

猴头菇 β -葡聚糖促进人肠道菌群产丁酸的研究进展

庄海宁¹, 向情儒², 冯涛^{*3}

(1. 上海城建职业学院 健康与社会关怀学院, 上海 201415; 2. 新疆大学 生命科学与技术学院, 新疆 乌鲁木齐 820017; 3. 上海应用技术大学 香料学院, 上海 201418)

摘要: 丁酸是结肠上皮细胞首选能量来源, 可提高肠屏障的完整性, 促进人的肠道健康。已有关于猴头菇 β -葡聚糖(HEBG)促进人肠道菌群产丁酸的作用的报道, 但有关其调控机制还不清楚。作者介绍了 HEBG 的制备方法 & 获得的具有不同结构特征的 HEBG, 并对人粪便中产丁酸特性的菌群进行了总结, 最后综述了不同来源 β -葡聚糖调控肠道菌群产丁酸的机制及研究进展。猴头菇 β -葡聚糖是一种优良的膳食纤维, 它可能通过直接或间接模式促进人肠道菌群产丁酸。本综述对猴头菇 β -葡聚糖益生功能的开发及健康食品的创制具有指导性意义。

关键词: 猴头菇; β -葡聚糖; 人; 肠道菌群; 产丁酸

中图分类号: TS 201.3 文章编号: 1673-1689(2023)02-0018-07 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.02.003

Research Progress on β -Glucan from *Hericium erinaceus* Promoting Butyric Acid Produced by Human Intestinal Flora

ZHUANG Haining¹, XIANG Qingru², FENG Tao^{*3}

(1. School of Health and Social Care, Shanghai Urban Construction Vocational College, Shanghai 201415, China; 2. School of Life Science and Technology, XinJiang University, Urumqi 830017, China; 3. School of Perfume and Aroma Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: Butyric acid is the preferred energy source for colon epithelial cells, which improves the integrity of the intestinal barrier and promotes human intestinal health. It has been reported that *Hericium erinaceus* β -glucan (HEBG) promotes the production of butyric acid by human intestinal flora, but the regulatory mechanism remains unclear. In this paper, the preparation methods of HEBG and the obtained HEBG with different structural characteristics were reviewed. Then, this paper summarized the bacteria with the characteristic of producing butyric acid in human feces, and reviewed the research progress of the mechanism of β -glucan regulating the intestinal bacteria producing butyric acid from different sources. It is concluded that *Hericium erinaceus* β -glucan is an excellent dietary fiber, which may promote the production of butyric acid by human intestinal flora through direct or indirect mode. This review has guiding significance for the development of the

收稿日期: 2021-05-23

基金项目: 上海市浦江人才计划项目(21PJJD021); 南昌大学食品科学与技术国家重点实验室开放基金项目(SKLF-KF-202223); 上海城建职业学院校级科研项目(cjky202209)。

作者简介: 庄海宁(1980—), 女, 博士, 副教授, 主要从事食药菌精深加工与高值利用方面的研究。E-mail: zhuanghaining@succ.edu.cn

* 通信作者: 冯涛(1978—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事天然产物高值利用方面的研究。E-mail: fengtao@sit.edu.cn

probiotics of β -glucan and the creation of healthy food of *Hericium erinaceus*.

Keywords: *Hericium erinaceus*, β -glucan, human, gut microbiota, butyrogenic production

肠道菌群是寄居在宿主肠道中微生物群落的总称,人类肠道微生物群由 10^{13} ~ 10^{14} 个微生物组成,占人体微生物总量的 78%,其集体基因组(“微生物组”)包含的基因数量至少是人类自身基因组的 100 倍^[1],这些微生物可以通过菌体的自身成分、代谢物和衍生物来调节肠道的局部免疫平衡,维持机体的免疫环境,并且帮助宿主完成多种生理生化功能^[2]。许多研究已证实,肠道的菌群紊乱会导致诸如抑郁症、肥胖症、肠炎等^[3]各类疾病,肠道微生物的生理活动是维护人体健康的天然屏障^[4],因此阐明肠道菌群的调节机制,有利于维持肠道菌群的平衡稳定,可以防止各种由肠道菌群引起的疾病。

