狗牯脑发酵茶的制备及功能特性

冯姚[1]，李琪美[1]，金元宝[2]，袁尔东[1*]
（1.华南理工大学食品科学与工程学院，广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室，广东广州 510640）
（2.吉安职业技术学院现代农业与食品学院，江西吉安 343006）

摘要：为促进低品质狗牯脑绿茶的高值化利用，该研究以狗牯脑夏暑茶为原料，通过食用菌固态发酵工艺，研究制备新型狗牯脑发酵茶，并对其感官品质、理化成分和体外活性进行分析。基于食用菌发酵产酶及多糖量，筛选出发酵狗牯脑绿茶的最适菌种为灰树花，经固态发酵制备得到狗牯脑发酵茶。分析显示，相较于狗牯脑绿茶，狗牯脑发酵茶的水浸出物、游离氨基酸、可溶性总糖和茶黄素含量显著增加，蛋白质和总酚含量显著下降。其中可溶性总糖增幅最大，达到 92.23%，其次是水浸出物，增幅达 39.54%，茶黄素含量也由 0.201%增加到 0.242%，茶多酚则由 108.64 mg g^{-1} 减少到 94.53 mg g^{-1}。感官审评及电子舌分析结果显示，狗牯脑发酵茶的涩味减弱，鲜味增强，整体滋味更趋醇厚鲜爽。狗牯脑发酵茶体外抗氧化活性比狗牯脑绿茶虽略有下降，但抑制 α-葡萄糖苷酶（IC_{50}=0.236 mg mL^{-1}）和胰脂肪酶（IC_{50}=0.524 mg mL^{-1}）作用显著增强，同时促进乳杆菌增殖的作用也有一定增强。该研究结果可为低值狗牯脑绿茶及其他低值茶叶的深加工和技术创新提供思路和参考。

关键词：狗牯脑茶；灰树花；发酵；感官品质；生物活性

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.8.0636

Preparation and Characteristics of Fermented Gougunao Tea

FENG Yao[1], LI Qimei[1], JIN Yuanbao[2], YUAN Erdong[1*]
(1.School of Food Science and Engineering, Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Product Safety, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)
(2.Modern Agriculture and Food College, Ji'an College, Ji'an 343006, China)

Abstract: In order to promote the high-value utilization of low-quality Gougunao green tea, this study was conducted to prepare a new type of Gougunao fermented tea using the solid-state fermentation process of edible fungi, with summer Gougunao green tea as the raw material. The sensory quality, physicochemical composition, and in vitro biological activity of the fermented tea were analyzed. Based on the enzyme production and polysaccharide production during the fermentation process, the most suitable strain for fermenting Gougunao green tea was selected as *Grifola frondosa*, and the fermented tea was produced using the solid-state fermentation method. The results showed that compared with the Gougunao green tea, the water leachate, free amino acids, total soluble sugars, and theaflavin content of the fermented tea significantly increased, while the protein and total phenol content decreased significantly. Among these, the total soluble sugars increased the most, reaching 92.23%, followed by water leachate, which increased by 39.54%, and the theaflavin content increased from 0.201% to 0.242%. Meanwhile, the total tea polyphenols decreased from 108.64 mg g^{-1} to 94.53 mg g^{-1}.Sensory evaluation and electronic tongue analysis revealed that the astringency of the fermented tea was reduced, and the freshness was enhanced, resulting in a more mellow and refreshing overall taste. In terms of in vitro antioxidant activity, the fermented tea exhibited slightly lower antioxidant capacity compared to the green tea, but it showed significantly enhanced inhibition of α-glucosidase (IC_{50}=0.236 mg mL^{-1}) and pancreatic lipase (IC_{50}=0.524 mg mL^{-1}), as well as a moderate promotion of *Lactobacillus* growth. The findings of this study provide valuable insights and references for the deep processing and technological innovation of low-value Gougunao green tea and other low-value tea products.

Key words: Gougunao tea; *Grifola frondosa*; fermentation; sensory quality; biological activity

我国是世界第一大茶叶生产国和消费大国。随着经济的持续增长和人民生活水平的稳步提升，消费者对茶叶

收稿日期：2025-05-08；修回日期：2025-07-31；接受日期：2025-08-08

基金项目：吉安市科技计划项目（20233-107626）

作者简介：冯姚（2000-），男，硕士研究生，研究方向：食品生物化学及功能性食品，E-mail：1356207698@qq.com

通讯作者：袁尔东（1975-），女，博士，副教授，研究方向：食品生物化学及功能性食品，E-mail：erdyuan@scut.edu.cn

品质的追求日益精进，低品质茶叶市场需求逐年萎缩。夏暑茶叶受生长周期和气候环境的双重影响，茶树碳氮代谢失衡，致使多酚类、酯型儿茶素等苦涩物质大量积累，而氨基酸和芳香类物质含量较低，导致夏暑茶滋味苦涩、香气寡淡，品质远不如春茶[1,2]。因此，这一品质缺陷直接导致夏暑茶在市场上的价格低廉、利润微薄，进而造成大量夏暑茶叶被弃采，引发严重的自然资源浪费和产业经济效益的流失。

