

# 食用菌多糖调控肠道菌群研究进展

## Effect of edible mushroom polysaccharide on human gut microbiome

程孟雅<sup>1</sup> 杨亚兰<sup>1</sup> 杨 桥<sup>1</sup> 冯路路<sup>1</sup>

CHENG Meng-ya<sup>1</sup> YANG Ya-lan<sup>1</sup> YANG Qiao<sup>1</sup> FENG Lu-lu<sup>1</sup>

黄仁贵<sup>1</sup> 郑鹭飞<sup>2</sup> 任佳丽<sup>1</sup>

HUANG Ren-gui<sup>1</sup> ZHENG Lu-fei<sup>2</sup> REN Jia-li<sup>1</sup>

(1. 中南林业科技大学, 湖南 长沙 410004;

2. 中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 北京 100081)

(1. Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China;

2. Institute of Quality Standard and Testing Technology for Agro-Products of CAAS, Beijing 100081, China)

**摘要:**多糖是食用菌的主要活性物质之一,具有抗氧化、抗肿瘤、抗炎、免疫调节等生物活性。文章从食用菌多糖的功效与结构、人体肠道菌群组成、分布与功能以及食用菌多糖如何调控肠道菌群影响人体健康方面进行了综述,同时对食用菌多糖的后续研究提出了建议。

**关键词:**食用菌;多糖;肠道菌群;人体健康

**Abstract:** Polysaccharide is one of the main bioactive compounds in these mushroom which had been generally studied to have the health-promoting properties of anti-oxidation, antitumor, anti-inflammatory, immunoregulation. With the heat wave of gut microbiome rising, how the edible mushroom polysaccharide affects human health through the gut microbiome has become the focus of attention. This review discussed the efficacy and structure of edible mushroom polysaccharides, the composition, distribution and function of human gut microbiome, and how the mushroom polysaccharides affect human health through regulating the gut microbiome. At the same time, preliminary suggestions for the follow-up study of edible mushroom polysaccharides were put forward in this review.

**Keywords:** edible mushroom; polysaccharide; gut microbiome; human health

**基金项目:**农业部农产品质量安全风险评估项目(编号: GJFP2019017);湖南省林业科技创新专项(编号: XLK201904-2)

**作者简介:**程孟雅,女,中南林业科技大学在读硕士研究生。

**通信作者:**郑鹭飞(1975—),女,中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所副研究员,博士。

E-mail: 13522807385@163.com

任佳丽(1977—),女,中南林业科技大学教授,博士。

E-mail: rjl\_cl@163.com

**收稿日期:**2019-07-26

多糖是食用菌菌丝体或子实体的重要组成部分,同时也是食用菌的重要活性成分。已有许多研究<sup>[1-3]</sup>表明,不同来源的食用菌多糖普遍具有抗氧化、抗肿瘤、抗炎、免疫调节等生物活性。食用菌多糖的生物活性与多糖的结构联系紧密。食用菌多糖的组成各不相同,但大部分都由 $\beta$ -葡聚糖组成,主链为 $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 3)糖苷键组成,侧链分支处由 $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 6)糖苷键连接<sup>[4-6]</sup>。试验<sup>[7-8]</sup>表明,高相对分子质量的(1 $\rightarrow$ 3)- $\beta$ -D-葡聚糖的三股螺旋结构对免疫调节作用至关重要,无三股螺旋结构的低分子量真菌多糖无抗肿瘤活性。随着“肠道菌群”研究的兴起,不少研究者<sup>[9-11]</sup>发现许多食用菌多糖也具有调节人体肠道菌群稳态的作用。食用菌多糖可以为微生物的生存提供必需的营养素,糖类被微生物降解后产生的短链脂肪酸可以调节肠道 pH 和给机体提供能量,对人体健康具有重要意义。目前多种食用菌来源的多糖被证明对动物肠道菌群结构具有极显著影响,可以改善抗生素导致的肠道菌群失衡,高脂饮食引起的高血脂、高血糖症状<sup>[12-13]</sup>。文章介绍了食用菌多糖的生理活性价值与结构的关系,并着重阐述了人体肠道菌群的组成、分布以及食用菌多糖通过调控肠道菌群来影响人体健康等方面的内容,以期对食用菌多糖的后续研究提供思路。

