陈艾琳, 杨清华, 赖谦, 等. 冠突散囊菌发酵赶黄草叶茶工艺优化及风味品质分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 251−261. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040085

CHEN Ailin, YANG Qinghua, LAI Qian, et al. Process Optimization and Flavor Quality Analysis of *Eurotium cristatum* Fermented *Penthorum chinense* Pursh Leaf Tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 251−261. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040085

· 工艺技术 ·

冠突散囊菌发酵赶黄草叶茶工艺优化及风味品质分析

陈艾琳[1], 杨清华[1], 赖　谦[2], 段飞霞[1], 曾　里[1,*], 冉　旭[1,*]
（1.四川大学轻工科学与工程学院, 四川成都 610065;
2.古蔺县农业农村局, 四川泸州 646500）

摘　要: 针对目前赶黄草叶茶产品普遍存在滋味苦涩、青草味重的问题，本文以感官评分为指标，采用单因素-响应面试验优化接种冠突散囊菌发酵赶黄草叶茶的最佳工艺条件，通过比较发酵前后赶黄草叶茶的感官品质、滋味物质及挥发性化合物差异，探究发酵对赶黄草叶茶风味的影响。研究结果表明：当加水量 27%、接种量 21%、发酵时间 16 d 时，发酵赶黄草叶茶金花普遍茂盛，茶汤色泽橙黄、口感醇和、香气协调，感官评分为 91.60 分。此条件下总多酚、总黄酮含量比未发酵赶黄草叶茶分别降低了 16.95% 和 18.70%，苦味与鲜甜味氨基酸比值下降 7.16%。发酵后赶黄草叶茶挥发性化合物的组分和相对含量发生显著变化，正己醛、反式-2-己烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、甲基庚烯酮等具有青辛气、刺激性等不良气味的挥发性成分相对含量下降明显，而苯乙酮、芳樟醇、2-丁酮等具有花果香、菌香的挥发性成分新产生或相对含量上升，掩盖了赶黄草叶茶的青草味，促进了发酵赶黄草叶茶花果香、菌香的形成。上述结果表明赶黄草叶茶经冠突散囊菌发酵后感官品质更佳, 本研究为赶黄草叶茶的进一步开发与应用提供理论基础和参考。

关键词: 赶黄草, 发酵, 冠突散囊菌, 工艺优化, 风味, 滋味
中图分类号: TS272.5　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)07−0251−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040085　　本文网刊:

Process Optimization and Flavor Quality Analysis of *Eurotium cristatum* Fermented *Penthorum chinense* Pursh Leaf Tea

CHEN Ailin[1], YANG Qinghua[1], LAI Qian[2], DUAN Feixia[1], ZENG Li[1,*], RAN Xu[1,*]
（1.College of Biomass and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2.Agriculture and Rural Bureau of Gulin County, Luzhou 646500, China）

Abstract: In the present work, *Eurotium cristatum* fermentation was applicated in *Penthorum chinense* Pursh (PCP) leaf tea production, to reduce the bitterness, astringent tastes and pronounced herbaceous flavor of PCP leaves. Based on the results of single-factor experiments and response surface methodology (RSM) according to sensory evaluation, the optimal fermentation conditions were determined as follows: water contents 27%, incubation amount 21%, with 16 days of incubation time. The *E. cristatum* fermented PCP leaf tea produced in the optimal condition had orange-yellow infusion appearance with abundant *E. cristatum* colonization, tasting smooth and mellow with harmonious aroma, which achieved the sensory score at 91.60, while the total polyphenols and total flavonoids contents were reduced by 16.95% and 18.70%, respectively. Compared with the unfermented samples, the ratio of bitter and sweet amino acids of fermented PCP leaf tea decreased by 7.16%. The results of HS-SPME-GC-MS showed that the undesirable volatile components (VOCs), including

收稿日期: 2025−04−09
基金项目: 中央高校基本科研业务费/泸州市科技局（2023CDLZ-14）, 赶黄草固体饮料研发及产业化示范。
作者简介: 陈艾琳（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与营养健康, E-mail: 1342493781@qq.com。
*** 通信作者:** 冉旭（1968−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 新资源食品的研究与开发, E-mail: ranxu01@sina.com。
曾里（1973−）, 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 保健食品与健康食品的研究与开发, E-mail: zengli1973@163.com。

hexanal, trans-2-hexenal, (E,E)-2,4-heptadienal, and 6-methyl-5-hepten-2-one representing grassy, pungent, and irritating odors, remarkably decreased, and the VOCs associated with floral, fruity, and fungal aromas, including acetophenone, linalool, and 2-butanone were newly generated and increased in PCP leave tea after fermentation. In summary, the optimal *E. cristatum* fermentation was confirmed to significantly improve the sensory quality of PCP leaf tea, especially eliminating the undesirable flavors and tastes, which could be a promising technology applicated in PCP tea process.

Key words: *Penthorum chinense* Pursh; fermentation; *Eurotium cristatum*; process optimization; flavor; taste

赶黄草(*Penthorum chinense* Pursh),为虎耳草科扯根菜亚科扯根菜属多年生草本植物,主要分布于东亚地区。在我国主产于四川、贵州、湖南等地,为四川古蔺县道地药材。赶黄草的基础营养成分不突出[1],但活性成分丰富,其中黄酮类化合物是主要的活性成分,占从赶黄草中分离得到化合物的 1/3 以上[2]。2020 年,国家卫生健康委员会第 4 号公告将赶黄草列为新食品原料,建议热水冲泡饮用;2022 年,国家卫生健康委员会批准将赶黄草的食用范围扩大至饮料,推荐食用量≤8 g/d[3]。当前,赶黄草在食品中的开发利用以赶黄草叶茶为主,包括赶黄草叶绿茶[4]、赶黄草袋泡茶[5]、赶黄草复合茶饮料[6] 等。然而,上述赶黄草叶茶产品普遍存在青草味重、滋味苦涩[7] 等问题,导致市场认可度较低。

冠突散囊菌(*Eurotium cristatum*),又称“金花菌”,是茯砖茶渥堆过程中的优势真菌,对茯砖茶的风味形成起着重要作用[8]。近年来利用冠突散囊菌发酵茶叶[9−10] 及药食两用植物原料[11−12] 的研究层出不穷,冠突散囊菌能从植物原料中获取营养物质并进行自身代谢转化[13],同时产生多种酶类[14],起到改善茶汤的香气和滋味的作用。赶黄草是一种药食两用的新食品原料,目前国内外尚没有通过接种发酵赶黄草叶茶的报道。因此,发酵赶黄草叶茶作为一种新型赶黄草产品既能丰富现有的赶黄草产品种类,又可以改善传统赶黄草叶茶滋味苦涩、青草味重的弊端。

本研究以赶黄草叶茶为原料,拟采用单因素-响应面试验确定接种冠突散囊菌发酵赶黄草叶茶最佳工艺条件,通过对发酵和未发酵赶黄草叶茶的感官品质、滋味物质及挥发性化合物进行测定分析,探究冠突散囊菌发酵对赶黄草叶茶风味的影响,开发出一款口感醇和,具有协调菌香、花果香气的发酵赶黄草叶茶,为赶黄草资源的高值化利用提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

赶黄草叶茶(经绿茶工艺加工,水分含量<6%) 由四川醇香茶业有限公司提供;冠突散囊菌(菌种保藏号 BNCC146563) 购自商城北纳创联生物科技有限公司;芦丁标准品、没食子酸标准品 上海源叶生物科技有限公司;无水乙醇、硝酸铝、亚硝酸钠、氢氧化钠 成都金山化学试剂有限公司,以上试剂均为分析纯;甲醇、乙腈、甲酸 色谱纯,美国 Sigma 公司。

FTT-1000C-旋钮多功能粉碎机 东莞市房太有限公司;QP-2010SE 气相色谱质谱联用仪 日本岛津公司;FA2204C 电子天平 上海天美天平仪器有限公司;DSX-30L-1 手提式高压蒸汽灭菌锅 上海申安医疗器械厂;SW-CJ-1-FD 洁净工作台 苏净集团苏州安泰空气技术有限公司;1260 Infinity II 液相色谱仪 美国安捷伦公司;A300 全自动氨基酸分析仪 德国曼默博尔公司。

