

# 植物多酚对肠道微生态影响的研究进展

## Progress on effects of plant polyphenols on intestinal microecology

李浩<sup>1,2</sup> 彭喜洋<sup>1,2</sup> 吴湃萱<sup>1,2</sup> 戴智勇<sup>1,2</sup>

LI Hao<sup>1,2</sup> PENG Xi-yang<sup>1,2</sup> WU Pai-xuan<sup>1,2</sup> DAI Zhi-yong<sup>1,2</sup>

汪家琦<sup>1,2</sup> 湛艳红<sup>1,2</sup> 何湘丽<sup>1,2</sup>

WANG Jia-qi<sup>1,2</sup> ZHAN Yan-hong<sup>1,2</sup> HE Xiang-li<sup>1,2</sup>

(1. 澳优乳业(中国)有限公司, 湖南长沙 410200; 2. 澳优食品与营养研究院, 湖南长沙 410200)

(1. Ausnutria Dairy [China] Co., Ltd., Changsha, Hunan 410200, China;

2. Ausnutria Institute of Food and Nutrition, Changsha, Hunan 410200, China)

**摘要:**介绍了植物多酚对肠道微生态的调节机制,对不同类型的多酚类物质及混合多酚提取物对肠道菌群菌落结构变化的影响进行了论述,并对今后植物多酚的研究方向及相关产品的开发进行了展望。

**关键词:**植物多酚;肠道微生态;益生菌

**Abstract:** This paper discussed the regulation mechanism of plant polyphenols on intestinal microecology, summarized and analyzed the effects of different kinds of polyphenols and mixed polyphenols extracts on the change of intestinal flora community structure, and prospected the research direction of plant polyphenols and the development of related products in the future.

**Keywords:** plant polyphenols; intestinal microorganism; probiotics

植物多酚是一类多羟基化合物,是广泛存在于茶叶、葡萄、苹果、酒类及多种水果和蔬菜中的具有多元酚结构的次生代谢物<sup>[1-4]</sup>。根据其化学结构,植物多酚可分为类黄酮和非类黄酮两大类<sup>[5]</sup>。因其具有抗氧化、抗肿瘤、保护肝脏及抗肥胖等多种功能,植物多酚在食品领域具有广泛的应用<sup>[6]</sup>。肠道微生物群在宿主的生理和代谢中起着重要的作用,对个人的健康至关重要<sup>[7]</sup>。随着相关理论研究的发展和深入,研究者<sup>[5]</sup>发现植物多酚对维持肠道微环境的稳态有较大作用。迄今为止,许多试验<sup>[8-10]</sup>结果证明多酚类物质可以抑制肠道内有害菌群的生长繁殖,促进有益菌如乳杆菌、双歧杆菌等的生长,优

化肠道内菌群的结构,因此研究者已将多酚类物质视为除益生元、益生菌之外的维护肠道健康的第三大调节因子。本文主要介绍了植物多酚与肠道菌群的关系,进一步阐述了植物多酚对肠道菌群生长繁殖的影响以及近期研究进展,以为开发含植物多酚类的高质量食品和保健品提供依据。

### 1 植物多酚对肠道微生态的调节机制

人体是一个巨大的微生态系统,在成年人体内存在着 100 多种、10~100 万亿个的细菌,约为人体细胞总数的 10 倍<sup>[11-12]</sup>。肠道不仅是人体消化吸收的重要场所,也是人类菌群的最大储藏库,约含有 500 种、1 011~1 012 U/g 的菌落,占肠道微生物总量的 35%~50%,是一个多元化和充满活力的复杂微生物生态系统<sup>[13]</sup>。Eckburg 等<sup>[14]</sup>通过宏基因组研究发现,肠道微生物在系统发育地位上基本分属厚壁菌门(*Firmicutes*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)、变形菌门(*Proteobacteria*)、放线菌门(*Actinobacteria*)、疣微菌门(*Verrucomicrobia*)、梭杆菌门(*Fusobacteria*)6 大门,其中拟杆菌门和厚壁菌门为主要优势菌群。而肠道微生物菌群的结构、功能及其产生的生物活性代谢产物对维持人体肠道健康具有重要意义<sup>[15]</sup>。在正常健康人体内,肠道微生态基本维持平衡状态,肠道菌群与生物体互利共生,相互依存,共同维护着整个机体的各项平衡。生物体可为肠道菌群的正常繁殖生长提供其所需要的营养环境,而肠道菌群所具有的多种生理功能也能反过来保护人体健康。相反,如果肠道微环境的稳态变得紊乱失调,生物体原有的平衡被打破,外来病原体微生物的入侵、人体免疫防线的打破都将导致人体在营养、免疫上都遭到较大的影响,导致糖尿病、心脑血管疾病、高血压以及自身免疫等疾病<sup>[16-19]</sup>,从而

