DOI:10.12441/spyswjs.20241214001 [文章编号] 1673-1689(2025)05-0087-08

可食用真菌多糖对鼠李糖乳酪杆菌GG增殖及代谢的影响

吴晟峣 叶子坤 谢唯祎 王 怡 欧阳昊天 张程程 马申嫣*

(江南大学食品学院,江苏 无锡 214122)

摘要:【目的】探究可食用真菌多糖对鼠李糖乳酪杆菌GG(*Lacticaseibacillus rhamnosus* GG,LGG)增殖及代谢的影响。**【方法】**以金针菇多糖(*Flarnmulina velutipes* polysaccharides,FVP)、银耳多糖(*Tremella fueiformls* polysaccharides,TFP)、黑木耳多糖(*Auricularia auricula* polysaccharides,AAP)、香菇多糖(lentinan,LNT)、猴头菇多糖(*Hericium erinaceus* polysaccharides,HEP)、茯苓多糖(*Poria cocos* polysaccharides,PCP)这6种可食用真菌多糖作为碳源培养LGG,测定其活菌数变化及短链脂肪酸(SCFAs)浓度。从这6种多糖中选取2种,并按不同质量比添加至LGG发酵乳中,检测发酵乳的pH及质构特性。**【结果】**TFP组和PCP组的多糖利用率和SCFAs产量均较高。将这2种多糖加入发酵乳中发现,不同质量比对发酵乳产酸的影响较小;但当TFP与PCP质量比较高时,发酵乳的硬度、黏性、内聚力和胶着性显著降低($P<0.05$),而当TFP与PCP质量比为1∶1时,发酵乳的黏性最强。**【结论】**TFP和PCP对LGG的增殖和代谢有较好的促进作用;在LGG发酵乳中添加质量比为1∶1的TFP和PCP可改善产品的口感。

关键词:可食用真菌多糖;鼠李糖乳酪杆菌GG;肠道益生菌;代谢组学;益生元;发酵乳

Effects of Edible Fungal Polysaccharides on the Proliferation and Metabolism of *Lactobacillus rhamnosus* GG

WU Shengyao YE Zikun XIE Weiyi WANG Yi OUYANG Haotian
*ZHANG Chengcheng MA Shenyan**

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: [**Objective**] The aim of this study is to explore the effects of edible fungal polysaccharides on the proliferation and metabolism of *Lactobacillus rhamnosus* GG (LGG). [**Method**] *Flarnmulina velutipes* polysaccharides (FVP), *Tremella fueiformls* polysaccharides (TFP), *Auricularia auricula* polysaccharides (AAP), lentinan (LNT), *Hericium erinaceus* polysaccharides (HEP), and *Poria cocos* polysaccharides (PCP) were selected as carbon sources for the culture of LGG. The viable bacterial count and the concentration of short-chain fatty acids (SCFAs) were determined. Two polysaccharides were selected from the six polysaccharides and added in different mass ratios to the LGG-fermented milk, and then the pH and textural properties of the fermented milk samples were determined. [**Result**] The TFP and PCP groups had the higher polysaccharide utilization rate and the highest production of SCFAs. When the two polysaccharides were added into the fermented milk, different mass ratios of polysaccharides had little effect on the acid production of the fermented milk. The hardness, viscosity, cohesiveness, and adhesion of the fermented milk decreased when the mass ratio of TFP to PCP was

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(32202009);2021年江苏省高等教育教改研究立项项目(2021JSJG058);教育部“新农科”研究与改革实践项目(2020402)。

通信作者:马申嫣(1987—),女,硕士,高级实验师,主要从事食品生物技术研究。E-mail: msy@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2024-12-14 **修回日期:**2025-02-10

higher (P<0.05), and the viscosity of the fermented milk reached the maximum when the mass ratio of TFP to PCP was 1∶1. [**Conclusion**] TFP and PCP can promote the proliferation and metabolism of LGG. The taste of LGG-fermented milk can be improved by adding TFP and PCP in a mass ratio of 1∶1.

Keywords: edible fungal polysaccharides; *Lactobacillus rhamnosus* GG; intestinal probiotics; metabolomics; prebiotics; fermented milk

益生菌作为一类对宿主健康有益的活性微生物，主要包括乳酪杆菌属、双歧杆菌属、芽孢杆菌属、链球菌属、放线菌属、丁酸梭菌等细菌以及部分真菌。其中，乳酪杆菌属展现出巨大的应用潜力[1]。诸多研究已证实鼠李糖乳酪杆菌具有优良的益生特性，如Wang等[2]发现该菌在胃酸和胆盐耐受性方面表现优秀，并具有良好的益生特性；Yeo等[3]发现在葡聚糖硫酸钠诱导的结肠炎模型中，鼠李糖乳酪杆菌能够显著促进肠道内益生菌的生长。因此，鼠李糖乳酪杆菌在调节肠道微生态、强化肠黏膜屏障、维持免疫系统稳态等方面发挥着关键作用。