近年来，食用菌发酵技术凭借其独特的生物转化优势，为低值茶叶的高值化利用开辟了新途径。食用菌在发酵过程中产生的丰富酶系，能够显著影响茶叶内含成分的组成与含量。例如，漆酶、纤维素酶、糖苷酶等酶类物质在发酵过程中催化茶叶中多酚、蛋白质、纤维素等大分子物质的分解与转化，从而改变茶叶的色泽、口感和香气[3]。此外，食用菌在发酵过程中还能通过菌丝体的生长自然嵌入茶叶基质，促进次生代谢产物（如多糖、萜类化合物、多酚等）的合成与积累，进一步丰富茶叶的化学成分，提升其功能特性[4]。蔡丽等[5]采用白参菌发酵普洱茶，研究发现粗老叶中的茶多酚含量由9.4%降到5.8%，游离氨基酸由3.2%下降到2.1%，咖啡碱由2.20%降到1.64%，儿茶素总量由 2.1%大幅降到 0.2%，发酵后粗老叶茶汤的燥舌感消失，涩味减弱，滋味甜纯滑口，汤色与口感均得到显著优化。刘亚兵等[6]将黑毛茶经灵芝菌发酵处理后，游离氨基酸总含量增加了 8.70 mg g^{-1}，茶多酚减少了0.9%，甜度由 11.12 增加到 14.36，苦涩度由 4.98 减少到 2.53。郑若男等[7]利用平菇对绿茶进行发酵，发酵后绿茶中的氨基酸含量、可溶性多糖含量以及水浸出物总量均有所提高，作为苦涩味主要来源的茶多酚含量则相应降低，发酵有效优化了绿茶的营养成分构成并改善整体滋味。因此，食用菌发酵不仅能有效改善夏暑茶纤维粗硬和多酚苦涩味的口感缺陷，同时食用菌活性多糖、茶黄素等活性成分的产生，也会给发酵后产品赋予更为丰富的感官品质和功能特性[8-11]。

狗牯脑茶是江西吉安的国家地理标志产品，以“形如钩、香如兰、味甘醇”的卓越品质闻名遐迩。据统计，全国每年占总产量 2/3 的夏秋茶鲜叶未被利用[12]。受限于技术落后、产业化程度低、产品单一等多方面因素，狗牯脑茶同样面临着大量夏季鲜叶弃采、资源利用率低下等产业痛点，茶叶利用率和综合经济效益与其品牌价值严重失衡。鉴于此，本文以狗牯脑夏暑茶为研究对象，系统开展食用菌固态发酵技术的应用探索。通过食用菌筛选、发酵工艺优化，深入分析发酵前后茶叶理化组分、感官品质和功能特性的动态变化，开发兼具茶叶和食用真菌优势的狗牯脑发酵茶。从而促进低品质狗牯脑茶的高值化利用，更为其他低值茶叶的深加工和技术创新提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

狗牯脑绿茶，产自江西吉安，为 2024 年 8 月采摘的夏季鲜叶（等级为统级），加工工艺：鲜叶→摊青→杀青→初揉→二青→复揉→整形提毫→干燥；没食子酸（≥98%）、DPPH、ABTS、*α*-葡萄糖苷酶（100 U mg^{-1}）、胰脂肪酶（猪源，3 000 U mg^{-1}）、棕榈酸对硝基苯酯（PNPP）、对硝基苯基-*β*-D-葡萄糖苷（PNPG）、阿卡波糖（≥98%）、奥利司他（≥98%），上海源叶生物科技有限公司；马铃薯葡萄糖琼脂（PDA）和液体培养基（PDB）、MRS 液体培养基，环凯生物有限公司；灰树花（*Grifola frondosa*）、竹荪（*Dictyophora indusiata*），广东省微生物保藏中心，保藏编号 5.463、5.538；白参菌（*Schizophyllum commune*），北京百欧博伟生物技术有限公司，保藏编号 bio-108961；鼠李糖乳杆菌（*Lactobacillus rhamnosus* CICC 23156）、植物乳杆菌（*Lactobacillus plantarum* CICC 23155）、嗜酸乳杆菌（*Lactobacillus acidophilus* CICC 23157），中国工业微生物菌种保藏管理中心；其他试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器设备

UV-1800 型紫外可见分光光度计，上海美谱达仪器有限公司；THZ-100 恒温培养摇床，上海一恒科学仪器有限公司；KLCZ-880A 型超净工作台，北京亚泰科隆仪器技术有限公司；FD-1A-50 冷冻干燥机，北京博医康实验仪器有限公司；HM-DN3 凯氏定氮仪，山东恒美电子科技有限公司；DHG-9140A 电热恒温鼓风干燥箱，上海申贤恒温设备厂；DSX-24L-I 高压蒸汽灭菌器，上海申安医疗器械厂；SA402B 电子舌，日本 INSENT 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 狗牯脑发酵茶制备

1.3.1.1 食用菌株筛选

在 PDA 培养基中央分别接入食用菌菌丝，30 ℃恒温培养至长满平板，传代 3 次后取 3 个平板边缘 0.5 cm^2 的菌块，接种至 100 mL PDB 培养基中，在 30 ℃、150 r min^{-1} 条件下振荡培养。取对数生长期内种子液 100 mL，滤出菌丝球，研磨均匀后，用无菌生理盐水定容至 50 mL，得到食用菌液。在狗牯脑绿茶中加入 50%水（*m/m*）混匀，121 ℃灭菌 45 min，冷却后接种 25%食用菌液（*V/m*），30 ℃恒温固态发酵，定期取样测定酶活及多糖含量。

取 1.5 g 茶样加入 15 mL 预冷 4 ℃的乙酸-乙酸钠缓冲液后研磨成匀浆，4 ℃浸提 2 h，8 000 r min^{-1} 离心 10 min，取上清液测定酶活，筛选出酶活较高的食用菌株。参考陈家俊[13]的方法检测内切葡聚糖酶（CMC 酶）、半纤维素酶酶活和 *β*-葡萄糖苷酶酶活，参考刘雨等[14]的方法检测漆酶酶活。