**基金项目:**湖南省科技创新平台与人才计划(编号:2018WK4016)

**作者简介:**李浩(1992—),男,澳优乳业(中国)有限公司法规工程师,硕士。E-mail: haoli@ausnutria.com

**收稿日期:**2019-03-05

对人体健康造成极大危害<sup>[20-21]</sup>。

多酚类物质作为功能性物质,目前认为其调节肠道菌群的机制主要包括两个方面,一方面多酚类物质可为肠道内微生物提供代谢底物,促进益生菌的生长繁殖;另一方面多酚类物质的抗菌活性能够抑制肠道内有害菌群的生长,减少致病菌带来的毒性<sup>[11]</sup>。这主要是因为多酚的羟基基团可以与有害菌细胞膜的脂质双分子层结合从而破坏其正常功能,还可以通过产生的过氧化氢来破坏细胞膜的通透性,导致致病菌无法正常生长繁殖<sup>[8]</sup>;其次,多酚类物质可以通过与金属离子的螯合作用形成复合物,使得微生物酶系无法正常催化反应,甚至还会抑制部分酶的酶活性,进而影响肠道内的一系列酶化反应<sup>[22]</sup>。

## 2 多酚类物质对肠道微生物的影响

目前的多酚类物质主要有多酚类单体物质以及多酚类混合物,其中按结构将多酚分类,其单体物质主要可分为类黄酮和非黄酮类物质。

### 2.1 类黄酮

类黄酮又称生物类黄酮,是食品中含量十分丰富的一类植物多酚化合物,主要以结合态或自由态的形式存在于日常生活中常见的蔬菜、水果、茶叶、豆类等食品中。可进一步将类黄酮分为黄酮类、异黄酮类、黄酮醇类、黄烷酮类、黄烷醇类、花色苷混合物等几大亚类。作为一种多酚类化合物,类黄酮因其丰富的种类和独特的化学结构,同样也具备着多酚物质重要的生理、生化功能活性,如抗炎症、抗氧化、抗病毒等。近年来,由于人们对肠道菌群的平衡态与健康关系的进一步研究深入,发现类黄酮化合物对优化肠道菌群结构,维持肠道菌群的稳定性体现出十分可观的功能活性。吕小迅等<sup>[23]</sup>采用滤纸片扩散法研究了黄芩的水煎液抑菌作用,研究结果表明黄芩水煎液中的黄酮类成分具有较好的抑菌作用,对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌的生长繁殖均有较明显的抑制作用。李辛慧等<sup>[24]</sup>研究了鹰嘴豆提取液中的异黄酮类化合物在模拟胃液、肠液以及肠道菌群中的代谢情况,研究结果表明只有在肠道菌群环境中异黄酮类化合物才发生代谢分解成了更利于人体肠道吸收的物质。刘敏等<sup>[25]</sup>探究了藤三七类黄酮组分对肠道菌群的调节作用,与对照组相比,类黄酮组的细胞水肿情况得到了明显的改善,肠道菌群变得更加多样丰富,嗜胆菌属细菌有所增加,结果表明类黄酮组分可以促进益生菌的生长繁殖,改善小鼠肝细胞的水肿现象,维持肠道菌群的平衡态。张蔚<sup>[26]</sup>探究了二氢黄酮苷与异黄酮苷和人体肠道细菌的相互作用关系,结果表明黄酮苷类物质对于病原菌如肠球菌、肠杆菌等的生长有抑制作用,且浓度越高抑制作用越强;同时黄酮苷类物质对有益菌如乳酸杆菌、双歧杆菌的生长有促进作用,但黄酮苷类物质的浓度越高,促进作用越弱,表明黄酮苷类物质不仅会影响肠道菌群的稳定性,且影响程

度和肠道菌群的种类和黄酮苷的浓度有关。为了了解紫色玉米色素与肠道菌群之间的关系,周波等<sup>[27]</sup>考察了紫色玉米色素对小鼠肠道中的乳杆菌、肠杆菌以及双歧杆菌的数量变化影响,结果表明灌服后的小鼠肠道中乳杆菌、双歧杆菌的数量变化差异均不显著,但低剂量组中肠杆菌的数量明显低于灌服前的数量( $P < 0.05$ ),而其他组的肠杆菌数量变化差异不显著,揭示了花色苷色素类物质也可以促进肠道菌群中有益菌的生长繁殖。这些体外及体内试验表明,不同种类的黄酮类植物多酚可以选择性促进肠道有益菌生长,或选择性抑制如肠杆菌等微生物的繁殖,从而丰富肠道菌群的多样性,维持肠道菌群的稳定。