近年来,越来越多的研究证明植物多糖可被肠道菌群降解,然后通过代谢产物影响宿主的健康,例如茯砖茶中的多糖能显著刺激拟杆菌属和普雷沃菌属,它们是降解膳食纤维的肠道菌群的关键成员^[5];灵芝菌丝体多糖能降低高脂饮食引起的肠道菌群失调^[6];杏鲍菇多糖可通过提高拟杆菌科和乳杆菌来促进免疫因子的分泌量,从而促进宿主的免疫反应^[7]。

猴头菇是一种真菌,猴头菇多糖是其主要的活

性成分,具有预防或缓解胃溃疡、高血脂病等功能^[8-9]。Khan 等研究指出,猴头菇中的 β -葡聚糖对人体抗癌、免疫调节、降血脂起主要作用^[10]。作者对目前猴头菇 β -葡聚糖的提取方法、产丁酸机制进行了综述总结,为猴头菇 β -葡聚糖益生功能的开发及健康食品的创制研究提供新的思路。

1 猴头菇 β -葡聚糖的制备方法对其结构的影响

猴头菇 β -葡聚糖是以 β -糖苷键连接D-葡萄糖形成的具有多支链或无支链的线性多糖。其制备方法不同,所得的葡聚糖的结构、相对分子质量及溶解性也会有很大差异。由表1可知,从溶解性上看,猴头菇 β -葡聚糖主要包括水溶性和碱溶性两类;从相对分子质量上看,其相对分子质量数量级在 10^5 ~ 10^6 ;从结构上看,主要是由 β -(1 $\rightarrow$ 3)-糖苷键和 β -(1 $\rightarrow$ 6)-糖苷键组成,其中2种糖苷键的摩尔比存在较大差异。猴头菇 β -葡聚糖显著的结构差异为研究不同制备方法及其不同结构对人粪便肠道菌群的调控提供了很好的模型。

表1 不同制备方法与猴头菇 β -葡聚糖结构之间的对应关系

Table 1 Corresponding relationship between different preparation methods and the structure of β -glucan from *Hericium erinaceus*

制备方法	溶解性	猴头菇 β -葡聚糖结构	
		相对分子质量	主要糖苷键
水提过滤,碱提滤渣,碱提液醇沉,离子交换凝胶层析,得 HEP3 ^[11]	水不溶、碱可溶	1 000 000	β -(1 $\rightarrow$ 3), (1 $\rightarrow$ 6)-糖苷键连接的 β -葡聚糖
微波处理、碱提、酶处理、再碱提,分别得到4种组分 ^[12]	水不溶、碱可溶	—	(1 $\rightarrow$ 3;1 $\rightarrow$ 6)- β -D-葡聚糖以(1 $\rightarrow$ 3)连接的 β -D-葡萄糖为骨架,每5个残基在O-6上连接一个(1 $\rightarrow$ 6) β -D-葡萄糖支链
	水不溶、碱可溶	—	(1 $\rightarrow$ 3;1 $\rightarrow$ 6)- β -D-葡聚糖富含(1 $\rightarrow$ 6)糖苷键
	水不溶、碱可溶	—	(1 $\rightarrow$ 3)- β -D-葡聚糖在O-6位上有一个侧链取代,比R2-SH线性度更强
	水不溶、碱可溶	—	(1 $\rightarrow$ 3;1 $\rightarrow$ 6)- β -D-葡聚糖以(1 $\rightarrow$ 3)连接的 β -D-葡萄糖为主链
微波加热提取 ^[13]	水可溶	—	(1 $\rightarrow$ 3;1 $\rightarrow$ 6)- β -D-葡聚糖富含(1 $\rightarrow$ 3)糖苷键
酶法结合微波提取 ^[14]	水不溶、碱可溶	180 000	(1 $\rightarrow$ 3;1 $\rightarrow$ 6)- β -D-葡聚糖富含(1 $\rightarrow$ 6)糖苷键
经沸水提取,低温静置,高速离心,低体积分数乙醇反复醇洗得 HEBG 组分 ^[15]	水溶	449 900	由1,3- β -糖苷键连接的葡萄糖组成,并带有1,6- β -糖苷键连接的葡萄糖组成的侧链,通过O-6位与主链相连, β -(1,3)/ β -(1,6)=1:1