1.3.1.2 灰树花固态发酵制备狗牯脑发酵茶

筛选出灰树花为狗牯脑绿茶的最适发酵菌株。在狗牯脑绿茶中加入 50%水（*m/m*）混匀，121 ℃灭菌 45 min，冷却后接种 25%灰树花菌液（*V/m*），30 ℃恒温固态发酵 88 h，55 ℃烘干 12 h，得到狗牯脑发酵茶。狗牯脑绿茶对照组添加等量蒸馏水替代食用菌液，其余操作一致。

1.3.2 理化组分测定

水分含量：按照《GB 5009.3-2016 食品中水分的测定》测定；水浸出物含量：按照《GB/T 8305-2013 茶 水浸出物测定》进行测定；游离氨基酸总量：按照《GB/T 8314-2013 茶 游离氨基酸总量的测定》进行测定；多糖含量：取 1.5 g 茶样按 1:20 料液比沸水浴提取 30 min，加入 4 倍滤液体积的 95%乙醇于 4 ℃静置醇沉过夜，过滤取不溶物，用水复溶，定容至 50 mL 即得多糖待测液，采用苯酚-硫酸法测定[15]；可溶性总糖含量：采用苯酚-硫酸比色法测定；茶多酚总量：按照《GB/T 31740.2-2015 茶制品 第 2 部分：茶多酚》测定；茶黄素含量：系统比色法[16]；蛋白质含量：按照《GB 5009.5-2016 食品中蛋白质的测定》进行测定。

1.3.3 感官品质评价

1.3.3.1 感官审评

参照《GB/T 23776-2018 茶叶感官审评方法》进行评价，从外形、汤色、香气、滋味、叶底等因子进行评价，对应权重分别为 20%、15%、25%、30%、10%加权计算综合得分。

1.3.3.2 电子舌分析

按照《GB/T 23776-2018 茶叶感官审评方法》冲泡茶叶，取茶汤进行电子舌分析，测定酸味、苦味、鲜味、咸味、甜味、涩味、以及苦味回味、涩味回味、丰富性等味道。

1.3.4 体外生物活性评价

茶叶粉碎后过 60 目筛，按料液比 1:20 加水混匀，90 ℃浸提 30 min，浸提 3 次，合并提取液，60 ℃减压浓缩、冻干得到茶提取物，用于体外活性评价。

抗氧化活性：参考 Luan 等[17]的方法测定 DPPH 和 ABTS 自由基清除率；

抑制 *α*-葡萄糖苷酶：参考吴少锦[18]的方法测定；

抑制胰脂肪酶：参考卓思雨等[19]的方法；

益生特性：分别将四种乳杆菌冻存菌株（鼠李糖乳杆菌、植物乳杆菌、嗜酸乳杆菌、干酪乳杆菌）接种至 MRS 培养基（葡萄糖含量 20%），37 ℃厌氧培养 24 h，传代 3 次后，离心收集菌体，以无菌生理盐水洗涤并调整 OD_{600}=0.15±0.02 得到活化菌悬液。按照 1%接种量于不同浓度茶提取物配置的减糖 MRS 培养基（葡萄糖含量 5%）中，37 ℃厌氧培养 12 h，测定 600 nm 处吸光度，以不加茶提取物的减糖 MRS 培养基为对照组。

1.3.5 数据处理与统计分析

所有实验均重复 3 次，采用 SPSS 26.0 软件进行数据处理，采用单因素方差分析（ANOVA）并结合 Duncan 检验（P＜0.05）来评估样本间是否存在显著差异。采用 Graph Prism 10 和 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 狗牯脑绿茶发酵食用菌株筛选

本研究利用食用菌的生长发酵特性来对夏暑茶等低值茶进行深加工，通过分析食用菌发酵产酶（CMC 酶、*β*-

葡萄糖苷酶、半纤维素酶、漆酶）及多糖量，筛选出制备狗牯脑发酵茶的最适菌株。如图 1 所示，白参菌、灰树花、竹荪等 3 种食用菌在狗牯脑绿茶固态发酵过程中，四种酶活均呈现先上升后下降的趋势，反映了发酵过程中茶叶中食用菌可利用的营养成分逐渐减少。从酶活水平看，发酵期内白参菌和竹荪的 CMC 酶活均无显著差异（$P>0.05$），而灰树花的 CMC 酶活在发酵第 3 天显著高于白参菌和竹荪（$P<0.05$）；发酵期内，三株食用菌的半纤维素酶活差异均不显著（$P>0.05$）；β-葡萄糖苷酶活方面，灰树花在发酵第 3 天达到最高水平，且活性显著高于白参菌和竹荪（$P<0.05$）；三株食用菌的漆酶活性在发酵第 2~3 天达到最高，在发酵第 2 天，竹荪的漆酶活性显著高于灰树花（$P<0.05$），但在发酵第 3 天，二者的漆酶活性基本一致。综合考虑，灰树花发酵产酶酶活强度与持续性优于其他菌株，这对茶叶纤维结构降解和功能成分释放至关重要[3]。

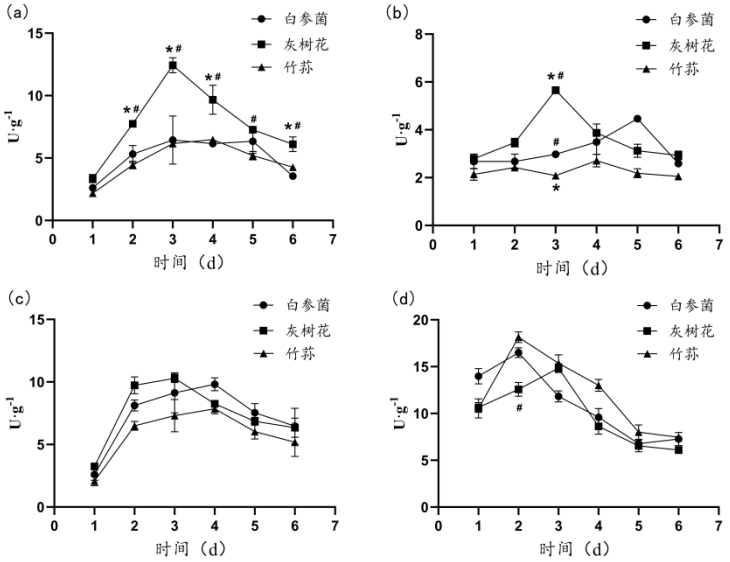

图 1 发酵过程中酶活变化情况

Fig.1 Changes of enzyme activity during fermentation

注：（a）CMC 酶活；（b）β-葡萄糖苷酶活；（c）半纤维素酶活；（d）漆酶酶活。*与白参菌组相比差异显著（$P<0.05$）；#与竹荪组相比差异显著（$P<0.05$）。

