乳酸菌发酵香菇对肠道菌群的调节作用及其产品研制

聂远洋，贾亚娟，卢 森，乔雪峰，李 波*
（河南科技学院 食品学院，河南 新乡 453003）

摘要：将香菇经乳酸菌发酵后，通过小鼠灌胃实验和16S rRNA高通量测序，研究其对肠道菌群结构和多样性的影响，并研制调味即食产品。结果表明，中等剂量（10 g/kg，以小鼠质量计）的发酵香菇改变了小鼠肠道菌群的物种多样性，其特有物种和稀有物种数量增加，且个体差异减小，物种分布更均匀。发酵香菇可不同程度地增加小鼠肠道内有益菌群，如*Muribaculaceae*、乳杆菌属（*Lactobacillus*）、*Dubosiella*、*Lachnospiraceae*等的定殖，降低螺杆菌属（*Helicobacter*）、支原体（*Mycoplasma*）等致病菌的相对丰度，从而改善肠道健康。通过单因素和响应面优化实验，获得乳酸菌发酵香菇调味即食产品的最佳配方为：发酵香菇块81.5%、甜面酱1.0%、豆瓣酱1.5%、白砂糖6.0%、藤椒油3.0%、芝麻2.0%、辣椒油4.0%、姜汁1.0%（均为质量分数）。为乳酸菌发酵技术在香菇深加工中的应用提供了有益参考。

关键词：乳酸菌；香菇；肠道菌群；16S rRNA高通量测序；调味；即食产品
中图分类号：TS 205.5　**文章编号：**1673-1689(2022)12-0075-10　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2022.12.009

Regulation of *Lentinus edodes* Fermented by Lactic Acid Bacteria on Gut Microbiota and Product Development

NIE Yuanyang, *JIA Yajuan*, *LU Sen*, *QIAO Xuefeng*, *LI Bo**
(School of Food Science, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The effects of *Lentinus edodes* after fermentation by lactic acid bacteria on the structure and diversity of gut microbiota were studied by gavage test and 16S rRNA high-throughput sequencing in mice, and the flavored ready-to-eat products were studied and developed. The results showed that medium dose (10 g/kg, calculated by the mouse body weight) of fermented *L. edodes* changed the species diversity of gut microbiota in mice. The number of endemic and rare species increased, the individual differences decreased, and the species distribution was more uniform. Fermented *L. edodes* could increase the relative abundance of beneficial bacteria in varied degrees, including *Muribaculaceae*, *Lactobacillus*, *Dubosiella*, *Lachnospiraceae*, and reduce the relative abundance of *Helicobacter*, *Mycoplasma* and other pathogenic bacteria in the intestinal tract of mice, and thus the intestinal health could be improved. Through single factor and response surface optimization tests, the best formula of flavored ready-to-eat product prepared through lactic acid bacteria fermented *L. edodes* was set with fermented *L. edodes* block of 81.5%, sweet bean paste of

收稿日期：2022-07-29
基金项目：中原科技创新领军人才项目（224200510019）；河南省科技攻关项目（222102110320）；漯河市重大科技创新专项（20210109）。
* **通信作者：**李波（1973—），男，博士，教授，硕士研究生导师，主要从事食用菌精深加工方面的研究。E-mail：libohnxx@163.com

1.0%, broad bean paste of 1.5%, white granulated sugar of 6.0%, rattan pepper oil of 3.0%, sesame of 2.0%, chili oil of 4.0%, and ginger juice of 1.0% (mass ratio). This study could provide a useful reference for the application of lactic acid bacteria fermentation technology in the value-added processing of *L. edodes*.

Keywords: lactic acid bacteria, *Lentinus edodes*, gut microbiota, 16S rRNA high-throughput sequencing, flavor, ready-to-eat products

香菇是我国的特色食用菌,含有多种营养及活性成分,如多糖、蛋白质、酚类物质、麦角甾醇、膳食纤维等[1-3],具有抗肿瘤、抗衰老、抗氧化、增强机体免疫力、护肝等多种生理功能[4-6]。近年来,我国香菇种植业发展迅速,产量持续增长,2020 年产量为 1 188 万吨[7],成为世界第一大食用菌品种,在脱贫攻坚和乡村振兴中发挥了重要作用。目前香菇以鲜品和干品为主,加工程度低、产品品种少、附加值不高,导致产销矛盾日益突出。因此,大力发展香菇精深加工技术,延长产业链,是保障香菇产业健康可持续发展的必要途径。

乳酸菌除用于乳制品发酵外,还常用于果蔬发酵。研究表明,利用乳酸菌发酵可明显改善发酵果蔬的风味、营养和安全性等[8-10]。香菇中丰富的营养成分能够为乳酸菌生长提供营养物质基础,因此可作为乳酸菌发酵的底物。乳酸菌可将香菇中的蛋白质分解为氨基酸,使其更易消化吸收。通过发酵,乳酸菌大量增殖,产生大量的有机酸,人体摄入这些乳酸菌和有机酸,可以通过降低肠道 pH 和抑制腐败菌、病原菌的生长来调节肠道微生态平衡[11]。乳酸菌将碳水化合物和蛋白质分解成乳酸、乙醇、醋酸、氨基酸等物质,并进一步生成酮类、醛类、醇类、酯类等多种风味物质[12-13],对发酵香菇独特风味的形成起着关键作用。另外,很多乳酸菌都是益生菌,其代谢产物也含有多种对人体有益的功能性成分[14]。

