提供参考。

关键词 单宁; 抗营养因子; 非粮饲料; 替抗; 植物提取物

中图分类号 S816

文章编号 1007-4333(2022)04-0164-15

文献标志码 A

Biological activity of tannin and its application in livestock and poultry production

WANG Ji^{1,2}, WANG Xianglin¹, XIAO Haisi¹, WEN Lixin^{1,3*}, WU Jing^{1*}

(1. Hunan Engineering Research Center of Livestock and Poultry Health Care, College of Veterinary Medicine, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Changsha Lvye Biotechnology Co., Ltd., Changsha 410100, China;

3. Hunan Collaborative Innovation Center of Animal Production Safety, Changsha 410128, China)

Abstract With the implementation of “No antibiotics” in the animal husbandry industry, it has become an important exploration direction to find suitable “Alternative antibiotic use” feed additives. Tannin is a kind of plant-derived polyphenolic compound that is widely existed in a variety of plants. In the past, excessive intake of tannic acid would affect the body's digestion and absorption of nutrients, and even produce certain physiological toxicity, so it has been classified as an anti-nutrient factor. However, due to its polyphenol properties, tannin has antibacterial, antiviral, antiparasitic and antioxidant activities in appropriate intake. In recent decades, numerous studies have reported that appropriate tannins can effectively improve the feed utilization rate and production performance of livestock and poultry, promote intestinal health and improve the quality of animal products. It has a very broad application prospect. However, current studies have shown that the optimal dosage and effects of tannins are different for different animal types, different growth stages, different tannins sources and different addition forms. In this study, the applications of tannin in livestock and poultry production such as pigs, ruminants and poultry are summarized and prospected based on the physicochemical properties and biological activity of tannin in order to explore the development potential and value

收稿日期: 2021-06-24

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFD0501209)

第一作者: 王吉, 博士研究生, E-mail: wangjics@163.com

通讯作者: 邬静, 副教授, 博士生导师, 主要从事营养代谢研究与动物保健研究, E-mail: wujing@hunau.edu.cn;

文利新, 教授, 博士生导师, 主要从事营养代谢研究与动物保健研究, E-mail: sfwls8015@sina.com

of tannin as feed additive, and to provide reference for the application of non-grain feed in breeding and production.

Keywords tannin; antinutritional factors; non-grain feed; antibiotic alternatives; plant extract

在中国,非粮饲料资源丰富且价格低廉,但利用率极低^[1],究其原因,抗营养因子是影响非粮饲料有效利用的主要因素。抗营养因子是指干扰营养物质消化和吸收的一类生物因子,主要包括单宁(tannic)、异硫、凝集素、异硫氰酸脂、芥子碱、棉酚等。这些抗营养因子的作用主要体现在:(1)非淀粉多糖增加食糜粘度并促进肠道内厌氧菌的生长,影响肠道的消化吸收。(2)植酸、单宁等与金属离子和维生素螯合,降低矿物质的吸收。(3)抑制消化酶的活性,进而降低饲料消化率。(4)降低饲料的适口性,从而降低采食量。(5)硫苷在体内分解形成异硫氰酸脂和恶唑烷硫酮,能造成动物甲状腺肿大及其功能异常。(6)植酸中毒会抑制免疫球蛋白活性,导致动物中毒甚至死亡^[2]。近年来,随着绿色环保养殖理念的普及以及畜牧行业“禁抗”的全面落实,寻找天然安全的饲料添加剂以促进动物生长、提高畜禽产品品质、替代抗生素以及保护环境变得尤为重要。单宁作为一种经欧盟批准使用的饲料添加剂,由于其独特的生物活性而被广泛的研究与应用,本研究对其生物学活性及其在畜禽(以生猪、反刍动物以及家禽为例)生产中的应用进行了综述。

1 单宁的概述

1.1 单宁的理化性质与结构

单宁(tannin)是一类多酚类化合物,广泛存在

于植物的根、茎、叶和果皮中,根据其化学结构,从分子结构上来看,单宁主要分为缩合单宁(condensed tannin, CT)和水解单宁(hydrolyzable tannin, HT),CT是由儿茶素、表儿茶素、没食子儿茶素和表没食子儿茶素按照一定比例聚合而成的低聚物或高聚物^[3],而HT则是由没食子酸酯或含糖基的鞣酸及其衍生物组成而成,以单宁酸(tannic acid, TA)为典型^[4]。单宁多为淡黄色或浅棕色无晶性粉末或鳞片,微臭,味极涩,易溶于水、乙醇、丙酮等溶剂,又因其含有多个酚羟基而具有独特的化学性质和较强的生理活性^[5],能与蛋白质,生物碱,多糖,核酸,细胞膜等大分子发生沉淀反应,一方面降低机体对营养物质的利用率,另一方面也可发挥抗炎、抑菌、抗寄生虫等作用;也能与金属离子发生螯合反应或者静电反应,降低金属离子的利用率;与此同时,邻位羟基的存在使其具有很强的清除氧自由基的能力,表现出比其他抗氧化剂更强的活性;不仅如此,它的酚羟基还极易发生衍生化反应,如乙酰化、硫化、醚化和酯化,改变其疏水、亲水比值,增加脂溶性,进一步改善和扩展单宁酸的性质等等^[3,6]。单宁的化学结构如图1所示。

1.2 单宁的来源与提取方法

单宁广泛存在于自然界中的各种植物中,尤其在牧草、灌木、谷类和药材中大量存在(柠条、坚木、百脉根、栗木、高粱、五倍子等)^[8],其他也存在于黑

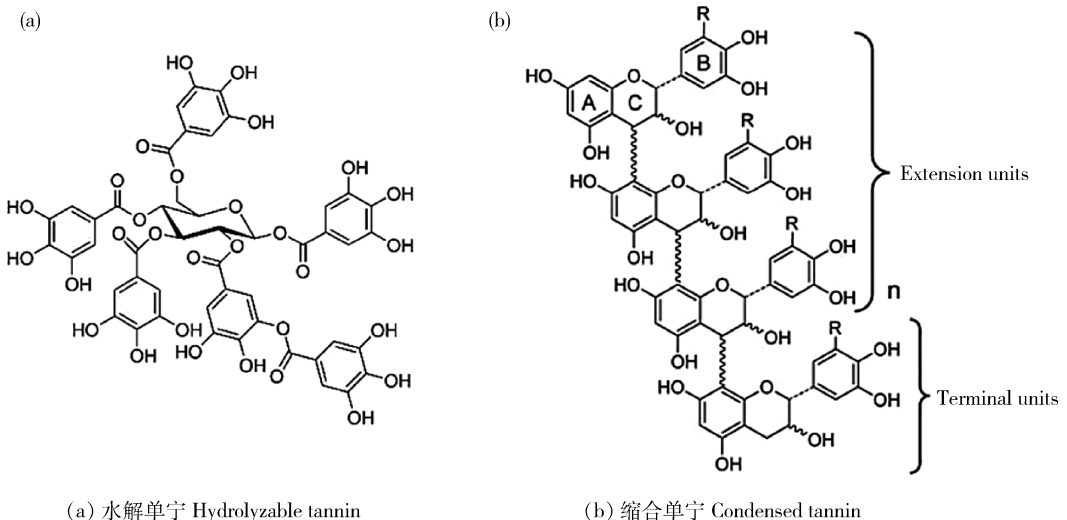


图1 单宁的化学结构^[3,7]

Fig.1 Chemical structure of tannin^[3,7]

莓、苹果以及葡萄等水果中^[9-10],一般单宁在植物的新生叶片、皮和花中较为丰富^[11],因为单宁的化学结构及含量在不同植物种类、生长条件之间存在很大差异,所以提取来源不同的单宁,其生物学功能也会存在差异^[8]。除此之外,提取工艺的不同也会对单宁的生物学功能产生一定的影响,现有的提取单宁的方法有溶剂浸提法、微波辅助提取法、超声波辅助提取法、超临界CO₂萃取法;使用有机溶剂甲醇、乙醇、丙酮等有机溶剂溶解单宁进行提取的方法因其操作简便、专业要求低、成本低,适合工业生产,而成为最常被使用的提取技术。近年来酶转化提取法、超高压提取法、发酵法等新兴提取方法的出现也为单宁的规模化生产提供了新的支撑,诸如此类的单宁提取方法的出现,为单宁的应用提供了强有力的理论依据和技术支持^[12]。

2 单宁的抗营养作用及毒性作用

2.1 单宁的抗营养作用

单宁味苦,具有收敛性,其发挥抗营养作用的机理主要是通过结合饲料中的淀粉、蛋白质等形成不溶性复合物来降低饲料的适口性及营养物质的生物利用率^[13]。有研究指出,单宁也能直接与味觉感受器发生反应,抑制动物摄食,来降低其采食量^[14];也有研究表明,单宁能与胃肠黏膜表面的部分消化酶结合,以减少动物肠道对营养物质的消化吸收^[15],单宁还能沉淀饲料中蛋白质,钙、铁、锌等金属离子及维生素B₁₂,降低饲料中营养物质的利用率^[16]。在反刍动物中,单宁能降低瘤胃的消化率,抑制瘤胃的排空,使动物产生饱腹感,采食量减少^[18],最新研究指出,灌喂高剂量的单宁(3.0 g/kg)后,由此损害消化系统可能是导致摄食率降低的最主要原因^[19];不仅如此,单宁还能显著降低反刍动物对干物质,粗蛋白,有机物的表观消化率,降低体内氮平衡,从而影响这些物质的消化吸收。在单胃动物中,单宁通过和大分子营养物质形成复合物以及降低消化酶的活性来进一步降低营养物质的利用率^[20]。Al-Mamary等^[21]研究发现高粱单宁对兔消化酶具有显著的抑制作用,饲料中3.5%单宁可分别抑制 α -淀粉酶和脂肪酶活力达77%和43%发挥抗营养作用。Marzo等^[22]发现饲料中的单宁(25 g/kg饲料)显著降低了鸡的蛋白质利用效率。但低剂量的单宁并不会对饲料适口性造成明显的影响,原因是唾液腺中分泌的富脯氨酸蛋白能结合饲料中的单