2 肠道产丁酸菌的种类

高膳食纤维饮食特别是谷物麸皮中的半纤维能够提高拟杆菌目 (Bacteroidales) 和毛螺菌科 (Lachnospiraceae) 的细菌丰度, 淀粉类纤维能够提高瘤胃菌科 (Ruminococcaceae) 的细菌丰度, 这些细菌通过降解膳食纤维, 产生短链脂肪酸 (SCFAs), 其中丁酸产生量最多^[16]。丁酸盐产生菌可能调节肠道菌群的结构达到一种更为平衡的状态^[17]。

产丁酸菌主要分布在人和动物的结肠和盲肠中, 以厚壁菌门 (Firmicutes) 中的梭杆菌属 (*Fusobacterium*)、真杆菌属 (*Eubacterium*)、梭菌属 (*Clostridium*)、罗氏菌属 (*Roseburia*) 等为主, 见图 1。真杆菌属中的直肠真杆菌 (*Eubacterium rectale*) 和梭杆菌属中的普拉梭菌 (*Faecalibacterium prausnitzii*)

在结肠菌群中的相对丰度最高, 通过在 M2G 培养基中进行体外培养发酵分离后的 *Faecalibacterium prausnitzii* 和罗氏菌属的罗氏弧菌 (*Roseburia intestinalis*) 发现, 其产丁酸量高于 10 mmol/L, 这说明以上 3 种菌可能是人和动物肠道中的优势产丁酸菌。梭菌属的丁酸梭菌 (*Clostridium butyricum*) 具有强大的产丁酸能力, 是人和动物肠道中常见的共生菌。此外, 肠道产丁酸菌的重要组成类别还包括霍氏真杆菌 (*Eubacterium hallii*)、粪便罗斯拜瑞氏菌 (*Roseburia faecis*)、人罗斯拜瑞氏菌 (*Roseburia hominis*)、细枝真杆菌 (*Eubacterium ramulus*)。随着基因测序等生物技术及色谱、质谱等仪器分析方法的发展, 有许多新型产丁酸菌种被发现和分离, 例如地中海产丁酸菌 (*Mediterraneibacter butyricigenes*) 和堆肥梭菌 (*Clostridium composti*) 等^[18]。

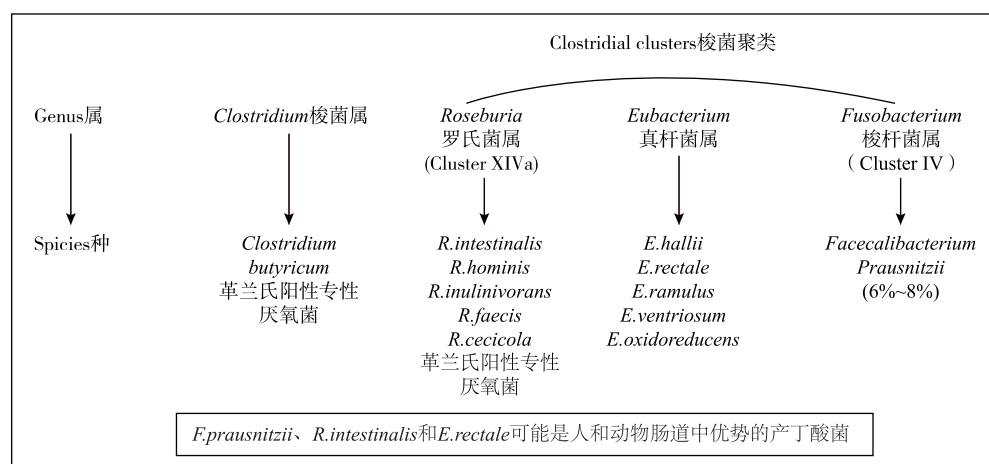


图 1 肠道产丁酸菌的种属分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of species distribution of butyric-producing gut bacteria

3 猴头菇与不同来源 β -葡聚糖调控肠道菌群产丁酸的机制

β -葡聚糖具有 β -1,2 糖苷键、 β -1,3 糖苷键、 β -1,4 糖苷键、 β -1,6 糖苷键等多种糖苷键, 其降解需要不同的酶。研究发现, 人体肠道中革兰氏阴性的拟杆菌门和革兰氏阳性的厚壁菌门是参与发酵利用 β -葡聚糖的主要细菌门类, 这两大类菌门也在维持肠道微生态平衡和保持宿主健康方面具有重要作用。其中, 谷物 β -葡聚糖主要由 β -1,3 糖苷键和 β -1,4 糖苷键构成, 它们主要被拟杆菌中的 *B. ovatus* 降解和利用^[19]。真菌 β -葡聚糖 (β -1,3 葡聚糖/