在前期研究中,作者筛选出了适合香菇发酵的乳酸菌复合发酵剂,对其发酵工艺进行了优化,分析测定了发酵前后其挥发性风味物质的变化情况,为香菇的乳酸菌发酵类食品开发提供了应用基础[8]。因此,在前期基础之上,通过动物实验,研究乳酸菌发酵香菇在小鼠体内调节肠道菌群的活性,并将其开发成调味即食食品,优化制作工艺,以期为香菇功能性食品开发提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜香菇、白砂糖、生姜、辣椒粉、熟白芝麻:购自本地超市;甜面酱、豆瓣酱:烟台欣和企业食品有限公司产品;菜籽油:山东鲁花集团有限公司产品;藤椒油:嘉里粮油(四川)有限公司产品;无水葡萄糖(食品级):江西省每伴食品有限公司产品;食用盐:河南省盐业集团有限公司产品;无菌纱布:南昌市奥康医疗器械有限公司产品;德氏乳杆菌保加利亚亚种、植物乳杆菌冻干菌种:郑州和合生物工程技术有限公司产品;鼠李糖乳杆菌冻干菌种:广东省微生物菌种保藏中心提供;SPF 级雄性昆明小鼠:斯贝福(北京)生物技术有限公司提供;清洁级动物饲料、垫料、鼠笼、饮水瓶:江苏省协同医药生物工程有限责任公司产品;无菌冻存管:美国 Corning 公司产品。

1.2 仪器与设备

XFH-50CA 电热式压力蒸汽灭菌器:浙江新丰医疗器械有限公司产品;SW-CJ-IBU 超净工作台:苏州苏净集团产品;GSP-9080MBE 隔水式恒温培养箱:上海博迅实业有限公司医疗设备厂产品;JYL-C16D 厨房机械(料理机):九阳股份有限公司产品;YDS-50B-125 液氮罐:乐山市东亚机电工贸有限公司产品;NovaSeq6000 PE250 测序平台:美国 Illumina 公司产品。

1.3 方法

1.3.1 香菇的乳酸菌发酵 新鲜香菇经去除杂质后清洗晾干,切成 0.5 cm×0.5 cm×0.5 cm 的香菇块。取适量香菇块按料液质量比 1:1 加入蒸馏水,再添加质量分数 1.0%食盐和 2.0%葡萄糖(以香菇和蒸馏水总质量为基准),115 ℃高压灭菌 10 min,冷却后接种质量分数 2.7%的复合乳酸菌发酵剂(德氏乳杆菌保加利亚亚种、植物乳杆菌、鼠李糖乳杆菌质量比为 3:1:2),37 ℃恒温发酵 48 h 后备用[8]。

1.3.2 动物实验 SPF 级雄性昆明小鼠 50 只,5 周龄,24~26 g。将小鼠随机分成 5 组,每组 10 只,在室内温度为(24±1) ℃,相对湿度为 60%±5%,每天明暗时间各 12 h 的条件下,用基础维持型鼠粮饲养各组小鼠,自由摄食饮水,自由活动。各组小鼠先适应性饲养 1 周,然后开始灌胃,其中空白对照组灌胃等剂量的蒸馏水。小鼠分组及灌胃剂量见表 1。

表 1 动物实验设计

Table 1 Animal experimental design

小鼠分组	数量/只	干预材料	灌胃剂量/(g/kg)	干预时间/周	样本收集
空白对照组(C)	10	蒸馏水	15	4	结肠及内容物
阴性对照组(FC)	10	未发酵香菇	15	4	结肠及内容物
处理组 1(FL)	10	发酵香菇	5	4	结肠及内容物
处理组 2(FM)	10		10	4	结肠及内容物
处理组 3(FH)	10		15	4	结肠及内容物

1.3.3 肠道菌群 16S rRNA 高通量测序 取适量小鼠结肠内容物至无菌冻存管,立即放入液氮中保存备用。采用 CTAB/SDS 法提取小鼠肠道内容物总基因组 DNA,用引物 341F 5′-CCTAYGGGRBG CASCAG-3′和引物 806R 5′-GGACTACNNGGGT ATCTAAT-3′扩增 16S rRNA V3-V4 区。随后构建文库,将构建好的文库进行 Qubit 和 Q-PCR 定量;待文库合格后,使用 NovaSeq6000 PE250 测序平台进行高通量测序。样本检测、DNA 提取、PCR、纯化、建库、测序均由北京诺禾致源生物科技有限公司完成。

1.3.4 生物信息学分析 采用 QIIME2 软件(版本号 QIIME2-202006)中的 DADA2 模块对全部有效数据进行降噪,并过滤掉丰度小于 5 的序列,从而获得最终的扩增子序列变异(amplicon sequence variants,ASVs)以及特征表。随后使用 QIIME2 软件中的 classify-sklearn 模块将得到的 ASVs 与数据库比对,从而得到每个 ASV 的物种信息。采用 QIIME2 软件计算物种的相对丰度,并进行样本 Alpha 多样性和 Beta 多样性分析。

1.3.5 乳酸菌发酵香菇调味产品的制作工艺

调味:取发酵好的香菇块控干(不滴发酵液为止),然后加入甜面酱、豆瓣酱、白砂糖、藤椒油、辣椒、姜汁、熟白芝麻等调味料拌制均匀。

包装:准确称取调味发酵香菇块 15 g,装入耐高温蒸煮袋,真空密封。

杀菌:将包装好的调味香菇在 121 ℃杀菌 15 min,取出冷却,即得成品。

1.3.6 单因素实验 乳酸菌发酵香菇调味产品的基础配方:发酵香菇块 84.0%、白砂糖 4.0%、辣椒 4.0%、姜汁 1.0%、熟白芝麻 2.0%、藤椒油 2.5%、甜面酱和豆瓣酱共 2.5%(均为质量分数)。

分别选取甜面酱和豆瓣酱质量比(0.50:2.00、1.00:1.50、1.25:1.25、1.50:1.00、2.00:0.50)、白砂糖添加量(质量分数 3.0%、4.0%、5.0%、6.0%、7.0%)、藤椒油添加量(质量分数 2.0%、2.5%、3.0%、3.5%、4.0%)为 3 个因素,以感官评分为指标,研究调味发酵香菇产品中甜面酱和豆瓣酱最适质量比、白砂糖、藤椒油的最适添加量。