宁,改善其苦涩的口感,进而减少其对动物摄食率的影响^[23]。由此可知,单宁的抗营养作用与其使用剂量紧密相关。

2.2 单宁的毒性作用

动物单宁中毒最常见的是橡树叶(栎树叶)中毒,这是因为在早春时节,橡树叶中含有较高浓度的单宁,当反刍动物摄入过多的橡树叶,就会引起反刍停止、食欲废绝、便秘、消瘦、皮下水肿、体温降低等症状。Boyd等^[25]发现,口服单宁后,大鼠前期表现为厌食、嗜睡、暂时性腹泻,后期逐渐发展成为肝坏死、肾炎和急性胃肠炎,并且对免疫器官有明显的抑制作用,造成脾脏水肿,胸腺萎缩,半数致死量(LD₅₀)为2.26±0.083 g/kg。有研究指出,当食物中单宁含量达到3%时,植食性哺乳动物田鼠体内出现钠离子失衡现象,但这种失衡是由于机体对摄入的植物次生化合物进行解毒所引起的,而非单宁消化抑制作用所致^[26]。值得注意的是,部分学者将单宁的作用剂量与作用时间进行调整后,其结果却不尽相同,当给牛连续灌服50 g/d的单宁,在16 d后,牛体内就出现了不可逆的胃肠道和肾脏损伤,但是,将剂量减少至25 g/d时,即使到28 d也并未出现明显的副作用^[27]。在一项慢性毒性研究试验中,研究人员持续290 d以低浓度的单宁对雄性大鼠进行皮下注射,结果发现部分试验组大鼠在结束时出现了肝癌和胆管癌^[27]。由此可见,动物的种类、单宁的剂量以及给药途径均可能是影响单宁对机体产生不同作用的原因。综合分析,单宁对哺乳动物发挥毒性作用的机制与其理化性质密切相关,单宁能沉积蛋白质,形成的复合物沉积在粘膜表面,从而引起黏膜细胞变性、坏死等;同时,单宁的体内代谢产物进入循环系统后,也会对肝脏、肾脏造成损伤。总之,常见的单宁急性中毒是动物在短时间内摄入浓度过高的单宁而引起肝脏、肾脏、胃肠道急性病变的现象,而长期摄入或注射较低剂量的单宁时,机体则多数表现为慢性中毒。

在体外试验中,单宁也对多种细胞具有毒性作用。已有大量研究表明,单宁能显著抑制多种癌细胞的体外增殖以及促进癌细胞的凋亡^[28-31]。我们团队在前期的体外研究中发现,一定剂量的单宁对正常动物细胞也存在毒性作用。其可通过Caspase-9/Capase-3/Bax/Bcl-2等信号通路促进猪空肠上皮(IPEC-J2)细胞^[32]和猪肾(PK-15)细胞^[33]的凋亡,并可抑制周期蛋白的转录与表达,对细胞的

周期进程产生阻滞的效果。

3 单宁的生物学功能

尽管过量摄入单宁具有一定的抗营养甚至毒性作用,但已有大量研究证实了,适当剂量的单宁具有广泛的生物学功能,例如抗菌^[35]、抗病毒^[36]、抗氧化^[37]、抗炎^[38]、抗寄生虫^[39]、收敛止泻^[40,41]以及降血脂血糖^[42]等。

3.1 单宁的抗菌、抗病毒作用

近几年来,越来越多的学者发现单宁对多种细菌和病毒都有着明显的抑制作用,具有潜在的“替代”开发价值。单宁可通过酚羟基结合病原微生物体内的酶和毒性蛋白,来削弱其致病力,也可以通过结合病原微生物增殖所必须的金属离子、降低细菌F-肌动蛋白和丝裂原活化蛋白的磷酸化以及生物膜的形成来抑制细菌增殖^[35,43-44],并通过促进机体细胞因子的产生来抵抗细菌的侵袭,在抗菌谱上,单宁对革兰氏阳性菌的抑制效果优于革兰氏阴性菌^[45]。多个研究表明,致病菌如大肠杆菌 O157:H7、沙门氏菌、志贺菌、葡萄球菌、假单胞菌、幽门螺杆菌等都对单宁敏感^[46-49]。江凯^[50]研究发现,五倍子单宁对金黄色葡萄球菌、肠炎沙门氏菌、白色念珠球菌、绿脓假单胞菌、鼠伤寒杆菌和李斯特杆菌等细菌也具有较好的抑菌活性。除此之外,有研究证明单宁对某些病毒也具有明显的抑制活性,如人类免疫缺陷病毒(HIV)、牛腺相关病毒(BAV)和诺如病毒(NV)等^[52-53],而这其中发挥作用的主要机制是蛋白沉淀。Liu等^[54]发现单宁酸可抑制丙型肝炎病毒(HCV)进入细胞和在细胞间的传播,此外 Ueda等^[36]的研究表明,来源于柿子中的单宁也能显著降低试验病毒的活性。因此,单宁作为一种新型的抗菌、抗病毒药物,具有很好的研究和应用前景。

3.2 单宁的抗氧化作用

单宁分子中的酚羟基是一种优良的供氢体,对氧负离子(O^{2-})和羟基自由基(OH^{\cdot})有清除作用,而它们清除自由基的能力与羟基的数量和单宁的聚合度有关。单宁作为体外抗氧化剂的潜力已经在很多研究中表明。Luciano等^[37]发现富含CT的草料也可通过增加血清抗氧化活性来改善牛和羊的抗氧化状态;但在许多情况下,化合物发挥抗氧化作用不仅仅取决于其化学性质,也与其作用剂量及其研究对象有关^[57-58]。众所周知,单宁所属的多酚类化合物可以通过结合DNA诱导活性氧的生成而引起

DNA降解。有研究发现,给小鼠灌服5 g/kg和10 g/kg的高剂量单宁,小鼠体内肝脏和血清中超氧化物歧化酶的活性表现出降低的趋势,且丙二醛的含量呈剂量依赖性的升高,发生氧化损伤^[59]。咎志惠^[60]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的能力,且浓度在1~7 mg/mL范围内其清除能力随浓度的增大而增强。这些结果表明单宁的抗氧化活性与其剂量密切相关,在实践应用中,可以将其作为天然抗氧化剂进行深度开发与利用。

3.3 单宁的抗炎作用

炎症是指机体遭受致炎因子侵害后的正常防御性反应,单宁具有不同的抗炎活性,一方面这与他们的抗氧化活性呈正相关,另一方面是通过调节炎症因子来发挥其抗炎作用^[61-63]。体外研究表明,葡萄籽中的HT可通过调节细胞因子的表达来治疗肥胖等低度炎症性疾病^[64];从黑树莓种子中提取的CT的抗炎活性通过抑制脂多糖诱导的RAW 264.7细胞产生一氧化氮(NO)来实现^[61]。Liu等^[38]研究表明,黄连提取的HT注射到耳部水肿以及关节炎的模型小鼠后,小鼠的炎症症状会得到一定的改善。但Huang等^[7]研究表明,单宁的抗炎机制与其自身的自由基清除能力有关,而不是取决于单宁抑制NO和促炎症因子的作用。由此可知,虽然单宁可作为抗炎剂进行应用,但其抗炎的具体机制还有待进一步的研究。

3.4 单宁的抗寄生虫作用

单宁可与细胞膜蛋白、多糖和磷脂等发生沉淀反应,并干扰机体营养物质的吸收与代谢,以及单宁自氧化产生过氧化氢可降低细胞膜的通透性,进而对大部分寄生虫表现出抑制作用^[28]。单宁的抗寄生虫特性在体内体外试验中均得到证实,在动物体内试验中,从豆科牧草(如红豆草、百脉根、鸟足拟三叶草和冠状岩黄耆)中获取的CT能降低蛇形毛圆线虫产卵量和抑制肺蠕虫和胃肠道线虫的孵化率,并呈剂量依赖性^[65-66];Zhong等^[39]研究发现,单宁能够抑制羊捻转血矛线虫幼虫的存活率;在动物体外试验中,以黄烷-3-醇和没食子酸形式存在的CT提取物能抑制体外培养的蛇形毛圆线虫卵的孵化^[67]。将白坚木中的单宁提取物添加到培养基中,被测试的寄生虫的生长受到明显的抑制且抑制效果具有剂量依赖性^[68]。以上结果均说明单宁具有明显的抗寄生虫特性,有望成为传统化学驱虫剂的替代物质,

但这与其添加水平紧密相关,因此关于其应用还需要更深入的研究。

3.5 单宁的其他生理作用

除上述生理功能以外,单宁还具有降血脂、降血糖、收敛止泻等功效,均有相关研究进行证实。从忍冬中提取的单宁也具有降血糖、降血脂的功效^[42]。Bonelli等^[40]在新生犊牛中添加栗木单宁能够显著减少其腹泻。Yi等^[41]研究发现,五倍子提取的单宁在蓖麻油致小鼠腹泻模型中,对小鼠的腹泻有显著的缓解作用。