β -1,6 葡聚糖) 主要被 *B. thetaiotaomicron* 降解和利用^[20]。

梭菌属、罗氏菌属、真杆菌属和梭杆菌属的微生物可直接将 β -葡聚糖降解为葡萄糖, 葡萄糖经糖酵解途径产生丙酮酸, 丙酮酸生成乙酰 CoA 后再转化为丁酰 CoA。丁酰 CoA 可经丁酸激酶直接生成丁酸, 还可通过丁酰 CoA: 乙酰 CoA 转移酶将乙酸转化生成丁酸^[21], 见图 2。 β -葡聚糖还可由拟杆菌属的 *B. ovatus* 或 *B. thetaiotaomicron* 降解成葡寡聚糖或低聚糖, 再被肠道菌群中的双歧杆菌和乳杆菌利用可产生乳酸, 最后由乳酸利用菌产生丁酸^[21], 见图 3。

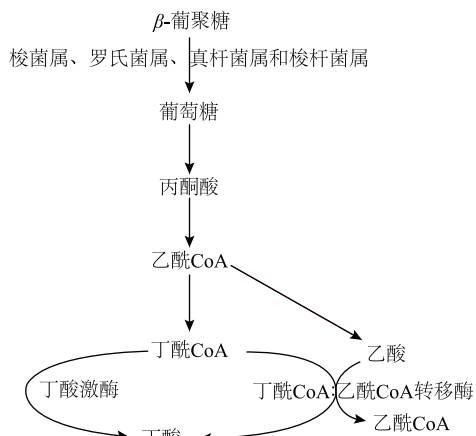


图2 丁酸的直接产生途径

Fig. 2 Direct production pathway of butyric acid

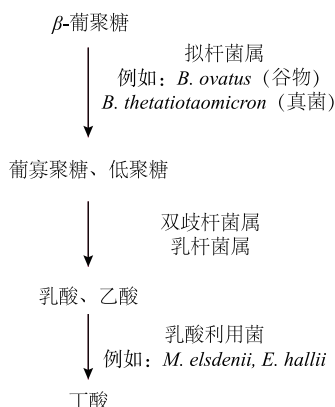


图3 丁酸的间接产生途径(交叉喂养)

Fig. 3 Indirect production pathway of butyric acid (cross feeding)

CANTU-JUNGLES 等发现梭菌属 *Clostridium* cluster XIVa 可以直接利用 *Cookeina speciosa* 葡聚糖产生丁酸^[22]。Kaur 等发现以海藻酸钠包裹的淀粉形成的淀粉微球,可以在体外增加人粪便发酵产丁酸的量,其优势利用菌由拟杆菌属(*Bacteroidetes*)转变成厚壁菌属(*Firmicutes*)^[23],显示出微生物与淀粉物理接触可导致优势产丁酸菌群种属迁移。Schwartz 等发现真杆菌属(*Eubacterium*)可以直接利用抗消化淀粉发酵产生丁酸,但这并不是人肠道菌群中的主要产丁酸方式^[24]。Pryde 等指出虽然抗消化淀粉在结肠中具有产丁酸特性,但目前还不清楚这些淀粉在多大程度上是通过直接被产丁酸菌利用而提高丁酸的产量^[25],也就是说,通过产丁酸菌直接

降解淀粉或通过发酵产物交叉喂养的方式产丁酸都有可能,且两者之间没有一个准确的比例。进一步通过体外培养和分子生物学研究表明人的粪便中发现最多的产丁酸菌都是高度厌氧菌,并属于梭杆菌簇 IV 和 XIVa。

以上研究表明,产丁酸菌直接利用葡聚糖产丁酸需要具备 2 个条件:1) 该菌可直接降解该葡聚糖;2) 该菌可利用葡聚糖的降解产物产丁酸。这一机制通常比较明显,可根据 0~24 h 的肠道菌群的生长变化较容易地分辨出目标菌作用于底物是否具有直接产丁酸的能力。