1.3.7 响应面实验 在单因素实验基础上,采用三因素三水平的 Box-Behnken 实验设计。以甜面酱和豆瓣酱质量比(A)、白砂糖添加质量分数(B)和藤椒油添加质量分数(C)为因素,感官评分为响应值,对调味发酵香菇制作工艺进行优化,因素与水平设计见表 2。

表 2 响应面实验因素与水平表

Table 2 Factors and levels of response surface test

水平	因素		
	甜面酱和豆瓣酱质量比	白砂糖添加质量分数/%	藤椒油添加质量分数/%
-1	0.50:2.00	5.0	2.5
0	1.00:1.50	6.0	3.0
1	1.25:1.25	7.0	3.5

1.3.8 感官评定 由 10 名经过培训的人员组成感官评定小组,对乳酸菌发酵香菇调味产品的色泽、口感、气味、组织状态进行感官评分。评分标准见表3[15]。

1.4 数据处理

所有实验均重复 3 次,结果用平均值±标准差表示,实验数据采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析。

多重比较采用 LSD 法和 Dunnett's T3 法，$P<0.05$ 具有显著性差异。采用 Origin 9.0 软件绘图。采用 Design-expert 8.0.6 软件进行 Box-Behnken 响应面优化实验设计和统计分析。

表 3　乳酸菌发酵香菇调味产品的感官评分标准

Table 3　Sensory evaluation criteria of flavored *Lentinus edodes* fermented by lactic acid bacteria

项目	评分标准	得分
色泽(25 分)	褐色，透亮有光泽	18~25
	颜色发暗无光泽	9~17
	颜色发暗无光泽	≤8
口感(25 分)	滑嫩爽口，酸辣适中	18~25
	滑嫩，微酸，可接受	9~17
	偏酸，辣度较高	≤8
气味(25 分)	具有发酵香菇应有的发酵气味	18~25
	发酵香味不足，风味较差	9~17
	无发酵风味，无香味	≤8
组织状态(25 分)	黏度适中，菇粒饱满	18~25
	较黏稠，菇粒较饱满	9~17
	过于黏稠，菇粒不饱满	≤8

2 结果与分析

2.1 乳酸菌发酵香菇对小鼠肠道菌群的调节作用

2.1.1　肠道菌群 Alpha 多样性指数差异　对各组样本在 97%一致性阈值下的 Alpha 多样性指数(chao1、observed species、shannon、simpson)进行统计，结果见图 1。chao1 和 observed species 指数主要用于统计群落中的物种总数，且当群落中低丰度物种越多时，chao1 指数越大[16]；shannon 和 simpson 指数用于表征群落中物种的多样性及均匀性，指数越大，多样性越高，物种分布越均匀[17]。与空白对照组相比，各处理组的 chao1 和 observed species 指数均在一定程度上增加但不显著($P>0.05$)，其中 FM 组增加幅度最大，表明灌胃中剂量的乳酸菌发酵香菇丰富了小鼠肠道中低丰度的物种，即稀有物种或特有物种。FC、FL 和 FH 组的 shannon 和 simpson 指数与对照组均无显著差异，而 FM 组有所增加但不显著($P>0.05$)，表明灌胃中剂量的乳酸菌发酵香菇在一定程度上丰富了小鼠肠道中的菌群多样性，且分布更均匀。另外，乳酸菌发酵香菇对小鼠肠道菌群 Alpha 多样性的影响与灌胃剂量有一定相关性，但过高的剂量带来相反的效果，可能与小鼠对剂量的适应性和应激反应有关。

2.1.2　肠道菌群 Beta 多样性指数差异　Beta 多样性主要用于评估不同样本组间的微生物群落构成差异。基于 unweighted unifrac 距离进行的 PCoA 和

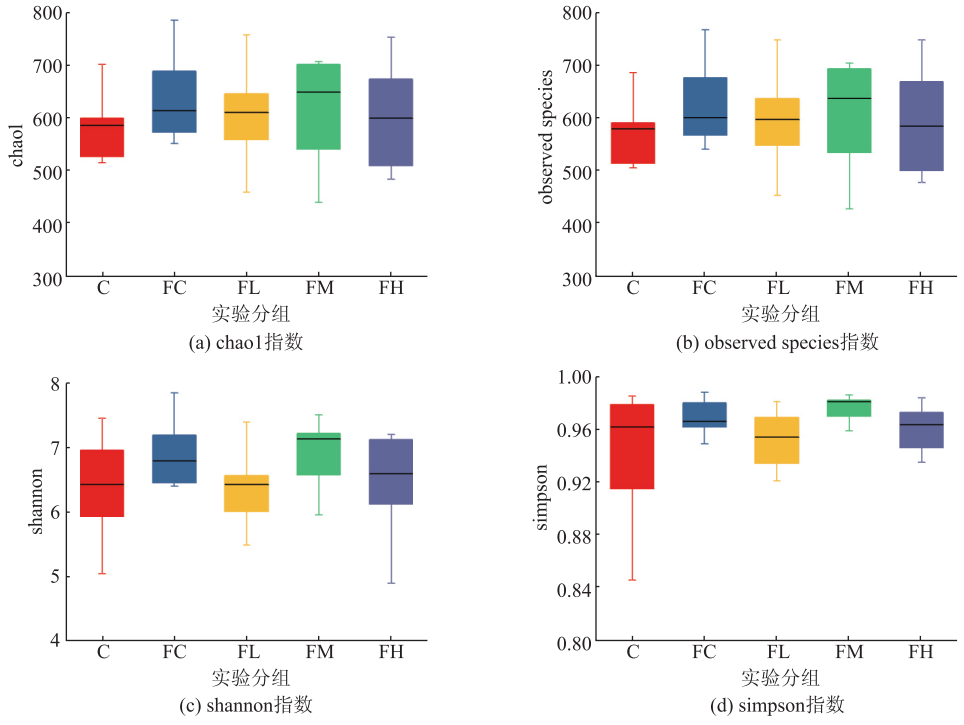
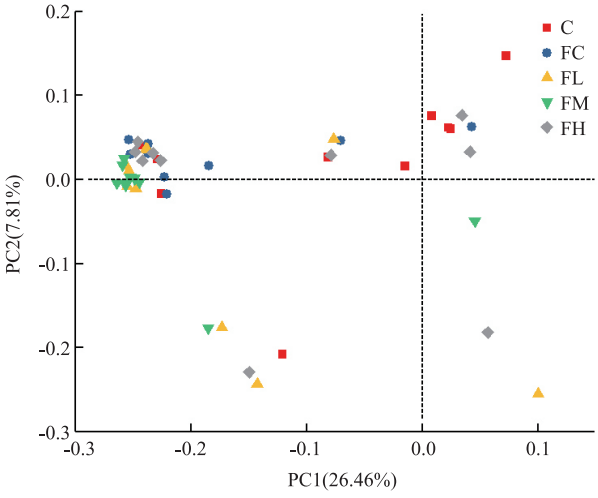