### 1 人体肠道菌群的组成及分布

人体肠道内定植着数量庞大的微生物群系,它们是人体完成正常物质代谢,维持机体健康不可或缺的一部分。人体肠道菌群数量高达 $10^{14}$ ,其种类超过 3 500 多种,主要定植在结肠部位,其基因数约为人体基因数的 100 倍。它们主要由厚壁菌门(*Firmicutes*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)、变形菌门(*Proteobacteria*)、放线菌门(*Actinobacteria*)、梭杆菌门(*Fusobacteria*)、疣微菌门

(*Verrucomicrobia*)组成,这些菌门的细菌占据肠道菌群总量的 95%以上,厚壁菌门和拟杆菌门是其中的优势菌门<sup>[14-15][16][24]</sup>。而每个菌门中也有各自的优势菌。例如,厚壁菌门中的优势菌有梭菌属(*Clostridium*)、罗氏菌属(*Roseburia*)、粪杆菌属也称柔嫩梭菌属(*Faecalibacterium*)、瘤胃球菌属(*Ruminococcus*)等,拟杆菌门中的优势菌有拟杆菌属(*Bacteriodes*)和普氏菌属(*Prevotella*),双歧杆菌属(*Bifidobacterium*)是放线菌门的主要优势菌<sup>[17]</sup>。这些菌群在肠道内的定植受肠道化学环境的影响。从小肠到结肠,肠道内的 pH 值逐渐升高,含氧量逐渐降低。小肠内的菌群多样性相对而言要低一些,含有较多耐酸细菌,如乳杆菌科(*Lactobacillaceae*)和拟杆菌科(*Bacteroidaceae*)。在到达盲肠后,细菌数量急剧增加,主要包括厌氧的拟杆菌科(*Bacteroidaceae*)、普雷沃氏菌科(*Prevotellaceae*)、理研菌科(*Rikenellaceae*)、毛螺菌科(*Lachnospiraceae*)和瘤胃菌科(*Ruminococaceae*)<sup>[18][13-15][19]</sup>。

乳杆菌属和双歧杆菌属是人体肠道最常见的两类益生菌,对人体具有多种生理功能。成人体内常见的乳杆菌主要有:鼠李糖乳酸杆菌(*Lactobacillus rhamnosus*)、干酪乳杆菌(*Lactobacillus casei*)、副干酪乳杆菌(*Lactobacillus paracasei*)。常见的双歧杆菌有:青春双歧杆菌(*Bifidobacterium adolescentis*)、链状双歧杆菌(*Bifidobacterium catenulatum*)、长双歧杆菌(*Bifidobacterium longum*)、假小链双歧杆菌(*Bifidobacterium pseudocatenulatum*)。在人体处于亚健康状态或者产生疾病时,这些益生菌的数量较正常状态会显著下降<sup>[20][7-9]</sup>。

肠道菌群的组成及丰度受多种因素的影响,例如饮食、生活方式、抗生素的使用等<sup>[21]</sup>。相较于人体基因组代谢特性的难以改变,肠道菌群结构易受外界条件干预而改变使人们可以有选择性地调控人体肠道菌群的平衡,从而达到保持人体健康和治愈某些疾病的目的。

## 2 肠道菌群的功能

### 2.1 参与人体营养物质的代谢

糖类是人体维持正常生理活动的主要能量来源,但大部分植物来源的多糖不能直接被人体消化利用,因为人体缺乏降解这些糖类的酶,或者是酶的降解活性很低。而肠道内的微生物可以弥补人体糖类代谢的不足。研究<sup>[22-24]</sup>表明,某些不被人体消化酶水解的多糖在进入人体消化道后可在肠道菌群的作用下被降解产生乙酸盐、丙酸盐、丁酸盐等短链脂肪酸(short-chain fatty acids, SC-FAs)。这个过程是由许多肠道菌群共同参与通力完成的。首先由一部分可以降解抗人体消化多糖的初级降解菌群,把进入肠道的抗性多糖分解为单糖、二糖、低聚糖等,同时它们自身也利用这些低聚糖产生乳酸或乙酸,而