近年来，可食用真菌多糖在生命科学与食品科学等领域备受关注。可食用真菌多糖是从真菌子实体、菌丝体及培养液中提取的多糖类化合物，富含多种生物活性成分[4]，具有抗氧化[5]、调节免疫[6]、保护肠道[7]、保护器官[8]、降血脂[9]等多种功效。已有研究表明，可食用真菌多糖可以到达远端肠道并被同化，进而重塑肠道微生物群[10]。钟千贵等[11]研究发现猴头菇多糖可增强部分胃肠益生菌对胃液、肠液的耐受力，从而调节胃肠健康；Liu等[12]运用代谢组学和微生物学方法发现，AAP能够激活精氨酸代谢途径，显著提高小鼠肠道双歧杆菌的丰度；Ma等[13]研究表明，杏鲍菇多糖的摄入可能通过肠道微生物的发酵过程对胃肠道健康发挥重要作用。

然而，现有研究多聚焦于单一多糖对肠道微生物的作用，缺乏不同种类多糖的横向对比，以及多糖对发酵乳品质影响的研究。因此，作者选择了FVP、TFP、AAP、LNT、HEP和PCP这6种可食用真菌多糖，探究其对LGG增殖及代谢的影响。通过探索不同多糖的质量比及协同增效作用，挖掘其益生元价值。该研究旨在解析可食用真菌多糖的益生活性，同时也为复合多糖发酵乳制品的开发及商业化推广提供理论与方法支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

LGG：江南大学食品生物技术中心保存；FVP、TFP、AAP、LNT、HEP、PCP：瑞迪生物科技有限公司；脱脂乳粉：澳大利亚Murray Goulburn公司；乙酸、丙酸、丁酸、异戊酸、戊酸、无水乙醚等：国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

超净工作台：HT-1300型，苏净集团安泰公司；紫外可见分光光度计：DU-800型，美国贝克曼公司；电子分析天平：JJ124BC型，上海第二天平仪器厂；恒温细菌培养箱：DNP-9162-II型，上海铂温仪器有限公司；立式数显高压灭菌锅：DGL-202型，江苏登冠医疗器械有限公司；气相色谱仪：7000型，江苏天瑞仪器股份有限公司；质构仪：XTC-20型，上海保圣实业发展有限公司；冰箱：BD-228WL型，青岛海尔股份有限公司；雷磁PH计：PHS-3C型，上海精科有限公司。

1.3 方法

1.3.1 培养基的制备

分别配制MRS培养基（MRS对照组）、MRS−（无葡萄糖）培养基（空白对照组），以及6种以等质量真菌多糖替换葡萄糖的MRS培养基。将培养基置于高压蒸汽灭菌锅中，于115 ℃灭菌20 min。每组离心管中分别加入5 mL MRS培养基、MRS−培养基及含不同真菌多糖的MRS培养基。取已活化3次的菌液（接种体积分数为2%），向各离心管中分别加100 μL，将离心管置于37 ℃恒温细菌培养箱中培养。

1.3.2 生长曲线的测定

在活化3代后，将LGG分别接种到不同培养基中，于37 ℃恒温培养36 h至对数生长期。每隔1 h从每组离心管中抽取3管，用移液枪吸取200 μL菌液接入96孔板中，用紫外可见分光光度计测定其OD_{600}值，绘制生长曲线。

1.3.3　SCFAs的提取和测定

将LGG分别接种到不同培养基中，于37 ℃恒温培养24 h。吸取500 μL活化后的菌液置于2 mL离心管中，加入20 μL硫酸（0.5 mL硫酸加5.0 mL去离子水）酸化，在通风橱中加1 mL乙醚，振荡30 s以萃取SCFAs。于14 000 r/min离心15 min，取上层乙醚相，离心后取上清液，然后将上清液加到装有0.25 g无水硫酸钠的2 mL EP管中，静置30 min，再次以同样的条件离心，取上层乙醚相。离心后将上清液转移至气相进样瓶，采用气相色谱仪检测SCFAs浓度。

1.3.4　发酵乳的制备

将脱脂乳粉配制成质量分数为10%的溶液，分别加入质量分数1%的2种多糖混合物，并设置不同质量比（1∶0、3∶1、1∶1、1∶3、0∶1）。90 ℃灭菌15 min，待样品温度降至37 ℃时，以体积分数2%接种已活化3代的LGG进行发酵。将配制好的发酵液置于恒温培养箱中，于37 ℃静置培养24 h。