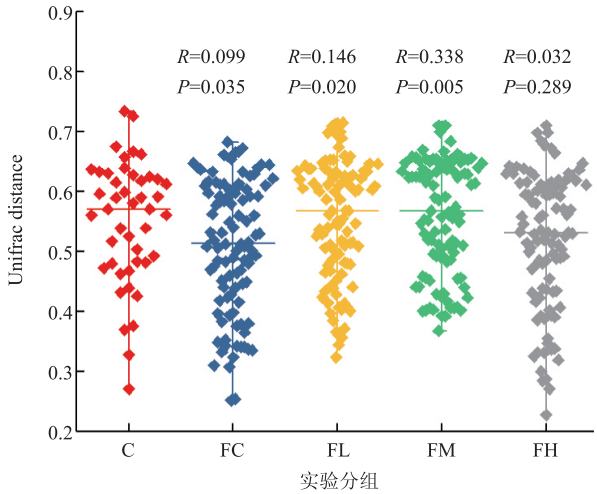
图 1　乳酸菌发酵香菇对小鼠肠道菌群 Alpha 多样性的影响

Fig. 1　Effects of *Lentinus edodes* fermented by lactic acid bacteria on the Alpha-diversity of gut microbiota in mice

Anosim 分析结果见图 2。第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)贡献值分别为 26.46%和 7.81%,从各样本间距离来看,各组内大多数样本间距较小,表明个体差异较小,FM 组的个体样本离散程度最低。与对照组相比,各处理组的 R 均大于 0,说明组间差异大于组内差异[18],除 FH 组与对照组无显著性差异(P=0.289)外,其余各组与对照组均有显著性差异(P<0.05),表明组间差异明显。因此,乳酸菌发酵香菇改变了小鼠肠道菌群的 Beta 多样性,对个体差异影响较小,物种分布更均匀。



(a) 基于unweighted unifrac的PCoA分析



(b) 基于unweighted unifrac的Anosim分析

图 2 乳酸菌发酵香菇对小鼠肠道菌群 Beta 多样性的影响

Fig. 2 Effects of *Lentinus edodes* fermented by lactic acid bacteria on the Beta-diversity of gut microbiota in mice

2.1.3 *肠道菌群物种分布和相对丰度差异* 根据门分类水平上的物种注释结果,选取相对丰度前 10 的物种进行统计分析,结果见图 3。在门水平上,对照组和所有处理组中的优势肠道菌群均属于厚壁菌门(Firmicutes)和拟杆菌门(Bacteroidetes)两大门类。其中,对照组和 FC 组分别占 86.80%、85.23%,发酵香菇组(FL、FM、FH)分别占 82.57%、82.37%、80.70%,表明乳酸菌发酵香菇降低了小鼠肠道中两大主要门类菌群总的相对丰度,增加了其他门类菌群的相对丰度,尤其是稀有物种或特有物种,这与 Alpha 多样性分析结果一致。此外弯曲杆菌门(Campilobacterota)、脱硫菌门(Desulfobacterota)、脱铁杆菌门(Deferribacterota)、变形菌门(Proteobacteria)等的相对丰度为 2%~10%,其他含量较少的疣微菌门(Verrucomicrobia)、髌骨菌门(Patescibacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、蓝藻细菌门(Cyanobacteria)等的相对丰度在 1%左右。