### 2.2 非类黄酮

除了类黄酮类物质,植物多酚还包括一系列酚酸类、芪类等化合物,而这些非类黄酮类的多酚,在保护肠黏膜、优化肠道菌群结构进而维持肠道健康等方面也有一定作用。研究<sup>[28]</sup>表明,咖啡酸等酚酸类物质对肠道中的产气荚膜梭菌(*Clostridium perfringens*)、大肠杆菌(*Escherichia coli*)、假单胞菌(*Pseudomonas*)、沙门氏菌(*Salmonella enterica*)等病原菌产生抑制作用,而对乳酸杆菌(*Lactobacillus*)和双歧杆菌(*Bifidobacterium*)等益生菌的生长繁殖产生促进作用,从而起到优化肠道菌群结构,维护肠道健康的作用。除此以外,多酚中的芪类物质如白藜芦醇等同样也表现出了相似的生理活性。Mar等<sup>[29]</sup>探究了白藜芦醇能否在可达到的膳食剂量下在体内发挥抗炎活性,将大鼠灌服白藜芦醇 $[1 \text{ mg}/(\text{d} \cdot \text{kg})]$ 连续25 d,最后5 d给予5%右旋糖酐硫酸钠(DSS)诱导结肠炎,并讨论了微阵列对结肠组织损伤、肠道微生物群、活性氧种类、炎症标志物、一氧化氮生成以及基因表达谱的影响。结果表明白藜芦醇可增加DSS处理后的乳酸菌和双歧杆菌的数量,降低肠杆菌的数量,能明显保护结肠黏膜结构,减轻体重,降低全身炎症标志物、结肠黏膜前列腺素E2、环氧化酶-2、前列腺素E合酶、一氧化氮水平。此外,与重要通路相关的2 655个基因在远端结肠黏膜中的表达也存在差异。这些结果强化了白藜芦醇作为肠道炎症的一种饮食有益化合物的概念。Qiao等<sup>[30]</sup>研究了白藜芦醇对高脂饮食小鼠体内肠道微生物、葡萄糖和脂质代谢的影响。通过采用荧光原位杂交和流式细胞术对肠道菌群变化进行监测和定量。结果表明,白藜芦醇 $[200 \text{ mg}/(\text{d} \cdot \text{kg})]$ 可以改善高脂饮食引起的肠道菌群失调,增加拟杆菌门与厚壁菌门的比例,显著抑制粪肠球菌的生长,增加乳酸菌和双歧杆菌的生长,调节肠道微生物的组成结构,从而起到维护肠道菌群环境平衡态的作用。

## 3 混合多酚提取物对肠道微生态的影响

茶叶、葡萄、红酒等多种食物中均含有丰富的多酚类物质,随着近年来研究的深入,发现多酚类化合物对于维

护生物体肠道菌群的健康十分重要,其中以茶多酚、葡萄多酚、红酒多酚、可可多酚等为主。

### 3.1 茶多酚

在体外抗氧化试验中,茶多酚均表现出了潜在的类似益生元的生理生化活性<sup>[31]</sup>,茶多酚对人体健康的益处可能与茶多酚的生物活性代谢物和人体肠道菌群的调节作用有关。Sun 等<sup>[10]</sup>利用 Caco-2 transwell 系统对绿茶、乌龙茶和红茶中的茶多酚和茶多酚在肠道中的吸收分别进行了探究,并对绿茶、乌龙茶和红茶对人体肠道菌群的影响进行了评价,结果表明各样品均诱导了某些有益菌的增殖,抑制了普氏拟杆菌和溶组织性梭菌的增殖。此外,茶多酚培养基中产生的短链脂肪酸(SCFA)也相对较高。这些结果揭示了绿茶、乌龙茶和红茶中的茶多酚可以调节肠道菌群,产生短链脂肪酸,有助于改善人体健康。因此,饮用富含多酚类物质的茶,有利于肠道微生态,有利于宿主健康。为了研究乌龙茶多酚对肠道 13 个微生物群的调节作用,Cheng 等<sup>[32]</sup>采用柱层析法制备了茶多酚,并采用高通量测序法分析了其对肠道 14 个菌群结构的影响。结果表明 16 种细菌的生物多样性和 17 种产丁酸盐和醋酸盐的细菌属的丰富度有了强劲的增长。茶多酚给药 4 周后,拟杆菌门菌群大量增加,厚壁菌门菌群减少,相应的厚壁菌门/拟杆菌门比值减少,反映了茶多酚对肠道菌群有积极的正向调节作用。Wang 等<sup>[33]</sup>采用了人植物区系相关小鼠模型,研究了高脂饮食和茶多酚对肠道微生物群和脂质代谢的协同作用。结果表明高脂饮食组结肠微生物群的丰富度和多样性显著增加( $P < 0.05$ ),拟杆菌门与厚壁菌门比值显著升高( $P < 0.001$ ),进一步说明了茶多酚对高脂饮食小鼠的结肠微生物群组成和多样性产生了相应影响,有利于增加肠道菌群的稳定性。