1.2 实验方法

1.2.1 发酵赶黄草叶茶制备工艺优化

1.2.1.1 基本工艺流程 冠突散囊菌发酵赶黄草叶茶发酵工艺参照孟庭宇[15]、王罗[16] 的方法并做适当修改,工艺流程如图 1。取赶黄草叶茶(PT)80 g,加水混合在 1000 mL三角瓶中,搅拌均匀后放置 12 h,使水分均匀分布到叶片,然后用高压灭菌器在 121 ℃ 下灭菌 20 min,冷却后无菌接种冠突散囊菌孢子悬浮液(细胞密度为 8.25×10^7 个/mL),在 28 ℃ 下发酵 14 d,得到湿发酵赶黄草叶茶;取出冻干,使其水分含量≤6%,即得到发酵赶黄草叶茶(FPT)。

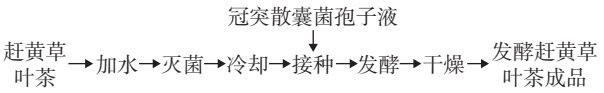


图 1 接种冠突散囊菌制备发酵赶黄草叶茶工艺流程

Fig.1 Process flow for preparing FPT inoculated with *Eurotium cristatum*

1.2.1.2 单因素实验 根据查阅相关文献,发现 28 ℃ 为冠突散囊菌生长的最适温度[16],因此本实验将 28 ℃ 确定为恒定的发酵温度。设定加水量 20%、接种量 15%(接种量为 mL 孢子液/g 赶黄草叶茶)、发酵时间 14 d 为基础发酵条件,改变单一条件,考察在恒定发酵温度下,加水量(10%、20%、30%、40%、50%)、接种量(10%、15%、20%、25%、30%)、发酵时间(12、14、16、18、20 d)对成品发酵赶黄草叶茶的感官评分的影响。

1.2.1.3 响应面优化试验设计 通过单因素实验选择合适的因素水平,并根据响应面的 Box-Behnken

表 1 FPT 制备响应面试验设计因素水平

Table 1 Response surface experimental design and factor levels for FPT preparation

水平	因素		
	A加水量(%)	B接种量(%)	C发酵时间(d)
−1	20	15	14
0	30	20	16
1	40	25	18

设计(BBD)原理，进行了冠突散囊菌发酵赶黄草叶茶工艺的优化(表 1)。以加水量(A)、接种量(B)、发酵时间(C)为考察因素，感官评分(Y)为响应值，利用 Design Expert 13 软件设计响应面优化试验。

1.2.2　感官评价

1.2.2.1　茶汤泡制　参考 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》，分别取 3.0 g 发酵前后赶黄草叶茶，按茶水质量体积比 1∶50 加注沸水，浸泡 2 min 后将茶汤沥入茶杯中，此为第一泡；沥出茶汤后再加水冲泡 5 min，此为第二泡。依次审评汤色、香气、滋味、叶底，汤色以第一泡为主评判，香气、滋味以第二泡为主评判。

1.2.2.2　感官评价　参考 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》以及吴凯为[17] 和曾桥[18] 的评分标准并稍作修改。感官评价小组由实验室 10 名经过评茶培训的人员组成，感官评分=0.2×汤色+0.3×香气+0.35×滋味+0.05×叶底+0.1×发花状态，结果取平均值。感官评分标准如表 2 所示。

表 2　感官评分标准

Table 2　Sensory evaluation standard

指标	评价标准	评分
汤色	较显绿，较浑浊，欠明亮	60~69
	黄绿色，稍显浑浊，尚明亮	70~79
	橙黄色，稍显浑浊，明亮	80~89
	橙红色，不浑浊，清澈明亮	90~99
香气	无菌香，青草气浓，赶黄草香显	60~69
	无菌香，稍淡青草气，赶黄草香较显	70~79
	显菌香，淡青草气，赶黄草香较显	80~89
	显菌香，略有青草气，赶黄草香略显	90~99
滋味	苦涩味，有辛味，欠醇和	60~69
	较苦涩，稍弱辛味，尚醇和	70~79
	略有涩味，略有辛味，醇和	80~89
	略有涩味，口感圆润、醇和	90~99
叶底	黄褐，叶片较完整，较软亮	60~69
	棕褐，叶片较完整，较软亮	70~79
	棕褐，叶片完整，较软亮	80~89
	棕褐，叶片完整，软亮	90~99
发花状态	没有发金花	60~69
	少量金花	70~79
	金花颗粒较小或欠饱满	80~89
	金花颗粒大而饱满	90~99

1.2.3　样品处理　将未发酵赶黄草叶茶及 1.2.1 最优条件下制得的发酵赶黄草叶茶冻干至水分含量≤6%，完整叶片用于测定色度色差，粉碎后过 60 目筛的样品用于测定滋味物质及挥发性化合物。

1.2.4　色度色差测定　按照 1.2.2.1 的方法制备待测茶汤(第一泡)，使用色度色差仪测定，并计算 ΔE 来表示颜色变化程度。

$$\Delta E = \sqrt{\left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\right]} \qquad 式（1）$$

式中，ΔL^*、Δa^*、Δb^*分别表示发酵后赶黄草叶茶与未发酵样品颜色之间的 L^*、a^*、b^*值之差。

1.2.5　总多酚、总黄酮含量测定　样品提取：准确称量 1.0 g 样品，加入 25 mL 体积分数为 70% 的乙醇溶液，于 40 ℃ 下超声提取 30 min 后离心(4000 r/min, 10 min)。重复提取一次，合并两次滤液，用 70% 乙醇溶液定容至 50 mL，备用。

总黄酮的测定方法采用亚硝酸钠-硝酸铝比色法[19]，使用体积分数为 70% 的乙醇溶液配制不同质量浓度芦丁标准溶液，绘制标准曲线为 y=0.6581x+0.0418，R^2=0.9997。取 1 mL 提取液，于 510 nm 下显色。

总多酚的测定方法参考 GB /T 8313-2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》，使用分光光度计测定，得到标准曲线为 y=0.0058x+0.0534，R^2=0.9995。

1.2.6　游离氨基酸含量测定　参考 GB/T 30987-2020《植物中游离氨基酸的测定》，使用全自动氨基酸分析仪测定。游离氨基酸的滋味活度值(TAV)按如下公式计算：

$$TAV = \frac{C}{T} \qquad 式（2）$$

式中，TAV 表示滋味活力值；C 表示滋味化合物含量(mg/g)；T 为滋味化合物呈味阈值(mg/g)。

1.2.7　挥发性风味物质测定

1.2.7.1　顶空固相微萃取(HS-SPME)条件　准确量取 1 g 发酵赶黄草叶茶粉末于 20 mL 顶空瓶中，注入 5 mL 沸水，加搅拌磁子搅拌均匀，迅速加盖密封；然后放入 60 ℃ 的恒温水浴锅中，静置 30 min，萃取吸附 30 min，250 ℃ 下解析 5 min[7]。

1.2.7.2　气相色谱(GC)条件　色谱柱：SAAB-57330U；载气为高纯氦气(纯度≥99.999%)；柱流量：1 mL/min(恒流模式)。升温程序：40 ℃ 保持 5 min，以 5 ℃/min 升到 80 ℃，再以 25 ℃/min 升到 140 ℃，然后以 5 ℃/min 升到 210 ℃，保持 5 min 后，以 10 ℃/min 升到 250 ℃，保持 5 min。

1.2.7.3　质谱(MS)条件　EI；离子源：230 ℃；离子化：80 eV；四级杆：150 ℃；全扫描式；扫描范围：30~600 m/z；接口：250 ℃，柱温：40 ℃，进样口：250 ℃。

1.2.7.4　定性及定量方法　根据总离子图中各色谱峰的质谱信息，经 NIST20 标准库谱库检索，匹配指数大于 85% 作为物质鉴定标准，结合文献 [7,20−21] 及待测香气物质的保留时间对各挥发性成分进行定性，采用峰面积归一法计算各挥发性物质的相对含量。

1.3　数据处理

采用 Microsoft Excel 2021 处理实验数据，所有数据以平均值±标准差显示；SPSS Statistic 25.0 软件进行显著性分析，Design Expert 13 进行响应面试验分析，SIMCA 软件进行正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)，所有数据和实验至少重复三次。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 加水量对发酵赶黄草叶茶感官评分的影响