如图 2 所示，随发酵时间的增加，多糖含量均逐渐增加，但三组间并无显著性差异（$P>0.05$）。其中，灰树花组与竹荪组在第 3 天即达到较高水平并随后进入增长缓慢的平台期，说明二者能快速积累多糖，相比之下，白参菌在发酵前期的多糖含量增长较缓慢。综合考虑发酵过程中酶活和多糖产量，选取灰树花作为发酵狗牯脑绿茶的最适菌株。

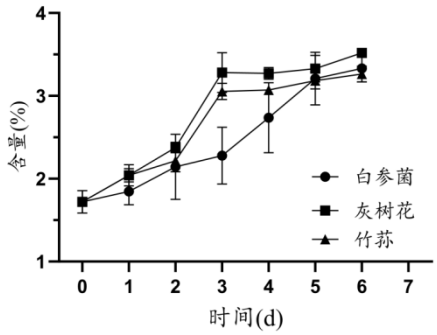

图 2 发酵过程中多糖含量变化

Fig.2 Changes of polysaccharide content during fermentation

2.2 狗牯脑发酵茶理化成分

如表 1 所示，与未发酵的狗牯脑绿茶相比，狗牯脑发酵茶的水浸出物、游离氨基酸、可溶性总糖和茶黄素含

量显著增加（$P<0.05$），蛋白质和总酚含量则显著下降（$P<0.05$）。其中，可溶性总糖含量增幅最为显著，达 92.23%；其次水浸出物含量增加 39.54%。该变化机制主要涉及两方面：其一，灰树花菌分泌的纤维素酶类可高效催化茶叶细胞壁的降解，促进细胞内含物的溶出[20]，同时大分子多糖类被水解为小分子糖[21]；其二，灰树花本身的次级代谢产物也在菌丝体生长过程中自然嵌入茶叶基质，而灰树花菌丝体活性多糖更是发酵茶的重要可溶性多糖成分和活性组分[22]。狗牯脑发酵茶中茶黄素含量由发酵前的 0.201%增加到 0.242%，增幅达 20.40%，而茶多酚则降低约 13%。这一变化可归因于灰树花分泌的漆酶催化茶多酚氧化聚合所致[23]。此外，狗牯脑发酵茶的蛋白含量显著下降，而游离氨基酸总量显著上升，说明发酵过程中蛋白质被分解为小分子氨基酸。上述灰树花发酵引起的茶叶内含物质的动态变化，为狗牯脑发酵茶独特的感官品质形成和生物活性的提升奠定了物质基础。

表 1 狗牯脑绿茶和狗牯脑发酵茶理化成分对比（以干基计）

Table 1 The content of Gougunao green tea and fermented tea ingredients

成分	狗牯脑绿茶	狗牯脑发酵茶
水浸出物含量（%）	31.44±1.61	43.87±1.89*
游离氨基酸总量（mg g^{-1}）	22.85±0.97	28.38±0.95*
可溶性总糖含量（mg g^{-1}）	30.90±2.58	59.40±3.36**
茶多酚（mg g^{-1}）	108.64±3.51	94.53±3.13*
茶黄素（%）	0.201±0.003	0.242±0.004**
蛋白质（%）	18.68±0.51	16.95±0.38*

注：*表示两组之间具有显著性差异，*$P<0.01$，**$P<0.001$。

2.3 感官品质分析

2.3.1 感官审评结果

表 2 狗牯脑绿茶和狗牯脑发酵茶的感官品质特征

Table 2 Sensory quality traits of Gougunao green tea and fermented tea

因素	狗牯脑绿茶	狗牯脑发酵茶
外形	条索紧结，翠绿显毫	色泽不均，团状
汤色	黄绿明亮，微浑	橙红透亮
香气	清香持久，浓郁	甜香显著，附带菌味
滋味	鲜爽但涩感明显	醇厚甘润
叶底	嫩绿匀整，柔软度高	稍有碎末，不匀整

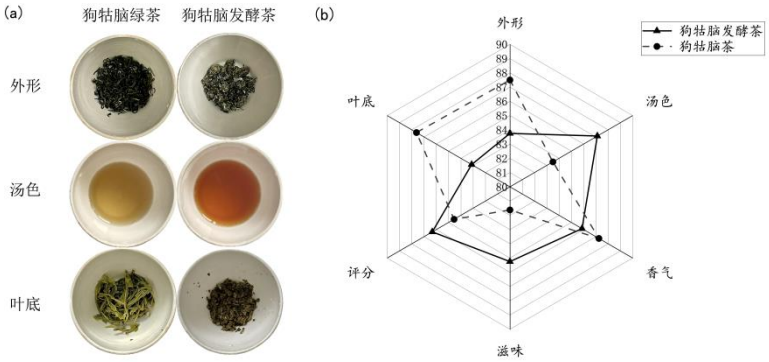

图 3 传统感官审评结果

Fig.3 Result of traditional sensory evaluation

注：（a）外观和形态特征；（b）感官审评雷达图。

如表 2 和图 3 所示，两种茶叶呈现出不同的感官特性。狗牯脑绿茶在外形和叶底方面表现更佳，展现出未发酵茶叶完好的物理结构；发酵茶外形呈团状、叶底不匀整，主要是因为菌丝生长和发酵导致的纤维变性现象[24]。香气方面，狗牯脑绿茶清新浓郁而狗牯脑发酵茶香甜显著，附带菌味。滋味方面，狗牯脑绿茶鲜爽但涩感明显，