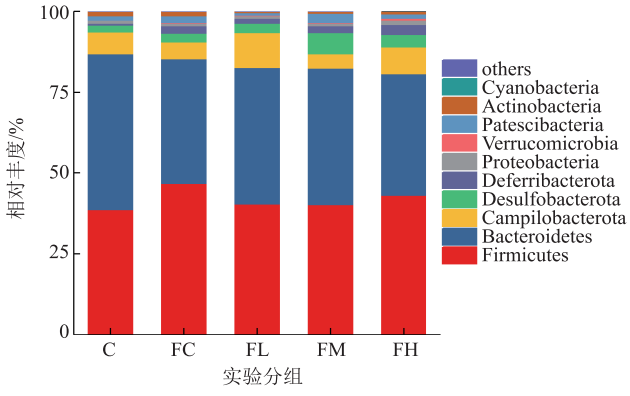


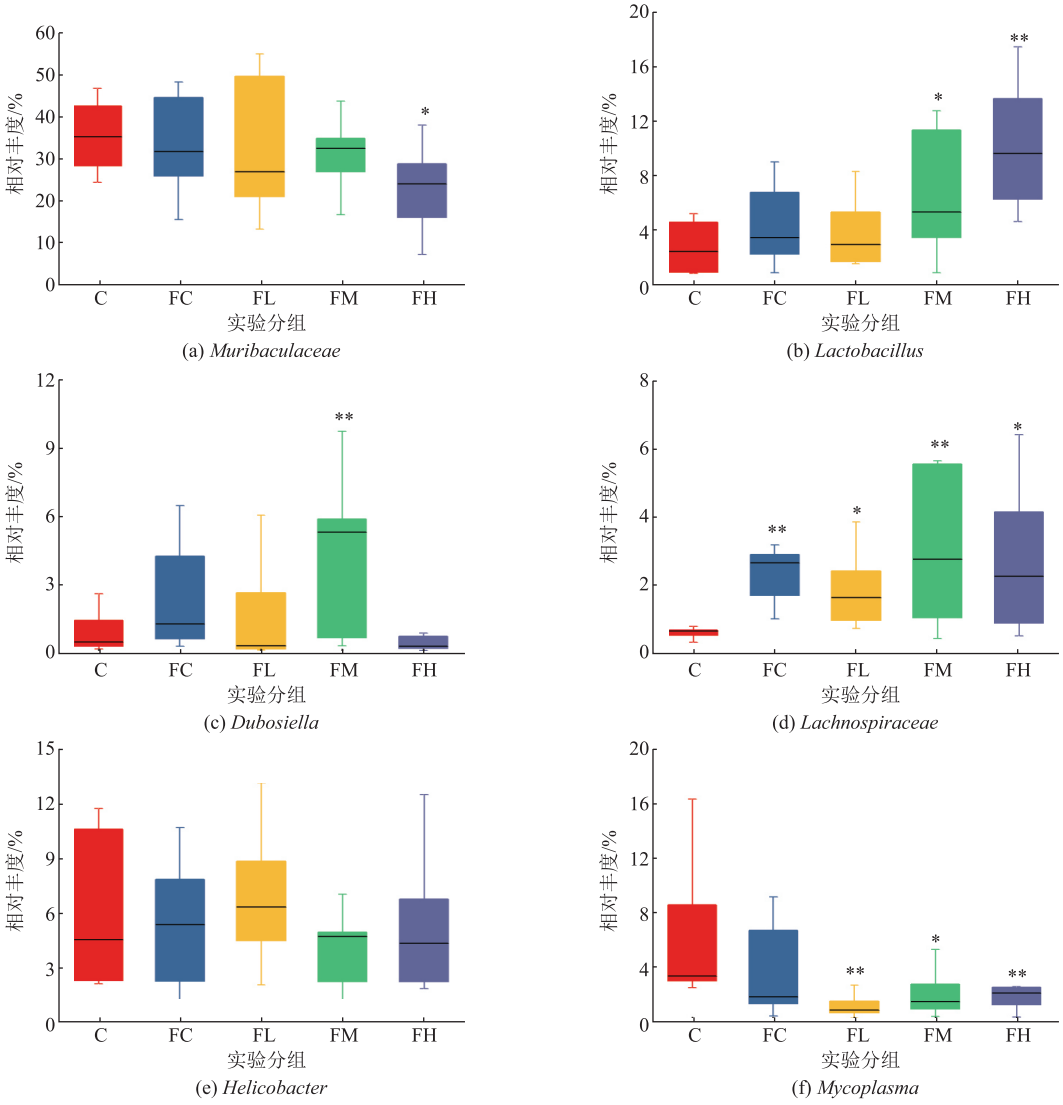
图 3 乳酸菌发酵香菇对小鼠肠道菌群门水平物种分布和相对丰度的影响

Fig. 3 Effects of *Lentinus edodes* fermented by lactic acid bacteria on the distribution and relative abundance of gut microbiota at phylum level in mice

在属分类水平上,优势菌群主要包括 *Muribaculaceae*、乳杆菌属(*Lactobacillus*)、*Dubosiella*、*Lachnospiraceae*、螺杆菌属(*Helicobacter*)、支原体(*Mycoplasma*)等。如图 4(a)所示,除 FH 组与对照组 *Muribaculaceae* 的相对丰度相比有显著性(P<0.05)下降外,其余各组无明显变化。从乳杆菌属相对丰度的变化可以看出(见图 4(b)),FC、FL 组与对照组相比无明显变化,而 FM 和 FH 组显著增加,且灌胃剂量越大差异越显著,这可能与灌胃的发酵香菇中乳酸菌的含量存在依从性。由图4(c)可知,除 FM 组的 *Dubosiella* 相对丰度与对照组相比有极显著增加外(P<0.01),其余各组无显著变化。而在

Lachnospiraceae 相对丰度的变化上，各处理组均显著增加,FM 组增加幅度最大(见图 4(d))。螺杆菌属相对丰度的变化情况表明(见图 4(e)),与对照组相比,FM 组有所降低但不显著,其余各处理无显著变化。由图 4(f)可知,除 FC 组支原体相对丰度下降不明显外,其余各处理组显著下降。

Muribaculaceae 是小鼠肠道中的优势菌群,富含分解碳水化合物的酶系,可代谢产生短链脂肪酸(short-chain fatty acids,SCFAs),促进肠上皮细胞的生长发育[19]。此外,*Lachnospiraceae* 也是 SCFAs 的重要生产者,能够提供能量并选择性上调紧密连接蛋白的表达,促进肠上皮的完整性[20]。常见的益生菌如乳杆菌属包括嗜酸乳杆菌、干酪乳杆菌等,可以促进抗炎因子的分泌、调节肠道微生物群、缓解便秘症状[21]。*Dubosiella* 被认为是具有调节体内代谢、提高肠道免疫力和促进机体抵抗炎症疾病等功效的一类肠道菌属[22]。而螺杆菌属为变形菌门细菌,多属致病菌,如幽门螺杆菌、肝螺杆菌等。因此,通过灌胃乳酸菌发酵香菇可不同程度地增加小鼠肠道内有益微生物如 *Muribaculaceae*、乳杆菌属、*Dubosiella*、*Lachnospiraceae* 等的相对丰度，降低螺杆菌属、支原体等致病菌的相对丰度,从而调节肠