水是冠突散囊菌吸收利用各种营养成分的重要介质[22], 对茶叶“发金花”效果有重要作用。如图 2(A)所示, 当加水量为 10%~30% 时, 感官评分随加水量的增加而升高, 由 74.87 分上升至 85.25 分, 之后缓慢降低。这可能是因为加水量过低时冠突散囊菌的生长受到抑制, 发酵程度不足; 而加水量过高会改变冠突散囊菌的生长特性, 影响茶叶外观和滋味[23]。因此, 选择加水量 20%、30%、40% 进行响应面分析。

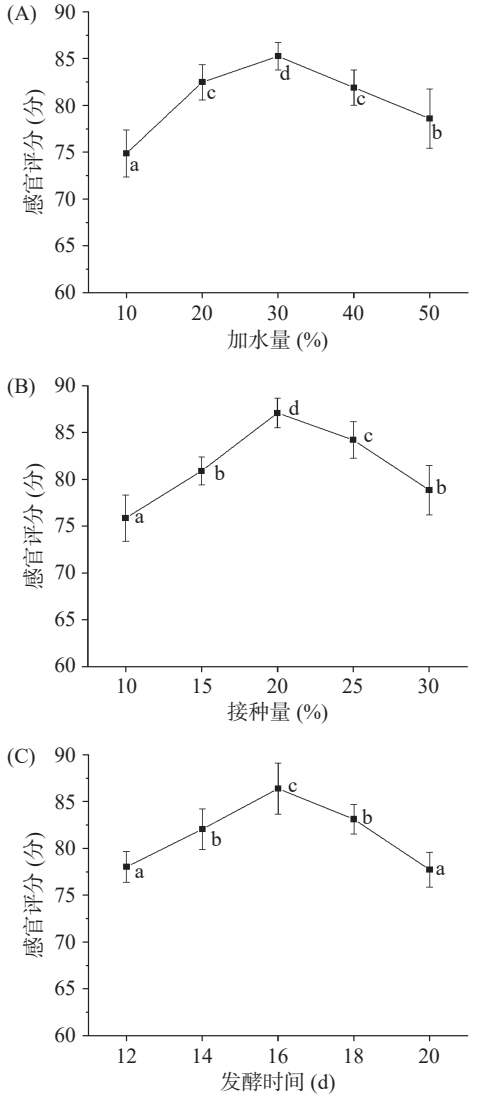


图 2 加水量(A)、接种量(B)、发酵时间(C)对发酵赶黄草叶茶的影响

Fig.2 Effect of water addition (A), inoculation amount (B) and fermentation time (C) on FPT

注: 图中不同字母表示差异显著, $P<0.05$。

2.1.2 接种量对发酵赶黄草叶茶感官评分的影响

接种量是影响发酵茶品质的重要因素, 接种量过高可能会导致茶叶基质无法提供微生物生长所需的营养成分[24], 合适的接种量能够缩短发酵周期, 利于发酵茶良好品质形成。如图 2(B)所示, 随着接种量的增加, 感官评分先升高后降低, 当接种量为 20% 时感官评分达到最大值。因此, 选择接种量 15%、20%、25% 进行响应面分析。

2.1.3 发酵时间对发酵赶黄草叶茶感官评分的影响

在发酵 12~16 d 时, 随着发酵时间延长, 赶黄草内部“金花”茂盛, 冠突散囊菌长势良好, 呈现金黄色; 但当发酵至 18 d 时, 发酵茶金花色泽逐渐变黯淡, 与曾桥[18] 的研究一致。感官评分结果如图 2(C)所示, 发酵 16 d 时感官评分最高, 之后随着发酵时间延长感官评分显著下降($P<0.05$), 这可能是发酵时间过长导致产物的再利用或产生其他不良产物[25]。因此, 选择发酵 14、16、18 d 进行响应面分析。

2.2 响应面优化试验结果

基于单因素实验结果, 根据响应面的 Box-Behnken 设计(BBD)原理, 设计响应面试验对冠突散囊菌发酵赶黄草叶茶工艺进行优化。以加水量(A)、接种量(B)、发酵时间(C)为考察因素, 感官评分(Y)为响应值, 试验设计方案和结果如表 3 所示。由 Design Expert 13 软件对实验结果进行分析, 得到感官评分(Y)与加水量(A)、接种量(B)、发酵时间(C)之间的二次三元回归模型, 模型的拟合方程如下: $Y=90.3220-1.55375A+0.9550B-0.73125C-0.3750AB-0.2125AC-0.3550BC-2.98475A^2-1.91225B^2-3.29475C^2$。对响应面优化发酵赶黄草叶茶感官评分进行方差分析, 结果见表 4, 模型中的 $P<0.01$, 失拟项 $P=0.3641>0.05$, 模型极显著且失拟项不显著。决定系数 $R^2=0.976$, 校正系数 $R^2_{adj}=0.9451$, 模型能够科学体现响应值变化。F 值体现了各因素对响应值的影响大小, 发现三因素对赶黄草发酵叶茶感官评分的影响大小顺序为: 加水量(A)>接种量(B)>发酵时间(C), 其中一次项 C 为显著影响因素($P<0.05$), 一次项 A、B 及二次项 A^2、B^2 和 C^2 为极显著影响因

表 3 响应面试验设计与结果

Table 3 Experimental design and results of response surface analysis

试验号	A加水量	B接种量	C发酵时间	Y感官评分(分)
1	−1	−1	0	85.20
2	1	−1	0	83.76
3	−1	1	0	87.84
4	1	1	0	84.90
5	−1	0	−1	86.46
6	1	0	−1	82.86
7	−1	0	1	85.65
8	1	0	1	81.20
9	0	−1	−1	84.64
10	0	1	−1	87.28
11	0	−1	1	83.66
12	0	1	1	84.88
13	0	0	0	89.86
14	0	0	0	90.25
15	0	0	0	91.30
16	0	0	0	89.64
17	0	0	0	90.56

表 4　回归模型方差分析

Table 4　Variance analysis of regression model

来源	平方和	自由度	均方差	F	P	显著性
模型	141.61	9	15.73	31.61	<0.0001	显著
A-加水量	19.31	1	19.31	38.79	0.0004	**
B-接种量	7.3	1	7.3	14.66	0.0065	**
C-发酵时间	4.28	1	4.28	8.59	0.022	*
AB	0.5625	1	0.5625	1.13	0.3231	
AC	0.1806	1	0.1806	0.3628	0.5659	
BC	0.5041	1	0.5041	1.01	0.3478	
A^2	37.51	1	37.51	75.35	<0.0001	**
B^2	15.4	1	15.4	30.93	0.0008	**
C^2	45.71	1	45.71	91.81	<0.0001	**
残差	3.48	7	0.4978			
失拟项	1.79	3	0.596	1.4	0.3641	不显著
纯误差	1.7	4	0.4242			
总离差	145.09	16				

注：**表示差异极显著（P<0.01），*表示差异显著（P<0.05）。

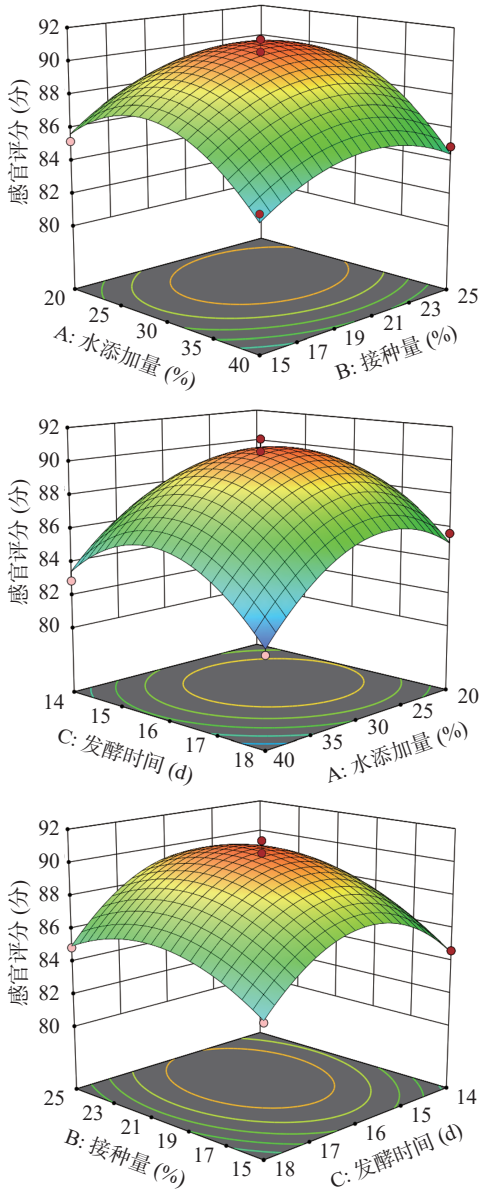


图 3　发酵赶黄草叶茶感官评分的响应面图

Fig.3　Response surface diagram of the sensory score of the FPT

素（P<0.01），交互项不显著。加水量、接种量和发酵时间对赶黄草叶茶感官评分的影响如图 3 所示，其两两交互作用对发酵茶的感官评分影响不显著，加水量的曲面坡度最陡，表明该因素对感官评分的影响最为显著，与方差分析的结果一致。

