

不同菌材栽培天麻的生物活性成分含量和抗氧化能力比较

谭云^{1,2,3}, 申爱荣^{1,2,3*}, 沈宝明^{1,2,3}, 刘丽娜^{1,2,3},
李赛男¹, 唐树元⁴, 谭著明^{1,2,3**}

(1. 湖南省林业科学院, 湖南 长沙 410004;

2. 湖南省林下特色生物资源培育与利用工程技术研究中心, 湖南 长沙 410004;

3. 湖南省菌根性食用菌种质资源保护与利用中心, 湖南 长沙 410004;

4. 绥宁县博世康天麻科技开发有限责任公司, 湖南 绥宁 422600)

【摘要】目的 探讨不同菌材对天麻的生物活性成分含量和抗氧化能力的影响,为天麻抗氧化产品开发提供参考。**方法** 以 9 种菌材单独栽培的天麻为研究对象,测定天麻生物活性成分(总生物碱、总多酚、总多糖、总黄酮)含量和体外抗氧化能力。采用相关性分析、聚类分析(CA)和主成分分析(PCA)对 9 种天麻进行综合评价。**结果** 不同菌材栽培的天麻生物活性成分含量存在差异:以白栎为菌材栽培的天麻 BL 总生物碱含量和总多糖含量最高;以山桐子和野漆树为菌材栽培的天麻 STZ 和 QYS 总多酚含量最高;以水青冈为菌材栽培的天麻 SQG 总黄酮含量最高;体外抗氧化试验发现,不同菌材栽培的天麻抗氧化能力存在差异:天麻 STZ 的总抗氧化能力(ABTS)最强,为 $(60.41 \pm 3.81) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$;天麻 YQS 的总抗氧化能力(DPPH)最强,为 $(5.36 \pm 0.09) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$;天麻 ZJ 的总抗氧化能力(FRAP)和 $\cdot\text{OH}$ 自由基清除率最高,分别为 $(6.74 \pm 0.05) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $(20.89 \pm 0.65)\%$ 。经 Pearson 相关性分析发现,天麻生物活性成分含量与抗氧化能力存在强相关性,天麻总生物碱、总多酚与总黄酮是天麻体外抗氧化作用的主要活性成分。聚类分析结果表明,天麻 YQS、ZJ 和 SQG 聚为一类。根据 PCA 评价,得分较高的是天麻 YQS、ZJ、SQG 和 BL,可进一步开发为抗氧化的功能食品。**结论** 野漆树、枳椇、水青冈和白栎作为菌材栽培的天麻抗生物活性成分含量较高,抗氧化活力较强,是天麻栽培的优选菌材。

【关键词】 天麻; 菌材; 生物活性成分; 抗氧化能力; 聚类分析; 主成分分析

DOI:10.70976/j.1008-0805.SZGYGY-2025-1315

CSTR:32392.14.j.1008-0805.SZGYGY-2025-1315

【中图分类号】S567 【文献标识码】A 【文章编号】1008-0805(2025)13-2500-09

天麻为兰科植物天麻 *Gastrodia elata* Bl. 的干燥块茎,是一味传统的名贵中药材。其具有息风止痉,平抑肝阳,祛风通络的功效^[1]。2023 年,天麻入选国家药食同源目录,是重要的食品来源^[2]。新鲜的天麻可以直接炖炒后食用,干燥后的天麻可用于煲汤,作为新型功能型食品,天麻已经走进寻常百姓家。自从 1965 年徐锦堂利用野生蜜环菌首次人工栽培天麻获得成功以来^[3],天麻的人工栽培技术得到进一步完善和推广^[4]。现阶段,围绕天麻高效蜜环菌^[5]和萌发菌^[6]的选育是研究热点。天麻的人工栽培主要分布于我国云南、贵州、陕西、湖北、安徽、湖南等地区,并逐渐形成了“滇天麻”“贵天麻”“雪峰天麻”等地域特色品牌。