4 猴头菇 β -葡聚糖与其他来源的 β -葡聚糖调控肠道菌群产丁酸的研究进展

Jayachandran 等介绍了 β -葡聚糖对人体肠道菌群和人体健康的影响,比较全面地分析和比较了不同 β -葡聚糖的类型、相关功能性质以及调控肠道菌群的机理和人体健康之间的关系^[26]。大量的研究表明, β -葡聚糖对肠道菌群具有积极影响,但有关 β -葡聚糖对肠道菌群产丁酸机制仍有待进一步研究。表 2 列出了几种不同来源 β -葡聚糖的结构、肠道菌群菌谱变化、短链脂肪酸(SCFAs)比例及可能的产丁酸机制。

可以看出,不同的 β -葡聚糖对肠道菌群发酵后菌谱迁移的变化影响差异显著,其中索拉胶、橘黄刺杯菌、大麦、燕麦、青稞和酵母 β -葡聚糖对产丁酸菌的增殖作用明显,且丁酸占总 SCFAs 浓度的比例达 15.8%~26.3%。而猴头菇的 β -葡聚糖产丁酸的能力与其他来源的 β -葡聚糖相比,其丁酸占总 SCFAs 浓度的比例达 22%~61.6%,可见猴头菇 β -葡聚糖卓越的产丁酸性能,这可能与猴头菇 β -葡聚糖含有 β -1,3 β -1,6 β -1,4 等多种糖苷键构型有关,且其微观结构呈三股螺旋,较易被肠道产丁酸微生物利用^[27]。

Yang 等人通过模拟胃肠道消化过程发现,添加猴头菇多糖组在消化过程中释放了大量的甘露糖和半乳糖,且消化后乳酸、乙酸、丁酸等短链脂肪酸质量分数增加,推测猴头菇 β -葡聚糖有利于肠道的消化活性^[28]。

表 2 β -葡聚糖的结构与肠道菌群变化及 SCFAs 之间的关系

Table 2 Relationship among the structure of β -glucan, gut flora changes and SCFAs