模型预测的最佳发酵工艺为加水量 27.26%，接种量 21.43%，发酵时间 15.77 d，在此条件下发酵赶黄草叶茶感官评分为 90.71 分。考虑到生产实际，调整工艺条件为加水量 27%，接种量 21%，发酵时间 16 d。为验证实验可靠性，在此条件下多次实验，该条件下赶黄草发酵叶茶感官评分为 91.60 分，该优化条件可行。

2.3　色度色差分析

由表 5 可知，茶汤亮度 L^*在接种冠突散囊菌发酵后显著降低（P<0.05），表明发酵赶黄草叶茶的汤色变暗；a^*表示由绿到红的色彩变化，发酵前后茶汤 a^*值无显著差异；发酵赶黄草茶汤 b^*显著升高（P<0.05），表明茶汤黄度增强。ΔE 表示总色差程度，当 ΔE 值为 3.5~5 之间被认为色差差异明显，大于 5 时表示颜色已为两种色彩[26]；本实验中 ΔE 为 9.50，说明发酵前后赶黄草叶茶颜色差异大，由茶汤青绿变为橙黄，如图 4 所示。

表 5　茶汤色度色差

Table 5　Color difference parameters of tea infusion

样品	L^*	a^*	b^*	ΔE
PT	94.09±0.06^b	−2.28±0.01^a	14.34±0.03^a	–
FPT	92.48±0.03^a	−2.49±0.00^a	23.70±0.04^b	9.50

注：结果以平均值±标准偏差表示（n=3）；同一列数据上的不同字母表示差异显著，P<0.05。

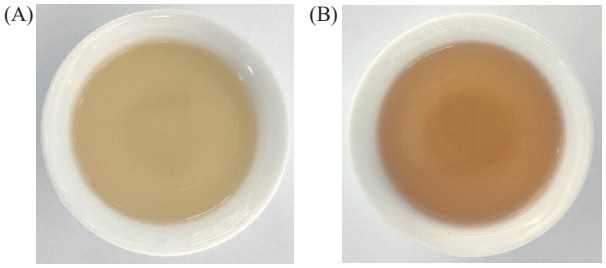


图 4　赶黄草叶茶发酵前（A）后（B）对比

Fig.4　Comparison of the *Penthorum chinense* Pursh leaf tea infusion before (A) and after (B) fermentation

2.4　滋味成分分析

2.4.1　总多酚及总黄酮　多酚是影响茶叶滋味的重要物质，主要呈现苦涩味[18]。有研究发现普洱茶发酵过程中酚类化合物被积极代谢，含量降低，有利于发酵茶味道从涩味转变为醇厚[27]。总黄酮是赶黄草中含量较高的成分，其中黄酮醇类物质被认为具有涩味，同时还有增强茶汤中咖啡碱苦味的作用[28]。因此，总酚、总黄酮含量下降可能会影响茶叶滋味，起到降低其苦涩味的作用。黄酮类物质性质不稳定，易在热、酶和氧化作用下发生降解；冠突散囊菌接种发

酵会促进酚类和黄酮类物质转化为其他物质，从而导致含量下降[29]。在本研究中，发酵赶黄草叶茶总多酚和总黄酮含量分别为 115.04 mg/g 和 68.17 mg/g，与未发酵茶相比总多酚含量下降 16.95%，总黄酮含量下降 18.70%，使得发酵赶黄草叶茶苦涩味减弱、口感醇和(图 5)。

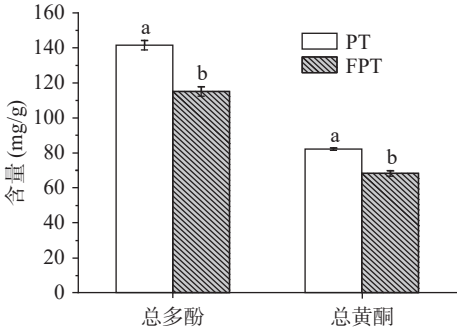


图 5 赶黄草叶茶发酵前后总多酚及总黄酮含量

Fig.5 Total phenolic and flavonoids contents of *Penthorum chinense* Pursh leaf tea infusion before and after fermentation

注：图中不同字母表示同一指标在两个样本中差异显著，$P<0.05$。

2.4.2 游离氨基酸 游离氨基酸是茶汤中的重要呈味物质，也是多种反应的前体物质，能提供甜味、鲜味、苦味等滋味[30]。由表 6 可知，发酵前后赶黄草叶茶中均检测出 21 种游离氨基酸，甜味氨基酸 7 种、鲜味氨基酸 3 种、苦味氨基酸 11 种。21 种游离氨基酸的总量在发酵后显著下降($P<0.05$)，各呈味氨基酸总量均呈下降趋势，其中苦味氨基酸下降幅度最大。这可能与微生物代谢活动、美拉德反应、氨基酸氧化分解和氨基酸转化形成挥发物质等作用有关[29,31]。有研究结果表明，通过降低苦味氨基酸能降低茶叶的苦涩味，增加鲜味、甜味氨基酸能提升茶叶的鲜爽和甘甜味[32]。进一步分析可得，经发酵后的赶黄草叶茶鲜甜味氨基酸比例由 75.65% 显著增高至 79.98%，苦味氨基酸所占比例由 24.35% 显著降低至 20.02%，苦味与鲜甜味氨基酸比值显著下降了 7.16%($P<0.05$)，这也可能是赶黄草叶茶经过发酵后苦涩味降低，回味甘醇的原因。

滋味活度值(TAV)大于 1 的成分被认为具有味觉活性[28]。发酵前后赶黄草叶茶苦味氨基酸和甜味氨基酸 TAV 均小于 1，表明单一氨基酸对苦味和甜

表 6 赶黄草叶茶发酵前后游离氨基酸组成

Table 6 Profile of free amino acids in PT and FPT

名称	呈味	阈值[7,20](mg/g)	含量(mg/100 g)		TAV	
			PT	FPT	PT	FPT
丙氨酸	甜味	0.6	29.33±0.59^a	2.52±0.08^b	0.49	0.04
天冬酰胺	甜味	1.5	135.43±3.38^a	8.19±0.09^b	0.9	0.05
谷氨酰胺	甜味	2.5	3.32±0.03^b	16.46±0.26^a	0.01	0.07
甘氨酸	甜味	1.3	2.51±0.09^a	0.86±0.03^b	0.02	0.01
脯氨酸	甜味	3	14.85±0.60^a	2.33±0.03^b	0.05	0.01
丝氨酸	甜味	1.5	30.77±0.42^a	3.18±0.13^b	0.21	0.01
苏氨酸	甜味	2.6	26.70±0.92^a	2.57±0.13^b	0.67	0.01
甜味氨基酸总量			242.91±3.80^a	36.11±0.40^b		
天冬氨酸	鲜味	1	88.2±0.36^a	10.24±0.08^b	0.88	0.1
γ-氨基丁酸	鲜味	0.2	9.92±0.16^a	1.12±0.01^b	0.5	0.06
谷氨酸	鲜味	0.3	54.25±2.09^a	26.35±1.22^b	1.81	0.88
鲜味氨基酸总量			152.37±2.61^a	37.71±1.12^b		
精氨酸	苦味	0.5	3.81±0.03^a	0.41±0.01^b	0.08	0.01
胱氨酸	苦味	0.02	0.92±0.03^a	0.75±0.03^b	0.46	0.38
组氨酸	苦味	0.2	6.51±0.08^a	1.76±0.05^b	0.33	0.09
异亮氨酸	苦味	0.9	21.43±0.35^a	0.79±0.03^b	0.24	0.01
亮氨酸	苦味	1.9	9.44±0.25^a	0.66±0.02^b	0.05	0
赖氨酸	苦味	0.5	10.08±0.41^a	1.80±0.03^b	0.2	0.04
蛋氨酸	苦味	0.3	0.76±0.01^a	0.71±0.00^b	0.03	0.02
苯丙氨酸	苦味	0.9	12.97±0.49^a	1.50±0.01^b	0.14	0.02
酪氨酸	苦味	2.6	10.51±0.13^a	1.77±0.05^b	0.04	0.01
缬氨酸	苦味	0.4	32.50±0.01^a	1.75±0.04^b	0.81	0.04
色氨酸	苦味	0.9	18.30±1.02^a	6.58±0.32^b	0.2	0.07
苦味氨基酸总量			127.23±2.22^a	18.48±0.45^b		
21种氨基酸总量			522.51±1.03^a	92.30±1.07^b		
甜味氨基酸占比(%)			46.49±0.01^a	39.12±0.00^b		
鲜味氨基酸占比(%)			29.16±0.00^a	40.86±0.01^b		
苦味氨基酸占比(%)			24.35±0.00^a	20.02±0.01^b		