4 单宁在畜禽生产中的应用

4.1 单宁与生猪生产

我国作为世界第一养猪大国,生猪养殖业在我国农业发展中一直占据着主导地位,同时它也是国民经济的支柱性产业^[69]。养猪生产中,营养性腹泻、细菌性腹泻以及肠道损伤引起的腹泻会给生猪产业带来极大的经济损失^[70]。目前已有大量研究表明,在饲料中添加一定剂量的单宁可以代替抗生素促生长剂来提高生猪的生长性能、改善生猪的肠道健康进而解决影响生猪产业发展的腹泻问题。对于营养性腹泻,Biagi^[71]在为期28 d的试验中,分别将1.13、2.25和4.50 g/kg的栗木单宁添加于仔猪日粮中,结果表明栗木水解单宁可以显著提高饲料利用率,并且可通过影响肠道菌群代谢物的含量变化来影响相应的肠道细菌的数量,进一步对机体代谢产生积极的影响,最佳添加剂量为4.50 g/kg。此外,有报道指出单宁对肠道形态也有一定的营养作用,可以增加回肠微绒毛的长度和盲肠隐窝的深度,来缓解仔猪的营养性腹泻^[72]。Bilic-Sobot^[73]在育肥猪的基础日粮中添加30 g/kg的五倍子水解单宁,可显著提高十二指肠绒毛高度/隐窝深度比值,促进养分的消耗与吸收,保护肠道免受病原菌的侵袭。与此同时,Yu^[75]等人在断奶仔猪的基础日粮中添加2 g/kg的鞣酸蛋白可通过改善肠道屏障的完整性来抵挡病原菌的侵袭,进而降低腹泻率。过早的断奶会引起仔猪产生过量的氧化产物来损害肠粘膜细胞以及肠壁结构,最终引起仔猪腹泻^[76,77]。Liu等^[78]在为期28 d的试验中,将1 g/kg的栗木水解单宁和不同浓度的氧化锌(ZnO)添加到144只断奶仔猪的基础日粮中,结果表明,单宁可通过减轻肠道的氧化应激来减少腹泻,可以有效的代替ZnO,此外,也进一步发现HT可以提高生猪体内的

消化酶活性及其免疫水平。代珍青等^[79]也发现,断奶仔猪的基础日粮中添加1 000 mg/kg五倍子水解单宁(含量50%)可减少生产中ZnO的使用量,并降低仔猪腹泻率。

另一方面,单宁也可改善生猪的生长性能,刘树栋^[80]在育肥猪的基础日粮中添加0.15、0.30、0.45 g/kg的栗木单宁,饲喂87 d,结果发现猪的采食量、平均日增重均显著增加,能量利用率提高4.30%,蛋白质利用率提高5.04%,其中最适添加剂量是0.45 g/kg;宋之波^[81]在杜长大猪的基础日粮中添加500 mg/kg的坚木单宁可增加其采食量和日增重,改善其生长性能;唐青松^[82]在断奶仔猪的基础日粮中分别添加500、1 000和1 500 mg/kg的缩合单宁,结果发现添加500和1 000 mg/kg的缩合单宁在一定程度能提高断奶仔猪的生长性能和缓解腹泻,其中最佳添加剂量是1 g/kg,但添加1.5 g/kg的缩合单宁则会严重抑制断奶仔猪采食,由此可知,单宁生理作用的发挥与其剂量紧密相关。

对于仔猪,不同的研究显示日粮中单宁含量在0.5~10 g/kg的剂量范围内,均为安全剂量,且表现出不同程度的积极效果。对于育肥猪,在日粮中添加不同来源的10~30 g/kg的单宁,同样表现出改善肠道健康、促进消化等生物活性。单宁与生猪生产的相关研究总结见表1。

4.2 单宁与反刍家畜生产

自20世纪80年代以来,植物单宁在牛、羊等反刍动物中已被广泛用于饲料添加剂,因为它不仅能提高瘤胃蛋白、氨基酸等物质的含量,还可以防止瘤胃鼓气,抑制寄生虫,提高动物的生产性能及其健康水平。虽然单宁对牛、羊等反刍动物的作用和影响机制比较复杂,但已有的研究表明,适量的单宁对动物健康、生产性能有着积极的影响。李元恒等^[86]在2013年综述得出,当百脉根单宁含量在18~50 g/kg时,对牛、羊等反刍动物被毛生长速度、产毛量、毛品质、泌乳和繁殖率均有改善作用,但当百脉根单宁含量超过60 g/kg时,反刍动物各方面的生产性能则有所下降。在Bhatta等^[87]的研究中,在日粮中添加7.4 g/kg水平的单宁(来源于罗望子种子壳),可显著提高多产杂交奶牛的生长性能和牛奶蛋白水平,同时降低尿液中的氮排泄水平。回海勇等^[88]的研究同样证实了在饲料中添加单宁,可以提高奶牛的生产性能、改善乳品质以及奶牛的健康水平。该试验选取286头荷斯坦奶牛,试验组日粮中添加

表1 单宁在生猪生产中的应用研究

Table 1 Application studies of tannins in swine production

单宁来源 Tannin source	试验对象 Experimental animal	试验剂量/(g/kg) Experimental dose	试验周期/d Experimental period	效果评价 Effectiveness evaluation	最适剂量/ (g/kg) Optimal dose	参考文献 References
栗木单宁	48 头仔猪	1.13、2.25 和 4.50	28	通过影响肠道菌群的变化 提高饲料利用,进而影响机 体代谢。	4.5	Biagi 等 ^[71]
栗木单宁	144 头仔猪 (28 日龄)	1	28	提高仔猪的抗氧化能力、免 疫水平、消化酶活性,降低 腹泻率。	1+ZnO	Liu 等 ^[78]
鞣酸蛋白	108 头仔猪 (21 日龄)	2、10	28	通过改善肠道屏障的完整 性抵挡病原菌的侵袭,降低 腹泻率。	2	Yu 等 ^[75]
栗木单宁	160 头断奶仔猪 (25 日龄)	0.5、1.0、1.5	28	增强仔猪的抗氧化能力,改善 肠道健康,提高其生长性能。	1.0	邓文等 ^[83]
五倍子单宁	45 头断奶仔猪 (21 日龄)	0.5、1.0、1.5	14	改善肠道形态及营养物质 的转运,调节肠道菌群,从 而促进机体代谢	1.0	Wang 等 ^[84]
五倍子单宁	24 头育肥猪 (123 日龄)	10、20、30	70	提高十二指肠绒毛高度/隐 窝深度比值,促进养分的消 耗与吸收,保护肠道免受病 原菌的侵害。	30	Bilic-Sobot 等 ^[73]
栗木单宁	36 头未阉割公猪 (105 日龄)	15、30	60	减少公猪胴体中吲哚和雄 烯酮含量,提高猪肉品质。	30	Bee 等 ^[85]
栗木单宁	160 头育肥猪 (体重 60 kg 左右)	0.15、0.30、 0.45	87	增加了采食量和日增重 提高了能量和蛋白质利用率	0.45	刘树栋等 ^[80]
坚木单宁	100 头杜长大猪 (体重 70 kg 左右)	0.5	28	增加其采食量和日增重 改善其生长性能		宋之波等 ^[81]
未知缩合单 宁	120 断奶仔猪 (21 日龄)	0.5、1.0、1.5	10	提高仔猪生长性能 缓解腹泻	1.0	唐青松等 ^[82]

注:试验剂量均已换算为统一单位 g/kg,下同。

Note: The experimental doses have been converted to uniform unit g/kg, the same as below.

1 g/kg 的纯化 TA, 饲喂 38 d 后与对照组相比, 试验组奶牛日产奶量显著高于对照组, 前期提高 5.89%, 后期提高 4.14%, 且试验组奶产品中乳脂提高 1.36%, 乳蛋白提高 0.65%, 同时试验组饲料利用率和奶牛血清免疫球蛋白含量均有显著提高。Pathak 等^[89] 研究发现, 在羔羊的基础日粮中添加

15 g/kg 的单宁, 饲喂 180 d 可以显著提高羔羊平均日增重和产毛量。此外, 牟春堂^[90] 在羔羊的基础日粮中分别添加 0.01、0.02、0.04 g/kg 的葡萄籽缩合单宁, 发现其对羔羊的生殖能力也具有一定的改善作用, 最佳剂量为 0.02 g/kg。与此同时, Liu 等^[91] 研究发现, 在奶牛的日粮中添加 10 g/kg 的栗木水

解单宁可提高奶牛血浆中总抗氧化能力,改善过渡期奶牛机体的抗氧化状态,进而改善奶牛的健康。但在另一肉牛试验中,当日粮中添加 16.9 g/kg 的纯化单宁饲喂 19 d 后,降低了肉牛的瘤胃发酵和日粮粗蛋白的消化率^[92]。

