DOI:10.12441/spyswjs.20250220001 [文章编号] 1673-1689(2026)05-0104-09

天麻液混菌发酵工艺优化及品质特性分析

陈晓芳[1,2] 王 辉[3,4*] 罗婧文[3,4]

(1. 毕节医学高等专科学校医学技术系,贵州 毕节 551700; 2. 毕节市健康产业重点实验室,贵州 毕节 551700; 3. 贵州省农科院食品加工研究所,贵州 贵阳 550025; 4. 贵州省农业生物技术重点实验室,贵州 贵阳 550025)

摘要:【目的】解决单菌发酵天麻(*Gastrodie elata*)液营养及感官品质较差的问题,探究混菌发酵对天麻液营养品质提升及风味改善的影响。**【方法】**筛选能改善天麻液风味的菌株,优化混菌发酵工艺,比较混菌与单菌发酵天麻液的营养及风味品质差异。**【结果】**优化后工艺为:8种适宜菌(戚海鲜魏斯氏菌、香肠乳杆菌、植物乳植杆菌、短乳杆菌、罗伊氏粘液乳杆菌、戊糖片球菌、酸乳球菌和粪肠球菌)等比例混合发酵,发酵时间3 d,接种体积分数2.25%,发酵温度37 ℃。混菌发酵天麻液的红黄度增加,总酸质量浓度(4.81±0.39) g/mL,黄酮质量浓度(1.28±0.03) mg/mL。与对照组相比,DPPH自由基清除率提升47.96%,显著优于单菌发酵。天麻素及对羟基苯甲醇质量浓度分别为(434.53±14.11) μg/mL和(289.94±0.11) μg/mL,多酚质量浓度降低6.70%,可溶性固形物质量分数降低,显著优于部分单菌发酵。电子鼻分析发现,发酵天麻液的W1W及W5S传感器响应值降低,主要异味成分为硫化物、萜类化合物和氮氧化合物,混菌发酵对异味的协调效果更佳,与感官评价结果一致。**【结论】**混菌发酵具有协同产酸作用,天麻液中多酚及黄酮保留率较高,抗氧化活性增强,风味品质更好,具有推广应用价值。

关键词:天麻;混菌;发酵;工艺优化;品质分析

Process Optimization of *Gastrodia elata* Fermentation by Mixed Strains and Quality Characterization

CHEN Xiaofang[1,2] *WANG Hui*[3,4*] *LUO Jingwen*[3,4]

(1. Department of Medical Technology, Bijie Medical College, Bijie 551700, China; 2. Bijie Key Laboratory for Health Industry, Bijie 551700, China; 3. Institute of Food Processing, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550025, China; 4. Guizhou Key Laboratory of Agricultural Biotechnology, Guiyang 550025, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to solve the issue of poor nutritional and sensory quality of *Gastrodia elata* fermented by single strains, this study explored the improving effects of mixed strain fermentation on the nutritional quality and flavor of *Gastrodia elata*. [**Method**] Strains that could improve the flavor of *Gastrodia elata* liquid were screened, and the mixed strain fermentation process was optimized. The nutritional and flavor quality were compared between the *Gastrodia elata* liquids fermented by mixed strains and single strains. [**Result**] The optimized process was as follows: eight suitable strains (*Weissella halotolerans*, *Lactobacillus farciminis*, *Lactiplantibacillus plantarum*, *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus mucosae reuteri*, *Pediococcus pentosaceus*, *Lactococcus acidophilus*, and *Enterococcus faecalis*) were mixed in equal proportions, fermentation for 3 d, an inoculation volume fraction of 2.25%, and a fermentation temperature of 37 ℃. The red-yellow degree of the *Gastrodia elata* liquid fermented by

基金项目:毕节市健康产业重点实验室开发项目(毕健重字BJZDSYS[2024]7号);毕节市科技创新平台及人才团队项目(毕科合[2023]66号);毕节医学高等专科学校校级科研团队项目(BJYZXT202401);贵州省农业科学院揭榜挂帅项目(黔农科JBGS(2024)04号)。

通信作者:王辉(1989—),男,博士,副研究员,硕士研究生导师,主要从事食品功能与加工研究。E-mail:wanghui880101@163.com

收稿日期:2025-02-20 **修回日期:**2025-04-12

mixed strains increased, the mass concentration of total acids was (4.81±0.39) g/mL and the mixed strain fermentation group showed the mass concentration of flavonoids (1.28±0.03) mg/mL. Compared with the control group, the DPPH free radical scavenging rate increasing by 47.96%, being significantly better than single strain fermentation. The mass concentrations of gastrodin and *p*-hydroxybenzyl alcohol were (434.53±14.11) μg/mL and (289.94±0.11) μg/mL, respectively. The mass concentration of polyphenols decreased by 6.70%, and that of soluble solids also decreased. The data indicated that mixed strain fermentation outperformed single strain fermentation. The analysis of the fermented *Gastrodia elata* liquid by an electronic nose showed that the response values of the W1W and W5S sensors decreased. The main off-flavor components were sulfides, terpenes, and nitrogen oxides, and the coordination effect of mixed strain fermentation on off-flavors was better, which was consistent with the results of sensory evaluation. [**Conclusion**] The mixed strain fermentation has a synergistic acid production effect, producing the *Gastrodia elata* liquid with a relatively high retention rate of polyphenols and flavonoids, an enhanced antioxidant activity, and improved flavor quality and demonstrating the value of popularization and application.