注：同行不同小写字母表示显著差异性($P<0.05$)。

味贡献有限。鲜味氨基酸在发酵茶中 TAV 均小于 1，在未发酵茶中仅有谷氨酸 TAV 大于 1。

以上结果表明，赶黄草叶茶游离氨基酸在发酵过程中被大量利用，发酵能显著促进氨基酸转化，TAV 分析表明游离氨基酸不是发酵赶黄草叶茶的主要呈味物质。

2.5　挥发性成分分析

2.5.1　赶黄草叶茶发酵前后挥发性物质组成　为研究发酵前后赶黄草叶茶的香气特征，采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用的方法（HS-SPME- GC-MS）对发酵赶黄草叶茶的挥发性物质成分及相对含量进行分析鉴定。由表 7 可知，发酵前后赶黄草叶茶中共鉴定出 65 种挥发性物质，包括醛类 12 种、酮类 17 种、醇类 13 种、烃类 13 种、酯类 5 种、其他类 5 种。其中共有化合物为 20 种，占所有鉴定出挥发性化合物的 30.77%，说明发酵前后挥发性成分差异较大。

如图 6 展示了发酵前后赶黄草叶茶挥发性物质

表 7　赶黄草叶茶发酵前后挥发性成分定性及相对含量

Table 7　Qualitative analysis and relative content of volatile compounds of the PT and FPT

序号	保留时间（min）	CAS	香气化合物名称	相对含量（%）		气味描述[4,20,34−35]
				PT	FPT	
醛类						
1	13.804	66-25-1	正己醛	3.25±0.83^{a}	0.15±0.07^{b}	豆腥味、青草味
2	15.02	1576-87-0	反式-2-戊烯醛	0.74±0.34^{a}	–	油脂香、青草味
3	16.18	111-71-7	庚醛	1.40±0.12^{a}	–	油脂味、柑橘香、青草味、腐臭气味
4	16.877	6728-26-3	反式-2-己烯醛	7.28±0.55^{a}	0.63±0.04^{b}	青草味
5	19.103	106-72-9	2,6-二甲基-5-庚烯醛	0.17±0.03^{a}	–	青草味、柑橘香
6	20.531	432-24-6	*α*−环柠檬醛	0.25±0.11^{a}	–	柑橘香
7	20.703	4313-03-5	（E,E）-2,4-庚二烯醛	7.42±0.54^{a}	–	青草味
8	22.49	557-48-2	反-2-,顺-6-壬二烯醛	0.84±0.19^{a}	0.18±0.04^{b}	青草味
9	23.446	122-78-1	苯乙醛	0.68±0.07^{a}	–	花香
10	23.227	40702-26-9	1,3,4-三甲基-3-环己烯-1-甲醛	3.91±0.88^{a}	–	/
11	23.589	116-26-7	藏红花醛	1.21±0.10^{a}	–	木香
12	19.69	124-19-6	壬醛	1.38±0.30^{a}	0.61±0.31^{b}	脂肪香、甜橙香
酮类						
13	18.822	110-93-0	甲基庚烯酮	15.82±1.71^{a}	6.38±1.65^{b}	青草味
14	19.954	78-59-1	异佛尔酮	3.64±0.39^{a}	2.84±0.27^{b}	樟脑味、薄荷香
15	21.452	38284-27-4	（E,E）-3,5-辛二烯-2-酮	1.76±0.05^{a}	–	烘焙香、甜香
16	22.564	1604-28-0	6-甲基-3,5-庚二烯-2-酮	2.41±0.22^{a}	–	青草味、果香
17	24.246	1125-21-9	茶香酮	0.34±0.17^{a}	–	茶香
18	26.686	689-67-8	香叶基丙酮	18.10±1.01^{a}	1.48±0.24^{b}	生青味、青草味
19	28.407	79-77-6	*β*−紫罗兰酮	2.46±0.68^{a}	–	紫罗兰香、花香
20	31.589	502-69-2	植酮	0.14±0.02^{a}	0.13±0.03^{a}	青草味、木香
21	31.904	3548-78-5	（E）-ψ-紫罗兰酮	0.07±0.01^{a}	–	青草味
22	29.372	23267-57-4	环己酮	0.71±0.18^{a}	0.26±0.07^{b}	/
23	37.211	1117-52-8	法尼基丙酮	1.60±0.47^{a}	1.12±0.41^{a}	木香
24	22.408	30434-65-2	3,4,4-三甲基环戊-2-烯酮	0.52±0.14^{a}	–	/
25	23.62	98-86-2	苯乙酮	1.30±0.45^{b}	50.38±1.35^{a}	玫瑰香、芳香
26	8.396	78-93-3	2-丁酮	–	3.57±1.40^{a}	果香、清香
27	17.944	111-13-7	仲辛酮	–	1.72±0.54^{a}	果香、甜香
28	18.565	2408-37-9	2,2,6-三甲基环己酮	–	0.39±0.03^{a}	花香、甜香
29	26.553	17283-81-7	*β*−二氢紫罗兰酮	–	0.49±0.11^{a}	花香
醇类						
30	20.211	3391-86-4	1-辛烯3-醇	1.81±0.05^{a}	2.89±1.44^{a}	药草香、真菌清香
31	15.558	616-25-1	1-戊烯-3-醇	0.15±0.05^{a}	–	果香
32	18.387	1576-95-0	顺-2-戊烯醇	0.43±0.05^{a}	–	青草味
33	21.551	78-70-6	芳樟醇	0.99±0.29^{b}	8.45±1.76^{a}	铃兰花香、青木香、柑橘香
34	17.612	100-42-5	苯乙醇	0.05±0.03^{b}	0.71±0.09^{a}	玫瑰香、芳香
35	28.011	67858-77-9	5,9,13-三甲基-4,8,12-十四碳三烯-1-醇	0.47±0.04^{a}	–	/
36	29.698	142-50-7	橙花叔醇	0.21±0.06^{a}	–	玫瑰香、苹果香
37	26.262	106-25-2	橙花醇	0.13±0.08^{a}	–	花香、柠檬果香
38	20.208	104-76-7	2-乙基己醇	2.16±0.38^{a}	–	青草味、玫瑰香