* 表示 $P<0.05$,** 表示 $P<0.01$。

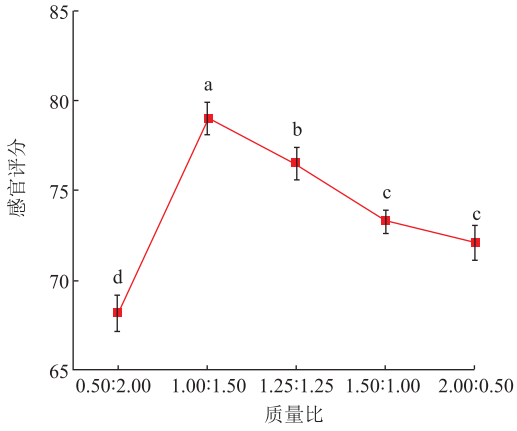
图 4　乳酸菌发酵香菇对小鼠肠道菌群属水平主要物种相对丰度的影响

Fig. 4　Effects of *Lentinus edodes* fermented by lactic acid bacteria on the relative abundance of main species in gut microbiota of mice at genus level

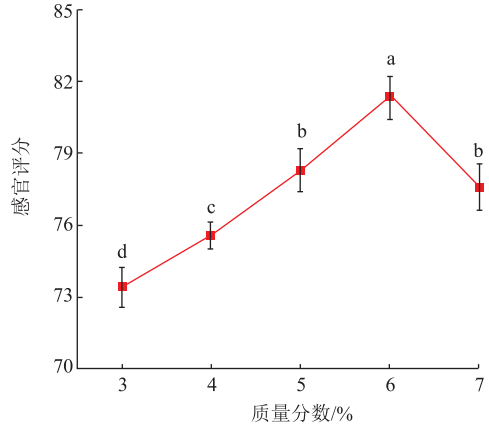
道菌群结构、改善肠道健康。

2.2 乳酸菌发酵香菇调味产品的制作工艺

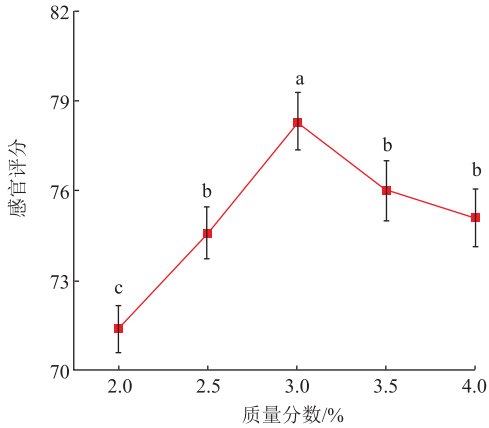
2.2.1 单因素实验结果 香菇经乳酸菌发酵后呈现较浓郁的酸味，不适合直接食用，需进行调味处理。根据发酵香菇特性，结合市场调研，在预实验基础上通过添加白砂糖、辣椒、姜汁、熟白芝麻、藤椒油、甜面酱、豆瓣酱等进行风味调节，并研究了甜面酱豆瓣酱质量比、白砂糖和藤椒油添加量对产品品质的影响。甜面酱在味型上属咸中带甜[23]，豆瓣酱则以咸、鲜为主[24]，可以增加发酵香菇的酱香味，改善产品色泽。糖在调味工艺中具有提鲜、增甜的作用[25]，可以使发酵香菇的酸味更加柔和，且略带甜味。藤椒油以麻、香为风味特色[26]，可以增加发酵香菇的麻、香味感。由图 5 可知，甜面酱与豆瓣酱最适添加质量比为 1.00:1.50，白砂糖最适添加量为 6.0%，藤椒油最适添加量为 3.0%（均为质量分数）。添加过多的调味料均会掩盖乳酸菌发酵香菇的酸味和独特风味，导致感官评分下降。



（a）甜面酱与豆瓣酱



（b）白砂糖



（c）藤椒油

不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图 5 甜面酱豆瓣酱质量比、白砂糖和藤椒油添加量对发酵香菇调味产品感官评分的影响

Fig. 5 Effect of the mass ratio of sweet flour sauce to broad bean paste, the amounts of white granulated sugar and rattan pepper oil on the sensory scores of flavored *Lentinus edodes* fermented by lactic acid bacteria

2.2.2 响应面实验优化结果 在单因素实验的基础上，以感官评分为响应值，采用 Box-Behnken 响应面实验，确定发酵香菇调味制品的最佳配方。响应面实验结果和回归模型方差分析分别见表 4 和表 5。由回归分析结果得到调味发酵香菇制品感官评分与甜面酱与豆瓣酱质量比、白砂糖添加量、藤椒油添加量 3 个因素的二次多项回归方程如下：

$$Y=87.40+1.19A-0.31B+0.63C-1.38AB-0.50AC+0.75BC-1.89A^2-2.64B^2-1.51C^2$$

表 4　响应面实验结果

Table 4　Results of response surface experiment

实验号	*A*	*B*	*C*	感官评分
1	1	−1	0	86.0
2	1	0	−1	85.0
3	0	0	0	88.5
4	1	1	0	82.0
5	−1	0	1	84.1
6	0	0	0	87.0
7	0	−1	−1	83.5
8	−1	0	−1	81.5
9	0	0	0	87.0
10	−1	−1	0	81.3
11	0	−1	1	83.2
12	0	1	1	84.5
13	0	1	−1	82.0
14	0	0	0	87.5
15	−1	1	0	82.5
16	1	0	1	85.5
17	0	0	0	87.1