Keywords: *Gastrodia elata*; mixed strains; fermentation; process optimization; quality analysis

天麻（*Gastrodia elata*）为兰科植物天麻的干燥块茎[1]。现代药理学研究表明，其具有镇痛、抗癫痫、抗惊厥、改善睡眠及记忆等功效[2-3]。2023年11月，国家卫生健康委和国家市场监督管理总局联合发布公告，正式将天麻纳入《按照传统既是食品又是中药材的物质目录》，以期充分开发天麻资源，促进乡村振兴和天麻产业的发展[4]，此举也推动了以天麻为主要原料的食品开发进程[5]。但天麻自身的“马尿”异味对产品感官品质影响较大[6]，相较于蒸制、水煮等处理方式，发酵处理对风味的改善效果最为显著[7]。

发酵食品是人类饮食文化的重要组成部分，微生物的生长代谢可促进食品成分转化，进而改善其感官品质及贮藏特性[8]。有研究者将发酵技术应用于天麻品质改善，采用乳酸菌、红茶菌及酵素发酵剂等发酵天麻液，虽能在一定程度上改善风味[9]并保留营养成分[10]，但采用单菌发酵对天麻风味改善程度有限。混菌发酵在提升产品综合品质方面展现出优势，如在苹果酒中的应用使其感官及营养品质均得到极大提升[11]。红茶菌发酵天麻液风味品质优异，但其属于自然混菌动态发酵，此类特定菌群组合在天麻液风味改善及品质提升中的应用鲜有报道。混菌发酵技术可模拟传统发酵食品中微生物参与的动态过程[12]是当前重要的研究方向[13]。

以作者所在实验室自有菌种为基础，筛选适宜发酵天麻的菌株，优化混菌发酵工艺，并对发酵天麻液进行品质特性分析，旨在为混菌发酵技术在天麻液风味改善及品质提升中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料与试剂

新鲜乌天麻：毕节市中药研究所；菌种：作者所在实验室保藏；天麻素标准品：优级纯，成都曼斯特生物科技有限公司；对羟基苯甲醇标准品：优级纯，上海源叶生物科技有限公司；芦丁、没食子酸标准品：均为优级纯，天津市科密欧化学试剂有限公司；乙腈、磷酸、乙醇、硝酸钠、氢氧化钠、亚硝酸钠、硝酸铝：均为分析纯，天津市富宇精细化工有限公司；DPPH自由基清除能力测定试剂盒：南京建成生物工程研究所。

1.1.2 仪器与设备

高压灭菌锅：SX-700型，日本TOMY公司；恒温恒湿培养箱：DHP型，上海跃进医疗器械有限公司；高效液相色谱仪：Angilent 1260型，美国安捷伦公司；超净工作台：SW-CJ型，苏州安泰空气技术有限公司；台式高速离心机：TG-18W型，济南爱来宝仪器设备有限公司；紫外-可见分光光度计：UV-8000型，美国赛默飞世尔科技有限公司；色差仪：D25NC型，上海信联创作电子有限公司；折光仪：TD-32型，上海力辰仪器科技有限公司；电子鼻：PEN3型，德国AIRSENSE公司。

1.2 方法

1.2.1 菌种活化

使用无菌接种环分别取甘油管中保存的乳酸

菌，接种于 20 mL MRS 肉汤培养基中，于 37 ℃、150 r/min 条件下培养 24~48 h。将菌体培养液于 4 ℃、7 500 r/min 离心 3 min，收集菌体。用等体积无菌蒸馏水重悬菌体并离心，重复洗涤 3 次。用 5~10 mL 无菌生理盐水重悬菌体，调整菌体浓度至 1×10^8~1×10^9 CFU/mL，备用。

1.2.2 发酵天麻液的制备

称取 1 g 天麻干粉，加入纯净水定容至 15 mL。随后添加 1.5 g 白砂糖、0.3 g 脱脂乳粉，调节 pH 至 4.6。分别加入 0.02 g 纤维素酶和 0.02 g 淀粉酶进行酶解。酶解结束后将体系灭菌，接种活化后的菌液进行发酵。发酵结束后过滤，即得天麻酵素成品。

1.2.3 感官评价

招募 20 名经过培训且具有相关评价经验的感官评价员（男女各 10 名，其中 20~30 岁 10 人，30~40 岁 5 人，40~50 岁 5 人）组成评价小组，依据表 1 所示的感官评价标准对样品进行评分。

表 1 感官评价表

Table 1 Sensory evaluation criteria

评价指标	评价标准	评分/分
色泽	清亮透明，呈淡黄色至浅棕色，色泽均匀一致	14~20
	稍有浑浊，色泽基本均匀，但颜色略深或略浅	7~13
	明显浑浊，色泽不均匀，出现明显偏色或异色	<7
气味	天麻气味很淡或几乎无，伴随发酵产生的宜人酵香，气味协调、纯正	14~20
	天麻气味较淡，酵香不明显，稍有异味（如轻微刺鼻等）	7~13
	具有明显的天麻特有气味，或异味明显（刺鼻、腐臭等），气味不协调	<7
口感	口感醇厚，回味悠长	14~20
	口感较单薄，回味较短	7~13
	口感粗糙，有不良后味	<7
滋味	几乎尝不出天麻味，酸甜适中	14~20
	天麻味相对较淡，酸甜度稍不平衡	7~13
	天麻味浓郁，酸甜度过高或过低	<7
外观形态	液体均匀，无沉淀、分层或悬浮物等现象	14~20
	有少量沉淀或轻微分层，但摇晃后可基本恢复均匀	7~13
	沉淀较多、分层明显，摇晃后也难以恢复均匀，有明显悬浮物	<7

1.2.4 发酵性能测定

分别取发酵 0、1、2、3、4、5、6 d 的天麻发酵液样品，参照 GB 4789.35—2023《食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验》的方法，将样品适当稀释后，涂布于乳酸菌专用 MRS 琼脂培养基上，于适宜条件下培养，计数乳酸菌活菌数。