续表 7

序号	保留时间（min）	CAS	香气化合物名称	相对含量(%)		气味描述[4,20,34−35]
				PT	FPT	
39	17.236	6728-31-0	CIS-4-庚烯醇	1.96±0.45^{a}	–	青草味、油脂味
40	16.643	137-32-6	2-甲基丁醇	–	0.21±0.08^{a}	/
41	18.9	111-27-3	正己醇	–	0.18±0.06^{a}	果香
42	25.901	98-85-1	苏合香醇	–	1.55±0.21^{a}	花香、果香
烷烃类						
43	16.611	112-40-3	十二烷	2.54±0.35^{a}	4.05±1.61^{a}	/
44	27.526	36144-40-8	1-丁烯叉基环己烷	0.11±0.02^{a}	–	/
45	17.736	527-84-4	邻-异丙基苯	0.32±0.13^{a}	–	/
46	18.89	98-82-8	异丙基苯	0.06±0.01^{a}	–	/
47	13.63	17312-54-8	3,7-二甲基癸烷	–	0.19±0.11^{a}	/
48	30.13	1209-61-6	4,9,12,12-四甲基-5-氧杂三环辛烷[8.2.0.04,6]十二烷	–	0.40±0.12^{a}	/
49	14.542	3387-41-5	桧烯	0.72±1.39^{a}	–	/
50	15.511	123-35-3	月桂烯	3.95±0.51^{a}	0.55±0.36^{b}	花香、柠檬香、木香
51	16.485	138-86-3	柠檬烯	0.57±0.54^{a}	–	柑橘香、柠檬香
52	17.524	100-42-5	苯乙烯	0.11±0.33^{a}	–	芳香
53	23.026	87-44-5	*β*-石竹烯	0.75±0.26^{a}	–	辛香、木香
54	15.175	99805-90-0	环戊二烯	–	0.08±0.04^{a}	木香
55	35.528	30021-74-0	*γ*-茂伦烯	0.14±0.02^{a}	–	木香、青草味
酯类						
56	21.949	2270-60-2	3,7-二甲基-6-辛烯酸甲酯	–	1.79±0.23^{a}	玫瑰香、柑橘香
57	24.487	3050-69-9	正己酸乙烯酯	0.33±0.12^{a}	–	菠萝果香味
58	37.275	15356-74-8	二氢猕猴桃内酯	0.68±0.26^{a}	1.16±0.07^{a}	清香
59	34.558	628-97-7	棕榈酸乙酯	0.06±0.01^{a}	–	辛香
60	16.973	123-66-0	正己酸乙酯	–	0.75±0.06^{a}	果香、甜香
其他						
61	21.274	1192-62-7	2-乙酰基呋喃	0.20±0.05^{b}	1.82±0.59^{a}	甜香、焦糖香
62	18.205	70424-14-5	(E)-2-(2-戊烯基)呋喃	1.49±0.45^{a}	–	豆香
63	28.792	1072-83-9	2-乙酰基吡咯	0.25±0.02^{a}	0.37±0.23^{a}	甜香、坚果香
64	19.419	103-9-3	对乙酰氨基酚	–	0.78±0.11^{a}	/
65	5.326	71773-95-0	(S)-2-氨基-N-乙基丙酰胺	1.96±0.68^{b}	3.74±0.68^{a}	/

注: “–”表示未检测出, “/”表示未查找到香气描述, 同行不同小写字母表示显著差异性(P<0.05)。

的种类和相对含量。比较发酵前后检测到的挥发性化合物的种类和相对含量(图 6、表 7), 发酵后比发酵前减少了 32 种挥发性化合物, 这些化合物主要提供青草味、木香、辛香、果香等气味; 同时, 发酵后新产生了 13 种挥发性化合物, 这些化合物主要为发酵赶黄草叶茶提供了花香、果香和甜香。赶黄草叶茶

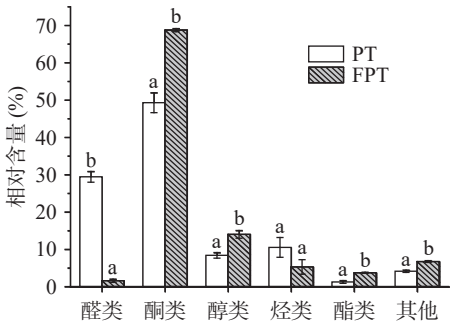


图 6 赶黄草叶茶发酵前后挥发性物质组成

Fig.6 Volatile organic compounds profile of the PT and FPT

注: 图中不同字母表示同一指标在两个样本中差异显著, P<0.05。

发酵后挥发性醛类物质种类和相对含量均减少, 其中, 呈青草味的(E,E)-2,4-庚二烯醛、反式-2-己烯醛、正己醛、反-2-,顺-6-壬二烯醛等物质, 在发酵后相对含量显著下降(P<0.05)。酮类是发酵前后赶黄草叶茶中相对含量最高的挥发性成分, 发酵后酮类物质总相对含量显著升高(P<0.05), 其中苯乙酮的相对含量上升最明显, 并新产生了 2-丁酮、仲辛酮、2,2,6-三甲基环己酮和 *β*-二氢紫罗兰酮。醇类物质相对含量显著上升(P<0.05), 以芳樟醇、1-辛烯-3-醇相对含量较高, 此外, 发酵新产生了苏合香醇、2-甲基丁醇和正己醇。烷烃类物质总的相对含量变化不显著, 除十二烷相对含量略有上升, 月桂烯、*β*-石竹烯、柠檬烯等具有柠檬香、木香的物质相对含量均减少。发酵后酯类化合物总相对含量略有上升, 可能是因为在发酵过程中微生物酶从其氨基酸前体生物合成风味活性酯化合物[33], 新产生了呈花果香的 3,7-二甲基-6-辛烯酸甲酯和正己酸乙酯, 呈木香、清香的二氢猕猴桃内酯含量增加。发酵后赶黄草叶茶中其他类化合

物共鉴定出 4 种，2-乙酰基呋喃、2-乙酰基吡咯、对乙酰氨基酚和(S)-2-氨基-N-乙基丙酰胺，共同构成发酵赶黄草叶茶的香气特征。

2.5.2　赶黄草叶茶发酵前后挥发性成分差异分析

正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA)是一种有监督的分类方法，能够有效区分样本并提取关键差异参数[36]。为进一步明确发酵前后赶黄草叶茶风味差异的原因，基于发酵前后赶黄草叶茶的挥发性成分相对含量建立的 OPLS-DA 模型如图 7(A)和 7(B)所示，可以看出，该模型对两个茶样进行了有效分离，其拟合参数为 R^2X=0.957、R^2Y=0.995，R^2X 和 R^2Y 越接近 1 模型越稳定，解释能力越强；Q^2=0.998，Q^2 大于 0.5 说明模型的预测能力越强。为验证模型的可靠性，通过 200 次交叉验证，所得模型的 Q^2 回归线与纵轴的相交点为负数(−0.589)，说明模型未出现过拟合现象，模型验证有效。

OPLS-DA 变量重要性因子(VIP)能够量化各个变量对分类的贡献度，从而筛选出重要的特征物质。图 7C 为发酵前后赶黄草叶茶中共检测出的 65 种挥发性化合物的 VIP 得分图，根据 P<0.05 且 VIP>1 的标准，如表 8 所示，筛选出 12 种发酵前后赶黄草叶茶的差异香气物质，包括苯乙酮、香叶基丙酮、甲基庚烯酮、(E,E)-2,4-庚二烯醛、芳樟醇、反式-2-己烯醛、1,3,4-三甲基-3-环己烯-1-甲醛、2-丁酮、月桂烯、正己醛、β-紫罗兰酮、6-甲基-3,5-庚二烯-2-酮，这些特征挥发物质的含量变化是造成发酵前后赶黄草叶茶风味差异的关键因子。

差异香气酮类化合物中，苯乙酮具有玫瑰香和芳香，发酵后相对含量由 1.30% 上升至 50.38%，差异显著(P<0.05)，是发酵赶黄草叶茶中相对含量最高的化合物，其余成分在样本中含量均较低。有研究表明，苯乙酮是茯砖茶菌香、花香的关键香气化合物，其香气强度的增加可能与优势曲霉菌的代谢有关[37]。甲基庚烯酮、香叶基丙酮和 6-甲基-3,5-庚二烯-2-酮