由表 5 可知，模型极显著（$P<0.01$），失拟项不显著（$P>0.05$）。由一次项 F 可知，各因素对调味发酵香菇感官评分的影响顺序为：甜面酱与豆瓣酱质量比>藤椒油添加量>白砂糖添加量。A、AB、A^2、B^2、C^2 项对调味发酵香菇感官评分影响极显著，C、BC 项对感官评分影响显著，其余项对感官评分影响不显著。回归模型中的相关系数 R^2 和 R^2_{adj} 分别为 0.800 4 和 0.931 8，变异系数为 0.73%，说明模型拟合度较好，可靠性良好，可用此方程预测调味发酵香菇工艺配方的感官评分。

通过响应面实验优化，预测最佳调味工艺配方为：甜面酱与豆瓣酱质量比为 1.00∶1.50、白砂糖 6.0%、藤椒油 3.0%（均为质量分数），此时感官评分为 87.4 分。经过 3 次验证实验，实际感官评分为 87.0 分，与预测值接近，说明二次回归方程具有较高的可靠性，可用于实际操作中预测调味发酵香菇的感官评分。

表 5　回归模型方差分析

Table 5　Variance analysis of the regression model

变异来源	平方和	自由度	均方	*F*	*P*	显著性
模型	85.80	9	9.53	25.30	0.000 2	**
A	11.28	1	11.28	29.94	0.000 9	**
B	0.78	1	0.78	2.07	0.193 1	
C	3.12	1	3.12	8.29	0.023 7	*
AB	7.56	1	7.56	20.07	0.002 9	**
AC	1.00	1	1.00	2.65	0.147 3	
BC	2.25	1	2.25	5.97	0.044 5	*
A^2	15.00	1	15.00	39.81	0.000 4	**
B^2	29.29	1	29.29	77.74	0.000 1	**
C^2	9.63	1	9.63	25.56	0.001 5	**
残差	2.64	7	0.38			
失拟项	0.94	3	0.31	0.74	0.583 2	
纯误差	1.70	4	0.42			
总变异	88.44	16				

注：* 表示 $P<0.05$，** 表示 $P<0.01$。

3 结 语

通过小鼠灌胃实验研究了乳酸菌发酵香菇对小鼠肠道菌群的调节作用,结果表明,发酵香菇改变了小鼠肠道菌群的物种多样性,其特有物种和稀有物种数量增加,且个体差异减小,物种分布更均匀。在菌群的门分类水平上,对照组和所有处理组中的优势肠道菌群均属于厚壁菌门和拟杆菌门两大门类,乳酸菌发酵香菇降低了小鼠肠道中这两大主要门类菌群总的相对丰度,增加了其他门类菌群的相对丰度。在属分类水平上,各处理组相对丰度较高的有 *Muribaculaceae*、乳杆菌属、*Dubosiella*、*Lachnospiraceae*、螺杆菌属等,乳酸菌发酵香菇可不同程度地增加小鼠肠道内有益微生物如 *Muribaculaceae*、乳杆菌属、*Dubosiella*、*Lachnospiraceae* 等的相对丰度,降低螺杆菌属、支原体等致病菌的相对丰度,表明乳酸菌发酵香菇能够调节小鼠肠道菌群结构,增加有益菌在肠道内的定殖,可能具有提高肠道免疫功能进而改善肠道健康的作用。乳酸菌发酵香菇调味即食产品的最佳配方为:发酵香菇块 81.5%、甜面酱 1.0%、豆瓣酱 1.5 %、白砂糖 6.0%、藤椒油 3.0%、芝麻 2.0%、辣椒油 4.0%、姜汁 1.0%(均为质量分数)。按此配方制得的成品滑嫩爽口、酸辣适中、风味独特。作者在前期香菇的乳酸菌发酵工艺研究基础之上进行了调节肠道菌群的功效研究和调味产品开发,具有较好的实际应用前景。

参考文献:

[1] GAITÁN-HERNÁNDEZ R,LÓPEZ-PEÑA D,ESQUEDA M,et al. Review of bioactive molecules production,biomass,and basidiomata of shiitake culinary-medicinal mushrooms,*Lentinus edodes* (Agaricomycetes) [J]. **International Journal of Medicinal Mushrooms**,2019,21(9):841-850.

[2] ZHU L,WANG S L,ZHANG Z,et al. Dissolution of bioactive components from dried fruiting bodies of the culinary-medicinal shiitake mushroom,*Lentinus edodes* (Agaricomycetes),during cleaning,soaking,and cooking [J]. **International Journal of Medicinal Mushrooms**,2019,21(1):37-45.

[3] KE L,CHEN H Y. Homogenate extraction of crude polysaccharides from *Lentinus edodes* and evaluation of the antioxidant activity[J]. **Food Science and Technology**,2016,36(3):533-539.

[4] LI S F,WANG A J,LIU L,et al. Extraction of polysaccharides under vacuum condition from *Lentinus edodes* stipe and their antioxidant activities *in vitro*[J]. **Food Science and Biotechnology**,2019,28:759-767.

[5] NISAR J,MUSTAFA I,ANWAR H,et al. Shiitake culinary-medicinal mushroom,*Lentinus edodes* (Agaricomycetes):a species with antioxidant,immunomodulatory,and hepatoprotective activities in hypercholesterolemic rats[J]. **International Journal of Medicinal Mushrooms**,2017,19(11):981-990.

[6] 万茜淋,任雨贺,吕瑞娜,等. 香菇多糖对神经胶质瘤 SHG-44 细胞增殖、周期、凋亡及迁移的影响[J]. 中成药,2019,41(11):2614-2619.