1.2.5 天麻素及对羟基苯甲醇的测定

参照文献[14]的方法并稍加调整。取 2 mL 发酵天麻液样品，经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后，置于进样瓶中待测。色谱条件为：采用岛津 ODS-3 色谱柱，流动相为乙腈与体积分数 0.05% 磷酸水溶液，体积比 3∶97，柱温 30 ℃，检测波长 220 nm，流量 0.6 mL/min，进样量 10 μL。

标准溶液配制及标准曲线绘制：精确称取干燥至恒质量的天麻素标准品 20.0 mg，用适量流动相溶解并定容至 1 mL，得到质量浓度为 20.0 mg/mL 的天麻素标准储备液。精确称取对羟基苯甲醇标准品 100.0 mg，加适量流动相溶解并定容至 2.0 mL。取此溶液 1.0 mL，用流动相稀释并定容至 2.5 mL，得到质量浓度为 20.0 mg/mL 的对羟基苯甲醇标准储备液。将上述 2 种标准储备液混合，用流动相逐级稀释，分别配制成质量浓度为 25、50、100、500、1 000、5 000 μg/mL 的系列混合标准工作溶液。

1.2.6 发酵工艺优化

1）发酵时间优化：将筛选出的菌株等比例混合制成复合发酵剂。以感官评分为指标，在复合酶添加质量分数 0.4%、发酵温度 37 ℃、接种体积分数 2% 的条件下，分别发酵 0、1、2、3、4、5、6 d，以确定最佳发酵时间。

2）接种体积分数优化：以感官评分为指标，在复合酶添加质量分数 0.4%、发酵温度 37 ℃、发酵时间 3 d 的条件下，分别以 1.25%、1.50%、1.75%、2.00%、2.25%、2.50%、2.75% 接种体积分数进行发酵，以确定适宜的接种体积分数。

3）发酵温度优化：以感官评分为指标，在复合酶添加质量分数 0.4%、接种体积分数 2.25%、发酵时间 3 d 的条件下，分别于 30、33、35、37、39、41、43 ℃进行发酵，以确定最佳发酵温度。

4）正交试验设计：以发酵时间（*A*）、接种体积分数（*B*）、发酵温度（*C*）为因素，每个因素取 3 个水平，进行三因素三水平正交试验设计，以感官评分为评价指标，优化天麻液发酵的最佳工艺参数。

1.2.7 品质分析

1）总酸质量浓度的测定：参照 GB 12456—2021 中的总酸测定方法进行测定。

2）色差测定：取适量天麻发酵液，使用色差仪进行测定，记录其L^*、a^*、b^*值。每个样品平行测定3次，取平均值。

3）可溶性固形物测定：使用手持式折光仪进行测定。

4）多酚质量浓度测定：采用福林-酚法测定。取1.0 mL样品提取液或没食子酸标准溶液于试管中，依次加入5.0 mL蒸馏水、1.0 mL福林-酚试剂，混匀后静置反应8 min。随后加入3.0 mL 7.5 g/dL的碳酸钠溶液，混匀后于室温避光条件下显色2 h。于765 nm测定吸光度。以一系列质量浓度的没食子酸标准溶液的质量浓度为横坐标，相应的吸光度为纵坐标，绘制标准曲线。

5）黄酮质量浓度测定：参考廖霞等[15]的研究，采用硝酸铝显色法测定。取5.0 mL样品溶液于试管中，加入0.3 mL质量分数5%的亚硝酸钠溶液，摇匀后静置6 min；再加入0.3 mL质量分数5%的硝酸铝溶液，摇匀后静置6 min，再加入4.0 mL 4 g/dL的氢氧化钠溶液和0.4 mL体积分数30%的乙醇溶液，混匀后静置12 min。于510 nm测定吸光度。

6）DPPH自由基清除能力测定：操作步骤遵循试剂盒说明书。

7）电子鼻气味分析：参照曹森等[16]的方法，采用电子鼻检测挥发性风味成分。

1.3　数据分析

采用WPS Office及SPSS 26.0软件进行数据分析，使用Origin 2021软件绘制图表。数据以平均值±标准误差表示，组间差异通过单因素方差分析（ANOVA）结合独立样本t检验进行判断，$P<0.05$表示差异显著。

2　结果与讨论

2.1　发酵工艺优化

2.1.1　适宜菌株的筛选

对作者所在实验室保藏的41种菌株进行筛选，有8种菌发酵天麻液的感官评价在60分以上，分别为咸海鲜魏斯氏菌（A1）、香肠乳杆菌（A4）、植物乳植杆菌（A9）、短乳杆菌（A17）、戊糖片球菌（A31）、罗伊氏粘液乳杆菌（A33）、酸乳球菌（A40）及粪肠球菌（A41），均属于乳酸菌。这8株菌对天麻液的“马尿”异味均有一定改善作用，但感官评分总体仍较低。通过正交试验评价这8株菌在天麻基质中的发酵性能，见表2。

表2　正交试验因素水平表

Table 2　Factors and levels of orthogonal test

水平	发酵时间/d	接种体积分数/%	发酵温度/℃
1	2	2.00	35
2	3	2.25	37
3	4	2.50	39

如图1所示，随着发酵时间的延长，乳酸菌数量显著上升，0~3 d生长速度较快，从2.0×10^7 CFU/g升至2.0×10^{10}~2.5×10^{11} CFU/g，但5 d后整体呈平稳或下降趋势。其中A1、A41下降最为明显，分别为2.0×10^{10}、2.5×10^{10} CFU/g，表明所筛选菌株在天麻液中确有发酵且生长状态较好。