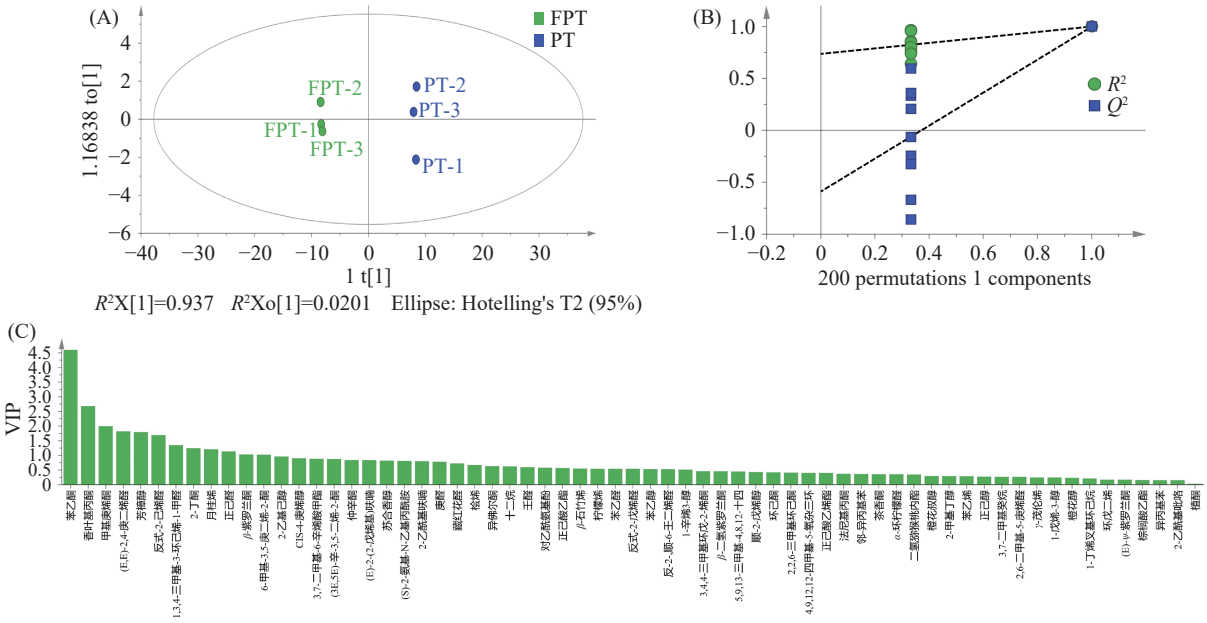


图 7　赶黄草叶茶发酵前后香气成分 OPLS-DA 得分图(A)、置换检验图(B)、VIP 得分图(C)

Fig.7　OPLS-DA score plots (A), replacement test results (B) and VIP scores (C) of volatile substances in PT and FPT

表 8　赶黄草叶茶发酵前后差异挥发性化合物筛选结果

Table 8　Differential volatile compounds screening results of the PT and FPT

编号	香气化合物	气味描述[4,34−35]	VIP值	P值
1	苯乙酮	玫瑰香、芳香	4.604	<0.05
2	香叶基丙酮	生青味、青草味	2.682	<0.05
3	甲基庚烯酮	青草味	2.000	<0.05
4	(E,E)-2,4-庚二烯醛	青草味	1.818	<0.05
5	芳樟醇	铃兰花香、青木香、柑橘香	1.796	<0.05
6	反式-2-己烯醛	青草味	1.693	<0.05
7	1,3,4-三甲基-3-环己烯-1-甲醛	/	1.351	<0.05
8	2-丁酮	果香、清香	1.244	<0.05
9	月桂烯	花香、柠檬香、木香	1.206	<0.05
10	正己醛	豆腥味、青草味	1.139	<0.05
11	β-紫罗兰酮	紫罗兰香、花香	1.031	<0.05
12	6-甲基-3,5-庚二烯-2-酮	青草味、清香	1.022	<0.05

具有青草气[38]，经发酵后甲基庚烯酮相对含量由 15.82% 显著降低至 6.38%，香叶基丙酮相对含量由 18.10% 显著降低至 1.48%（P<0.05），6-甲基-3,5-庚二烯-2-酮发酵后未检出。2-丁酮是发酵后新产生的物质，赋予发酵茶清果香和清香[7]。差异香气醛类化合物中，呈青草味的(E,E)-2,4-庚二烯醛、反式-2-己烯醛、正己醛等物质[38]，在发酵后相对含量显著降低（P<0.05）。芳樟醇具有铃兰花香、柑橘香和花香[18]，在发酵后相对含量由 0.99% 显著上升到 8.45%（P<0.05），研究发现，芳樟醇是普洱茶及六堡茶中醇类物质的主体[35]，同时，芳樟醇及其氧化物还被认为是发酵绿茶“菌香”的关键组分[10]，赋予发酵赶黄草叶茶特征花香及菌香。上述香型挥发性化合物相对含量增高，而呈青草味的挥发性化合物含量降低，使得发酵赶黄草叶茶香型由青草香向花果香、菌香转化。

3 结论

本文通过单因素-响应面试验确定了发酵赶黄草叶茶的最佳工艺条件为：加水量 27%，接种量 21%，发酵时间 16 d，该条件下赶黄草发酵叶茶感官评分为 91.60 分。此条件下金花普遍茂盛，茶汤色泽橙黄、口感醇和，具有协调的花香、果香和菌香。与未发酵的赶黄草叶茶相比，总多酚、总黄酮含量分别降低了 16.95% 和 18.70%，苦味与鲜甜味氨基酸含量比值下降 7.16%。发酵后赶黄草叶茶挥发性物质的组分和含量发生显著变化，正己醛、反式-2-己烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、甲基庚烯酮等具有青辛气、刺激性等不良气味的挥发性成分相对含量下降明显，而苯乙酮、芳樟醇、2-丁酮具有花果香、清香的挥发性成分新产生或相对含量上升，掩盖了赶黄草叶茶的青草味，促进了发酵赶黄草叶茶花果香、菌香的形成。综上所述，赶黄草叶茶经冠突散囊菌发酵后，其滋味和风味得到显著改善，优于未发酵赶黄草叶茶。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 张瑞雪, 杨善彬, 蒋杨凤, 等. 赶黄草中营养素含量的测定[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2019, 37(3): 30−34. [ZHANG Ruixue, YANG Shanbin, JIANG Yangfeng, et al. Determination of nutrient content in *Penthorum chinense* Pursh[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2019, 37(3): 30−34.]

[2] 蔡煜涵, 龙敏娟, 于芷芩, 等. 赶黄草化学成分、药理活性及质量标志物预测分析[J]. 中成药, 2025, 47(2): 523−532. [CAI Yuhan, LONG Minjuan, YU Zhiqin, et al. Prediction and analysis of chemical constituents, pharmacological activities and quality markers of *Penthorum chinense* DC[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2025, 47(2): 523−532.]

[3] 段文亚, 吴静, 颜玉锜, 等. 响应面法优化赶黄草茎、叶总黄酮加热回流提取工艺及其抗氧化性研究[J]. 现代食品, 2024(23): 55−62. [DUAN Wenya, WU Jing, YAN Yuqi, et al. Optimization of the heating reflux extraction technology for total flavonoids from the stems and leaves of *Penthorum chinense* Pursh by response surface methodology and their antioxidant activity[J]. Modern Food, 2024(23): 55−62.]

[4] 王星月, 杨潇然, 张紫涵, 等. 赶黄草叶茶制备工艺及其对风味、功效成分溶出的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(2): 241−252. [WANG Xingyue, YANG Xiaoran, ZHANG Zihan, et al. *Penthorum chinense* Pursh leaf tea preparation technology and its influence on flavor and functional ingredients dissolution[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(2): 241−252.]

[5] 杜鹤阳, 詹儒君, 徐应丽, 等. 赶黄草保健袋泡茶的配方及冲泡工艺优化[J]. 现代食品, 2023(1): 42−47. [DU Heyang, ZHAN Rujun, XU Yingli, et al. Optimization of the formula and brewing technology of health care teabag with *Penthorum chinense* Pursh[J]. Modern Food, 2023(1): 42−47.]

[6] 孙思胜, 程晶晶, 郭孝辉, 等. 复方赶黄草凉茶的研制[J]. 许昌学院学报, 2018, 37(4): 46−50. [SUN Sisheng, CHENG Jingjing, GUO Xiaohui, et al. Preparation of compound *Penthorum chinense* herbal tea[J]. Journal of Xuchang University, 2018, 37(4): 46−50.]

[7] 王星月, 杨潇然, 贾利蓉, 等. 赶黄草茎苦味物质基础及茎茶脱苦工艺对其风味、功效成分的影响研究[J]. 食品科技, 2021, 46(4): 51−56. [WANG Xingyue, YANG Xiaoran, JIA Lirong, et al. Bitter compounds in *Penthorum chinense* Pursh stem and the influence of debittering processing on its flavonoids and functional ingredients[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(4): 51−56.]

[8] ZHOU S D, XU X, LIN Y F, et al. On-line screening and identification of free radical scavenging compounds in *Angelica dahurica* fermented with *Eurotium cristatum* using an HPLC-PDA-Triple-TOF-MS/MS-ABTS system[J]. Food Chemistry, 2019, 272: 670−678.

[9] 徐达. “金花菌”发酵对普洱茶组分、口感的影响及其机制研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2023. [XU Da. Study on the effect of 'Jinhua fungus' fermentation on the composition and taste of Puerh tea and its mechanism[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2023.]

[10] 宋林瑶, 徐辉, 吴思瑶, 等. “散茶发花”发酵贵州绿茶的工艺优化及其特征挥发性化合物解析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 33−44. [SONG Linyao, XU Hui, WU Siyao, et al. Optimization of the "loose tea blooming" process for Guizhou green tea and analysis of characteristic volatile compounds[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 33−44.]