狗牯脑发酵茶苦涩味减弱，增加了醇厚度和回甘感。汤色方面，狗牯脑发酵茶呈橙红色，狗牯脑绿茶呈黄绿色。发酵过程中由于漆酶等多酚氧化酶的作用，促进了茶多酚转化为茶黄素等茶色素类物质，使茶汤从原来的黄绿色变为透亮的橙红色，同时有效降低了茶汤的苦涩感，而显著提升了醇厚度和回甘特性[10]，最终形成形成其独特的感官风味特征。

2.3.2 电子舌分析结果

电子舌传感器响应值如图 4 所示，涩味和涩味回味的传感器响应值下降，表明发酵有效减轻了茶汤的收敛感；鲜味和丰富性的传感器响应值增加，表明茶汤滋味变得更加鲜爽、醇厚和饱满。发酵茶的涩味减弱可能主要源于茶多酚含量的降低，鲜味增强主要得益于游离氨基酸含量的升高。此外，发酵茶的水浸出物含量和可溶性总糖含量的显著升高，可能是导致其茶汤丰富性增加的重要原因。刘亚兵等[6]利用灵芝菌发酵黑毛茶的研究中电子舌检测显示茶叶甜味提高，苦涩味降低，该趋势与本试验结果相近。

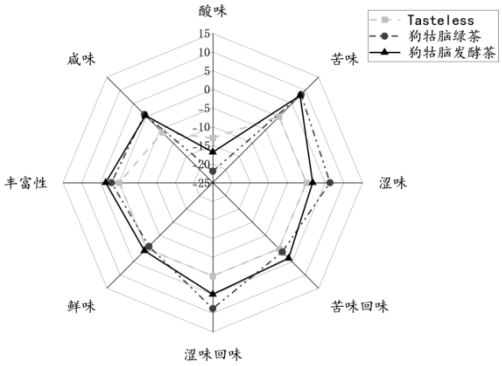

图 4 电子舌分析结果雷达图

Fig.4 Radar plot of analysis result by electronic tongue

2.4 体外抗氧化活性

通过 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力来评价体外抗氧化活性，以维生素 C（Vc）为阳性对照。如图 5 所示，在 0.25~2.0 mg mL^{-1} 质量浓度范围内，狗牯脑绿茶和狗牯脑发酵茶均呈现出较好的清除 DPPH 和 ABTS 自由基的活性，清除率均在 70%以上，且表现出明显的剂量依赖效应。在质量浓度为 2.0 mg mL^{-1} 时，狗牯脑绿茶的 DPPH 和 ABTS 自由基清除率最高，分别达到 92.85%和 84.83%，前者与阳性对照 Vc 组的差异不显著（P＞0.05），后者显著低于 Vc 组（P＜0.05）；狗牯脑发酵茶的 DPPH 和 ABTS 自由基清除率最高分别达到 85.5%和 81.21%，显著低于狗牯脑绿茶组和 Vc 组（P＜0.05）。狗牯脑发酵茶的抗氧化活性明显低于狗牯脑绿茶，原因主要在于发酵茶中主要的抗氧化活性成分多酚含量显著降低[25]。