1.3.5　发酵乳pH的测定

按照1.3.4中方法，将配制好的溶液置于37 ℃恒温培养箱中，在24 h内，每4 h测定一次样品的pH。

1.3.6　发酵乳质构特性的测定

将达到发酵终点的样品置于4 ℃冰箱冷藏24 h，选择探头TA3/100、夹具TA-RT-KT测定其质构特性，每组样品测定3次。

1.3.7　感官评定方法

感官评定采用侯文娟等[14]的方法并稍加修改，发酵乳感官评价标准见表1。

表1　感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation criteria

指标	评定标准	分值/分
顺滑度（25分）	稍顺滑	17~25
	较顺滑	10~16
	很顺滑	0~9
奶香味（25分）	奶香味浓郁	17~25
	奶香味一般	10~16
	奶香味寡淡	0~9
稀稠度（25分）	较稠	17~25
	中等	10~16
	较稀	0~9
口味（25分）	酸甜适中	17~25
	酸甜较适宜	10~16
	酸甜不适宜	0~9

1.4　数据处理

使用GraphPad Prism 9.4.0和Excel对数据进行统计分析，计算平均值和标准误差并制图。用SPSS Statistics 28.0进行方差分析，采用One-Way ANOVA进行显著性分析，$P<0.05$表示差异显著。

2　结果与讨论

2.1　LGG生长曲线

活菌数直接反映了培养基中微生物的活性和数量，是评估生物制剂等产品质量的重要指标之一。虽然FVP、TFP、AAP、HEP、LNT、PCP这6种真菌多糖的来源和结构各不相同，但它们的化学组成和结构特征相似，如都含有葡萄糖、甘露糖、半乳糖等单糖。这些特征使它们在一定程度上具备被鼠李糖乳酪杆菌利用的潜力。鼠李糖乳酪杆菌分泌的水解酶能够将易水解的低相对分子质量的多糖降解为低聚糖或单糖，从而降低真菌多糖的相对分子质量[15]。这些酶具有特定的底物特异性和作用机制，可识别并切割多糖链中的特定化学键。随着多糖链被切割成较小的片段，鼠李糖乳酪杆菌可以进一步代谢和利用这些片段。

将LGG接种至MRS培养基、MRS⁻培养基及6种真菌多糖培养基中培养，LGG生长曲线见图1。在MRS培养基中，LGG在0~12 h持续生长，12~36 h趋于稳定。在LNT培养基中，LGG在0~6 h增长较快，6~36 h增长趋于稳定。张丽华等[16]研究发现，当LNT质量浓度超过一定阈值时，其对乳酸菌的促生长作用减弱，这可能是由于培养基渗透压随糖质量浓度升高而增大，进而抑制了菌体生长。LNT可能在菌体酶系作用下降解为可供乳酸菌利用的单糖，从而促进其增殖。

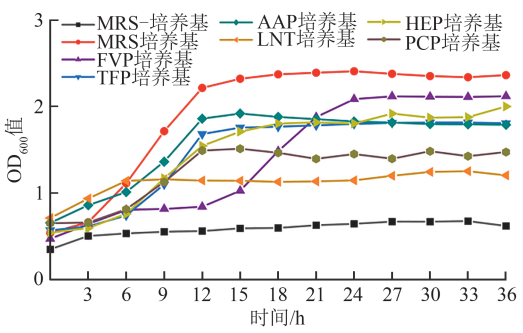


图1　LGG在不同培养基中的生长曲线

Fig. 1　Growth curves of LGG in different media

在FVP培养基中，LGG在0~12 h缓慢稳定增殖，12 h进入对数生长期，12~24 h快速增殖，随后趋于稳定。与对照组相比，在0~24 h，LGG在FVP培养基中的繁殖速度明显高于空白对照组；24 h后生长速度接近MRS对照组。因此，LGG能分解并利用FVP实现增殖。

在AAP培养基中，LGG在0~12 h迅速增殖，12~36 h趋于稳定。将葡萄糖替换为相同质量的AAP后，在0~36 h内LGG的生长、繁殖速度远高于空白对照组，12 h后生长速度接近MRS对照组。AAP是黑木耳的主要活性成分，是一种以甘露糖为主的杂多糖，其单糖组分为甘露糖、氨基葡萄糖、葡萄糖、半乳糖、木糖和阿拉伯糖[17]。据此推测，LGG对其他小分子多糖的利用能力较差可能与其分解代谢途径效率较低有关，该菌株需要经过更复杂的酶促反应才能完成多糖的分解与转化，因此在培养6 h后其生长情况明显弱于MRS对照组。