### 3.2 葡萄多酚

除茶多酚外,葡萄中也含有大量的植物多酚类物质,主要以花青素、黄酮醇类、酚酸类为主。大量动物体内试验表明,葡萄多酚可以调节肠道活动,改变胃肠道的结构和功能。Viveros 等<sup>[34]</sup>采用体内试验研究了在葡萄果渣浓缩液和葡萄籽提取物喂养仔鸡 21 d 后其肠道菌群和肠道形态的变化。饮食治疗包括无抗生素饮食(CON)、阳性对照(AVP, 50 mg/kg 的阿佛帕星)以及不含抗生素的含葡萄糖精的饮食(GPC)或葡萄籽提取物(GSE, 7.2 g/kg)。在回肠含量方面,以 CON 和 GSE 饲料喂养的禽鸟回肠中乳酸菌的数量最多。与 CON 日粮相比,AVP 日粮、GPC 日粮和 GSE 日粮增加了肠球菌的数量,降低了回肠梭菌的数量。在盲肠消化中,喂食 GPC 和 GSE 饲料的鸟类比任何其他处理组的鸟类具有更丰富的大肠杆菌、乳酸菌、肠球菌和梭菌种群。饲喂 GPC 和 GSE 饲料的动物的生物多样性程度高于饲喂对照饲料的动物。结论表明

了富含多酚的葡萄制品饲料可以改变肉鸡肠道形态和肠道菌群,提高肠道细菌的生物多样性程度。Abu Hafsa 等<sup>[35]</sup>研究了饲料中添加葡萄籽对肉鸡性能、胴体性状、抗氧化状态和回肠微生物群的影响。结果表明饲料中添加葡萄籽的肉鸡回肠链球菌和大肠杆菌的数量较低,而乳酸菌的数量较高( $P < 0.05$ )。葡萄籽中的多酚类物质具有降低血脂,增强抗氧化能力,减少回肠有害细菌等作用,有益于生物体健康。Williams 等<sup>[36]</sup>研究了富含多酚的葡萄渣膳食补充剂与猪肠道蛔虫感染之间的相互作用。结果表明补充葡萄渣的膳食组导致了结肠原核菌群组成发生显著变化,在猪饲料中添加越来越受欢迎的饲料添加剂多酚葡萄渣膳食补充剂可在感染猪蛔虫期间增加黏膜嗜酸性粒细胞和肥大细胞数量,并通过调节原核菌群组成和/或改变结肠中短链脂肪酸浓度来调节肠道功能,进一步证明了葡萄多酚对于改善肠道菌群的作用。此外,葡萄籽提取物中的多酚物质也能促进双歧杆菌与乳酸杆菌的生长,而其中含有的一些单体物质如儿茶素和表儿茶素则对一些有害菌如铜绿假单胞菌、肺炎杆菌、大肠杆菌、粪肠球菌、酿脓链球菌和流感嗜血杆菌等具有良好的抑制作用。基于此,其作为动物饲料添加剂已经具有一定的应用。

### 3.3 红酒多酚

适量饮用红酒的好处主要归功于其酚类化合物,包括黄酮类化合物的复杂混合物,如黄酮-3-醇和花青素,也包括非黄酮类化合物,如白藜芦醇、肉桂酸和没食子酸。与从其他食品中提取的多酚类似,红酒多酚也被认为对肠道微生物群具有选择性调节作用<sup>[37]</sup>。Dolar 等<sup>[38]</sup>发现红酒多酚(50 mg/kg)可抑制偶氮甲烷(AOM, 7.4 mg/kg, 总剂量 74 mg/kg)或二甲胂(DMH, 30 mg/kg, 总剂量 300 mg/kg)诱导的结肠癌发生。与对照组相比,接受多酚治疗的动物的肿瘤发生率始终较低。经过多酚处理的大鼠粪便中的主要菌株为拟杆菌、乳酸菌和双歧杆菌,而在对照组大鼠粪便中主要鉴定的微生物为拟杆菌、梭菌和丙酸杆菌,结果表明红酒多酚对于肠道菌群的结构起到了调节和优化作用。在一项干预研究中,Queipo-Ortuno 等<sup>[39]</sup>研究了 10 名健康志愿者连续摄入红酒、脱醇红酒和杜松子酒后其粪便微生物群的变化。在肠道菌群方面,所观察到的差异取决于饮料的种类。在摄入红酒后,4 种主菌门(*Proteobacteria*、*Fusobacteria*、*Firmicutes*、*Bacteroidetes*)显著增加,双歧杆菌和 *Prevotella* 的种类也相应增加。而放线菌门未见明显改变,红酒组梭状芽胞杆菌属和溶组织梭状芽胞杆菌属明显减少。这一结果表明在摄入含多酚的红酒后,其肠道菌群的结构得到了一定程度的优化。