与单胃动物相比,反刍动物可以更有效地消化纤维素含量较高的粗饲料,并对粗纤维较高的日粮有较高的利用率,这主要借助于瘤胃微生物的存在。然而在发酵饲料的过程中,瘤胃会生成甲烷并通过暖气排出,根据现有的研究表明甲烷造成的温室效应是二氧化碳的 25 倍,而联合国政府气候变化专门委员会(IPCC)指出反刍动物是甲烷最大排放源之一^[93-94]。此外,在一定程度上减少家畜体内甲烷的生成可以提高动物的生产性能,因此在针对反刍动物的研究上,不仅仅只是关注其生产性能的改善,如何减少甲烷气体的排放也显得尤为重要。刘立成等^[96]在泌乳期奶牛的基础日粮中额外添加 40 g/d 的 TA,可以在提高奶牛生产性能的同时,还显著降低了奶牛甲烷气体排放。在小反刍兽的研究中,王敬尧^[97]同样发现,在绵羊日粮中分别添加 2.16、4.31 g/kg 的柠条单宁也可以显著提高绵羊的可消化氮利用率,降低甲烷日排放量。Yang 等^[98]在成年公牛日粮中分别按 6.5、13.0、26.0 g/kg DM 的比例加入单宁可通过降低瘤胃中醋酸盐和丙酸盐含量和产甲烷菌相对丰度,来减少瘤胃中甲烷气体的排放,最佳添加剂量为 26.0 g/kg DM。

可见在反刍家畜日粮中添加适量的单宁有益于改善动物瘤胃的消化能力、提高动物的生产性能。但反刍动物的种类不同、日粮中所添加的 TA 类型及其来源的不同,试验结果也不尽相同。单宁与反刍家畜生产的相关研究总结见表 2。

4.3 单宁与家禽生产

由于单宁的收敛作用,单宁在家禽生产中的应用研究同样聚焦在改善肠道健康以及促生长上。Jamroz 等^[99]的研究中,当给 1 日龄的仔肉鸡日粮中添加低水平(0.25、0.50、1.00 g/kg)的单宁至出栏时,发现单宁可显著改善肉鸡的肠道菌群,即显著减少幼龄仔鸡肠道中大肠杆菌的丰度从而降低其腹泻率,其中最佳添加剂量为 0.25 g/kg。李茜和侯海峰^[100]在 1 000 只 1 日龄肉鸡的日粮中分别添加 0.5、1.0、1.5、2.0 g/kg 的单宁,结果表明,日粮中低水平的单宁可通过升高空肠绒毛高度/隐窝深度值,提高淀粉酶和胰蛋白酶活性,来改善肉鸡的消化

能力,其中最佳添加剂量为 1.5 g/kg。除此以外,有研究人员还对单宁在鸡肉胴体品质的改善中发挥的作用进行了探索,Kristina^[101]的研究中,在肉鸡日粮中添加 5 g/kg 的单宁酸饲喂 35 d 后,肉鸡体内的有益脂肪酸含量增加,但胆固醇的含量相应的降低,此外肉鸡的抗氧化能力也得到了一定程度的改善。侯海峰等^[100]分别用 0.5、1.0、1.5、2.0 g/kg 的单宁饲喂肉用仔鸡至出栏可显著提升肉鸡的生长速度和饲料利用率,还可通过促进肠道内双歧杆菌的增殖,有效的提升肉鸡体内烟酸的含量,且机体脂肪合成相关蛋白的表达降低,进而减少了体内脂肪的蓄积,其中最佳添加剂量为 1.5 g/kg。此外,从光雷^[102]在 1 日龄雄性爱拔益加(AA)肉鸡的基础日粮中分别添加 0.1、0.5 和 1.0 g/kg 的橄榄单宁可改善肉鸡的肉品质,提高空肠和回肠绒毛高度,进而提高营养物质的利用率,其中最佳添加剂量为 1.0 g/kg。Chamorro^[103]等在 1 日龄肉鸡的基础日粮中添加 5 和 10 g/kg 的葡萄果渣缩合单宁可在不影响肉鸡生长性能的情况下,提高其抗氧化能力,其中最佳添加剂量为 10 g/kg。

然而,不乏有研究证明了单宁对家禽的生理作用存在剂量依赖性,高剂量的单宁对家禽的健康及生产性能表现出的负面影响同样显而易见。Ramah 等^[104]通过在肉鸡日粮中分别添加 0.5 和 30 g/kg 的单宁来探究其对肉鸡免疫能力的影响。结果表明,肉鸡日粮中添加低剂量的单宁可改善其免疫水平,但是高剂量的单宁会通过降低免疫器官质量,减少免疫细胞以及相关细胞因子的数量来削弱机体的免疫水平,还会引起机体发生氧化应激反应,对机体产生一定程度的损伤。在另一项研究中,Marzo^[105]给肉鸡持续 48 d 摄入 25、30 g/kg(日粮浓度)的单宁后,可显著抑制肉鸡体重的增长,降低其对营养物质的利用率,并损伤肉鸡的免疫系统,降低其对疾病的免疫力。Mansoori^[103]在肉鸡的基础日粮中添加 20 g/kg 的纯化单宁酸可降低肉鸡的饲料转化率进而影响其生长性能。

单宁在家禽生产中的应用有如“双刃剑”,低剂量的单宁对家禽的生长性能和肠道健康有显著改善作用,而高剂量的单宁会对肉鸡的生产性能以及免疫功能产生明显的抑制作用。且相较于家畜,家禽对单宁的耐受性更低,这也提示了在将单宁应用于家禽生产时,需要我们更加科学与谨慎地对待。单宁与家禽生产的相关研究总结见表 3。

表2 单宁在反刍动物生产中的应用研究
Table 2 Application studies of TA in ruminant production

单宁来源 Tannins source	试验对象 Experimental animals	试验剂量 Experimental dose	试验周期 Experimental period	效果评价 Effectiveness evaluation	最适剂量 Optimal dose	参考文献 References
罗望子壳单宁	9头杂多产交奶牛	2.0、7.4 g/kg	18周	提高生产性能、牛奶蛋白水平,降低氮排泄。	7.4 g/kg	Bhatta 等 ^[87]
纯化单宁酸	286头荷斯坦奶牛	1 g/kg	38 d	提高奶牛生长性能,改善乳品质,提高奶牛健康水平。	1 g/kg	回海勇等 ^[88]
纯化单宁酸	8头生长期肉牛 (体重 350 kg 左右)	16.9 g/kg	19 d	降低瘤胃发酵,和日粮中粗蛋白的消化。		Zhou 等 ^[92]
未知单宁	60头荷斯坦奶牛 (泌乳中后期)	40 g/(头·d)	60 d	提高产奶量,降低牛乳中尿素氮含量,降低奶牛呼出气体中甲烷含量。	40 g/(头·d)	刘立成等 ^[96]
柠条缩合单宁	15只杜蒙杂交绵羊 羯羊(1~1.5周岁)	2.16、 4.31 g/kg	3~9 h	提高可消化氮利用率,降低瘤胃氨氮浓度和甲烷日排放量。	2.16、 4.31 g/kg	王敬尧 ^[97]
栗木水解单宁	20头奶牛 (泌乳后期)	10 g/kg	21 d	提高血浆中总抗氧化能力,改善过渡期奶牛机体的抗氧化状态。	10 g/kg	Liu 等 ^[91]
番石榴叶缩合单宁	24只羔羊(6月龄)	10、15、 20 g/kg	195 d	提高羔羊平均日增重和产毛量	15 g/kg	Pathak 等 ^[18]
葡萄籽缩合单宁	48只杜泊小尾寒羊 杂交公羔羊(4月龄)	0.01、0.02、 0.04 g/kg	60 d	提高生长性能,提高睾丸和附睾组织的抗氧化能力改善精液品质	0.02 g/kg	牟春堂等 ^[90]
未知单宁	4头成年公牛 (体重 376 kg 左右)	6.5、13.0、 26.0 g/kg DM	15 d	降低瘤胃中醋酸丙酸盐含量和产甲烷菌相对丰度,减少瘤胃中甲烷气体的排放。	26.0 g/kg DM	Yang 等 ^[98]

4.4 单宁与抗生素使用的比较

2020年7月1日我国实施了饲料行业的最严“禁抗令”,饲料“禁抗”和“替抗”成为了养殖业的焦点问题。实际上自20世纪80年代欧美发达国家逐渐意识到禁抗的重要性后,欧盟畜牧业就一直致力于寻找替代抗生素生长促进剂的方法,其中以单宁为代表的具有明显抗菌活性的天然植物提取物受到了广泛关注 and 深入研究。Hana 等^[109]指出基于某些植物提取物的抗菌活性使其具有用于制造药物的潜力,如生物碱,萜类化合物,单宁,类固醇,香豆素

和类黄酮等^[110],且单独或与抗生素组合使用的植物性抗菌素均具有强大的抗菌活性,因此可帮助解决当前的抗生素耐药性危机。而近几年的大量研究也表明单宁对机体有益,其极具潜力作为饲料中的抗生素替代品,用于控制疾病和提高动物的生长性能^[74,111-112]。在杨海涛^[113]的试验中发现,包被的TA的治疗效果不亚于抗生素,可提高肉仔鸡的屠宰率、抗氧化性能;增强其肠道消化酶的活性、维持肠道菌群的稳定;甚至在个别指标上其效果还要优于抗生素。Redondo 等^[114]报道与抗生素阿维霉素