在HEP培养基中，LGG在0~15 h生长速度较快，15~36 h平稳生长。HEP的单糖主要是葡萄糖、果糖、半乳糖、鼠李糖等，以1，3-糖苷键、1，6-糖苷键和1，4-糖苷键连接方式最为普遍。因此，推测LGG利用葡萄糖的能力最强，在短暂的平稳期后，LGG开始将半乳糖、果糖等转化为葡萄糖。朱佳敏等[18]研究发现，HEP的分解及转化仍然需要经历一定的代谢过程，所以生长情况弱于MRS对照组。

在TFP培养基中，LGG在0~6 h生长速度较缓慢，6~12 h生长速度较快，12 h后生长速度趋于平缓。TFP是银耳的主要活性成分，是以α-1，3-*D*-甘露糖为主链的杂多糖，而*D*-甘露糖可以转化为葡萄糖。推测在培养前期，TFP含有的部分小分子多糖被LGG利用；之后由于LGG需要通过一定代谢途径将α-1，3-*D*-甘露糖转化为葡萄糖，所以生长速度比在MRS培养基中缓慢，这与顾炜炜等[19]的研究结果一致。

在PCP培养基中，LGG活菌数在0~3 h呈下降趋势，3~12 h快速生长，12~15 h保持平稳，15~36 h出现波动并呈现略微下降的趋势。出现这种现象的原因可能是：在0~3 h，由于LGG无法分解PCP，导致培养基缺乏LGG生长所需的碳源，造成LGG数量下降；在3~12 h，PCP得到分解，产生水溶性多糖并进一步水解成葡萄糖，为LGG的生长提供了充足的碳源，从而快速生长[20]；15 h后，由于培养基内pH随着LGG代谢出的SCFAs增多而降低，使PCP分解产生的碱溶性多糖无法被溶解利用，导致碳源不足，LGG数量降低。

综上所述，LGG在含LNT、TFP和PCP的培养基中生长代时较短，在其他培养基中生长代时较长。但由于在含LNT的培养基中的总菌数较少，而在含TFP和PCP的培养基中总菌数较多且生长代时相对较短。因此综合菌株生长代时和生长曲线可知，LGG在含TFP和PCP的培养基中增殖更为迅速。