[7] 中国食用菌协会. 2020 年度全国食用菌统计调查结果分析[J]. 中国食用菌,2022,41(1):85-91.

[8] NIE Y,JIA Y,ZHANG X,et al. Screening of mixed lactic acid bacteria starter and its effects on the quality and flavor compounds of fermented *Lentinus edodes*[J]. **Food Science and Technology**,2022,42:1-8.

[9] FERNANDES J,KUMBHAR R,KULKARNI R. Bacteriocins from lactic acid bacteria[J]. **Resonance**,2021,26(3):387-398.

[10] CUI S,ZHAO N,LU W,et al. Effect of different *Lactobacillus* species on volatile and nonvolatile flavor compounds in juices fermentation[J]. **Food Science and Nutrition**,2019,7(2):2214-2223.

[11] GAO H,WEN J,HU J,et al. Fermented *Momordica charantia* L. juice modulates hyperglycemia,lipid profile,and gut microbiota in type 2 diabetic rats[J]. **Food Research International**,2019,121:367-378.

[12] PARK S E,YOO S A,SEO S H,et al. GC-MS based metabolomics approach of kimchi for the understanding of *Lactobacillus plantarum* fermentation characteristics[J]. **LWT–Food Science and Technology**,2016,68:313-321.

[13] ZHAO N,ZHANG C C,YANG Q,et al. Selection of taste markers related to lactic acid bacteria microflora metabolism for

Chinese traditional Paocai:a gas chromatography-mass spectrometry-based metabolomics approach[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**,2016,64(11):2415-2422.

[14] QUINTO E J,JIMENEZ P,CARO I,et al. Probiotic lactic acid bacteria:a review[J]. **Food and Nutrition Sciences**,2014,5(18):1765-1775.

[15] 陈聪,董英,程新,等. 乳酸菌直投制备金针菇泡菜的风味物质分析[J]. 食品与发酵工业,2015,41(2):221-226.

[16] CHAO A. Non-parametric estimation of the classes in a population[J]. **Scandinavian Journal of Statistics**,1984,11(4):265-270.

[17] SU M,NIE Y,SHAO R,et al. Diversified gut microbiota in newborns of mothers with gestational diabetes mellitus[J]. **PLOS ONE**,2018,13(10):1-17.

[18] CHAPMAN M G,UNDERWOOD A J. Ecological patterns in multivariate assemblages:information and interpretation of negative values in ANOSIM tests[J]. **Marine Ecology Progress**,1999,180(3):257-265.

[19] 王伯韬. 青春双歧杆菌对高脂饮食引发肥胖症的缓解作用与机制研究[D]. 无锡:江南大学,2021.

[20] 柴茂. 双歧杆菌对便秘的缓解作用及其机制分析[D]. 无锡:江南大学,2021.

[21] 陆文伟,胡文兵,曹文金,等. 干酪乳杆菌 LC01 对小鼠肠道菌群和肠道转运调节作用的剂量效应[J]. 食品科学,2019,40(15):211-217.

[22] WAN F,HAN H,ZHONG R,et al. Dihydroquercetin supplement alleviates colonic inflammation potentially through improved gut microbiota community in mice[J]. **Food and Function**,2021,12(22):11420-11434.

[23] 王沛. 甜面酱的风味提升工艺研究[D]. 天津:天津科技大学,2020.

[24] 李东蕊. 豆瓣酱工业发酵过程中生物胺的生成规律及微生物多样性的研究[D]. 无锡:江南大学,2020.

[25] 张秀南,贾亚娟,李光磊. 拌面调味汁的研制[J]. 中国调味品,2021,46(7):116-120.

[26] 胡强,王延云,王燕,等. 两种生产工艺藤椒油产品挥发性成分对比分析[J]. 食品工业科技,2019,40(13):215-220.

科　技　信　息

纳米纤维素规模化制备关键机制被发现

2022 年 9 月 16 日，中国农业科学院麻类研究所可降解材料开发与利用创新团队联合国内高校以苎麻纤维为研究对象,解析了果胶对植物细胞壁解离及其纳米纤维素再分散的作用机制,为纳米纤维素的规模化生产及应用提供理论依据,也为生物质的全组分高值化利用提供新思路。相关研究成果发表在 *Carbohydrate Polymers* 上。

据悉,纳米纤维素在聚合物制备、包装、医学、生物传感、电子器件、环境修复等领域有着广泛的应用价值,但其制备需要对植物细胞壁进行分离纯化,这个过程会消耗大量化学药剂,增加环境负担。生物质全组分利用是纳米纤维素制备的重要发展方向,直接利用生物质原生纤维制备含木质素、半纤维素的纳米纤维素,省去植物细胞壁的分离纯化过程,而植物细胞壁的高效解离和纳米纤维素的再分散是其规模化应用的基础与关键。果胶对植物细胞壁解离及其纳米纤维素的再分散具有重要的影响,但其作用机制尚未解析。

该研究针对苎麻纤维,采用一系列果胶预提取方法,制备具有不同果胶成分和含量的纤维素纳米纤维,研究果胶对纤维素纳米纤维综合性能的影响规律。根据研究结果,研究人员发现了果胶对植物细胞壁解离及其纳米纤维素再分散的作用机制,揭示了果胶、半纤维素或木质素、纤维素多层级复合纳米结构的形成,以及基于该结构产生的表面静电排斥效用和空间位阻效应。在纳米纤维素利用领域,防止高浓度或干态纳米纤维素的团聚一直是最具挑战性的问题之一,而果胶刚好可以起到分散纳米粒子的作用。

[信息来源]中国农业科学院麻类研究所 .纳米纤维素规模化制备关键机制被发现[EB/OL]. (2022-10-14).https://www.caas.cn/xwzx/kyjz/323707.html.