原料	β -葡聚糖的结构	肠道菌群谱变化	短链脂肪酸(SCFAs)变化	可能的产丁酸机制
索拉胶 (Salecan) ^[29]	一种线性的水溶性 β -(1,3)-D-葡聚糖,平均相对分子质量 2 000	饲喂 Salecan 组的乳杆菌和双歧杆菌的 16S rRNA 基因分别为对照组的 3 倍和 6 倍,而梭菌聚类 XIVa 的 16S rRNA 基因在两组间无显著差异。	添加 Salecan 可显著提高乙酸和丁酸的质量分数,而对乳酸和丙酸的质量分数无显著影响。	通过双歧杆菌或乳杆菌与乳酸利用菌交叉喂养,将乳酸转化生成丁酸
橘黄刺杯菌 (<i>Cookeina speciosa</i>) ^[30]	葡聚糖 A: β -(1 $\rightarrow$ 3)、 β -(1 $\rightarrow$ 6)-糖苷键连接,不溶于水,平均相对分子质量 2 000	罗氏菌属 (梭菌聚类)XIVa (<i>Roseburia inulinivorans</i> , <i>Roseburia intestinalis</i>) 和真杆菌属 (<i>Eubacterium rectale</i>) 增长显著	葡聚糖 A 产丁酸较少	通过罗氏菌属或真杆菌属等产丁酸菌直接利用 β -葡聚糖生成丁酸
	葡聚糖 B:线性 β -(1 $\rightarrow$ 3) 糖苷键连接,不溶于水,相对分子质量不详		葡聚糖 B 产丁酸较高	
大麦、燕麦 ^[31]	β -(1 $\rightarrow$ 3)、 β -(1 $\rightarrow$ 4)-糖苷键连接,且 β -(1 $\rightarrow$ 4)/ β -(1 $\rightarrow$ 3) 为 1.5~2.5,相对分子质量 137 000~243 000	产丁酸菌 <i>C.histolyticum</i> 在所有 β -葡聚糖上增长显著;产丁酸菌 <i>Clostridia cluster IX</i> 在除相对分子质量 137 000 大麦的所有 β -葡聚糖上增加显著;双歧杆菌 <i>Bifidobacterium genus</i> 在所有 β -葡聚糖上无变化	所有 β -葡聚糖处理组在 24 h 后醋酸:丙酸:丁酸盐的平均摩尔比为 51:32:17。与菊粉相比, β -葡聚糖发酵生产丁酸的总量和在 SCFAs 总量中的比例都更高。	通过梭菌属或梭杆菌属等产丁酸菌直接利用 β -葡聚糖生成丁酸
青稞 ^[32]	β -(1 $\rightarrow$ 3)、 β -(1 $\rightarrow$ 4)-糖苷键连接,相对分子质量为 34 456,溶解度为 41.26%,黏度为 1.01 Pa·s	在属水平普氏菌属_9、拟杆菌属、巨球型菌属、巨单胞菌属、双歧杆菌属占比上升,大肠杆菌-志贺氏菌、粪杆菌属、肠杆菌属和毛螺菌属占比下降	与空白组相比,青稞 β -葡聚糖组 SCFAs 由高到低依次为:丁酸、丙酸、乙酸,分别是空白组的 2.53 倍、1.53 倍、1.21 倍	通过双歧杆菌与乳酸利用菌交叉喂养将乳酸生成丁酸
酵母 ^[33]	β -(1 $\rightarrow$ 3)、 β -(1 $\rightarrow$ 6)-糖苷键连接,相对分子质量不详	与对照组相比,添加酵母壁多糖在一定程度上可以提高盲肠内双歧杆菌和乳酸杆菌的丰度,但差异不显著	显著提高乙酸、丙酸和丁酸的质量分数	通过促进乳酸利用菌的增殖来达到乳酸向丁酸转化的效果
猴头菇 ^[27]	在 100%山毛榉木屑中培养的猴头菌 LGAM 4514 (β -葡聚糖质量分数 15.4%,简称 HEBS)	与空白相比,产丁酸菌 <i>Clostridium perfringens</i> , <i>Roseburia spp.</i> , <i>Eubacterium rectale</i> , <i>Faecalibacterium prausnitzii</i> 显著增加	在发酵 24 h 后,HEBS (25 μ mol/mL) 的丁酸质量分数明显高于对照组基线水平。	通过 3 种产丁酸菌直接产丁酸
	橄榄剪枝残基中培养的猴头菌 LGAM 4514 (β -葡聚糖质量分数 20.7%,简称 HEOLRP)	与空白相比,产丁酸菌 <i>Clostridium perfringens</i> , <i>Roseburia spp.</i> , <i>Eubacterium rectale</i> , <i>Faecalibacterium prausnitzii</i> 显著增加	在发酵 24 h 后,HEOLRP (70 μ mol/mL) 的丁酸质量分数明显高于对照组基线水平	通过 3 种产丁酸菌直接产丁酸

5 展望

猴头菇 β -葡聚糖含有 β -1,3、 β -1,6、 β -1,4 等多种糖苷键构型。研究发现, β -1,3 和 β -1,6 是具有强抗氧化性的糖苷键构型,且已有相关的结构表征数据。另有研究表明,猴头菇 β -葡聚糖的结构会随加工方法、栽培条件及品种差异而不同,因此猴头菇 β -葡聚糖显著的结构差异使其作为理想的食用

菌 β -葡聚糖的代表。

目前,水溶性猴头菇 β -葡聚糖的肠道菌群和碱性猴头菇 β -葡聚糖的相应研究尚待开发,水不溶性猴头菇 β -葡聚糖的碱溶液提取和纯化方法虽然进行了部分结构鉴定,但其结构信息还不全面。有关不同溶解性、相对分子质量及化学结构的猴头菇 β -葡聚糖调节肠道菌群产丁酸的分子机制研究将给肠道菌群目标调控领域提供新思路。

参考文献:

- [1] GILL S R, POP M, DEBOY R T, et al. Metagenomic analysis of the human distal gut microbiome [J]. **Science**, 2006, 312(5778): 1355-1359.
- [2] LI M, WANG B H, ZHANG M H, et al. Symbiotic gut microbes modulate human metabolic phenotypes[J]. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 2008, 105(6): 2117-2122.
- [3] 程孟雅, 杨亚兰, 杨桥, 等. 食用菌多糖调控肠道菌群研究进展[J]. **食品与机械**, 2019, 35(10): 145-149.
- [4] SHANG Q S, JIANG H, CAI C, et al. Gut microbiota fermentation of marine polysaccharides and its effects on intestinal ecology: An overview[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2018, 179: 173-185.
- [5] CHEN G J, XIE M H, WAN P, et al. Digestion under saliva, simulated gastric and small intestinal conditions and fermentation *in vitro* by human intestinal microbiota of polysaccharides from Fuzhuan brick tea[J]. **Food Chemistry**, 2018, 244: 331-339.
- [6] JIN M L, ZHU Y M, SHAO D Y, et al. Effects of polysaccharide from mycelia of *Ganoderma lucidum* on intestinal barrier functions of rats[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2017, 94(Part A): 1-9.
- [7] MA G X, KIMATU B M, ZHAO L Y, et al. *In vivo* fermentation of a *Pleurotus eryngii* polysaccharide and its effects on fecal microbiota composition and immune response[J]. **Food & Function**, 2017, 8(5): 1810-1821.
- [8] ZHANG Z F, LV G Y, PAN H J, et al. Antioxidant and hepatoprotective potential of endo-polysaccharides from *Hericium erinaceus* grown on tofu whey[J]. **International Journal of Biological Macromolecules: Structure, Function and Interactions**, 2012, 51(5): 1140-1146.
- [9] SHANG H M, SONG H, XING Y L, et al. Effects of dietary fermentation concentrate of *Hericium caput-medusae* (Bull.:Fr.) Pers. on growth performance, digestibility, and intestinal microbiology and morphology in broiler chickens[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2016, 96(1): 215-222.
- [10] KHAN M A, TANIA M, LIU R, et al. *Hericium erinaceus*: An edible mushroom with medicinal values[J]. **Journal of Complementary & Integrative Medicine**, 2013, 10(1): 253-258.
- [11] DONG Q, JIA L M, FANG J N. A β -D-glucan isolated from the fruiting bodies of *Hericium erinaceus* and its aqueous conformation[J]. **Carbohydrate Research**, 2006, 341(6): 791-795.
- [12] OOKUSHI Y, SAKAMOTO M, AZUMA J I. β -glucans in the water-insoluble Residue of *Hericium erinaceum*[J]. **Journal of Applied Glycoscience**, 2008, 55(4): 231-234.
- [13] OOKUSHI Y, SAKAMOTO M, AZUMA J I. Effects of microwave irradiation on water-soluble polysaccharides of the fruiting body of *Hericium erinaceum*[J]. **Journal of Applied Glycoscience**, 2009, 56(3): 153-157.
- [14] OOKUSHI Y, SAKAMOTO M, AZUMA J I. Extraction of β -glucan from the water-insoluble residue of *Hericium erinaceum* with combined treatments of enzyme and microwave irradiation[J]. **Journal of Applied Glycoscience**, 2008, 55(4): 225-229.
- [15] 张三丰, 王一非, 冯涛, 等. 猴头菇 β -葡聚糖的结构表征及其稀溶液性质[J]. **食品科学**, 2019, 40(12): 85-91.
- [16] 张烽, 张晨虹. 膳食营养与肠道微生物组[J]. **生命科学**, 2017, 29(7): 695-706.
- [17] WANG F, YU T, HUANG G H, et al. Gut microbiota community and its assembly associated with age and diet in Chinese centenarians[J]. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, 2015, 25(8): 1195-1204.
- [18] 陈映宇, 毛联智, 刘华缓, 等. 肠道产丁酸菌防治炎症性肠病的机制研究进展[J]. **世界华人消化杂志**, 2019, 27(14): 907-912.
- [19] 谢勇, 覃小丽, 金剑波, 等. 来源与加工方式对 β -葡聚糖理化特性的影响及其在肠道的降解机理[J]. **食品与发酵工业**, 2019, 45(23): 282-294.
- [20] TEMPLE M J, CUSKIN F, BASLE A, et al. A Bacteroidetes locus dedicated to fungal 1,6- β -glucan degradation: Unique substrate conformation drives specificity of the key endo-1,6- β -glucanase[J]. **Journal of Biological Chemistry**, 2017, 292(25): 10639-10650.
- [21] 于卓腾, 杭苏秦, 姚文, 等. 肠道产丁酸细菌及其丁酸产生机制的研究进展[J]. **世界华人消化杂志**, 2006, 14(25): 2531-2534.
- [22] CANTU-JUNGLES T M, DO NASCIMENTO G E, ZHANG X W, et al. Soluble xyloglucan generates bigger bacterial community shifts than pectic polymers during *in vitro* fecal fermentation[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2019, 206: 389-395.
- [23] KAUR A, CHEN T T, GREEN S J, et al. Physical inaccessibility of a resistant starch shifts mouse gut microbiota to butyrogenic Firmicutes[J]. **Molecular Nutrition & Food Research**, 2019, 63(7): 1801012.
- [24] SCHWIERTZ A, LEHMANN U, JACOBASCH G, et al. Influence of resistant starch on the SCFA production and cell counts of