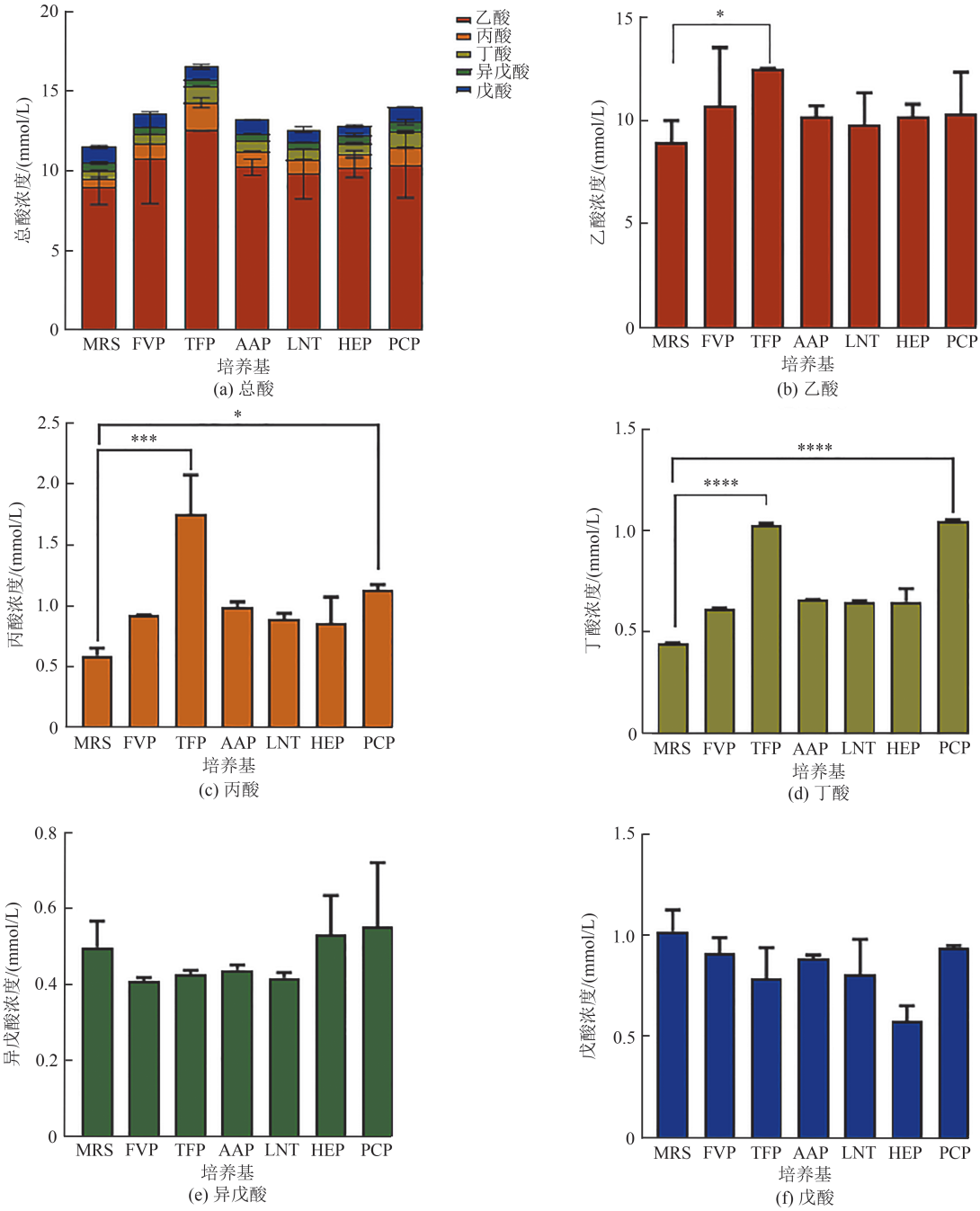
2.2 不同培养基中LGG的SCFAs产量

肠道益生菌产生的SCFAs能够反映肠道及机体健康状态，其水平可间接体现肠道屏障的完整性和功能状态。常见的SCFAs有乙酸、丙酸、丁酸、异戊酸、戊酸等。乙酸是最常见的SCFAs，鼠李糖乳酪杆菌通过糖酵解代谢途径合成乙酸，该过程首先将底物转化为丙酮酸，随后经乙酰辅酶A途径生成乙酸。丙酸的生成通常与糖类的发酵途径有关，肠道微生物可通过多种代谢途径合成丙酸，主要包括琥珀酸、丙二醇及丙烯酸酯这3种生物代谢途径。丁酸的生物合成涉及复杂的代谢过程，其生成主要依赖于碳水化合物经三羧酸循环后形成的乙酰辅酶A，再通过多步缩合反应生成[21]。异戊酸则主要通过α-酮酸脱羧途径合成，该过程涉及亮氨酸与多种酶的连续催化反应。首先在支链氨基酸转氨酶作用下生成α-酮异己酸，随后经5'-磷酸吡哆醛依赖性酶和α-酮酸脱羧酶催化形成异戊醛，最终由醛脱氢酶氧化生成异戊酸[22]。目前，在鼠李糖乳酪杆菌中，戊酸的代谢途径尚不明确。Lau等[23]发现戊酸是嗜酸乳杆菌产生的主要代谢产物，LGG中可能存在类似的酶系来催化中间产物进而转化为戊酸。

不同培养基中LGG的SCFAs产量见图2。MRS对照组中乙酸浓度为（8.95±1.07）mmol/L，丙酸浓度为（0.59±0.06）mmol/L，丁酸浓度为（0.45±0.00）mmol/L。TFP组中乙酸浓度为（12.51±0.01）mmol/L，丙酸浓度为（1.74±0.32）mmol/L，丁酸浓度为（1.04±0.01）mmol/L，且TFP组能够显著提升LGG产生乙酸、丙酸和丁酸的能力。Wu等[24]研究发现，以TFP为底物体外发酵

48 h可促进SCFAs的生物合成，与本研究的结果一致。Ma等[25]发现PCP可使乙酸产量加倍，丙酸产生略有提高。本研究中，PCP培养基中的乙酸浓度为（10.33±2.01）mmol/L，丙酸浓度为（1.13±0.05）mmol/L，丁酸浓度为（1.06±0.01）mmol/L，且能显著提升LGG产生丙酸和丁酸的能力，进一步证实了Ma等[25]的研究结果。

综上所述，结合2.1中LGG生长曲线结果，推测作者选取的6种可食用真菌多糖中，LGG利用效果较好的是TFP和PCP。



*—P<0. 05；***—P<0. 001；****—P<0. 000 1。

图2　不同培养基中LGG的SCFAs产量

Fig. 2　Production of SCFAs by LGG in different media

2.3　不同发酵乳的pH变化

在酸奶发酵过程中，乳酸菌会产生乳酸，从而使酸奶酸度增加，进而引起蛋白质变性交联凝固。酸度是考察酸奶发酵终点和酸奶品质的重要指

标，通常用pH表示。将TFP和PCP按不同质量比加入LGG发酵乳中，pH变化见图3。5组样品经过24 h发酵后，pH均呈明显下降趋势。当TFP与PCP质量比为1∶0时，pH降低程度最大（但与其他组无显著差异），是促进LGG发酵乳产酸的最优质量比。多糖结构会对乳酸菌代谢产生影响，进而影响发酵乳的质构特性，而多糖相对分子质量是影响其生物活性的重要因素[12]。TFP对LGG产酸的促进作用较突出，这可能是由于TFP为酸性杂多糖，为乳酸菌的代谢提供了更适宜的环境。