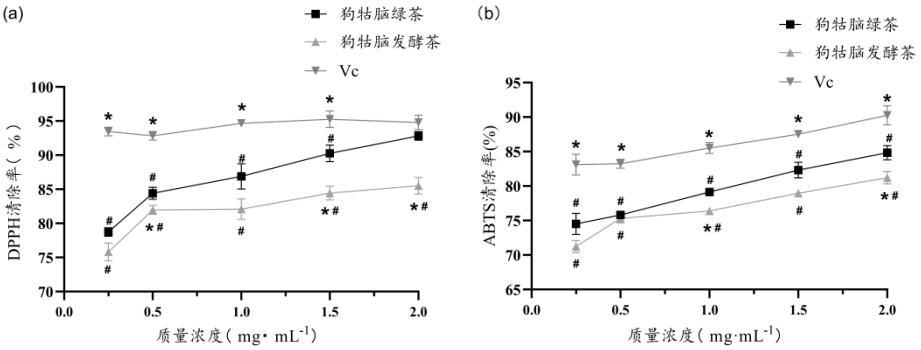

图 5 体外抗氧化活性

Fig.5 In vitro antioxidant activity

注：在同一浓度水平下，*表示与绿茶组相比，差异显著（P<0.05）；#表示与 Vc 组相比，差异显著（P<0.05）。

2.5 抑制 α-葡萄糖苷酶活性

抑制 α-葡萄糖苷酶能降低小肠中多糖、低聚糖等的水解，降低葡萄糖的吸收速率，从而达到降低餐后血糖的目的[26]。阿卡波糖是常见降糖药物，用作阳性对照。如图 6 所示，在 0.05~2.0 mg mL^{-1} 质量浓度范围内，狗牯脑发酵茶和狗牯脑绿茶均呈现出较好的抑制 α-葡萄糖苷酶作用，并表现出明显的剂量依赖效应。且在质量浓度为 0.25 和 0.5 mg mL^{-1} 时，狗牯脑发酵茶抑制 α-葡萄糖苷酶的作用显著强于狗牯脑绿茶（P＜0.05）。阿卡波糖、狗牯脑发酵茶和狗牯脑绿茶对 α-葡萄糖苷酶抑制率的 IC_{50} 分别为 0.037、0.236 和 0.289 mg mL^{-1}，其中狗牯脑发酵茶的 IC_{50} 值显著高于阿卡波糖且显著低于狗牯脑绿茶（P＜0.05）。推测，发酵茶中的茶黄素等茶色素物质易与 α-葡萄糖苷酶活性中心结合，而具有更强的抑制活性[27]。此外，灰树花次生代谢物中的活性成分也对 α-葡萄糖苷酶具有抑制作用。鲁梅芳等[28]研究证实，灰树花胞外多糖主要成分 GFP-1 对 α-葡萄糖苷酶酶活有非竞争性抑制作用。Matsuura 等[29]从灰树花子实体里提取出的海藻糖同样具有 α-葡萄糖苷酶抑制剂的活性。此外，灰树花中含有的吡咯生物碱能与底物竞争 α-葡萄糖苷酶活性位点，进而抑制酶促反应的进行[30,31]。因此，狗牯脑发酵茶中高含量的茶黄素类物质，以及灰树花代谢产生的多种活性成分，可能是协同作用形成了其对 α-葡萄糖苷酶更强的抑制效果。

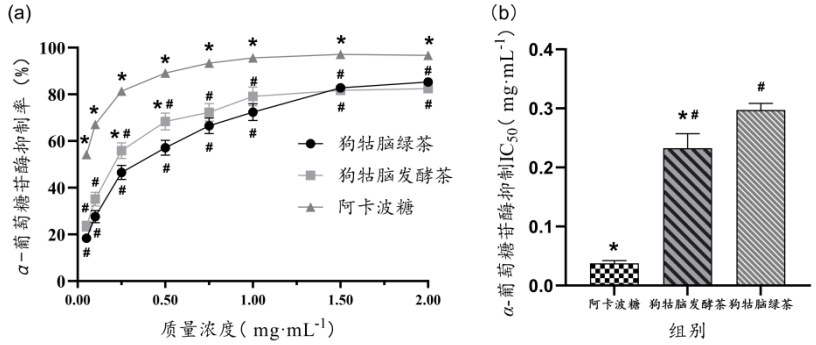

图 6 抑制 α-葡萄糖苷酶活性

Fig.6 Inhibitory effect on α-glucosidase

注：同一浓度水平下，*表示与绿茶组相比差异显著（P<0.05）；#表示与阿卡波糖组相比差异显著（P<0.05）。

2.6 抑制胰脂肪酶活性

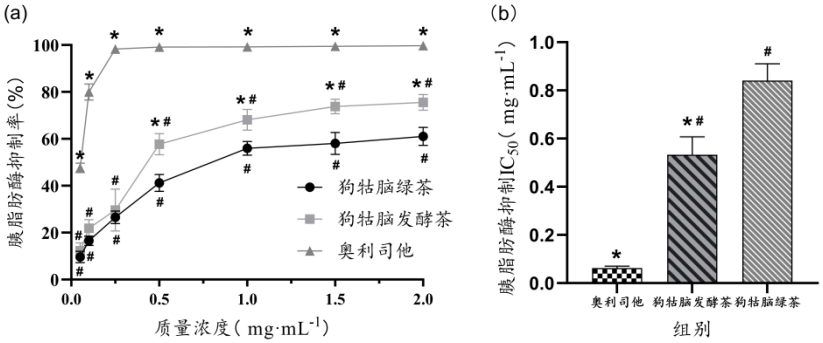

图 7 抑制胰脂肪酶活性

Fig.7 Inhibitory effect on pancreatic lipase

注：同一浓度水平下，*表示与绿茶组相比差异显著（P<0.05）；#表示与奥利司他组相比差异显著（P<0.05）。

抑制胰脂肪酶能减缓机体对脂肪的吸收速率，减缓肠道对脂肪的吸收，降低甘油三酯在体内的积累，从而降低血脂水平[32]。奥利司他是常见的降血脂药物，用作阳性对照。如图 7 所示，在 0.05~2.0 mg mL^{-1} 质量浓度范围内，狗牯脑发酵茶和狗牯脑绿茶均对胰脂肪酶显示出良好的抑制作用，且呈剂量依赖性。且在 0.5~2.0 mg mL^{-1} 范围内，狗牯脑发酵茶对胰脂肪酶的抑制作用显著强于狗牯脑绿茶（P＜0.05）。狗牯脑发酵茶对胰脂肪酶抑制率的 IC_{50} 为 0.524 mg mL^{-1}，显著低于狗牯脑绿茶（0.821 mg mL^{-1}）（P＜0.05），但显著高于降血脂药物奥利司他（0.058 mg mL^{-1}）（P＜0.05）。茶叶中的多种活性成分（茶黄素、茶褐素、茶多糖及茶多酚类成分等）都被发现具有良好的抑制脂肪酶活性。Glisan 等[33]研究认为，茶黄素的没食子酰基可与胰脂肪酶活性中心附近 Asn263 和 Asp206 形成氢键，干扰催化残基 His264 的质子化状态，而非竞争性抑制脂肪酶。另一方面，灰树花活性成分也

能很好地抑制脂肪酸酶，其乙酸乙酯提取物中的野靛黄素和矢车菊素-3-O-芸香糖苷被认为是主要活性成分[34]。因此，狗牯脑发酵茶可能通过茶及灰树花中多种活性成分协同作用，而实现对胰脂肪酶的抑制作用。然而，其主要活性成分与具体作用机制有待于进一步研究。