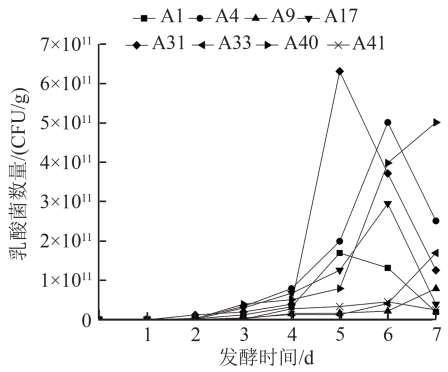
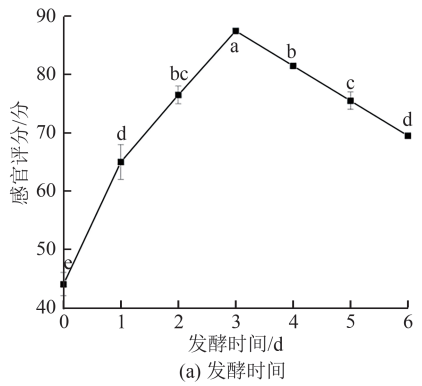


图1　不同菌株在发酵天麻液中的数量变化

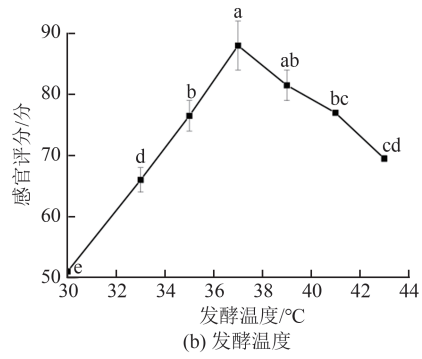
Fig. 1　Variations in the counts of different strains during *Gastrodia elata* fermentation

2.1.2　混菌发酵工艺优化

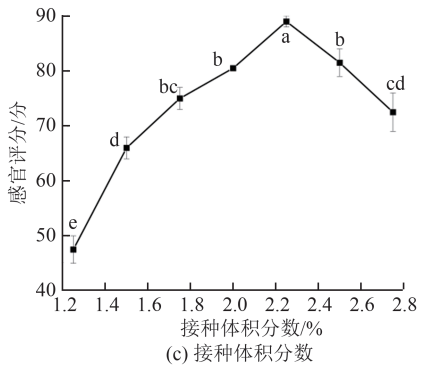
将筛选菌株接种到天麻液中进行混菌发酵，对发酵时间、接种体积分数及发酵温度等工艺条件进行优化，见图2。随着发酵时间从0 d增加至6 d，天麻发酵液的感官评分呈先上升后下降的趋势，且发酵3 d时感官评分最高。发酵时间过长会导致发酵过度，产生不良风味。当接种体积分数为1.25%~2.75%时，天麻发酵液感官评分呈先上升后下降的趋势，接种体积分数为2.25%时感官评分最高。接种体积分数过低会导致发酵时间过长，易造成杂菌污染；接种体积分数过高会导致过度发酵和代谢，产生不良风味。当发酵温度为30~43 ℃时，天麻发酵液感官评分呈先上升后下降的趋势，且发酵温度为37 ℃时感官评分最高，温度过低会导致发酵不完全，温度过高会导致天麻液中热敏性成分降解及易挥发醇类化合物挥发[17]，从而影响感官评分[18]。



(a) 发酵时间



(b) 发酵温度



(c) 接种体积分数

不同字母表示不同处理组之间差异显著（P<0.05）。

图 2　混菌发酵天麻液单因素工艺优化

Fig. 2　Process optimization of single factors in *Gastrodia elata* fermentation by mixed strains

由表 3 可知，通过极差分析得到影响混菌发酵天麻液感官评分的主次顺序为：发酵时间>接种体积分数>发酵温度，最佳发酵工艺条件组合为 $A_2B_2C_2$。经 3 次平行验证试验可知，混菌发酵天麻液的感官评分为 88 分。因此，混菌发酵天麻液的最佳工艺为：A1、A4、A9、A17、A31、A33、A40、A41 等比例混合，发酵时间 3 d，接种体积分数 2.25%，发酵温度 37 ℃。

表 3　混菌发酵天麻液工艺优化正交试验结果

Table 3　Results of orthogonal tests for process optimization of *Gastrodia elata* fermentation by mixed strains

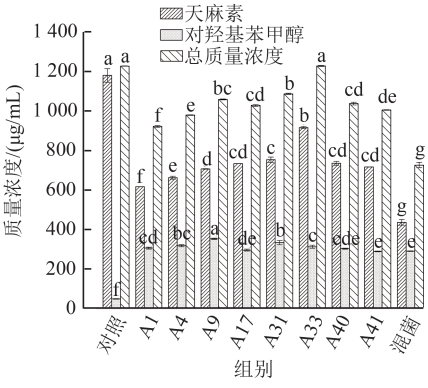
试验号	发酵时间/d	接种体积分数/%	发酵温度/℃	感官评分/分
1	2	2.00	35	77.67±1.53
2	2	2.25	37	83.67±0.58
3	2	2.50	39	79.67±1.53
4	3	2.00	39	83.67±0.58
5	3	2.25	35	86.00±2.00
6	3	2.50	37	86.67±2.31
7	4	2.00	37	80.00±1.00
8	4	2.25	39	82.67±2.08
9	4	2.50	35	78.00±1.00
K_1	80.34	80.45	80.56	
K_2	85.45	84.11	83.45	
K_3	80.22	81.45	82.00	
R^2	5.22	2.67	1.44	