天麻是兰科多年生草本植物,不含叶绿素,不能进行光合作用,必须依靠共生的蜜环菌提供营养^[7]。菌材是蜜环菌获取营养的主要来源,不同菌材中木质素、纤维素、蛋白质等营养成分的含量存在差异^[8],会直接

影响天麻的产量和品质。谭云等^[9]用不同菌材栽培天麻,并进行产量和品质对比,发现白栎是栽培天麻的首选菌材,山桐子、水青冈、山樱桃为栽培天麻的较优菌材;代波等^[10]研究了不同菌材混合伴栽天麻对其产量与品质的影响,发现贵州青冈+亮叶桦作为混合菌材,伴栽天麻的产量和产值最佳;罗夫来等^[11]发现在云贵高原进行天麻仿野生栽培时,以青冈为菌材树种栽培天麻产量最高;申爱荣等^[12]对运用隶属函数法综合筛选出化香、山樱桃、锥栗和拟赤杨为湖南天麻栽培优选菌材树种。上述研究都表明,菌材树种对天麻的品质和产量有直接影响,但是受限于试验地的地理位置和气候条件、菌材树种的树龄、天麻种和蜜环菌菌种来源、栽培方式、采收时间、评价标准等不同,前人的研究不能得出一致的结论。目前,对于天麻质量检测都是基于《中华人民共和国药典》^[13]中规定“天麻素和对羟基苯甲醇总含量不低于 0.25%”的标准,研究更偏重

收稿日期:2024-09-11; 修订日期:2025-02-15

基金项目:湖南省林业科技计划项目(XLK201904);湖南省自然科学基金(2023JJ50073);

湖南省生态保护与修复专项(湘财资环指 2023[72];湘财资环指 2020[29])

作者简介:谭云(1989-),男(汉族),湖南宁乡人,湖南省林业科学院助理研究员,硕士学位,主要从事生物资源学研究。

*通讯作者简介:申爱荣(1980-),女(汉族),湖南邵东人,湖南省林业科学院副研究员,博士学位,主要从事菌物学研究。

**通讯作者简介:谭著明(1966-),男(汉族),湖南沅江人,湖南省林业科学院研究员,博士学位,主要从事菌物学研究。

于天麻的药用成分,是以高品质的药用天麻为目标进行菌材筛选。

天麻作为天然的多功能食品,其富含多糖、多酚、黄酮和生物碱类活性成分^[13,14],主要有神经保护^[15],镇静^[16]、催眠^[17],抗惊厥^[18]、抗癫痫^[19],抗老年痴呆^[20],抗氧化^[21]、抗肿瘤^[22]等功效,同时还有辅助降血糖^[23]、降血脂^[24]、降血压^[25],改善肠道菌群^[26]、预防肝肾损伤^[27]、调节免疫力^[28]、缓解帕金森病^[29]等多种功能,营养及保健价值极高。据国家市场监督管理总局的特殊食品查询平台检索的数据显示,截至 2024 年 6 月,以天麻及其提取物为主要原料的保健食品共计 67 种,可见已经天麻被广泛添加到保健食品中^[30]。不同菌材会直接影响天麻中生物活性成分和营养物质的含量,为了获得生物活性成分高、抗氧化能力强的高品质天麻,对栽培天麻的菌材进行筛选是很有必要的。本文选择以白栎、枹木、水青冈、山桐子、野漆树、青榨

槭、山樱桃、化香和枳椇为单一菌材栽培的天麻为试验材料,通过测定 9 种天麻的总生物碱含量、总多酚含量、总多糖含量、总黄酮含量,并对比其抗氧化活性的差异,采用相关性分析、聚类分析和主成分分析法对 9 种天麻进行综合评价,筛选出生物活性成分高、抗氧化能力强的天麻,为天麻抗氧化产品的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 药材