另一些次级降解菌群可利用前者的产物进行发酵产生丁酸盐。这些肠道菌对多糖的发酵往往都是有选择性的,因而,不论是初级发酵者还是次级发酵者,它们都包含了大量不同种类的细菌<sup>[16][1-6][25]</sup>。

但值得注意的是,并不是供给越多的抗性淀粉就能产生越多的丁酸盐产物。初级降解菌的发酵底物同时也要为自身的发酵提供原料与能量,如果初级降解菌的发酵活动比较剧烈,那么可能只有少部分发酵底物能被次级降解菌利用从而产生较少丁酸盐。Nielson 等<sup>[26]</sup>设计试验利用不被人体消化酶水解的马铃薯抗性淀粉、玉米抗性淀粉、菊粉对受试者进行膳食干预来探讨这 3 种可发酵多糖对短链脂肪酸产生情况和肠道菌群动力学的影响,结果发现并不是每一种淀粉都能直接促进丁酸盐终产物产量的增加,但是这 3 种淀粉都各自能引起某些菌群丰度的增加。肠道菌群发酵抗性多糖产生的这些短链脂肪酸不仅可为机体提供能量,还具有维持肠道 pH 环境、维持肠屏障功能、减轻炎症、抑制病原菌等重要功效<sup>[20][2-4]</sup>。

### 2.2 维持肠道稳态和调节免疫

肠道菌群在维持肠上皮屏障完整性,促进人体免疫系统的发育以及调节免疫系统方面具有重要作用。人体肠道内表面是由单层肠上皮细胞组成的,它是将人体内环境与肠道菌群分隔开的一道物理屏障,同时还提供了肠道生物的附着和免疫细胞分泌物质的界面。肠道上皮细胞的功能包括吸收营养物质和分泌细胞因子,后者影响肠道微生物的定植,识别有益或有害微生物从而诱导和调解免疫反应<sup>[21]</sup>。肠道菌群及其产物可刺激肠上皮细胞中 TLRs 和 NLRs 的表达,使宿主出现生理炎症,促使上皮细胞增殖,表达抗菌肽,促进上皮细胞转化,加强细胞间紧密连接<sup>[21]</sup>。研究<sup>[27-29]</sup>表明,无菌小鼠具有明显的免疫缺陷,它们的免疫效应细胞少,Treg 细胞减少,淋巴组织的数量较少,抗体水平也较低。而在无菌小鼠体内定植大肠杆菌和乳酸杆菌后,相关免疫因子的分泌水平有所恢复。肠道内的一些细菌还能与病原菌竞争肠上皮细胞的附着位点,阻碍病原菌的定植,维持肠道的正常通透性。并且肠道内的益生菌产酸可以降低肠道 pH 值,抑制病原微生物的生长繁殖。例如多形拟杆菌、艾克曼菌、双歧杆菌均利用未被宿主肠道消化的多糖,使病原体远离黏膜表面<sup>[20][8][21]</sup>。肠道菌群对于抑制病原微生物生长,增强机体免疫力,保障人体健康具有不容忽视的作用。

## 3 食用菌多糖对肠道菌群的作用

### 3.1 调节肠道菌群的组成和结构

肠道菌群的结构和组成与人体健康联系密切,目前已有许多研究证实,很多种类的食用菌都具有促进益生菌生长,调节人体肠道菌群组成的功效。王雪等<sup>[18][19-47][30]</sup>利用盐酸林可霉素灌胃塑造肠道菌群失衡小