注：K_1、K_2、K_3代表各因素 3 个水平的感官评分总和，R^2代表各因素 3 个水平总和的极差。

2.2　混菌与单菌发酵天麻液的理化特性及营养成分比较

2.2.1　天麻素及对羟基苯甲醇

天麻素及对羟基苯甲醇是天麻中的主要特征功能成分，是测定天麻及其产品等级的主要依据[19]。经试验得出天麻素的标准曲线为 y=22 294x+3 200，R^2=0.992；对羟基苯甲醇的标准曲线为 y=55 529x+70.206，R^2=1.000。对混菌及 8 种单菌发酵天麻液的天麻素及对羟基苯甲醇质量浓度进行检测，见图 3。经单菌发酵后，天麻素质量浓度降低，对羟基苯甲醇质量浓度增加，总质量浓度降



不同字母表示同一指标不同处理组之间差异显著（P<0.05）。

图 3　混菌与单菌发酵天麻液中天麻素及对羟基苯甲醇质量浓度

Fig. 3　Mass concentrations of gastrodin and *p*-hydroxybenzyl alcohol in *Gastrodia elata* liquids fermented by mixed and single strains

低，但保留率在75.08%以上。A1发酵的天麻液中天麻素下降最快，下降了563.34 μg/mL，A33发酵的天麻素保留效果最好，发酵后为915.22 μg/mL，仅下降了263.80 μg/mL。A9发酵的天麻液中对羟基苯甲醇增加最多，较对照组增加了304.22 μg/mL。从总质量浓度来看，A33组下降较少，A1组下降较多，为920.95 μg/mL，与对照组相比下降了305.68 μg/mL。这可能是由于天麻素属于小分子酚型糖苷类化合物，经微生物的作用分解为对羟基苯甲醇、巴利森苷、葡萄糖等小分子物质[6]。混菌发酵天麻液的天麻素质量浓度为434.53 μg/mL，对羟基苯甲醇质量浓度为289.94 μg/mL，均低于单菌发酵，这表明混菌发酵会加速对发酵底物的利用，导致天麻素转化为对羟基苯甲醇，这与袁钰洁等[20]的结果一致。

2.2.2　色差

色泽是影响消费者选择的重要因素，经乳酸菌发酵后，天麻液的色差有显著变化，见表4。添加乳酸菌发酵后，不同单菌发酵天麻液的L^*、a^*、b^*值均增大，说明发酵天麻液红黄度较对照组增大。不同单菌之间存在显著差异，混菌发酵天麻液的色差与对照组有显著变化，但在各单菌发酵的色差范围内，表明混菌发酵的色差较单菌发酵更为协调。

表4　混菌与单菌发酵天麻液的色差分析

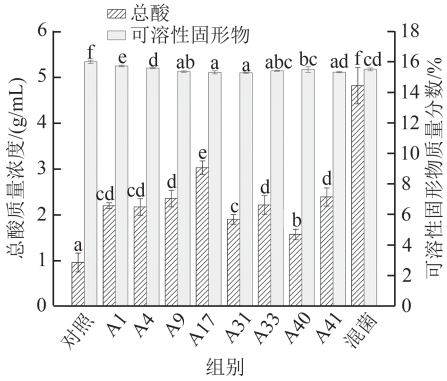
Table 4　Color difference analysis of *Gastrodia elata* liquids fermented by mixed and single strains

组别	L^*值	a^*值	b^*值	ΔE
对照	45.42±0.28^{ab}	−0.15±0.26^{a}	1.45±0.30^{a}	45.45±0.27^{a}
A1	45.59±0.13^{abc}	1.28±0.02^{b}	15.18±0.63^{bc}	48.07±0.08^{b}
A4	45.16±0.03^{a}	1.31±0.15^{b}	16.60±0.03d^{ef}	48.13±0.02^{bc}
A9	45.93±0.4^{abc}	1.58±0.03^{c}	17.56±0.32^{f}	49.20±0.49^{bde}
A17	47.53±1.08^{e}	2.09±0.06^{e}	16.09±0.02^{bcde}	50.22±1.03^{e}
A31	46.61±1.01^{cde}	1.83±0.17^{d}	15.99±0.74^{bcde}	49.32±1.10^{cde}
A33	47.11±0.72^{de}	3.49±0.05^{g}	16.50±1.01^{cdef}	50.05±0.56^{de}
A40	47.12±0.13^{de}	1.30±0.01^{b}	17.07±1.52^{ef}	50.15±0.50^{de}
A41	46.48±0.78^{bcde}	1.13±0.10^{b}	15.62±0.61^{bcd}	49.05±0.88^{bcd}
混菌	46.06±0.83^{abcd}	2.55±0.36^{f}	14.92±1.72^{b}	48.50±1.15^{bc}

注：同列不同字母表示不同处理组之间差异显著（P<0.05）。

2.2.3　总酸及可溶性固形物

总酸是影响发酵液感官品质的重要指标[21]。混菌与单菌发酵对天麻液总酸质量浓度及可溶性固形物质量分数的影响见图4。混菌与单菌发酵后，发酵液总酸质量浓度均显著上升，这是由于乳酸菌发酵过程中会产生有机酸。A17是单菌发酵中产酸量最大的菌种，总酸质量浓度为（3.12±0.15）g/mL。混菌发酵天麻液总酸质量浓度优于单菌发酵，为（4.81±0.39）g/mL，较对照组增加了5.4倍，表明混菌发酵有协同产酸作用。混菌及单菌发酵后，可溶性固形物质量分数均呈现不同程度降低，这是由于乳酸菌发酵需利用葡萄糖和蔗糖[22]。A17及A31的可溶性固形物质量分数最低，分别为（15.31±0.11）%及（15.28±0.04）%，较对照组分别降低了4.31%及4.50%，降低幅度较小，可能是发酵过程中优先利用了其他碳源。