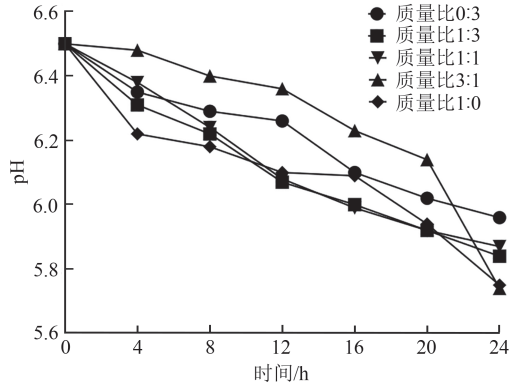


图3 不同发酵乳的pH变化

Fig. 3 pH changes of different fermented milk samples

2.4 不同发酵乳的质构特性

不同发酵乳的质构特性见表2。TFP与PCP质量比为1∶3、3∶1和1∶0组的硬度和内聚力与质量比0∶1组均存在显著差异（$P<0.05$）；当TFP与PCP质量比为1∶1时，发酵乳的黏性最大，而质量比为1∶3、3∶1和1∶0组的黏性无显著差异（$P>0.05$）；质量比为1∶1、3∶1和1∶0组的胶着性均与质量比0∶1组存在显著差异（$P<0.05$）。这可能是由于TFP相对分子质量大、主链长且支链丰富[26]，具有良好的持水能力，使多糖分子与酪蛋白结合形成的三维网状含水结构更稳固[27]，进而改变了发酵乳的质构特性。以LGG作为发酵剂时，当TFP质量占比较高时，发酵乳的硬度、黏性、内聚力、胶着性显著降低（$P<0.05$）；当TFP与PCP质量比为1∶1时，LGG发酵乳的黏性达到峰值。这可能是与LGG胞外多糖（EPS）的产生机制和结构有关[27-28]，EPS通过与蛋白质相互作用，影响发酵乳的凝胶硬度、黏性及保水性[29]。在本研究中，可能是由于TFP促进了LGG代谢产生EPS，EPS的释放抑制了酪蛋白的聚集，从而导致酸奶质构变软。因此，综合考虑发酵乳的品质和成本，确定可食用真菌多糖对LGG发酵乳质构特性的较优添加水平为TFP与PCP质量比为0∶1或1∶1。

表2 不同发酵乳的质构特性

Table 2 Textural properties of different fermented milk samples

单位：g

TFP与PCP质量比	硬度	黏性	内聚力	胶着性
0∶1	99.41±0.78^{a}	99.20±9.17^{b}	6.70±0.17^{a}	55.31±2.32^{a}
1∶3	80.12±0.33^{b}	73.96±1.04^{c}	5.30±0.30^{b}	47.35±0.65^{c}
1∶1	95.67±5.51^{a}	135.83±2.64^{a}	6.54±0.04^{a}	51.34±0.78^{b}
3∶1	75.52±4.53^{b}	74.69±0.87^{c}	5.42±0.42^{b}	50.57±0.57^{b}
1∶0	81.47±2.16^{b}	74.98±0.87^{c}	5.35±0.35^{b}	49.16±0.84^{bc}

注：同列不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

2.5 不同发酵乳的感官评价结果

不同发酵乳的感官评价结果见图4。TFP与PCP质量比为1∶1时，发酵乳的感官得分最高，进一步确定可食用真菌多糖对LGG发酵乳的较优添加水平为TFP与PCP质量比1∶1。

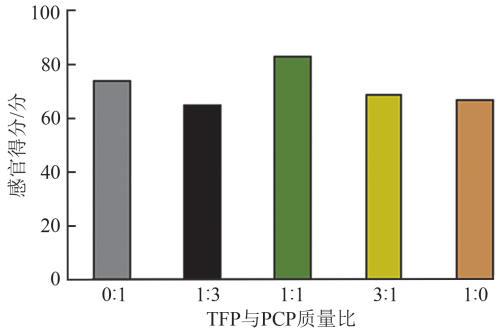


图4 不同发酵乳的感官评价结果

Fig. 4 Sensory scores of different fermented milk samples

3 结论

在添加6种可食用真菌多糖的发酵乳中，TFP和PCP的多糖利用率和SCFAs产量最高。将这2种多糖加入发酵乳中发现，TFP与PCP质量比对发酵乳产酸的影响较小；发酵乳的硬度、黏性、内聚性、胶着性在TFP质量占比较高时显著下降；当TFP与PCP质量比为1∶1时，发酵乳的黏性最强。因此，TFP与PCP对LGG增殖和代谢有较好的促进作用；TFP与PCP质量比对发酵乳产酸的影响较小，但从质构角度考虑，TFP与PCP质量比1∶1