鼠模型,然后用长根菇多糖对小鼠进行干预,设置了5个试验组:对照组,多糖浓度高、中、低3个组和自然恢复组。结果表明,多糖组的菌群多样性比对照组的低,但高于自然恢复组的;与对照组相比,多糖干预组随着多糖浓度的增加,小鼠肠道厚壁菌门增加,拟杆菌门降低;双歧杆菌和乳杆菌逐渐增加,大肠杆菌和肠球菌逐渐减少。说明长根菇多糖可以对抗生素导致的小鼠肠道菌群失衡起到一定恢复作用。Khan等<sup>[31]</sup>分别探究了从灵芝和茯苓子实体和菌丝体中提取的多糖对小鼠肠道菌群的影响。发现这4种多糖都能够增加肠道益生菌如双歧杆菌、直肠真杆菌、约氏乳酸菌、乳酸球菌的数量,而减少病原菌的数量。Zhao等<sup>[32]</sup>探究了黑木耳、金针菇、香菇等6种常见食用菌在体外厌氧发酵过程中对粪便菌群组成的影响。结果表明,相较于对照组,这6种食用菌均能显著增加发酵液中的短链脂肪酸含量,而黑木耳的促进作用尤为突出;在粪便菌群组成上,与对照组相比,食用菌对益生菌的生长有促进作用,对条件致病菌的生长有抑制作用。Xu等<sup>[33]</sup>通过向老年小鼠的饮食中加入香菇多糖发现,香菇多糖可以使小鼠的免疫反应和肠道微生物菌群得到恢复。香菇多糖可逆转老年小鼠体内的TNF- $\alpha$ 、IL-1 $\alpha$ 和IL-2的减少,并达到和正常成年小鼠一样的水平;在肠道菌群组成上,老年小鼠体内的优势菌门为厚壁菌和拟杆菌,其总量占肠道菌群总数的97%以上,厚壁菌与拟杆菌比值由正常成年鼠的0.50降到0.38,喂食香菇多糖后,肠道菌群多样性有所恢复,厚壁菌与拟杆菌总数占肠道菌群总数的96%以上(正常成年小鼠厚壁菌和拟杆菌之和占肠道菌群总数的95%以上),且厚壁菌与拟杆菌比值上升到0.82;与老年组相比,香菇多糖老年组小鼠肠道内拟杆菌显著减少(由70.75%降到52.86%),而厚壁菌显著增加(由26.85%上升到43.41%)。Xu等<sup>[34]</sup>通过试验表明灵芝多糖可通过调节炎症细胞因子和小鼠肠道菌群组成来提高高脂饮食小鼠胰岛素敏感性。喂食高脂饮食后,小鼠肠道放线菌科,明串珠菌属丰度增加,都与慢性低度炎症和胰岛素抵抗有关;而普氏菌(*Prevotella*),毛螺旋菌属(*Parasutterella*),艾克曼菌(*Akkermansia muciniphila*)减少,都与抗炎有关。

### 3.2 通过肠道菌群调节免疫

肠道微生物菌群对免疫系统的发育和功能起着重要作用。徐晓飞<sup>[35]</sup>利用小鼠试验探究了香菇多糖L2的体内免疫调节活性以及对肠道菌群的作用及特点;L2的平均分子量为26 kDa,主要由L-阿拉伯糖、D-葡萄糖和D-半乳糖单糖组成,3种单糖的相对百分含量分别为2.81%,87.54%,9.66%。香菇多糖L2不具有3股螺旋结构。徐晓飞<sup>[35]</sup>的试验结果显示:与对照组相比,多糖组小鼠的脾T淋巴细胞增值能力更强,且NK细胞活性更高;在肠道菌群组成上,正常组小鼠肠道厚壁菌门与拟杆菌门比值为0.50,服用多糖后变为0.63,且变形菌门极显著

增加;产酸拟杆菌(*Bacteroides acidifaciens*)、太阳螺杆菌(*Helicobacter suncus*)、理炎菌(*Alistipes*)中未培养出的拟杆菌、A-47可能在参与香菇多糖调节小鼠免疫功能中有重要的作用。