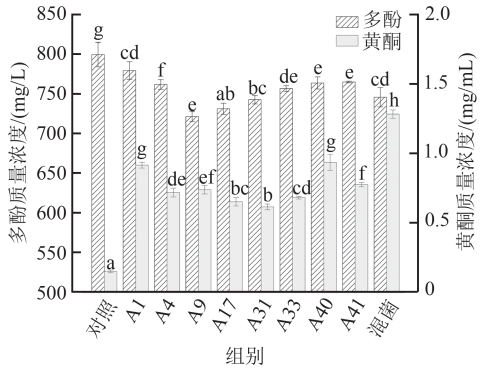
不同字母表示同一指标不同处理组之间差异显著（P<0.05）。

图4　混菌与单菌发酵天麻液的总酸质量浓度及可溶性固形物质量分数

Fig. 4　Mass concentration of total acids and mass fractions of soluble solids in *Gastrodia elata* liquids fermented by mixed and single strains

2.2.4　多酚及黄酮

多酚与黄酮是天然抗氧化剂，具有降血糖、抗氧化等生物活性[23]，不同发酵方式对天麻液中多酚及黄酮质量浓度的影响见图5。发酵天麻液的多酚质量浓度显著下降，与宁珊珊等[24]的研究结果一致。单菌发酵天麻液的多酚质量浓度在（720.94±6.17）mg/L与（778.78±11.05）mg/L之间，混菌发酵天麻液的多酚质量浓度处于中等水平，菌种间的协同或拮抗作用对多酚降解的影响有待进一步研究。混菌及单菌发酵后，天麻液的黄酮质量浓度显著上升，可能是发酵导致细胞壁降解后游离型黄酮被释放出来[25]。与对照组相比，混



不同字母表示同一指标不同处理组之间差异显著（P<0.05）。

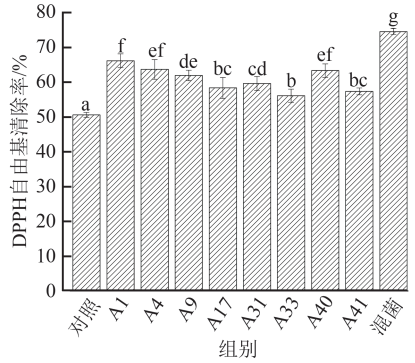
图 5　混菌与单菌发酵天麻液的多酚及黄酮质量浓度

Fig. 5　Mass concentrations of polyphenols and flavonoids in *Gastrodia elata* liquids fermented by mixed and single strains

菌发酵天麻液的黄酮质量浓度增加量比单菌发酵天麻液更大，为（1.28±0.03）mg/L，表明 8 株菌混合发酵具有协同作用。

2.2.5　抗氧化活性

以 DPPH 自由基清除率评价天麻液的抗氧化活性[26]，结果见图 6。发酵天麻液的 DPPH 自由基清除率上升，抗氧化活性显著增强。混菌发酵天麻液的 DPPH 自由基清除率为（74.50±0.86）%，显著高于单菌发酵，较对照组增加了 47.96%。这可能是由于混菌协同产酸的过程中同时产生其他抗氧化成分[27]，导致抗氧化活性增强，周灿等[28]在发酵生姜酵素的研究中也有同样发现。



不同字母表示不同处理组之间差异显著（P<0.05）。

图 6　混菌与单菌发酵天麻液的 DPPH 自由基清除率

Fig. 6　DPPH radical scavenging rates of *Gastrodia elata* liquids fermented by mixed and single strains

2.2.6　电子鼻分析结果

采用电子鼻对混菌发酵前后的天麻液进行比较，见图 7。对照组中 W1W（硫化物、萜类化合物）及 W5S（氮氧化合物）2 个传感器的响应值较大，其次为 W2W（芳香成分和有机硫化物），这与刘莹等[29]的研究结果一致。经乳酸菌发酵后，天麻液在 W1W 及 W5S 的响应值降低，混菌发酵液的响应值低于单菌发酵，表明天麻液异味的来源主要是硫化物、萜类化合物或氮氧化合物，混菌发酵使上述挥发性成分占比降低，风味得以改善。

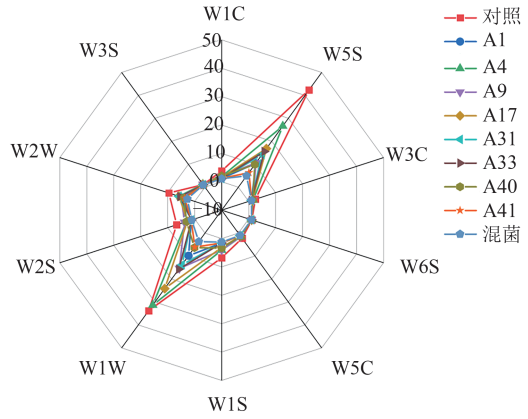


图 7　混菌与单菌发酵天麻液的电子鼻分析雷达图

Fig. 7　Radar chart of electronic nose analysis of *Gastrodia elata* liquids fermented by mixed and single strains

3　结论

咸海鲜魏斯氏菌、香肠乳杆菌、植物乳植杆菌、短乳杆菌、罗伊氏粘液乳杆菌、戊糖片球菌、酸乳球菌及粪肠球菌这 8 株菌发酵的天麻液感官评分均在 60 分以上，发酵性能得到验证。优化的混菌发酵工艺为：8 株菌等比例混合接种、发酵时间 3 d、接种体积分数 2.25%、发酵温度 37 ℃。混菌发酵天麻液的总酸质量浓度为（4.81±0.39）g/mL，显著高于单菌发酵，天麻素、对羟基苯甲醇及多酚的保留率较高，可溶性固形物质量分数降低，优于部分单菌发酵。黄酮质量浓度增加至（1.28±0.03）mg/mL，与对照组相比，DPPH 自由基清除率提升 47.96%。发酵天麻液的主要异味成分为硫化物、萜类化合物或氮氧化合物。因此，混菌发酵天麻液具有协同产酸作用，营养成分保留率较高，抗氧化活性增强，风味品质较好，具备推广应用价值。

参考文献

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典：一部. 2020 年版[M]. 北京：中国医药科技出版社，2020：59-60.