### 3.4 其他多酚类

除了常见的茶多酚、葡萄多酚、红酒多酚等,石榴多

酚、可可多酚及檳榔多酚等其他多酚类物质近期也被研究者<sup>[40-43]</sup>发现具有优化肠道菌群的作用。可可可是产自可可科可可树的一种产品,富含黄烷-3-醇,以单体(-)-表儿茶素和(+)-儿茶素以及B型原花青素的形式存在。可可多酚类物质的摄入可能对如高血压、氧化应激、癌症、动脉粥样硬化、糖尿病和多种中枢神经系统疾病造成影响,这些疾病又与肠道微生物群密切相关,因此Massot-Cladera等<sup>[44]</sup>调查了可可和巧克力摄入量对肠道微生物群的影响,通过对雌性Wistar大鼠连续高剂量(质量分数10%)摄入可可后的粪便微生物群组成进行分析。结果表明在干预结束时,拟杆菌、葡萄球菌和梭状芽胞杆菌属的水平显著降低。同时科学研究<sup>[45]</sup>也证明石榴制品具有较高的抗氧化能力,主要是由于石榴皮、石榴膜和石榴皮中富含抗氧化剂和抗炎活性化合物(以鞣花色素和花青素为主)。Bialonska等<sup>[43]</sup>采用分批培养发酵系统进行的试验旨在检测石榴皮提取物(PPE)在肠道菌群生长中的潜力,研究结果表明石榴皮提取物(0.01%)抑制了产气荚膜C、拉莫斯C、金黄色葡萄球菌和梭状芽胞杆菌的生长,但显著提高了双歧杆菌(275%)的生长。Mar等<sup>[46]</sup>用右旋糖酐硫酸钠诱导大鼠结肠炎模型报道了石榴皮提取物的益生菌作用,结果表明摄入250 mg PPE/(kg·d),3周后双歧杆菌、乳酸菌和梭状芽胞杆菌数量增加。除了石榴多酚以外,苹果中也富含酚类化合物,相关研究<sup>[47]</sup>证实实用苹果汁(总多酚,829 mg/L)喂养4周的大鼠的新鲜粪便中发现了更多的乳酸菌和双歧杆菌。成煥等<sup>[42]</sup>通过间歇式静态厌氧体外发酵结合Ion S5 XL平台扩增子测序的方法,研究了檳榔籽多酚对男性肠道微生物的影响,结果显示肠道微生态的物种多样性水平明显提高,柔嫩梭菌属(*Faecalibacterium*)相对丰度明显提高,而拟杆菌属(*Bacteroides*)和双歧杆菌属(*Bifidobacterium*)的相对丰度也有小幅增加。

#### 4 结论和展望

综上所述,无论是植物多酚单体还是混合多酚提取物,均对肠道微生态具有较大的影响。其既能选择性地抑制大肠杆菌、粪肠球菌等特定致病菌,也可以促进乳酸菌和双歧杆菌等特定有益菌株的生长,有利于维持肠道微生态平衡、促进肠道健康。在当前的保健食品及营养补充剂等食品加工领域,植物多酚类产品如葡萄籽、红石榴口服液及绿茶多酚等往往是以其抗氧化功能作为其主要功能宣称。相信随着人体健康与肠道微生态关系研究的不断深入,植物多酚作为一种有助于调节肠道菌群的调节因子,在肠道保健领域将会具有更大的应用前景。

当前,关于植物多酚与肠道微生态的研究已取得一定的成果,但总体而言,相关临床研究较少,对其作用机理的研究还不够深入,今后针对植物多酚对肠道微生态影响的研究应集中在以下几个方面:①通过体内及临床

试验研究进一步明确植物多酚对人体肠道健康的作用,并结合代谢组学来进一步分析植物多酚在人体内的代谢途径及作用机理;②对于混合多酚提取物开展进一步的分离研究,采用质谱技术<sup>[48]</sup>等分析其结构,明确其有益物质及组成;③在进行多酚类肠道保健食品或营养品的研发时,需综合考虑产品的用品及剂型,以确保产品能在肠道中发挥作用。