2.7 促进乳杆菌增殖

如图 8 所示，与未添加茶的空白对照组相比，狗牯脑发酵茶和狗牯脑绿茶均呈现良好的益生特性。在 0.25~4 mg mL^{-1} 范围内，两种茶均能有效促进 4 种乳杆菌的生长，表明它们在低糖环境下可为乳杆菌提供营养或生长因子。总体而言，绿茶和发酵茶对乳杆菌生长的促进作用均随浓度增加呈现先上升后下降的趋势。有研究指出，酚类物质是良好的益生元[35,36]，但当茶多酚浓度过高时，其渗透压等负面效应渐增，破坏细菌的细胞壁和细胞膜完整性，从而导致整体促进效果减弱[37,38]。此外，狗牯脑发酵茶促进乳杆菌增殖的作用总体优于狗牯脑绿茶，尤其在对嗜酸乳杆菌和植物乳杆菌的促进作用上的差异较为明显。可见，发酵茶的水浸出物、游离氨基酸、可溶性总糖等含量较高，能给乳杆菌生长提供比绿茶更多的营养成分。

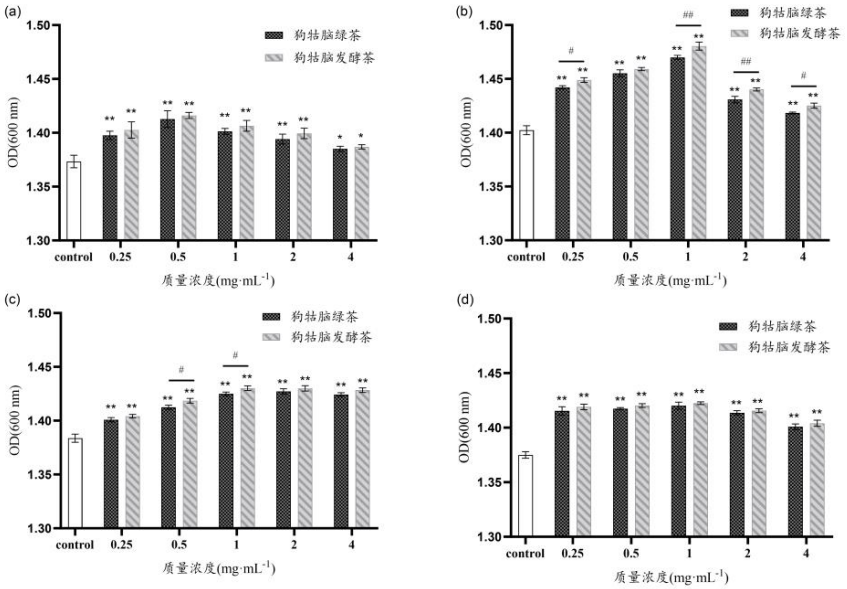

图 8 对 4 种乳杆菌生长的影响

Fig.8 Effect on the growth of lactobacillus

注：（a）鼠李糖乳杆菌；（b）嗜酸乳杆菌；（c）植物乳杆菌；（d）干酪乳杆菌。*表示与空白组相比具有显著性差异，*P<0.05，**P<0.01；#表示与狗牯脑绿茶相比具有显著性差异，#P<0.05，##P<0.01。

3 结论

本研究以低值夏暑季狗牯脑绿茶为原料，通过灰树花固态发酵制备了新型狗牯脑发酵茶。经过发酵后茶叶内含物质含量发生显著变化，其中可溶性总糖含量增幅最大，由 30.90 mg g^{-1} 增加至 59.40 mg g^{-1}，其次是水浸出物由31.44%增加至43.87%，茶黄素含量也由0.201%增加至0.242%，茶多酚含量则由108.64 mg g^{-1}降低至94.53 mg g^{-1}。发酵茶的感官品质特征也发生了显著改变，其苦涩感相对较弱，鲜味与醇厚感显著增强，茶汤色泽由黄绿转为橙红透亮，形成其独特的风味特征。发酵茶体外抗氧化活性有所降低，但对 α-葡萄糖苷酶和胰脂肪酶的抑制作用显著增强（IC_{50} 分别为 0.236 mg mL^{-1} 和 0.524 mg mL^{-1}），同时促进乳杆菌增殖作用也得到有效提升。本研究成果可为低值茶叶的深加工和高值化利用提供一定的参考，为茶叶产业的技术创新和可持续发展提供思路。

参考文献

[1] WEN L H, SUN L L, CHEN R H, et al. Metabolome and microbiome analysis to study the flavor of summer black tea improved by stuck fermentation [J]. Foods, 2023, 12(18): 3414.

[2] XU Y Q, ZHANG Y N, CHEN J X, et al. Quantitative analyses of the bitterness and astringency of catechins from green tea [J]. Food Chemistry, 2018, 258: 16-24.

[3] 龚玉雷,魏春,王芝彪,等.生物酶在茶叶提取加工技术中的应用研究[J].茶叶科学,2013,33(4):311-321.

[4] 高佳佳.灵芝菌和红曲霉及红茶菌混合发酵红茶的工艺研究[D].杭州:浙江工业大学,2014

[5] 蔡丽,陈林波,浦绍柳,等.白参菌发酵固态普洱茶技术与品质特征[J].中国农学通报,2018,34(19):133-137.

[6] 刘亚兵,戴宇樵,王敏,等.夏秋灵芝菌茶的制备及内含物质分析研究[J].食品安全质量检测学报,2023,14(6):319-328.

[7] 郑若男,陈晓英,林晨.平菇发酵茶提高绿茶品质研究[J].福建农业科技,2016,9:36-39.

[8] LIU X Y, HASAN K M F, WEI S F. Immunological regulation, effects, extraction mechanisms, healthy utilization, and bioactivity of edible fungi: A comprehensive review [J]. Journal of Food Process Engineering, 2022, 45(4): e13970.