[2] Gong X，Cheng J，Zhang K S，et al. Transcriptome

sequencing reveals *Gastrodia elata* Blume could increase the cell viability of eNPCs under hypoxic condition by improving DNA damage repair ability[J]. Journal of Ethnopharmacology,2022,282:114646.

[3] Huang H,Jiang N,Zhang Y,et al. *Gastrodia elata* Blume ameliorates circadian rhythm disorder-induced mice memory impairment[J]. Life Sciences in Space Research,2021,31:51-58.

[4] 郭佳欣,谢佳,蒋丽施,等. 天麻保健食品开发现状分析[J]. 中草药,2022,53(7):2247-2254.
Guo J X,Xie J,Jiang L S,et al. Analysis on development status of *Gastrodiae Rhizoma* health food[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs,2022,53(7):2247-2254.(in Chinese)

[5] 蒋丽施,顾玲,汤雨晴,等. 天麻山药复合调味酱的研制及风味成分分析[J]. 中国调味品,2024,49(10):19-24.
Jiang L S,Gu L,Tang Y Q,et al. Preparation and flavor composition analysis of *Gastrodia elata* and yam compound sauce[J]. China Condiment,2024,49(10):19-24.(in Chinese)

[6] 王迎,董明盛,张国强,等. 红茶菌发酵对天麻活性成分及感官品质的影响[J]. 食品科学,2024,45(4):232-238.
Wang Y,Dong M S,Zhang G Q,et al. Effect of kombucha consortium fermentation on active ingredients and sensory quality of *Gastrodia elata*[J]. Food Science,2024,45(4):232-238.(in Chinese)

[7] 杨丽莉,段桂媛,黄璐晗,等. 蒸制、水煮和发酵处理对天麻品质和风味的影响[J]. 食品与发酵工业,2024,50(11):301-307.
Yang L L,Duan G Y,Huang L H,et al. Effect of steaming,boiling and fermentation treatments on the quality and flavour of *Gastrodia elata*[J]. Food and Fermentation Industries,2024,50(11):301-307.(in Chinese)

[8] 陈臣,莫海文,于海燕,等. 发酵食品中微生物相互作用与风味品质塑造的研究进展[J]. 食品科学,2025,46(7):1-10.
Chen C,Mo H W,Yu H Y,et al. Research progress in the role of microbial interactions in shaping the flavor and quality of fermented foods[J]. Food Science,2025,46(7):1-10.(in Chinese)

[9] 赖岚玉,李敏,赵文俊,等. 益生菌发酵对姜制天麻活性成分及其抗氧化活性的影响[J]. 现代食品科技,2024,40(2):91-99.
Lai L Y,Li M,Zhao W J,et al. Effects of probiotic fermentation on the active constituents and antioxidant activity of ginger-processed *Gastrodia elata*[J]. Modern Food Science and Technology,2024,40(2):91-99.(in Chinese)

[10] 林灵,王瑜,杨娟,等. 天麻酵素对失眠小鼠的镇静催眠功效评价[J]. 现代食品科技,2021,37(10):55-61,152.
Lin L,Wang Y,Yang J,et al. Evaluation of the sedative and hypnotic effects of *Gastrodia elata* Bl. ferment on insomnia in mice[J]. Modern Food Science & Technology,2021,37(10):55-61,152.(in Chinese)

[11] 安琪,张霞,郭玉琪,等. 发酵方式对苹果幼果果酒品质及香气成分的影响[J]. 中国食品学报,2025,25(1):335-347.
An Q,Zhang X,Guo Y Q,et al. Effects of fermentation methods on the quality and aroma composition of young apple fruit wines[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology,2025,25(1):335-347.(in Chinese)

[12] 张依,刘敬科,刘俊利,等. 合成微生物群落的构建及其在发酵食品中的应用[J]. 中国酿造,2024,43(11):13-19.
Zhang Y,Liu J K,Liu J L,et al. Construction of synthetic microbial community and its application in fermented foods[J]. China Brewing,2024,43(11):13-19.(in Chinese)

[13] 邢君梅,张重权,王有琼,等. 混菌固态发酵辣木粕的营养价值和功能特性[J]. 食品与生物技术学报,2024,43(5):26-36.
Xing J M,Zhang Z Q,Wang Y Q,et al. Exploring the nutritional value and functional characteristics of moringa seed meal by mixed bacteria solid-state fermentation[J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2024,43(5):26-36.(in Chinese)

[14] 黄杰华,高佳乐,邹娟,等. HPLC法测定雪峰天麻不同部位中天麻素和对羟基苯甲醇含量[J]. 怀化学院学报,2019,38(5):6-10.
Huang J H,Gao J L,Zou J,et al. Determination of gastrodin and 4-hydroxybenzyl alcohol in different parts of *Gastrodia elata* in Xuefeng Mountain[J]. Journal of Huaihua University,2019,38(5):6-10.(in Chinese)

[15] 廖霞,吴振,杨勇,等. 乌天麻不同溶剂提取物的总多酚、总黄酮含量及其抗氧化能力[J]. 食品与发酵工业,2022,48(5):157-164.
Liao X,Wu Z,Yang Y,et al. The differentiation of total polyphenols and total flavonoids contents in *Gastrodia elata* Bl. f. *glauca* S. Chow extracts using different solvents and their antioxidant capacities[J]. Food and Fermentation Industries,2022,48(5):157-164.(in Chinese)