#### 参考文献

- [1] 高航,徐虹.植物多酚抗肥胖作用的研究进展[J].食品科学,2014,35(21):334-338.
- [2] 杨艳,杨荣玲,邹宇晓,等.肠道微生物菌群生物转化天然多酚类化合物研究进展[J].食品科学,2014,35(17):319-325.
- [3] 张凯,关家伟,季煜,等.茶多酚的提取及其对抗生素所致肠道菌群失衡的调整和预防作用[J].天然产物研究与开发,2014,26(10):1654-1658.
- [4] 冯丽,宋曙辉,赵霖,等.植物多酚及其提取方法的研究进展[J].中国食物与营养,2007(10):39-41.
- [5] 刘冬敏,黄建安,刘仲华.肠道微生物与茶及茶多酚的相互作用在调节肥胖及并发症中的作用[J].天然产物研究与开发,2018,30(9):168-176.
- [6] 符莎露,吴甜甜,吴春华,等.植物多酚的抗氧化和抗菌机理及其在食品中的应用[J].食品工业,2016,37(6):242-246.
- [7] 赵洪一,陈历水,尹乐斌,等.功能性食品对老年人肠道菌群影响的研究进展[J].农产品加工,2018(1):55-59.
- [8] 杨立娜,吴凯为,朱力杰,等.益生元、多酚、蛋白质和多不饱和脂肪酸对肠道健康的影响[J].食品工业科技,2017,38(22):336-340.
- [9] XIAO Jun-song, SHAN Jing-ming, CAO Yan-ping, et al. Research progress in regulation of energy metabolism by polyphenols via intestinal flora[J]. Food Science, 2012, 33(3): 300-303.
- [10] SUN Han-yang, CHEN Yu-hui, CHENG Mei, et al. The modulatory effect of polyphenols from green tea, oolong tea and black tea on human intestinal microbiota in vitro[J]. J Food Sci Technol, 2018, 55(1): 399-407.
- [11] 卢烽,廖小军,胡小松,等.多酚对肠道微生物影响的研究进展及对多酚指示菌的探讨[J].食品工业科技,2018,39(16):330-335.
- [12] USUNE E, ALFREDO F Q, MILAGRO F I, et al. Impact of polyphenols and polyphenol-rich dietary sources on gut microbiota composition[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2013, 61(40): 9517-9533.
- [13] 欧阳瑞. PGG及其肠道菌群降解产物的生物活性分析[D]. 广州:华南农业大学,2016:8.
- [14] ECKBURG P B, BIK E M, BERNSTEIN C N, et al. Diversity of the human intestinal microbial flora[J]. Science, 2005, 308(5728): 1635-1638.