表3 单宁在家禽生产中的应用

Table 3 Application studies of Tannins in poultry production

单宁来源 Tanins source	试验对象 Experimental animals	试验剂量/ (g/kg) Experimental dose	试验周期/d Experimental period	效果评价 Effectiveness evaluation	最适剂量/ (g/kg) Optimal dose	参考文献 References
甜栗水解单宁	950 只肉鸡 (1 日龄)	0.25、0.50、 1.00	42	有益于肠道菌群,显著的降低了大肠杆菌的数量。	0.25	Jamroz 等 ^[99]
纯化单宁	1 000 只肉鸡 (1 日龄)	0.5、1.0、 1.5、2.0	42	升高空肠绒毛高度/隐窝深度值,提高淀粉酶和胰蛋白酶活性。	1.5	李茜等 ^[106]
未知单宁酸	80 只肉鸡	5	35	提高肉鸡生长性能,减少脂质氧化,增加有益脂肪酸含量。	5	Kristina 等 ^[101]
纯化单宁酸	2 000 只肉鸡 (1 日龄)	0.5、1.0、 1.5、2.0	42	提高肉鸡的生长速度和饲料利用率,提高半净膛率,降低腹脂率。	1.5	候海峰等 ^[100]
橄榄单宁	288 只肉鸡 (1 日龄)	0.1、0.5 和 1.0	42	提高抗氧化能力,改善肉品质提高空肠和回肠绒毛高度	1.0	从光雷等 ^[102]
葡萄果渣 缩合单宁	300 只肉鸡 (1 日龄)	5、10	21	提高抗氧化能力 对生长性能无负面影响	10	Chamorro 等 ^[107]
纯化单宁酸	30 只肉鸡 (6 周龄)	0.5、30.0	35	低剂量 TA 使肉鸡的免疫水平升高,但高剂量会引起机体的氧化应激,影响免疫功能。	0.5	Ramah 等 ^[104]
纯化单宁酸	75 只白来亨鸡 (体重 40~50 g)	25、30	48	减少体重增加量,降低蛋白功效比,损害免疫系统。		Marzo 等 ^[105]
纯化单宁酸	40 只肉鸡 (17 日龄)	20	10	降低采食量、饲料转化率以及消化酶活性,影响生长性能。		Mansoori 等 ^[103]
未知单宁	480 只肉鸡 (1 日龄)	7.5、15.0	12	抑制体重增长,降低盲肠挥发性脂肪酸含量。		Kubena 等 ^[108]

相比,水解单宁可发挥相同的抗菌作用,但对多种抗菌药物产生耐药性的产气荚膜梭状芽胞杆菌却无法对水解单宁产生耐药性。Sahra^[115]发现耐甲氧西林的金黄色葡萄球菌对所有类型的 β -内酰胺类均具有耐药性,但与 TA 协同作用后,就可以很好的治疗 MRSA 的 β -内酰胺的耐药性问题。结合单宁的其他生物学功能,以及其在动物试验上的应用效果观察,单宁作为一种抗生素生长促进剂的替代物质,用于改善畜禽动物的营养与健康具有巨大的发展潜力。

5 小结与展望

单宁作为具有多重生物活性的植物多酚,在国内外动物营养学中已有几十年的应用研究,且其资源丰富、获取成本相对低廉,在“禁抗、替抗”新常态下的家畜家禽生产中有着巨大的应用前景。尽管如此,单宁目前仍未纳入我国的饲料添加剂品种目录,且既有的研究表明,不同的动物类型、不同的动物生长阶段、不同的单宁来源以及不同的添加形式,都对单宁的最适添加剂量及其作用效果有着举足轻重的

影响。因此,国内关于单宁的研究,应围绕单宁的生产工艺及其产品标准的制定,集成开展单宁在不同靶动物中的耐受性研究、毒理学研究以及代谢和残留研究,为单宁作为新饲料添加剂的开发及其在动物生产中的应用提供系统的参考标准。

参考文献 References

- [1] 黄俐晔. 中国养猪业现状、问题与趋势[J]. 广东农业科学, 2015, 42(16): 175-179
Huang L Y. Current status, problem and development trends of seine industry of China [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015, 42(16): 175-179 (in Chinese)
- [2] 王洁, 朱艳菲. 饲料原料中的抗营养因子及其消除方法[J]. 畜禽业, 2017, 28(9): 19-20, 22
Wang J, Zhu Y F. [J]. *Livestock and Poultry Industry*, 2017, 28(9): 19-20, 22 (in Chinese)
- [3] 彭凯, 王玉玺, 王国霞, 黄燕华. 缩合单宁的生物功能及其在动物生产中的应用[J]. 动物营养学报, 2020, 32(8): 3451-3460
Peng K, Wang Y X, Huang Y H. Biological function of condense tannins and their application in animal production [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(8): 3451-3460 (in Chinese)
- [4] Jourdes M, Pouységu L, Deffieux D, Teissedre P-L, Quideau S. *Hydrolyzable Tannins: Gallotannins and Ellagitannins* [M] // RAMAWAT K G, MÉRILLON J-M. Natural Products: Phytochemistry, Botany and Metabolism of Alkaloids, Phenolics and Terpenes. Berlin, Heidelberg; Springer Berlin Heidelberg, 2013: 1975-2010
- [5] Al-Hijazeen M, Lee E J, Mendonca A, Ahn D U. Effects of tannic acid on lipid and protein oxidation, color, and volatiles of raw and cooked chicken breast meat during storage[J]. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 2016, 5(2): 19
- [6] 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, 416
Shi S S, He G Q. Tannic acid and the progress of its application[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(4): 410-412, 416 (in Chinese)
- [7] Huang Q Q, Liu X L, Zhao G Q, Hu T M, Wang Y X. Potential and challenges of tannins as an alternative to in-feed antibiotics for farm animal production[J]. *Animal Nutrition*, 2018, 4(2): 137-150
- [8] Berard N C, Wang Y, Wittenberg K M, Krause D O, Coulman B E, McAllister T A, Ominski K H. Condensed tannin concentrations found in vegetative and mature forage legumes grown in western Canada[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2011, 91(4): 669-675
- [9] Figueroa-Espinoza M C, Zafimahova A, Alvarado P G M, Dubreucq E, Poncet-Legrand C. Grape seed and apple tannins: Emulsifying and antioxidant properties [J]. *Food Chemistry*, 2015, 178: 38-44
- [10] Ortiz J, Marín-Arroyo M R, Noriega-Domínguez M J, Navarro M, Arozarena I. Color, phenolics, and antioxidant activity of blackberry (*Rubus glaucus* Benth.), blueberry (*Vaccinium floribundum* Kunth.), and apple wines from Ecuador[J]. *Journal of Food Science*, 2013, 78(7): C985-C993
- [11] Terrill T H, Rowan A M, Douglas G B, Barry T N. Determination of extractable and bound condensed tannin concentrations in forage plants, protein concentrate meals and cereal grains [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1992, 58(3): 321-329
- [12] 王晓冬, 郑燕菲. 植物单宁的提取研究[J]. 当代化工研究, 2019(15): 103-104
Wang X D, Zheng Y F. Study on extraction of vegetable tannin[J]. *Modern Chemical Research*, 2019(15): 103-104 (in Chinese)
- [13] Wang M W, Huang H J, Liu S, Zhuang Y, Yang H S, Li Y L, Chen S, Wang L X, Yin L M, Yao Y F, He S P. Tannic acid modulates intestinal barrier functions associated with intestinal morphology, antioxidative activity, and intestinal tight junction in a diquat-induced mouse model [J]. *RSC Advances*, 2019, 9(55): 31988-31998
- [14] Waghorn G C, Shelton I D. Effect of condensed tannins in *Lotus corniculatus* on the nutritive value of pasture for sheep [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1997, 128(3): 365-372
- [15] Chung K T, Wong T Y, Wei C I, Huang Y W, Lin Y. Tannins and human health: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1998, 38(6): 421-464
- [16] 张高娜, 李金敏, 徐海燕, 谷巍. 单宁酸在畜牧生产中的应用[J]. 广东饲料, 2017, 26(6): 39-40
Zhang G N, Li J M, Xu H Y, Gu W. Application of tannic acid in animal husbandry[J]. *Guangdong Feed*, 2017, 26(6): 39-40 (in Chinese)
- [17] Waghorn G C, Shelton I D. Effect of condensed tannins in *Lotus corniculatus* on the nutritive value of pasture for sheep [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1997, 128(3): 365-372
- [18] Min B R, Fernandez J M, Barry T N, McNabb W C, Kemp P D. The effect of condensed tannins in *Lotus corniculatus* upon reproductive efficiency and wool production in ewes during autumn[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2001, 92(3-4): 185-202
- [19] Hervás G, Pérez V, Giráldez F J, Mantecón A R, Almar M M, Frutos P. Intoxication of sheep with quebracho tannin extract[J]. *Journal of Comparative Pathology*, 2003, 129(1): 44-54
- [20] 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, 41(S1):