[11] ZOU Minmin, GUO Xiaohan, HUANG Yan, et al. Improvement of the quality of *Ginkgo biloba* leaves fermented by *Eurotium cristatum* as high value-added feed[J]. Processes, 2019, 7(9): 627.

[12] 张丽华, 李珍珠, 赵光远, 等. 冠突散囊菌发酵杜仲茶的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2019, 40(21): 118−123. [ZHANG Lihua, LI Zhenzhu, ZHAO Guangyuan, et al. Process optimization of fermentation of *Eucommia ulmoides* tea by *Eurotium cristatum*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(21): 118−123.]

[13] GU Qiuya, DUAN Guoliang, YU Xiaobin, et al. Bioconversion of flavonoid glycosides from *Hippophae rhamnoides* leaves into flavonoid aglycones by *Eurotium amstelodami*[J]. Microorganisms, 2019, 7(5): 122.

[14] DENG J, LI Y L, YUAN Y, et al. Secondary metabolites from the genus *Eurotium* and their biological activities[J]. Foods, 2023, 12(24): 4452.

［15］孟庭宇. 冠突散囊菌发酵鹧鸪茶叶工艺及其袋泡茶产品开发研究[D]. 海口：海南大学, 2023. ［MENG Tingyu. Study on the processing technology of partridge tea fermented by *Clostridium coronarum* and the development of bagged tea products[D]. Haikou: Hainan University, 2023. ］
［16］王罗. 冠突散囊菌固态发酵苦荞叶茶的研制及其品质分析[D]. 成都：成都大学, 2022. ［WANG Luo. Preparation and quality analysis of Tartary buckwheat leaves tea fermented by *Eurotium cristatum*[D]. Chengdu: Chengdu University, 2022. ］
［17］吴凯为. 冠突散囊菌发酵刺五加茶的制备及品质分析[D]. 锦州：渤海大学, 2019. ［WU Kaiwei. Preparation and quality analysis of *Acanthopanax senticosus* tea fermented by *Eurotium cristatum*[D]. Jinzhou: Bohai University, 2019. ］
［18］曾桥. 杜仲叶茯茶品质形成机制及其降血脂作用[D]. 西安：陕西科技大学, 2022. ［ZENG Qiao. Mechanism of quality formation of *Eucommia ulmoides* leaves Fu tea and its hypolipidemic effect[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2022. ］
［19］申春燕. 代代花的化学成分及生物活性研究[D]. 广州：华南理工大学, 2019. ［SHEN Chunyan. Chemical constituents from blossoms of *Citrus aurantium* L. var. *amara* Engl and their bioactivities[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. ］
［20］周晶晶, 张雯萍, 李光发, 等. 九龙大白茶白茶风味品质的分析[J]. 食品科学, 2025, 46(6): 201−210. ［ZHOU Jingjing, ZHANG Wenping, LI Guangfa, et al. Analysis of flavor quality of Jiulong Dabaicha white tea[J]. Food Science, 2025, 46(6): 201−210. ］
［21］石碧滢, 周承哲, 田采云, 等. 不同贮藏时间白牡丹茶风味品质差异分析[J]. 食品科学, 2023, 44(14): 313−325. ［SHI Biying, ZHOU Chengzhe, TIAN Caiyun, et al. Differences in flavor quality between white peony tea with different storage times[J]. Food Science, 2023, 44(14): 313−325. ］
［22］MA Wanjun, ZHU Yin, SHI Jiang, et al. Insight into the volatile profiles of four types of dark teas obtained from the same dark raw tea material[J]. Food Chemistry, 2021, 346: 128906.
［23］张舟琼, 曹霞, 任锡毅, 等. 贵州茯茶散茶发花条件优化及微生物多样性分析[J]. 现代食品科技, 2023, 39(9): 62−71. ［ZHANG Zhouqiong, CAO Xia, REN Xiyi, et al. Process optimization and microbial diversity analysis of Guizhou loose Fu-tea[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(9): 62−71. ］
［24］ZHOU Wen, XIA Yu, ZHAO Yajiao, et al. Study on the effect of key genes *ME2* and *adhE* during Luzhou-flavor Baijiu brewing[J]. Foods, 2022, 11(5): 700.
［25］李儒泽. 茯砖茶中的可培养微生物对儿茶素 EGCG 的生物转化[D]. 合肥：安徽农业大学, 2020. ［LI Ruze. Biotransformation of EGCG by culturable microorganisms in Fuzhuan brick tea[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020. ］
［26］TURAN E, SIMSEK A. Effects of lyophilized black mulberry water extract on lipid oxidation, metmyoglobin formation, color stability, microbial quality and sensory properties of beef patties stored under aerobic and vacuum packaging conditions[J]. Meat Science, 2021, 178: 108522.
［27］ZHAO M, SU X Q, NIAN B, et al. Integrated meta-omics approaches to understand the microbiome of spontaneous fermentation of traditional Chinese Pu-erh tea[J]. mSystems, 2019, 4(6): e00680−e00619.
［28］SCHARBERT S, HOLZMANN N, HOFMANN T. Identification of the astringent taste compounds in black tea infusions by combining instrumental analysis and human bioresponse[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(11): 3498−3508.
［29］XIAO Yue, ZHONG Kai, BAI Jinrong, et al. Insight into effects of isolated *Eurotium cristatum* from Pingwu Fuzhuan brick tea on the fermentation process and quality characteristics of Fuzhuan brick tea[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(9): 3598−3607.
［30］龚自明, 王雪萍, 高士伟, 等. 湖北名优绿茶氨基酸组分分析[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(21): 4419−4421. ［GONG Ziming, WANG Xueping, GAO Shiwei, et al. Analysis on amino acids of famous green teas in Hubei[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(21): 4419−4421. ］
［31］JIANG Hao, YU Feng, QIN Li, et al. Dynamic change in amino acids, catechins, alkaloids, and gallic acid in six types of tea processed from the same batch of fresh tea (*Camellia sinensis* L.) leaves[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2019, 77: 28−38.
［32］杨志超, 郑选东, 孙天择, 等. 冠突曲霉发酵对夏秋茶理化指标及风味的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 35−46. ［YANG Zhichao, ZHENG Xuandong, SUN Tianze, et al. Effect of fermentation of *Aspergillus cristatus* on physicochemical indexes and flavors of summer and autumn tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 35−46. ］
［33］STIBNY J, GAMERO A, PEREZ-TORRADO R, et al. *Saccharomyces kudriavzevii* and *Saccharomyces uvarum* differ from *Saccharomyces cerevisiae* during the production of aroma-active higher alcohols and acetate esters using their amino acidic precursors[J]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 205: 41−46.
［34］赵甜甜. 香椿发酵茶风味物质在加工过程中的变化及品质调控研究[D]. 郑州：河南工业大学, 2023. ［ZHAO Tiantian. Changes of flavor components and quality control of *Toona sinensis* fermented tea during processing[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023. ］
［35］马士成, 王梦琪, 刘春梅, 等. 六堡茶挥发性成分中关键香气成分分析[J]. 食品科学, 2020, 41(20): 191−197. ［MA Shicheng, WANG Mengqi, LIU Chunmei, et al. Analysis of volatile composition and key aroma compounds of Liupao tea[J]. Food Science, 2020, 41(20): 191−197. ］
［36］戴浩民, 张灵枝, 梁轶琳, 等. 乌龙茶茶树品种制白茶的风味特征及特征组分分析[J]. 食品科学, 2024, 45(2): 229−239. ［DAI Haomin, ZHANG Lingzhi, LIANG Yilin, et al. Analysis of flavor characteristics and characteristic components of white tea made from oolong tea cultivars[J]. Food Science, 2024, 45(2): 229−239. ］
［37］LI Qin, LI Yongdi, LUO Yu, et al. Characterization of the key aroma compounds and microorganisms during the manufacturing process of Fu brick tea[J]. LWT, 2020, 127: 109355.
［38］刘怡君, 徐威, 田雪, 等. 低温水提工艺对赶黄草叶提取物风味、功效成分及体外活性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(16): 221−234. ［LIU Yijun, XU Wei, TIAN Xue, et al. Effect of low-temperature aqueous extraction on flavor, functional ingredients and *in vitro* bioactivities of *Penthorum chinense* Pursh leaf extracts[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(16): 221−234. ］