- [15] 叶良金. 茶叶对肠道微生物影响的研究进展[J]. 茶业通报, 2017, 39(3): 120-124.
- [16] EMMANOUIL A, VICKY M, DIDIER R. Related actions of probiotics and antibiotics on gut microbiota and weight modification[J]. *Lancet Infectious Diseases*, 2013, 13(10): 889-899.
- [17] ROWLAND I R. The role of the gastrointestinal microbiota in colorectal cancer[J]. *Curr Pharm Des*, 2009, 15(13): 1 524-1 527.
- [18] MACFARLANE G T, BLACKETT K L, NAKAYAMA T, et al. The gut microbiota in inflammatory bowel disease[J]. *Current Pharmaceutical Design*, 2009, 15(13): 1 528-1 536.
- [19] 谭婷, 刘武嫦, 仇云龙, 等. 茶叶对 IBD 肠道微生物菌群影响研究进展[J]. 茶叶通讯, 2016, 43(3): 37-40.
- [20] 陈丽莉. 黑树莓多酚对结肠直肠癌小鼠肠道菌群异常的调控作用研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2016: 2-4.
- [21] 蒋慧颖. 红茶调节肠道菌群与抗肥胖功效研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2018: 1-3.
- [22] 杨华, 叶发银, 赵国华. 膳食多酚与肠道微生物相互作用研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(3): 223-227.
- [23] 吕小迅, 周玉珍, 吕华冲, 等. 黄芩、黄精抗真菌作用活性部位实验研究[J]. 广东药学院学报, 1995, 11(3): 180.
- [24] 李辛慧, 梁现蕊. 鹰嘴豆中异黄酮类化合物体外模拟胃肠道代谢研究[J]. 发酵科技通讯, 2017, 46(3): 147-152.
- [25] 刘敏, 陈奇超, 胡瑞良, 等. 藤三七类黄酮组分对小鼠代谢综合征模型及其肠道菌群的调节作用[J]. 中国微生态学杂志, 2017, 29(4): 390-394.
- [26] 张蔚. 二氢黄酮苷及异黄酮苷与人体肠道细菌的相互作用研究[D]. 南京: 南京中医药大学, 2014: 136-137.
- [27] 周波, 王晓红, 郭连营, 等. 玉米紫色植株花色苷色素对小鼠肠道菌群的影响[J]. 中国微生态学杂志, 2008, 20(1): 23-24.
- [28] LEE H C, JENNER A M, LOW C S, et al. Effect of tea phenolics and their aromatic fecal bacterial metabolites on intestinal microbiota[J]. *Res in Microbiol*, 2006, 157(9): 876-884.
- [29] MAR L, MARÍA Josefa Y É G, MARÍA Victoria S, et al. Effect of a low dose of dietary resveratrol on colon microbiota, inflammation and tissue damage in a DSS-induced colitis rat model[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2009, 57(6): 2 211-2 220.
- [30] QIAO Yi, SUN Jin, XIA Shu-fang, et al. Effects of resveratrol on gut microbiota and fat storage in a mouse model with high-fat-induced obesity[J]. *Food & Function*, 2014, 5(6): 1 241-1 249.
- [31] 蒋慧颖, 马玉仙, 周欢, 等. 茶叶调节肠道菌群作用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(15): 31-33.
- [32] CHENG Mei, ZHANG Xin, ZHU Jie-yu, et al. Metagenomics approach to the intestinal microbiome structure and function in high fat diet-induced obesity mice fed with oolong tea polyphenols[J]. *Food & Function*, 2018, 9(2): 1 079-1 087.
- [33] WANG Li, ZENG Ben-hua, LIU Zhi-wei, et al. Green tea polyphenols modulate colonic microbiota diversity and lipid metabolism in high-fat diet treated HFA mice[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(3): 864-873.
- [34] VIVEROS A, CHAMORRO S, PIZARRO M, et al. Effects of dietary polyphenol-rich grape products on intestinal microflora and gut morphology in broiler chicks[J]. *Poult Sci*, 2011, 90(3): 566-578.
- [35] ABU HAFSA S H, IBRAHIM S A. Effect of dietary polyphenol-rich grape seed on growth performance, antioxidant capacity and ileal microflora in broiler chicks[J]. *J Anim Physiol Anim Nutr*, 2017, 102(1): 268-275.
- [36] WILLIAMS A R, KRYCH L, FAUZAN A H, et al. A polyphenol-enriched diet and *Ascaris suum* infection modulate mucosal immune responses and gut microbiota composition in pigs[J]. *Plos One*, 2017, DOI: 10.1371/journal.pone.0186546.
- [37] ISABEL M I, LIDIA S A, PABLO P M, et al. Red wine polyphenols modulate fecal microbiota and reduce markers of the metabolic syndrome in obese patients[J]. *Food & Function*, 2016, 7(4): 1 775-1 787.
- [38] DOLARA P, LUCERI C, DE F C, et al. Red wine polyphenols influence carcinogenesis, intestinal microflora, oxidative damage and gene expression profiles of colonic mucosa in F344 rats [J]. *Mutat Res*, 2005, 591(1): 237-246.
- [39] QUEIPO-ORTUÑO M I, BOTO-ORDÓNEZ M, MURRI M, et al. Influence of red wine polyphenols and ethanol on the gut microbiota ecology and biochemical biomarkers[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2012, 95(6): 1 323-1 334.
- [40] KEMPERMAN R A, GROSS G, MONDOT S, et al. Impact of polyphenols from black tea and red wine/grape juice on a gut model microbiome[J]. *Food Research International*, 2013, 53(2): 659-669.
- [41] NICOD N, CHIVA-BLANCH G, GIORDANO E, et al. Green tea, cocoa, and red wine polyphenols moderately modulate intestinal inflammation and do not increase high-density lipoprotein (HDL) production[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2014, 62(10): 2 228-2 232.
- [42] 成焕, 王远亮. 槟榔籽多酚对肠道微生物体外发酵的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(1): 41-46.
- [43] BIALONSKA D, KASIMSETTY S G, SCHRADER K K. The effect of pomegranate (*Punica granatum L.*) byproducts and ellagitannins on the growth of human gut bacteria[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2009, 57(18): 8 344-8 349.

(下转第 236 页)