- 33-40
- AI QingHui, MIANO YouQing, MAI KangSen, Mai K S. The anti-nutritional effects and the degradations of dietary tannins: A review [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, 41(S1): 33-40 (in Chinese)
- [21] Al-Mamary M, Molham A H, Abdulwali A A, Al-Obeidi A. *In vivo* effects of dietary *Sorghum* tannins on rabbit digestive enzymes and mineral absorption [J]. *Nutrition Research*, 2001, 21(10): 1393-1401
- [22] Marzo F, Urdaneta E, Santidrián S. Liver proteolytic activity in tannic acid-fed birds [J]. *Poultry Science*, 2002, 81(1): 92-94
- [23] Zhu J, Filippich L J. Acute intra-abomasal toxicity of tannic acid in sheep [J]. *Veterinary and Human Toxicology*, 1995, 37(1): 50-54
- [24] Kumar R, Vaithyanathan S. Occurrence, nutritional significance and effect on animal productivity of tannins in tree leaves [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1990, 30(1-2): 21-38
- [25] Boyd E M, Berczky K, Godi I. The acute toxicity of tannic acid administered intragastrically [J]. *Canadian Medical Association Journal*, 1965, 92(25): 1292-1297
- [26] 李俊年, 陶双伦, 刘季科. 食物单宁酸对根田鼠钠平衡的作用 [J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3848-3853
- Li J N, Tao S L, Liu J K. Dietary tannic acid modulate sodium balance in root voles (*Microtus oeconomus*) [M]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3848-3853 (in Chinese)
- [27] Philip W. Encyclopedia of toxicology [M]. Londyn: Academic Press, 2014, 52(2): 52-597
- [28] Darvin P, Joung Y H, Kang D Y, Sp N, Byun H J, Hwang T S, Sasidharakurup H, Lee C H, Cho K H, Park K D, Lee H K, Yang Y M. Tannic acid inhibits EGFR/STAT1/3 and enhances p38/STAT1 signalling axis in breast cancer cells [J]. *Journal of Cellular and Molecular Medicine*, 2017, 21(4): 720-734
- [29] Nagesh P K B, Hatami E, Chowdhury P, Kashyap V K, Khan S, Hafeez B B, Chauhan S C, Jaggi M, Yallapu M M. Tannic acid induces endoplasmic Reticulum stress-mediated apoptosis in prostate cancer [J]. *Cancers*, 2018, 10(3): 68
- [30] Zhang J, Chen D, Han D M, Cheng Y H, Dai C, Wu X J, Che F Y, Heng X Y. Tannic acid mediated induction of apoptosis in human glioma Hs683 cells [J]. *Oncology Letters*, 2018, 15(5): 6845-6850
- [31] Yang P, Ding G B, Liu W, Fu R, Sajid A, Li Z Y. Tannic acid directly targets pyruvate kinase isoenzyme M2 to attenuate colon cancer cell proliferation [J]. *Food & Function*, 2018, 9(11): 5547-5559
- [32] Wang J, Xiao H S, Zhu Y Y, Liu S P, Yuan Z H, Wu J, Wen L X. Tannic acid induces the mitochondrial pathway of apoptosis and S phase arrest in porcine intestinal IPEC-J2 cells [J]. *Toxins*, 2019, 11(7): 397
- [33] 王吉, 张琳玉, 刘翔燕, 肖海思, 李鑫, 严思思, 袁志航, 梁曾恩妮, 文利新, 郭静. 单宁酸诱导猪肾细胞氧化损伤和凋亡 [J]. *动物营养学报*, 2020, 32(9): 4327-4336
- Wang J, Zhang L Y, Liu X Y, Xiao H S, Lixin, Yan S S, Yuan Z H, Liang Z, Wen L X, Wu J. Tannic acid induces oxidative damage and apoptosis in pig kidney cells [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(9): 4327-4336 (in Chinese)
- [34] Zhu J, Filippich L J. Acute intra-abomasal toxicity of tannic acid in sheep [J]. *Veterinary and Human Toxicology*, 1995, 37(1): 50-54
- [35] Reyes A W B, Hop H T, Arayan L T, Huy T X N, Min W, Lee H J, Chang H H, Kim S. Tannic acid-mediated immune activation attenuates *Brucella abortus* infection in mice [J]. *Journal of Veterinary Science*, 2018, 19(1): 51-57
- [36] Ueda K, Kawabata R, Irie T, Nakai Y, Tohya Y, Sakaguchi T. Inactivation of pathogenic viruses by plant-derived tannins: Strong effects of extracts from persimmon (*Diospyros kaki*) on a broad range of viruses [J]. *PLoS One*, 2013, 8(1): e55343
- [37] Luciano G, Vasta V, Monahan F J, López-Andrés P, Biondi L, Lanza M, Priolo A. Antioxidant status, colour stability and myoglobin resistance to oxidation of longissimus dorsi muscle from lambs fed a tannin-containing diet [J]. *Food Chemistry*, 2011, 124(3): 1036-1042
- [38] Liu J B, Ding Y S, Zhang Y, Chen J B, Cui B S, Bai J Y, Lin M B, Hou Q, Zhang P C, Li S. Anti-inflammatory hydrolyzable tannins from *Myricaria bracteata* [J]. *Journal of Natural Products*, 2015, 78(5): 1015-1025
- [39] Zhong R Z, Sun H X, Liu H W, Zhou D W. Effects of tannic acid on *Haemonchus contortus* larvae viability and immune responses of sheep white blood cells *in vitro* [J]. *Parasite Immunology*, 2014, 36(2): 100-106
- [40] Bonelli F, Turini L, Sarri G, Serra A, Buccioni A, Mele M. Oral administration of chestnut tannins to reduce the duration of neonatal calf diarrhea [J]. *BMC Veterinary Research*, 2018, 14(1): 227
- [41] Yang Y, Luo H H, Song X, Yu L, Xie J, Yang J J, Jia R Y, Lin J C, Zou Y F, Li L X, Yin L Z, He C L, Liang X X, Yue G Z, Yin Z Q. Preparation of *Galla chinensis* oral solution as well as its stability, safety, and antidiarrheal activity evaluation [J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2017, 2017: 1851459
- [42] Ajebli M, El Ouady F, Eddouks M. Study of antihyperglycemic, antihyperlipidemic and antioxidant activities of tannins extracted from *Warionia saharae* Benth. & coss [J]. *Endocrine, Metabolic & Immune Disorders Drug Targets*, 2019, 19(2): 189-198
- [43] 阮志平, 向平. 植物单宁对微生物的抑制作用及其机制 [J]. *华北农学报*, 2006, 21(S1): 16-19
- Ruan Z P, Xiang P. Antimicrobial activity of tannic compounds [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2006, 21

- (S1): 16-19 (in Chinese)
- [44] Lee J H, Park J H, Cho H S, Joo S W, Cho M H, Lee J. Anti-biofilm activities of quercetin and tannic acid against *Staphylococcus aureus*[J]. *Biofouling*, 2013, 29(5): 491-499
- [45] 郑正男, 谭俊杰, 吴帅, 丁利君, 郑希. 单宁酸的体外抑菌作用及其影响因素[J]. 广东工业大学学报, 2015, 32(4): 46-51
Zheng Z N, Tan J J, Wu S, Ding L J, Zheng X. Antimicrobial activity of tannic acid *in vitro* and its influencing factors[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2015, 32(4): 46-51 (in Chinese)
- [46] Funatogawa K, Hayashi S, Shimomura H, Yoshida T, Hatano T, Ito H, Hirai Y. Antibacterial activity of hydrolyzable tannins derived from medicinal plants against *Helicobacter pylori* [J]. *Microbiology and Immunology*, 2004, 48(4): 251-261
- [47] Doss A. Antibacterial activity of tannins from the leaves of *Solanum trilobatum* Linn[J]. *Indian Journal of Science and Technology*, 2009, 2(2): 41-43
- [48] Banso A, Adeyemo S O. Evaluation of antibacterial properties of tannins isolated from *Dichrostachys cinerea* [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2007, 6(15): 1785-1787
- [49] Liu X L, Hao Y Q, Jin L, Xu Z J, McAllister T A, Wang Y X. Anti-*Escherichia coli* O157: H7 properties of purple prairie clover and sainfoin condensed tannins[J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2013, 18(2): 2183-2199
- [50] 江凯. 五倍子单宁的提取纯化及其抗菌、抗突变作用研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2011
Jiang K. *The extraction and purification of Chinese gallotannins and its antibiosis and antimutagenicity effect* [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2011 (in Chinese)
- [51] 尉晓, 侯渊博, 周铁丽, 陈华乐, 李斌, 杜佳, 曹建明. 单宁酸对临床菌株的抗菌活性及其对生物膜的影响[J]. 温州医科大学学报, 2015, 45(10): 709-712
Yu X, Hou Y B, Zhou T L, Chen H L, Li B, Du J, Cao J M. Antimicrobial activity of tannic acid and its effect on biofilms of clinical isolates[J]. *Journal of Wenzhou Medical University*, 2015, 45(10): 709-712 (in Chinese)
- [52] Uchiumi F, Hatano T, Ito H, Yoshida T, Tanuma S I. Transcriptional suppression of the HIV promoter by natural compounds[J]. *Antiviral Research*, 2003, 58(1): 89-98
- [53] Zhang X F, Dai Y C, Zhong W M, Tan M, Lv Z P, Zhou Y C, Jiang X. Tannic acid inhibited *Norovirus* binding to HBGA receptors, a study of 50 Chinese medicinal herbs [J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2012, 20(4): 1616-1623
- [54] Liu S H, Chen R, Hagedorn C H. Tannic acid inhibits hepatitis C virus entry into Huh7. 5 cells[J]. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0131358
- [55] 屈恋, 高璇, 刘雄民, 刘田元, 赖芳. 柠檬桉果实单宁的提取纯化及抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2017, 38(8): 256-261
Qu L, Gao X, Liu X M, Liu T Y, Lai F. Study on purification and antioxidant activities of tannins of *Eucalyptus citriodora* fruits [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(8): 256-261 (in Chinese)
- [56] Mašek T, Starčević, K. Lipogenesis and lipid peroxidation in rat testes after long-term treatment with sucrose and tannic acid in drinking water[J]. *Andrologia*, 2017, 49(4): 1-7
- [57] Labieniec M, Gabryelak T, Falcioni G. Antioxidant and prooxidant effects of tannins in digestive cells of the freshwater mussel *Unio tumidus* [J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2003, 539(1/2): 19-28
- [58] Labieniec M, Gabryelak T, Falcioni G. Antioxidant and prooxidant effects of tannins in digestive cells of the freshwater mussel *Unio tumidus* [J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2003, 539(1/2): 19-28
- [59] 秦绪军, 海春旭, 何伟, 梁欣, 赵康涛, 张晓迪, 陈宏莉, 刘瑞. 单宁急性毒性及其对小鼠丙二醛和抗氧化酶的影响[J]. 卫生毒理学杂志, 2004, 18(2): 79-81
Qin X J, Hai C X, He W, Liang X, Zhao K T, Zhang X D, Chen H L, Liu R. The acute toxicity of tannic acid and its effect on malondialdehyde and antioxidant enzymes in mice[J]. *Journal of Health Toxicology*, 2004, 18(2): 79-81 (in Chinese)
- [60] 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
Zan Z H. *Extraction and the study on biological activity of effective components in green peel of Juglans mandshurica maxim*[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015 (in Chinese)
- [61] Park M, Cho H, Jung H, Lee H, Hwang K T. Antioxidant and anti-inflammatory activities of tannin fraction of the extract from black raspberry seeds compared to grape seeds [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2014, 38(3): 259-270
- [62] Souza S M C, Aquino L C M, Milach A C, Bandeira M A M, Nobre M E P, Viana G S B. Antiinflammatory and antiulcer properties of tannins from *Myracrodruon urundeuva* allemão (Anacardiaceae) in rodents[J]. *Phytotherapy Research*, 2007, 21(3): 220-225
- [63] Sugiura Y, Tanaka R, Katsuzaki H, Imai K, Matsushita T. The anti-inflammatory effects of phlorotannins from *Eisenia arborea* on mouse ear edema by inflammatory inducers[J]. *Journal of Functional Foods*, 2013, 5(4): 2019-2023
- [64] Chacón M R, Ceperuelo-Mallafre V, Maymó-Masip E, Mateo-Sanz J M, Arola L, Guitierrez C, Fernandez-Real J M, Ardévol A, Simón I, Vendrell J. Grape-seed procyanidins modulate inflammation on human differentiated adipocytes *in vitro*[J]. *Cytokine*, 2009, 47(2): 137-142
- [65] Molan A L, McNabb W C, Hoskin S O, Barry T N. Effect of condensed tannins extracted from four forages on the viability of the larvae of deer lungworms and gastrointestinal *Nematodes*[J]. *Veterinary Record*, 2000, 147(2): 44-48
- [66] Molan A L, Waghorn G C, Min B R, McNabb W C. The