[9] ZHAO X, YAN F, LI X S, et al. A systematic review of tea pigments: Prevention of major diseases, protection of organs, and potential mechanisms and applications [J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(11): 6830-6844.

[10] HUA J J, WANG H J, JIANG Y W, et al. Influence of enzyme source and catechins on theaflavins formation during *in vitro* liquid-state fermentation [J]. LWT, 2021, 139: 110291.

[11] 宛晓春.茶叶生物化学[M].北京,中国农业出版社,2003.

[12] 聂永昭,郭文琼,梁小金.遂川县“狗牯脑”茶产业发展研究[J].南方农机,2021,52(3):47-48,51.

[13] 陈家俊.绿色木霉发酵对茶渣膳食纤维的理化性质与降血糖功能的影响[D].南昌:南昌大学,2022.

[14] 刘雨,于涛,张宇鑫,等.灵芝漆酶在黑曲霉中的分泌表达及性质研究[J].食品工业科技,2023,44(13):119-126.

[15] 王海侠,吴云,时维静,等.白茅根多糖的提取与含量测定[J].中国中医药信息杂志,2010,17(2):55-57.

[16] 张湘琳,凌智辉,胡维霞,等.不同温度热风萎凋对红茶萎凋叶及成茶品质的影响[J].茶叶科学,2024,44(3):483-492.

[17] LUAN X X, FENG M Q, SUN J. Effect of Lactobacillus plantarum on antioxidant activity in fermented sausage [J]. Food Research International, 2021, 144: 110351.

[18] 吴少锦.青钱柳非水溶性提取物体外降糖活性研究[D].贵阳:贵州师范大学,2018.

[19] 卓思雨,梁颖康,欧成成,等.南瓜籽饼粕可溶性膳食纤维的提取及其结构与功能特性分析[J].食品工业科技,2025,46(18):272-282.

[20] XU X Q, LIU Y, PAN C L, et al. Antioxidant and immunomodulatory activities of polysaccharides from fermented wheat products of *Grifola frondosa*: In vitro methods [J]. International Journal of Food Science, 2023, 13: 3820276.

[21] VEERESH J, WU J C. Microbial cellulases: Engineering, production and applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 33: 188-203.

[22] 陈国广,孟蕾,孔毅,等.灰树花子实体多糖中 β-葡萄糖含量的酶法测定[J].时珍国医国药,2006,11:2199-2200.

[23] LI W, CHEN S X, LIU Y Q, et al. Co-immobilization of laccase-mediator system to catalyze the synthesis of theaflavins from tea polyphenols [J]. Results in Engineering, 2024, 22: 102062.

[24] SI J Y, YANG C R, MA W J, et al. Screen of high efficiency cellulose degrading strains and effects on tea residues dietary fiber modification: Structural properties and adsorption capacities [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 220: 337-347.

[25] 林星辰.茶叶中多酚氧化酶的性质及其在茶叶加工中的作用[J].福建茶叶,2024,46(9):32-34.

[26] 薛昕,姜丽丽,李晶,等.中药材水提物对 α-葡萄糖苷酶的抑制作用研究[J].实用药物与临床,2025,28(2):121-126.

[27] TOSHIRO M, TAKAISHI T, SATOMI T, et al. α-glucosidase inhibitory profile of catechins and theaflavins [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(1): 99-105.

[28] 鲁梅芳,金玉妍,曹小红,等.灰树花胞外多糖主要成分 GFP-1 对 α-葡萄糖苷酶的抑制作用[J].中国新药杂志,2009,18(23):2250-2254.

[29] HIDEYUKI M, CHIKAKO A, MASANORI K, et al. Alpha-glucosidase inhibitor from the seeds of balsam pear (*Momordica charantia*) and the fruit bodies of *Grifola frondosa* [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2002, 66(7): 1576-1578.

[30] SU C H, LU T M, LAI M N, et al. Inhibitory potential of *Grifola frondosa* bioactive fractions on α-amylase and α-glucosidase for management of hyperglycemia [J]. Biotechnology and Applied Biochemistry, 2013, 60(4): 446-452.

[31] CHEN S D, YONG T Q, XIAO C, et al. Pyrrole alkaloids and ergosterols from *Grifola frondosa* exert anti-α-glucosidase and anti-proliferative activities [J]. Journal of Functional Foods, 2018, 43: 196-205.

[32] FOREST R, LINDA P. Hydrolysis of triglycerides in cream using porcine pancreatic lipase [J]. Journal of Chemical Education, 2020, 97(12): 4438-4444.

[33] SHANNON L G, KIMBERLY A G, NEELA H Y, et al. Inhibition of pancreatic lipase by black tea theaflavins: Comparative enzymology and *in silico* modeling studies [J]. Food Chemistry, 2017, 216: 296-300.

[34] 周文斌,洪家丽,李路,等.灰树花中改善脂质代谢活性组分的筛选及其提取工艺优化[J].中国食品学报,2020,20(2):145-153.

[35] ÓSCAR A R R, CARLOS G F, ANA R Q C, et al. Growth of *Lactiplantibacillus plantarum* BG112 in batch and continuous culture with *Camellia sinensis* as prebiotic [J]. Fermentation, 2024, 10(9): 487.

[36] LIU Z B, JEAN P V, WOUTER J C D B. Tea phenolics as prebiotics [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 127: 156-168.

[37] LINDA P R, ELŻBIETA K. Mutual influence of polyphenols and *Lactobacillus* spp. bacteria in food: a review [J]. European Food Research and Technology, 2021, 247(1): 9-24.

[38] PASQUALE F, MARCO G, MARIA D A, et al. Hydroxycinnamic acids used as external acceptors of electrons: an energetic advantage for strictly heterofermentative lactic acid bacteria [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2014, 80(24): 7574-7582.