### 3.3 通过肠道菌群抵抗疾病

有报道<sup>[8]</sup>显示无论是在肿瘤患者或是肿瘤动物模型中,其肠道中的某些细菌种群往往会发生较大变化,这种变化可能是由肿瘤引起的,也可能正是因为产生这种变化而使宿主易受致癌性病原体的影响。而某些食用菌多糖可以通过作用于肠道菌群来抵抗肿瘤。Luo等<sup>[36]</sup>利用结直肠癌小鼠模型探究灵芝多糖对结肠癌的减缓作用与小鼠肠道菌群变化之间的关系,先对正常Balb/c小鼠喂食2个月的灵芝多糖,然后再利用化学致癌剂使小鼠产生结肠癌。结果表明,灵芝多糖的摄入可以防止结直肠癌小鼠的结肠缩短,并使其死亡率降低30%;与对照组相比,在不给多糖的结直肠癌的小鼠肠道内颤螺菌属(*Oscillospira*)和未知属的脱硫弧菌科(*Desulfobacteriaceae*)的相对丰度显著增加,而多糖干预组的结直肠癌小鼠肠道内这两者相对丰度都较低。Li等<sup>[37]</sup>探究了两种灵芝多糖对4T1乳腺癌小鼠肠道菌群的影响。结果显示,与正常组相比,癌症小鼠的厚壁菌门(47.0%)和变形菌门(3.0%)显著增加,拟杆菌门(48.5%)和放线菌门(0.38%)显著减少。在属水平上,S24-7和理炎菌(*Alistipes*)减少,而在多糖组内,这些变化趋势逆转。

肠道微生物发酵抗性多糖产生的短链脂肪酸可以激活GPR43从而抑制胰岛素介导的脂肪积累,促进脂肪和糖类的代谢,从而改善糖尿病。有研究<sup>[25]</sup>表明,糖尿病患者与健康对照者之间的肠道菌群结构存在差异,特别是产丁酸菌属丰度下降。疣微菌纲(*Verrucomicrobiae*)有可能成为诊断2型糖尿病的标志菌群,因为2型糖尿病患者肠道内的疣微菌纲的相对丰度普遍有显著降低。在1型糖尿病患者体内嗜血杆菌属(*Haemophilus*)、小类杆菌属(*Dialister*)、毛螺菌属(*Lachnospira*)、氨基酸球菌属(*Acidaminococcus*)、*DeFluviitaleaceae*科下未分类属的丰度明显下降,而Blautia属的丰度明显上升<sup>[15]31-36</sup>。Chen等<sup>[38]</sup>利用2型糖尿病小鼠模型探究了灰花树多糖的降血糖功效以及对小鼠肠道菌群的影响。灰花树多糖主要由L-阿拉伯糖、D-甘露糖、D-果糖组成。它可以激活胰岛素受体底物1、磷脂酰肌醇-3-激酶、葡萄糖转运子4,并抑制C-Jun氨基端激酶从而降低小鼠血糖。与糖尿病对照组小鼠相比,多糖干预小鼠肠道拟杆菌门增加,厚壁菌门和变形菌门减少。这一变化有助于膳食能量吸收和降低炎症程度<sup>[39]</sup>。拟杆菌门与厚壁菌门的比值与血糖浓度呈正相关。在灰花树多糖干预后,牙龈卟啉单胞菌(*Porphyromonas gingivalis*)、艾克曼菌、嗜酸乳杆菌(*Lactobacillus acidophilus*)、福赛斯坦纳菌(*Tannerella forsythia*)、产酸拟杆菌(*Bacteroides acidifaciens*)、罗氏