- effect of condensed tannins from seven herbage on *Trichostrongylus colubriformis* larval migration *in vitro* [J]. *Folia Parasitologica*, 2000, 47(1): 39-44
- [67] Molan A L, Meagher L P, Spencer P A, Sivakumaran S. Effect of flavan-3-ols on *in vitro* egg hatching, larval development and viability of infective larvae of *Trichostrongylus colubriformis* [J]. *International Journal for Parasitology*, 2003, 33(14): 1691-1698
- [68] Athanasiadou S, Kyriazakis I, Jackson F, Coop R L. Direct anthelmintic effects of condensed tannins towards different gastrointestinal *Nematodes* of sheep: *in vitro* and *in vivo* studies [J]. *Veterinary Parasitology*, 2001, 99(3): 205-219
- [69] 印遇龙. 中国生猪产业与饲料行业发展建议 [J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(12): 1337-1341
- Yin Y L. Suggestions on development of Chinese pig-breeding industry and feed industry [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(12): 1337-1341 (in Chinese)
- [70] 付伟, 吴子龙, 耿霄, 张浩. 单宁酸生物学功能及其应用前景 [J]. 饲料研究, 2019, 42(11): 108-111
- Fu W, Wu Z L, Geng X, Zhang H. Biological function of tannic acid and its application prospect [J]. *Feed Research*, 2019, 42(11): 108-111 (in Chinese)
- [71] Biagia G, Cipollini I, Paulicks B R, Roth F X. Effect of tannins on growth performance and intestinal ecosystem in weaned piglets [J]. *Archives of Animal Nutrition*, 2010, 64(2): 121-135
- [72] Nagy B, Fekete P Z. Enterotoxigenic *Escherichia coli* in veterinary medicine [J]. *International Journal of Medical Microbiology*, 2005, 295(6/7): 443-454
- [73] Bilić-Šobot D, Kubale V, Škrlep M, Čandek-Potokar M, Prevolnik Povše M, Fazarinc G, Škorjanc D. Effect of hydrolysable tannins on intestinal morphology, proliferation and apoptosis in entire male pigs [J]. *Archives of Animal Nutrition*, 2016, 70(5): 378-388
- [74] Girard M, Bee G. Invited review: Tannins as a potential alternative to antibiotics to prevent coliform diarrhea in weaned pigs [J]. *Animal*, 2020, 14(1): 95-107
- [75] Yu J, Song Y Y, Yu B, He J, Zheng P, Mao X B, Huang Z Q, Luo Y H, Luo J Q, Yan H, Wang Q Y, Wang H F, Chen D W. Tannic acid prevents post-weaning diarrhea by improving intestinal barrier integrity and function in weaned piglets [J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2020, 11: 87
- [76] Gülçin İ, Huyut Z, Elmastaş M, Aboul-Enein H Y. Radical scavenging and antioxidant activity of tannic acid [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2010, 3(1): 43-53
- [77] Gülçin İ, Huyut Z, Elmastaş M, Aboul-Enein H Y. Radical scavenging and antioxidant activity of tannic acid [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2010, 3(1): 43-53
- [78] Liu H S, Hu J X, Mahfuz S, Piao X S. Effects of hydrolysable tannins as zinc oxide substitutes on antioxidant status, immune function, intestinal morphology, and digestive enzyme activities in weaned piglets [J]. *Animals*, 2020, 10(5): 757
- [79] 代珍青, 温黎俊, 孙丹丹, 崔志英, 黄敏. 水解单宁酸替代部分氧化锌在断奶仔猪中预防腹泻的应用及对生长性能的影响 [J]. 广东饲料, 2019, 28(4): 23-25
- Dai Z Q, Wen L J, Sun D D, Cui Z Y, Huang M. Application of hydrolyzed tannic acid replaces part of zinc oxide in weaned piglets to prevent of diarrhea and its influence on growth performance [J]. *Guangdong Feed*, 2019, 28(4): 23-25 (in Chinese)
- [80] 刘树栋, 安文亭, 郭佳伟, 孙展英, 陈宝江. 单宁酸对生长育肥猪生长性能、营养物质利用率及健康的影响 [C]. 郑州: 第七届中国饲料营养学术研讨会论文集. 2014: 145
- Liu S D, An W T, Guo J W, Sun Z Y, Chen B J. *Effects of tannic Acid on Growth Performance, Nutrient availability and health of Growing-finishing Pigs* [C]. Zhengzhou: Proceeding of the 7th China Academic Symposium of Feed Nutrition. 2014: 145
- [81] 宋之波, 苏成文, 徐相亭, 王向葵, 杨明彩, 张继元, 黄加珍. 坚木单宁对育肥猪生产性能及胴体性状的影响 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017(11): 120-122
- Song Z B, Su C W, Xu X T, Wang X K, Yang M C, Zhang J Y, Huang J Z. The effect of quebracho tannin on production performance and Carcass Quality in fattening pigs [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2017(11): 120-122 (in Chinese)
- [82] 唐青松, 徐娥, 熊海涛, 肖明飞, 李景上, 易宏波. 缩合单宁对断奶仔猪生长性能和腹泻的影响 [J]. 饲料工业, 2020, 41(21): 37-41
- Tang Q S, Xu E, Xiong H T, Xiao M F, Li J S, Yi H B. Effects of condensed tannin on growth performance and diarrhea of weaned piglets [J]. *Feed Industry*, 2020, 41(21): 37-41 (in Chinese)
- [83] 邓文, 张世昌, 蔡荣斌, 任时成, 周小娟. 栗树单宁对断奶仔猪生产性能、肠道形态和通透性及抗氧化性能的影响 [J]. 中国饲料, 2018(1): 44-48
- Deng W, Zhang S C, Cai R B, Ren S C, Zhou X J. Effects of chestnut tannins on the performance, intestinal morphology and permeability, and antioxidant status in weaned piglets [J]. *China Feed*, 2018(1): 44-48 (in Chinese)
- [84] Wang M W, Huang H J, Hu Y P, Huang J, Yang H S, Wang L, Chen S, Chen C Q, He S P. Effects of dietary microencapsulated tannic acid supplementation on the growth performance, intestinal morphology, and intestinal microbiota in weaning piglets [J]. *Journal of Animal Science*, 2020, 98(5): 112
- [85] Bee G, Silacci P, Ampuero-Kragten S, Čandek-Potokar M, Wealleans A L, Litten-Brown J, Salminen J P, Mueller-Harvey I. Hydrolysable tannin-based diet rich in gallotannins has a minimal impact on pig performance but significantly