为LGG发酵乳的较优添加水平。该研究对解析可食用真菌多糖的益生活性、开发复合多糖发酵乳制品具有参考价值。

参考文献

[1] 顾敏雯，刘皓文，祝晨昕，等. 益生菌对食源性脂质代谢紊乱相关疾病的缓解作用及机制研究进展[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(10)：21-31.
GU M W，LIU H W，ZHU C X，et al. Research progress on the alleviating effects and mechanisms of probiotics on diet-induced lipid metabolism disorders[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(10)：21-31.(in Chinese)

[2] WANG N N，WANG S，XU B F，et al. Alleviation effects of *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* XLTG11 on dextran sulfate sodium-induced colitis in mice[J]. Microorganisms，2021，9(10)：2093.

[3] YEO S，PARK H，SEO E，et al. Anti-inflammatory and gut microbiota modulatory effect of *Lactobacillus rhamnosus* strain LDTM 7511 in a dextran sulfate sodium-induced colitis murine model[J]. Microorganisms，2020，8(6)：845.

[4] 郑婷婷，张文杰，龚婉莹，等. 食用菌多糖提取纯化及结构修饰研究进展[J]. 食品与机械，2024，40(7)：231-240.
ZHENG T T，ZHANG W J，GONG W Y，et al. Research progress on extraction，purification and structural modification of polysaccharides from edible fungi[J]. Food & Machinery，2024，40(7)：231-240.(in Chinese)

[5] 关天越，任怡琳，管祺杰，等. 枸杞多糖体外调节人体肠道菌群的功能研究[J]. 食品与生物技术学报，2023，42(9)：74-81.
GUAN T Y，REN Y L，GUAN Q J，et al. Study on the function of *Lycium barbarum* polysaccharide in regulating human gut microbiota *in vitro*[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2023，42(9)：74-81.(in Chinese)

[6] LIU C R，CHOI M W，XUE X K，et al. Immunomodulatory effect of structurally characterized mushroom sclerotial polysaccharides isolated from *Polyporus rhinocerus* on bone marrow dendritic cells[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2019，67(43)：12137-12143.

[7] YING M X，YU Q，ZHENG B，et al. Cultured *Cordyceps sinensis* polysaccharides modulate intestinal mucosal immunity and gut microbiota in cyclophosphamide-treated mice[J]. Carbohydrate Polymers，2020，235：115957.

[8] GAO Z，LAI Q Q，YANG Q H，et al. The characteristic，antioxidative and multiple organ protective of acidic-extractable *Mycelium* polysaccharides by *Pleurotus eryngii* var. *tuoliensis* on high-fat emulsion induced-hypertriglyceridemic mice[J]. Scientific Reports，2018，8：17500.

[9] ZENG H L，CHEN P L，WANG Z Y，et al. *Porphyra haitanensis* polysaccharides attenuates blood lipid *via* gut-liver axis in diet-induced high-fat *Mesocricetus auratus* through multiple integrated omics[J]. Molecular Nutrition & Food Research，2023，67(5)：e2200638.

[10] LIANG J J，ZHANG M N，WANG X N，et al. Edible fungal polysaccharides，the gut microbiota，and host health[J]. Carbohydrate Polymers，2021，273：118558.

[11] 钟千贵，邱铭锰，杨娟，等. 猴头菇多糖对胃肠道益生菌生长的影响[J]. 食品工业科技，2019，40(19)：301-304，309.
ZHONG Q G，QIU M M，YANG J，et al. Effects of *Hericium erinaceus* polysaccharides on the growth of gastrointestinal probiotics[J]. Science and Technology of Food Industry，2019，40(19)：301-304，309.(in Chinese)

[12] LIU Q，AN X，CHEN Y，et al. Effects of *Auricularia auricula* polysaccharides on gut microbiota and metabolic phenotype in mice[J]. Foods，2022，11(17)：2700.

[13] 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.

[14] 侯文娟，秦洋，张丹，等. 豌豆蛋白发酵乳的工艺优化及产品特性研究[J]. 食品工业科技，2024，45(2)：175-182.
HOU W J，QIN Y，ZHANG D，et al. Process optimization and product characteristics of pea protein fermented milk[J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(2)：175-182.(in Chinese)

[15] LIANG J J，ZHANG M N，LI X H，et al. Structure and immunomodulatory activity of *Lentinus edodes* polysaccharides modified by probiotic fermentation[J]. Food Science and Human Wellness，2024，13(1)：421-433.