- butyrate-producing Eubacterium spp. in the human intestine[J]. **Journal of Applied Microbiology**, 2002, 93(1): 157-162.
- [25] PRYDE S E, DUNCAN S H, HOLD G L, et al. The microbiology of butyrate formation in the human colon[J]. **FEMS Microbiology Letters**, 2002, 217(2):133-139.
- [26] JAYACHANDRAN M, CHEN J L, CHUNG S S M, et al. A critical review on the impacts of β -glucans on gut microbiota and human health[J]. **Journal of Nutritional Biochemistry**, 2018, 61: 101-110.
- [27] MITSOU EK, SAXAMI G, STAMOULO E, et al. Effects of rich in β -glucans edible mushrooms on aging gut microbiota characteristics: an *in vitro* study[J]. **Molecules**, 2020, 25(12):2806.
- [28] YANG Y, ZHAO C H, DIAO M X, et al. The prebiotic activity of simulated gastric and intestinal digesta of polysaccharides from the *Hericium erinaceus*[J]. **Molecules**, 2018, 23(12):3158.
- [29] ZHOU M Y, PU C L, XIA L, et al. Salecan diet increases short chain fatty acids and enriches beneficial microbiota in the mouse cecum[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2014, 102:772-779.
- [30] CANTU-JUNGLES T M, RUTHES A C, EI-HINDAWY M, et al. *In vitro* fermentation of *Cookeina speciosa* glucans stimulates the growth of the butyrogenic *Clostridium* cluster XIVa in a targeted way[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2018, 183:219-229.
- [31] HUGHES S A, SHEWRY P R, GIBSON G R, et al. *In vitro* fermentation of oat and barley derived β -glucans by human faecal microbiota[J]. **FEMS Microbiology Ecology**, 2008, 64(3):482-493.
- [32] 聂晨曦. 青稞 β -葡聚糖理化性质及其对肠道菌群的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- [33] 贺琴, 王自蕊, 游金明, 等. 酵母壁多糖对断奶仔猪肠道挥发性脂肪酸和微生物菌群的影响[J]. **动物营养学报**, 2017, 29(1): 177-183.

科 技 信 息

欧盟授权将乳糖-N-四糖作为新型食品投放市场

据欧盟官方公报消息, 2023年1月4日, 欧盟委员会发布法规(EU)2023/7号条例, 根据欧洲议会和理事会法规(EC) No 2015/2283, 批准乳糖-N-四糖(Lacto-N-tetraose)作为新型食品投放市场, 并修订欧盟委员会实施条例(EU)2017/2470的附件。

据了解, 乳糖-N-四糖是由大肠杆菌 BL21 (DE3) 的衍生菌株生产的。在其科学意见中, 欧盟委员会指出其关于新型食品安全性的结论是基于 MS、NMR 和 HPAEC-PAD 方法验证的科学研究和数据, 以及对新型食品中存在的 LNT 和碳水化合物副产品 LNT2、pLNH、乳糖和葡萄糖/半乳糖的鉴定结果。

本条例自发布之日起第二十天生效。

[信息来源] EUR-Lex home. Commission Implementing Regulation (EU) 2023/7 of 3 January 2023 authorising the placing on the market of Lacto-N-tetraose produced by derivative strains of *Escherichia coli* BL21 (DE3) as a novel food and amending Implementing Regulation (EU) 2017/2470[EB/OL]. (2023-1-4). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=uriserv:OJ.L_.2023.002.01.0021.01.ENG