- reduces salivary and bulbourethral gland size [J]. *Animal*, 2017, 11(9): 1617-1625
- [86] 李元恒, 金龙, 韩国栋, 王正文, 赵萌莉, 王玉玺. 植物单宁在反刍动物营养和健康养殖作用中的研究进展[J]. 草地学报, 2013, 21(6): 1043-1051
- Li Y H, Jin L, Han G D, Wang Z W, Zhao M L, Wang Y X. Effects of plant tannin on the nutrition and healthy production of ruminant: A review [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(6): 1043-1051 (in Chinese)
- [87] Bhatta R, Krishnamoorthy U, Mohammed F. Effect of feeding tamarind (*Tamarindus indica*) seed husk as a source of tannin on dry matter intake, digestibility of nutrients and production performance of crossbred dairy cows in mid-lactation [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2000, 83(1): 67-74
- [88] 回海勇, 安文亭, 李占一, 陈宝江. 单宁酸对奶牛生产性能、营养物质利用率及免疫力影响[J]. 饲料研究, 2018(6): 14-18, 24
- Hui H Y, An W T, Li Z Y, Chen B J. Effects of tannic acid on performance, nutrient availability and immunity of dairy cows [J]. *Feed Research*, 2018(6): 14-18, 24 (in Chinese)
- [89] Pathak A K, Dutta N, Pattanaik A K, Chaturvedi V B, Sharma K. Effect of condensed tannins from *Ficus infectoria* and *Psidium guajava* leaf meal mixture on nutrient metabolism, methane emission and performance of lambs [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2017, 30(12): 1702-1711
- [90] 牟春堂, 杨文军, 王鹏举, 任国栋, 剧浩, 任有蛇, 郝小燕, 张建新. 葡萄籽原花青素对公羔羊生长性能、精液品质及睾丸和附睾抗氧化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(5): 2241-2250
- Mu C T, Yang W J, Wang P J, Ren G D, Ju H, Ren Y S, Hao X Y, Zhang J X. Effects of grape seed procyanidins on growth performance, semen quality, antioxidant indexes in testis and epididymis of ram [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(5): 2241-2250 (in Chinese)
- [91] Liu H W, Zhou D W, Li K. Effects of chestnut tannins on performance and antioxidative status of transition dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(9): 5901-5907
- [92] Zhou K, Bao Y, Zhao G Y. Effects of dietary crude protein and tannic acid on rumen fermentation, rumen microbiota and nutrient digestion in beef cattle [J]. *Archives of Animal Nutrition*, 2019, 73(1): 30-43
- [93] Wanapat M, Cherdthong A, Phesatcha K, Kang S. Dietary sources and their effects on animal production and environmental sustainability [J]. *Animal Nutrition*, 2015, 1(3): 96-103
- [94] Kamke J, Kittelmann S, Soni P, Li Y, Tavendale M, Ganesh S, Janssen P H, Shi W B, Froula J, Rubin E M, Attwood G T. Rumen metagenome and metatranscriptome analyses of low methane yield sheep reveals a *Sharpea*-enriched microbiome characterised by lactic acid formation and utilisation [J]. *Microbiome*, 2016, 4: 56
- [95] Wanapat M, Cherdthong A, Phesatcha K, Kang S. Dietary sources and their effects on animal production and environmental sustainability [J]. *Animal Nutrition*, 2015, 1(3): 96-103
- [96] 刘立成, 刘娣, 邹红菲, 甘文平, 曲永利. 单宁酸对奶牛生产性能及甲烷排放的影响[J]. 饲料工业, 2014, 35(17): 108-111
- Liu L C, Liu D, Zou H F, Gan W P, Qu Y L. The effect of tannins on the dairy cow performance and the methane emission [J]. *Feed Industry*, 2014, 35(17): 108-111 (in Chinese)
- [97] 王敬尧. 单宁对绵羊瘤胃发酵参数、营养物质消化率和甲烷排放量的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019
- Wang J Y. Effects of tannin on rumen fermentation parameters, nutrient digestibility and methane emission in sheep [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [98] Yang K, Wei C, Zhao G Y, Xu Z W, Lin S X. Effects of dietary supplementing tannic acid in the ration of beef cattle on rumen fermentation, methane emission, microbial flora and nutrient digestibility [J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2017, 101(2): 302-310
- [99] Jamroz D, Wiliczekiewicz A, Skorupińska J, Orda J, Kuryszko J, Tschirch H. Effect of sweet chestnut tannin (SCT) on the performance, microbial status of intestine and histological characteristics of intestine wall in chickens [J]. *British Poultry Science*, 2009, 50(6): 687-699
- [100] 侯海锋, 刘彦慈, 马可为, 李茜. 水解单宁酸对肉仔鸡生产性能、屠宰性能及肉品质的影响[J]. 今日畜牧兽医, 2016(2): 51-53
- Hou H F, Liu Y C, Ma K W, Li Q. Effects of hydrolyzed tannic Acid on performance, slaughter performance and meat quality of broilers [J]. *Today Animay Husbandry and Veterinary Medicine*, 2016(2): 51-53 (in Chinese)
- [101] Starčević K, Krstulović L, Brozić D, Maurić M, Stojićević Z, Mikulec Ž, Bajić M, Mašek T. Production performance, meat composition and oxidative susceptibility in broiler chicken fed with different phenolic compounds [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(6): 1172-1178
- [102] 从光雷, 王强, 肖蕴祺, 钟光, 胡艳, 沈一茹, 张亮亮, 施寿荣. 饲料添加橡椀单宁对肉鸡生长性能、屠宰性能、肉品质、抗氧化功能和肠道发育的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(12): 5948-5957
- Cong G L, Wang Q, Xiao Y Q, Zhong G, Hu Y, Shen Y R, Zhang L L, Shi S R. Effects of dietary *Quercus acutissima* carruth tannin on growth performance, slaughter performance, meat quality, antioxidant function and intestinal development of broilers [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(12): 5948-5957 (in Chinese)
- [103] Mansoori B, Nodeh H, Modirsanei M, Kiaei M M, Farkhoy

- M. Influence of dietary tannic acid and polyethylene glycol on growth and intestinal D-xylose absorption of broiler cockerels and activity of serum enzymes[J]. *British Poultry Science*, 2007, 48(4): 489-495
- [104] Ramah A, Yasuda M, Ohashi Y, Urakawa M, Kida T, Yanagita T, Uemura R, Bakry H H, Abdelaleem N M, El-Shewy E A. Different doses of tannin reflect a double-edged impact on broiler chicken immunity[J]. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 2020, 220: 109991
- [105] Marzo F, Tosar A, Santidrian S. Effect of tannic acid on the immune response of growing chickens[J]. *Journal of Animal Science*, 1990, 68(10): 3306-3312
- [106] 李茜, 侯海锋. 水解单宁酸对肉鸡肠道形态和内源酶活性的影响[J]. *今日畜牧兽医*, 2016(4): 45-48
Li Q, Hou H F. Effects of hydrolyzed tannic acid on intestinal morphology and Endogenous Enzyme activity of broilers [J]. *Today Animay Husbandry and Veterinary Medicine*, 2016(4): 45-48 (in Chinese)
- [107] Chamorro S, Viveros A, Rebolé A, Rica B D, Arija I, Brenes A. Influence of dietary enzyme addition on polyphenol utilization and meat lipid oxidation of chicks fed grape pomace [J]. *Food Research International*, 2015, 73: 197-203
- [108] Kubena L F, Byrd J A, Young C R, Corrier D E. Effects of tannic acid on cecal volatile fatty acids and susceptibility to *Salmonella typhimurium* colonization in broiler chicks[J]. *Poultry Science*, 2001, 80(9): 1293-1298
- [109] AlSheikh H M A, Sultan I, Kumar V, Rather I A, Al-Sheikh H, Tasleem Jan A, Haq Q M R. Plant-based phytochemicals as possible alternative to antibiotics in combating bacterial drug resistance[J]. *Antibiotics (Basel, Switzerland)*, 2020, 9(8): 480
- [110] Yother J. Capsules of *Streptococcus pneumoniae* and other bacteria: Paradigms for polysaccharide biosynthesis and regulation[J]. *Annual Review of Microbiology*, 2011, 65: 563-581
- [111] 江雪, 王洪奎, 龙森. 家禽生产上使用单宁作为抗生素替代物的前景[J]. *畜牧与饲料科学*, 2015, 36(10): 34-36
Jiang X, Wang H K, Long M. Prospect of tannin serving as an alternative for antibiotics in poultry production[J]. *Animal Husbandry and Feea Science*, 2015, 36(10): 34-36 (in Chinese)
- [112] 胡成, 李宁宁, 刘则学. 水解单宁酸在保育猪上的应用[J]. *养猪*, 2018(6): 55-56
Hu C, Li N N, Liu Z X. Application of hydrolyzed tannic acid in nursery pigs[J]. *Swine Production*, 2018(6): 55-56 (in Chinese)
- [113] 杨海涛. 不同抗生素替代物对肉仔鸡生产性能、抗氧化性能及肠道健康的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019
Yang H T. Effects of different antibiotic substitutes on growth performance, antioxidant index and intestinal health of broilers [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [114] Redondo L M, Dominguez J E, Rabinovitz B C, Redondo E A, Fernández Miyakawa M E. Hydrolyzable and condensed tannins resistance in *Clostridium perfringens* [J]. *Anaerobe*, 2015, 34: 139-145
- [115] Kirmusaoglu S. Sensitizing of β -lactam resistance by tannic acid in methicillin-resistant *S. aureus* [J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2019, 35(4): 57

责任编辑: 袁文业