- [30] 崔阳阳, 姜启兴, 许艳顺, 等. 浸渍入味对冷冻熟制小龙虾品质的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(14): 297-300.
- [31] 张刘蕾, 姜启兴, 许艳顺, 等. 油炸和真空渗透对冻藏风味小龙虾品质的影响[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2013, 28(4): 40-44.
- [32] VEJAPHAN W, HSIEH C Y, WILLIAMS S S. Volatile flavor components from boiled crayfish (*Procambarus clarkii*) tail meat[J]. Journal of Food Science, 2010, 53(6): 1 666-1 670.
- [33] MARSHALL G A, MOODY M W, HACKNEY R. Differences in color, texture, and flavor of processed meat from red swamp crawfish (*Procambarus clarkii*) and white river crawfish (*P. acutus acutus*)[J]. Journal of Food Science, 2010, 53(1): 280-281.
- [34] CADWALLADER K R, BAEKH H. Aroma-impact compounds in cooked tail meat of freshwater crayfish (*Procambarus clarkii*)[J]. Developments in Food Science, 2015, 40(98): 271-278.
- [35] 葛孟甜, 李正荣, 赖年悦, 等. 两种杀菌方式对即食小龙虾理化性质及挥发性风味物质的影响[J]. 渔业现代化, 2018, 45(3): 66-74.
- [36] 耿胜荣, 熊光权, 李新, 等. 不同灭菌处理对小龙虾品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(12): 2 324-2 328.
- [37] 李新, 熊光权, 廖涛, 等. 小龙虾虾肉辐照后理化指标与蛋白质性质分析[J]. 核农学报, 2016, 30(10): 1 941-1 946.
- [38] 廖涛, 叶敏, 熊光权, 等. 辐照对克氏原螯虾致敏蛋白质生化性质的影响[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(24): 6 082-6 085.
- [39] 周蓓蓓, 陈小雷, 鲍俊杰, 等. 超高压加工工艺对小龙虾仁品质影响的初步研究[J]. 食品科技, 2018, 43(6): 154-160.
- [40] 汪兰, 何建军, 贾喜午, 等. 超高压处理对小龙虾脱壳及虾仁性质影响的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(14): 138-141, 147.
- [41] 汪兰, 何建军, 贾喜午, 等. 超高压增压次数对小龙虾脱壳及虾仁品质影响的研究[J]. 食品工业, 2017, 38(5): 49-52.
- [42] FLICK G J, LOVELL R T, ENRIQUEZ-IBARRA L G, et al. Changes in nitrogenous compounds in freshwater crayfish (*Procambarus clarkii*) tail meat stored in ice[J]. Journal of Muscle Foods, 2010, 5(2): 105-118.
- [43] 吴晨燕, 王晓艳, 王洋, 等. 熟制麻辣小龙虾冷藏和冻藏条件下的品质变化[J]. 肉类研究, 2018, 32(5): 52-56.
- [44] 赵立, 陈军, 邵兴锋, 等. 冷冻方式对熟制克氏原螯虾肉冷冻贮藏(-18℃)条件下品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(10): 232-234.
- [45] 赵立, 陈军, 陈晓明, 等. 不同冷冻温度处理的熟制克氏原螯虾肉的营养评价[J]. 食品科技, 2013, 38(7): 67-72.
- [46] CHEN Gong, GUTTMANN R P, XIONG You-ling, et al. Protease activity in post-mortem red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) muscle stored in modified atmosphere packaging[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2008, 56(18): 8 658-8 663.
- [47] 于晓慧, 林琳, 姜绍通, 等. 即食小龙虾复合生物保鲜剂的优选及保鲜效果研究[J]. 肉类工业, 2017(3): 24-32.
- [48] 于晓慧. 即食小龙虾保鲜剂的复配及其抑菌机理的初步研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017: 23-39.
- [49] 李新荅. 克氏原螯虾 Kazal 型丝氨酸蛋白酶抑制因子基因克隆、表达及功能分析[D]. 济南: 山东大学, 2010: 35-42.
- [50] 于颖颖. 克氏原螯虾 TNFAIP8 基因的表达特征及功能分析[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016: 48-65.
- [51] WANG Xin-xia, LU Ze-qing, ZHU Lin-na, et al. Innate immune response and related gene expression in red swamp crayfish (*Procambarus clarkii* (Girard)), induced by selenium-enriched exopolysaccharide produced by bacterium *Enterobacter cloacae* Z0206 [J]. Aquaculture Research, 2010, 41(11): e819-e827.
- [52] 任秀芳, 周鑫, 赵朝阳, 等. 壳聚糖对克氏原螯虾生长、血清相关免疫因子、肌肉成分和消化酶的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2013, 28(5): 468-474.
- [53] 孙爱东, 赵立群. 臭氧在出口小龙虾生产中降解氯霉素、农残及杂菌应用的研究[J]. 食品科技, 2002(10): 25-27.
- [54] 董志俭, 孙丽平, 唐劲松, 等. 不同干燥方法对小龙虾品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(24): 84-87.
- [55] LIN Ting, WANG Jing-jing, LI Ji-bing, et al. Use of acidic electrolyzed water ice for preserving the quality of shrimp[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2013, 61(36): 8 695-8 702.

(上接第 226 页)

- [44] MASSOT-CLADERA M, PÉREZ-BEREZO T, FRANCH A, et al. Cocoa modulatory effect on rat faecal microbiota and colonic crosstalk[J]. Archives of Biochemistry & Biophysics, 2012, 527(2): 105-112.
- [45] 贾桂云, 吴凌志, 羊传慧, 等. 芒果和番石榴的果皮、果肉多酚含量测定及抗氧化性比较分析[J]. 海南师范大学学报: 自然科学版, 2018, 31(1): 38-43.
- [46] MAR L, ANTONIO G S, YÁÑEZ-GASCÓN M J, et al. Anti-inflammatory properties of a pomegranate extract and its metabolite urolithin-A in a colitis rat model and the effect of colon inflammation on phenolic metabolism[J]. Journal of Nutritional Biochemistry, 2010, 21(8): 717-725.
- [47] SABINE S, GERHARD D, KATRI M N, et al. Physiological effects of extraction juices from apple, grape, and red beet pomaces in rats[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2006, 54(26): 10 269-10 280.
- [48] 李苇舟, 明建, 肖星凝, 等. 飞行时间质谱技术及其在植物多酚鉴定中的应用[J]. 食品与机械, 2017, 33(4): 200-204.