弧菌(*Roseburia intestinalis*)的相对丰度有显著上升,这些菌群都与丁酸盐的产生有关<sup>[38]</sup>。

#### 4 讨论与展望

肠道菌群的种类和数量的繁多与庞大阻碍了人们对肠道菌群的研究与认知,而高通量测序技术的高速发展使得这一障碍正在被逐步消除。虽然在亚种和品系水平上还不断有新的菌种待被发现,但人体肠道菌群构成中的主要优势谱系已被科学家们解析出来<sup>[40]</sup>。在此基础上,肠道菌群与人体健康关系的研究蓬勃发展。许多疾病的产生不一定是由肠道菌群失衡引起,但往往这些疾病的症状都伴随着肠道菌群失衡。而肠道菌群易受人为调控。因而可以利用膳食、药物或菌群移植对患者或者亚健康人群进行干预,来达到改善甚至治愈某些疾病的目的。

食用菌多糖正是一类可以用来改善健康,预防疾病的非常具有潜力的优质益生元。首先,多糖不仅是人和动物的主要能量来源,也是肠道菌群的主要能量来源。多糖的单糖组成、链接方式等结构特征关系到不同肠道菌对多糖的利用程度,从而影响肠道菌群的数量和分布。其次,食用菌多糖具有抗肿瘤、免疫调节、降血糖血脂等重要的生理活性,且这些活性与食用菌多糖对肠道菌群的影响是息息相关的。因此,探究食用菌多糖对人体健康作用以及对肠道菌群组成的影响是具有重要研究价值的。而解析食用菌多糖的组成、结构特征与肠道微生物的作用关系也同样重要,且具有更广泛深远意义。

#### 参考文献

- [1] 黄年来. 中国最有开发前景的主要药用真菌[J]. 食用菌, 2005, 27(1): 2-4.
- [2] ROUPAS P, KEOGH J, NOAKES M, et al. The role of edible mushrooms in health: Evaluation of the evidence[J]. Journal of Functional Foods, 2012, 4(4): 687-709.
- [3] 梁雪, 倪秀珍, 汉丽萍. 食药用真菌多糖生物活性的研究进展[J]. 长春师范大学学报, 2018(10): 82-85.
- [4] WASSER S. Medicinal mushrooms as a source of antitumor and immunomodulating polysaccharides[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2002, 60(3): 258-274.
- [5] BORCHERS A T, STERN J S, HACKMAN R M, et al. Mushrooms, tumors, and immunity[J]. Proceedings of the Society for Experimental Biology & Medicine, 1999, 221(4): 281-293.
- [6] WASSER S P. Medicinal mushroom science: History, current status, future trends, and unsolved problems[J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2010, 12(1): 1-16.
- [7] 李六文, 赵刚. 药用真菌多糖抗肿瘤免疫生物活性研究进展[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2015, 22(14): 1 156-1 160.
- [8] LIU Li-qiao, LI Ming-zhu, YU Mu-lan, et al. Natural polysaccharides exhibit anti-tumor activity by targeting gut microbiota[J]. Int J Biol Macromol, 2019, 121(7): 43-51.
- [9] NOWAK R, NOWACKA-JECHALKE N, JUDA M, et al. The preliminary study of prebiotic potential of Polish wild mushroom polysaccharides: The stimulation effect on Lactobacillus strains growth[J]. European Journal of Nutrition, 2017, 57(4): 1 511-1 521.
- [10] MENDEL F. Mushroom polysaccharides: Chemistry and antiobesity, antidiabetes, anticancer, and antibiotic properties in cells, rodents, and humans[J]. Foods, 2016, 5(4): 80-120.
- [11] TRAMONTANO M, ANDREJEV S, PRUTEANU M, et al. Nutritional preferences of human gut bacteria reveal their metabolic idiosyncrasies [J]. Nature Microbiology, 2018, 3: 514-522.
- [12] JAYACHANDRAN M, CHEN Jia-li, CHUNG S S M, et al. A critical review on the impacts of  $\beta$ -glucans on gut microbiota and human health[J]. The Journal of nutritional biochemistry, 2018, 61: 101-110.
- [13] AIDA F, SHUHAIMI M, YAZID M, et al. Mushroom as a potential source of prebiotics: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2009, 20(11/12): 567-575.
- [14] 王芳. 广西巴马长寿老人肠道菌群及其与膳食纤维多糖饮食关联性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015: 20-31.
- [15] 齐翠娟. 肠道菌群在 1 型糖尿病患者中的结构特征及潜在致病机制研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2016: 6-11.
- [16] 罗月梅. 菊粉类果聚糖对肠道菌群影响的随机对照临床研究[D]. 广州: 南方医科大学, 2018.
- [17] 方正. 通过 16S rRNA 序列分析探讨抑郁症与肠道菌群之间的相互联系[D]. 重庆: 重庆医科大学, 2016: 22-30.
- [18] 王雪. 长根菇胞外多糖对肠道微生态的影响及其抗氧化作用的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
- [19] 李晶. 主食变换对蒙古国志愿者肠道菌群结构及功能影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017: 1-11.
- [20] 吴欢. 遗传性肥胖儿童营养干预后肠道内优势菌的分离鉴定及生理功能的探究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [21] XU Xiao-fei, XU Ping-ping, MA Chuang-wah, et al. Gut microbiota, host health, and polysaccharides[J]. Biotechnol Adv, 2013, 31(2): 318-337.
- [22] TURNBAUGH P J, LEY R E, MAHOWALD M A, et al. An obesity-associated gut microbiome with increased capacity for energy harvest[J]. Nature, 2006, 444(7 122): 1 027-1 031.
- [23] 赵立平, 费娜. 肠道菌群与肥胖症的关系研究进展[J]. 微生物与感染, 2013, 8(2): 67-71.
- [24] 崔燕丽, 徐晓芬, 吴正钧, 等. 乳酸菌胞外多糖对人类肠道菌群的影响 [J]. 中国微生态学杂志, 2016, 28(7): 851-856.
- [25] ZHAO Li-ping, ZHANG Feng, DING Xiao-ying, et al. Gut bacteria selectively promoted by dietary fibers alleviate type