[16] 曹森,赵成飞,马风伟,等. 基于电子鼻和GC-MS评价不同采收期天麻的芳香品质[J]. 北方园艺,2019(19):87-94.
Cao S,Zhao C F,Ma F W,et al. Aroma quality of different harvesting period *Gastrodia elata* by electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry[J]. Northern Horticulture,2019(19):87-94.(in Chinese)

[17] 肖岚,安攀宇,杨芳,等. 发酵时间对安岳坛子肉风味及

坛内细菌菌群结构的影响[J]. 食品与生物技术学报，2021，40(2)：103-111.
Xiao L，An P Y，Yang F，et al. Effects of fermentation time on flavor and bacterial community structure of Anyue ceramic-pot sealed meat[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2021，40(2)：103-111.(in Chinese)

[18] 谢晶晶，王水兴，吴凌伟，等. 混菌发酵紫山药酒工艺优化及品质分析研究[J]. 中国酿造，2024，43(9)：215-220.
Xie J J，Wang S X，Wu L W，et al. Optimization of mixed-strain fermentation process of purple yam wine and its quality analysis[J]. China Brewing，2024，43(9)：215-220.(in Chinese)

[19] 姜浩，区少碧，沈灿钿，等. 天麻贮藏保鲜与加工利用研究进展[J]. 保鲜与加工，2024，24(12)：138-147.
Jiang H，Ou S B，Shen C T，et al. Research progress on preservation and processing utilization of *Gastrodia elata* Blume[J]. Storage and Process，2024，24(12)：138-147.(in Chinese)

[20] 袁钰洁，梁梓华，侯思文，等. 酵母混菌强化发酵提高麦曲黄酒的风味品质[J]. 中国食品学报，2024，24(12)：178-192.
Yuan Y J，Liang Z H，Hou S W，et al. Improving the brewing flavor quality of maiqu Huangjiu by enhanced fermentation with yeast mixed-culture[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2024，24(12)：178-192.(in Chinese)

[21] 史晴晴，范柳萍，沈选举，等. 不同发酵方式对玫瑰花发酵饮料品质和风味的影响[J]. 食品与发酵工业，2025，51(22)：304-314.
Shi Q Q，Fan L P，Shen X J，et al. Influence of different fermentation methods on quality and flavor of rose fermented beverage[J]. Food and Fermentation Industries，2025，51(22)：304-314.(in Chinese)

[22] 赵宇，杜庆萍，杨瑞，等. 西梅酵素发酵过程中理化指标、抗氧化能力及挥发性物质的变化[J]. 食品工业科技，2025，46(17)：335-343.
Zhao Y，Du Q P，Yang R，et al. Physicochemical properties and antioxidant capacity and volatile compound changes during the fermentation of Chinese prune Jiaosu[J]. Science and Technology of Food Industry，2025，46(17)：335-343.(in Chinese)

[23] 靳素媛，耿燕，周琦，等. 24种食用植物酵素功能成分分析与生物活性初步研究[J]. 食品与生物技术学报，2023，42(8)：62-67.
Jin S Y，Geng Y，Zhou Q，et al. Analysis of functional components of 24 fermented juice of edible plant and preliminary study on their biological activities[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2023，42(8)：62-67.(in Chinese)

[24] 宁珊珊，蔡思涵，孙武飞，等. 不同水果混合发酵对紫薯酒品质及风味的影响[J]. 食品与发酵工业，2025，51(17)：175-183.
Ning S S，Cai S H，Sun W F，et al. Effect of mixed fermentation of different fruits on quality and flavor of purple sweet potato wine[J]. Food and Fermentation Industries，2025，51(17)：175-183.(in Chinese)

[25] 刘欢，任娣，戴昀峰，等. 基于响应面法优化多菌株混合发酵铁皮石斛提高其抗氧化活性[J]. 食品工业科技，2025，46(20)：254-265.
Liu H，Ren D，Dai Y F，et al. Improving antioxidant activity of *Dendrobium candidum* by multi-strain mixed fermentation based on response surface method[J]. Science and Technology of Food Industry，2025，46(20)：254-265.(in Chinese)

[26] 余梅，焦迎春. 柴达木大肥菇多糖的体内外抗氧化活性研究[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(12)：101-109.
Yu M，Jiao Y C. Study on *in vivo* and *in vitro* antioxidant activity of polysaccharides from *Agaricus bitorquis* (quél.) sacc.[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(12)：101-109.(in Chinese)

[27] 缪园欣，田建阳，贲锦华，等. 山楂酵素发酵工艺优化及体外生物活性研究[J]. 食品与机械，2024，40(10)：181-187.
Miao Y X，Tian J Y，Ben J H，et al. Optimization of fermentation technology and its *in-vitro* activity of hawthorn enzyme[J]. Food and Machinery，2024，40(10)：181-187.(in Chinese)

[28] 周灿，齐成媚，杨芳，等. 生姜酵素发酵工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 中国酿造，2024，43(10)：82-87.
Zhou C，Qi C M，Yang F，et al. Optimization of fermentation process and antioxidant activity of ginger Jiaosu[J]. China Brewing，2024，43(10)：82-87.(in Chinese)

[29] 刘莹，王瑞，魏小林，等. 不同贮藏温度及包装条件对乌天麻干片挥发性气味的影响[J]. 食品研究与开发，2024，45(5)：114-121.
Liu Y，Wang R，Wei X L，et al. Effect of different storage temperatures and packing conditions on volatile components of dried *Gastrodia elata* slices[J]. Food Research and Development，2024，45(5)：114-121.(in Chinese)