[16] 张丽华，冯路瑶，李顺峰，等. 分级醇沉香菇多糖益生活性研究[J]. 食品安全质量检测学报，2023，14(4)：258-264.
ZHANG L H，FENG L Y，LI S F，et al. Studies on the prebiotics characteristic of lentinan with gradient ethanol precipitation[J]. Journal of Food Safety & Quality，2023，14(4)：258-264.(in Chinese)

[17] 尚学钰，美合日班，苏玲，等. 黑木耳可溶性膳食纤维功能特性和降脂活性研究[J]. 食品工业科技，2025，46(2)：112-121.
SHANG X Y，MEI H，SU L，et al. Functional

characteristics and lipid lowering activity of *Auricularia heimuer* soluble dietary fiber[J]. Science and Technology of Food Industry,2025,46(2):112-121.(in Chinese)

[18] 朱佳敏,武艺,赵琳静,等. 猴头菇多糖结构及调节肠道菌群作用研究进展[J]. 食品与发酵工业,2023,49(14):311-320.
ZHU J M,WU Y,ZHAO L J,et al. Structures and effects of *Hericium erinaceus* polysaccharide on regulating gut microbiota: a review [J]. Food and Fermentation Industries,2023,49(14):311-320.(in Chinese)

[19] 顾炜炜,巴金娜,郑守晶,等. 银耳多糖对嗜酸乳杆菌的增殖效果研究[J]. 工业微生物,2023,53(5):65-67.
GU W W, BA J N, ZHENG S J, et al. Study on the proliferation effect of *Tremella fuciformis* polysaccharides on *Lactobacillus acidophilus*[J]. Industrial Microbiology, 2023,53(5):65-67.(in Chinese)

[20] 李艳娟,张美,李艳芹,等. 茯苓及其复方抗糖脂代谢紊乱的研究进展[J]. 上海中医药大学学报,2024,38(1):89-100.
LI Y J,ZHANG M,LI Y Q,et al. Research progress of *Poria* and its compound formulas against glucolipid metabolic disorders[J]. Academic Journal of Shanghai University of Traditional Chinese Medicine,2024,38(1):89-100.(in Chinese)

[21] 何方,李金星,吴思谋. 肠源性短链脂肪酸生成机制及其饮食调控[J]. 食品科学技术学报,2023,41(1):10-21.
HE F,LI J X,WU S M. Generation mechanism of gut-derived short chain fatty acids and its dietary regulation [J]. Journal of Food Science and Technology,2023,41(1):10-21.(in Chinese)

[22] 谭琰俐,宋学茹,庞雪莉. 发酵食品中异戊酸的风味贡献、生成机理及调控[J]. 食品与发酵工业,2025,51(12):404-413.
TANY L, SONGX R, PANGX L. Flavor contribution, formation mechanism, and regulation of isovaleric acid in fermented foods[J]. Food and Fermentation Industries, 2025,51(12):404-413.(in Chinese)

[23] LAU H C, ZHANG X, JI F F, et al. *Lactobacillus acidophilus* suppresses non-alcoholic fatty liver disease-associated hepatocellular carcinoma through producing valeric acid[J]. eBioMedicine,2024,100:104952.

[24] WU D T, AN L Y, LIU W, et al. *In vitro* fecal fermentation properties of polysaccharides from *Tremella fuciformis* and related modulation effects on gut microbiota[J]. Food Research International,2022,156:111185.

[25] MA L K, KEI N, YANG F, et al. *In vitro* fermentation characteristics of fungal polysaccharides derived from *Wolfiporia cocos* and their effect on human fecal microbiota[J]. Foods,2023,12(21):4014.

[26] 许欢怡,李泉岑,郑明锋,等. 银耳多糖的结构、功能性及应用研究进展[J]. 食品工业科技,2024,45(4):362-370.
XU H Y,LI Q C,ZHENG M F,et al. Research progress on structure, function and application of *Tremella fuciformis* polysaccharide[J]. Science and Technology of Food Industry,2024,45(4):362-370.(in Chinese)

[27] 戴一佳,赵亮. 益生菌对发酵乳品质影响的研究进展[J]. 食品工业科技,2024,45(8):388-396.
DAI Y J,ZHAO L. Research on the effect of probiotics on the quality of fermented milk [J]. Science and Technology of Food Industry,2024,45(8):388-396.(in Chinese)

[28] ZHANG J, XIAO Y, WANG H C, et al. Lactic acid bacteria-derived exopolysaccharide: formation, immuno-modulatory ability, health effects, and structure-function relationship[J]. Microbiological Research,2023,274:127432.

[29] WANG L, GU Y C, LV Z L. Processing properties of yogurt as affected by the EPS produced by *Leuconostoc mesenteroides* XR1[J]. International Journal of Food Science & Technology,2022,57(7):4076-4085.

(责任编辑:刘冬梅)