- 2 diabetes[J]. *Science*, 2018, 359(6 380): 1 151-1 156.
- [26] BAXTER N T, SCHMIDT A W, VENKATARAMAN A, et al. Dynamics of human gut microbiota and short-chain fatty acids in response to dietary interventions with three fermentable fibers[J]. *mBio*, 2019, 10(1): 1-13.
- [27] BALLAL S A, GALLINI C A, SEGATA N, et al. Host and gut microbiota symbiotic factors: Lessons from inflammatory bowel disease and successful symbionts[J]. *Cellular microbiology*, 2011, 13(4): 508-517.
- [28] PETNICKI-OCWIEJA T, HRNCIR T, LIU Y J, et al. Nod2 is required for the regulation of commensal microbiota in the intestine[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(37): 15 813-15 818.
- [29] 张圣方. 泰山蛹虫草多糖对免疫抑制小鼠肠道菌群和免疫调节功能的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015: 35-42.
- [30] 王雪, 赵龙玉, 赵凤春. 应用 Illumina 高通量测序技术研究长根菇多糖对小鼠肠道菌群的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(19): 222-226.
- [31] KHAN I, HUANG Guo-xin, LI Xiao-ang, et al. Mushroom polysaccharides from *Ganoderma lucidum* and *Poria cocos* reveal prebiotic functions[J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 41: 191-201.
- [32] ZHAO Rui-qiu, YANG Wen-jian, PEI Fei, et al. In vitro fermentation of six kinds of edible mushrooms and its effects on fecal microbiota composition[J]. *LWT*, 2018, 96: 627-635.
- [33] XU Xiao-fei, YANG Ji-guo, NING Zheng-xiang, et al. *Lentinula edodes*-derived polysaccharide rejuvenates mice in terms of immune responses and gut microbiota [J]. *Food Funct*, 2015, 6(8): 2 653-2 663.
- [34] XU S, DOU Y, YE B, et al. *Ganoderma lucidum* polysaccharides improve insulin sensitivity by regulating inflammatory cytokines and gut microbiota composition in mice[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 38: 545-552.
- [35] 徐晓飞. 香菇多糖 L2 的免疫调节机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 42-93.
- [36] LUO Jian-ming, ZHANG Cheng, LIU Rong, et al. *Ganoderma lucidum* polysaccharide alleviating colorectal cancer by alteration of special gut bacteria and regulation of gene expression of colonic epithelial cells [J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 47: 127-135.
- [37] LI Li-feng, LIU Hong-bing, ZHANG Quan-wei, et al. Comprehensive comparison of polysaccharides from *Ganoderma lucidum* and *G. sinense*: Chemical, antitumor, immunomodulating and gut-microbiota modulatory properties[J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 1-12.
- [38] CHEN Yu-qing, LIU Dan, WANG Ding-yi, et al. Hypoglycemic activity and gut microbiota regulation of a novel polysaccharide from *Grifola frondosa* in type 2 diabetic mice[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2019, 126: 295-302.
- [39] LARSEN N, VOGENSEN F K, VAN D B F W J, et al. Gut microbiota in Human adults with type 2 diabetes differs from non-diabetic adults[J]. *PLoS ONE*, 2010, 5(2): e9085.
- [40] SCHMIDT T S B, RAES J, BORK P. The human gut microbiome: From association to modulation[J]. *Cell*, 2018, 172(6): 1 198-1 215.

(上接第 39 页)

对于不同类型的加热不燃烧卷烟,由于加热温度及烟草薄片性质的差异,烟支水分对烟气中水分、甘油、烟碱的影响方式及影响程度会有差异。下一步将结合烟支水分与烟气化学成分相关性研究结果,进一步研究烟支水分对不同类型加热不燃烧卷烟感官质量的影响。

### 参考文献

- [1] 龚淑果, 刘巍, 黄平, 等. 加热不燃烧卷烟烟气主要成分的逐口释放行为[J]. *烟草科技*, 2019, 52(2): 62-71.
- [2] 郑绪东, 李志强, 王程娅, 等. 不同加热温度下电加热不燃烧卷烟烟气释放特性研究[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(36): 168-171.
- [3] 周昆, 杨继, 杨柳, 等. 加热不燃烧卷烟气溶胶研究进展[J]. *中国烟草学报*, 2017, 23(5): 141-149.
- [4] FORSTER Mark, FIEBELKORN Stacy, YURTERI Caner, et al. Assessment of novel tobacco heating product THP1.0 Part 3: Comprehensive chemical characterisation of harmful and potentially harmful aerosol emissions[J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2018, 93: 14-33.
- [5] FORSTER Mark, MCAUGHEY John, PRASAD Krishna, et al. Assessment of tobacco heating product THP1.0 Part 4: Characterisation of indoor air quality and odour [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2018, 93: 34-51.
- [6] 张丽, 王维维, 张小涛, 等. 加热不燃烧卷烟气溶胶中主要成分的转移行为[J]. *烟草科技*, 2019, 52(3): 46-55.
- [7] 戴路, 史春云, 卢昕博, 等. 加热不燃烧制品与传统卷烟再造烟叶物理特性及化学成分差异分析[J]. *中烟烟草学报*, 2017, 23(1): 20-26.
- [8] 刘珊, 崔凯, 曾世通, 等. 加热非燃烧型烟草制品剖析[J]. *烟草科技*, 2016, 49(11): 56-65.
- [9] 刘珊, 唐培培, 曾世通, 等. 加热状态下烟叶烟气的释放特征[J]. *烟草科技*, 2015, 48(4): 27-31.
- [10] 赵光飞, 刘静, 屠彦刚, 等. 气相色谱法同时检测加热不燃烧卷烟芯材中的 1,2-丙二醇、烟碱与甘油含量[J]. *中国测试*, 2019, 45(3): 69-74.
- [11] 李巧灵, 陈昆炎, 刘泽春, 等. 基于热重的烟草热解差异度分析[J]. *烟草科技*, 2017, 50(8): 75-79, 102.
- [12] 胡永华, 宁敏, 张晓宇, 等. 不同热失重阶段烟草的裂解产物[J]. *烟草科技*, 2015, 48(3): 66-73.