供试的 9 种天麻为绥宁县博世康天麻科技开发有限公司在湖南省邵阳市绥宁县麻塘苗族乡田螺旋村栽培,杂交天麻种和蜜环菌用量、试验布置和栽培方法见文献^[9]。栽培时间为 2020 年 4 月,采收时间为 2020 年 12 月,天麻经蒸煮后烘干保存。天麻及栽培菌材的具体信息见表 1。

表 1 不同天麻及菌材介绍

序号	天麻种类	菌材名称	菌材介绍
1	BL	白栎 <i>Quercus fabri</i> Hance.	壳斗科栎属
2	QM	枹木 <i>Alnus cremastogyne</i> Burk.	桦木科枹木属
3	SQG	水青冈 <i>Fagus longipetiolata</i> Seem.	壳斗科水青冈属
4	STZ	山桐子 <i>Ilexia polycarpa</i> Maxim.	大风子科山桐子属
5	YQS	野漆树 <i>Toxicodendron sylvestre</i> (Siebold & Zucc.) Kuntze.	漆树科漆树属
6	QZQ	青榨槭 <i>Acer davidii</i> Franch.	槭树科槭属
7	SYT	山樱桃 <i>Cerasus tomentosa</i> (Thunb.) Wall.	蔷薇科樱桃属
8	HX	化香 <i>Platycarya strobilacea</i> Sieb. et Zucc.	胡桃科化香树属
9	ZJ	枳椇 <i>Hovenia acerba</i> Lindl.	鼠李科枳椇属

1.1.2 试剂

总抗氧化能力(DPPH)试剂盒(No. DPPH-1-D)、总抗氧化能力(ABTS)试剂盒(No. ABTS-1-D)、总抗氧化能力(FRAP)试剂盒(No. FRAP-1-G),来自苏州科铭生物技术有限公司。·OH 自由基清除能力试剂盒(No. QZQ-1-G),来自南京集测生物科技有限公司。标准品:盐酸川芎嗪(≥98.0%)、没食子酸(≥99.0%)、芦丁(≥98.0%)、葡萄糖(≥99.5%),上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.2 天麻生物活性成分测定方法

1.2.1 总生物碱含量测定

采用雷氏盐比色法测定天麻总生物碱含量。称取天麻粉末(过 3 号筛)5.00 g,至带塞锥形瓶中,加 pH 2.0 盐酸溶液 50.0 mL,浸泡 12.0 h,超声提取 25.0 min,离心 5.0 min,上清液过已经处理好的 D101 大孔树脂柱(内径 15 cm,长 10 cm),收集过柱液,0.1 mol·L⁻¹ HCl 调 pH 2.0,加新鲜配制的 2% 雷氏盐溶液 5.00 mL,摇匀,置冰水浴中 30.0 min 进行显色反应。取出,用小号 G4 熔玻璃漏斗抽滤,沉淀用适量蒸馏水洗涤,抽干,以丙酮溶解并定容至 5.0 mL,在 525 nm 波长处测定吸光度。以盐酸川芎嗪为对照品,绘制

标准曲线,计算天麻中总生物碱含量。

1.2.2 总多酚含量测定

采用福林酚比色法测定天麻总多酚含量。称取天麻粉末(过 3 号筛)0.10 g,用 20.0 mL 蒸馏水洗入 25.0 mL 容量瓶中,至 100℃沸水浴中保温 30.0 min,取出后自然冷却,定容,过滤后搜集滤液备用。用移液器吸取 1.00 mL 滤液,分别加入 FC 显色剂 1.0 mL 及 3.0 mL 7.5% 碳酸钠溶液,用蒸馏水定容至 25.0 mL,混匀,室温下显色反应 60.0 min,测定 765 nm 波长处吸光度,以没食子酸为标准品,绘制标准曲线,计算总多酚含量。

1.2.3 总多糖含量测定

采用苯酚硫酸法测定天麻总多糖含量。称取天麻粉末(过 3 号筛)0.20 g,置于 50.0 mL 离心管内,用 5.0 mL 水浸润样品,缓慢加入 20.0 mL 无水乙醇,同时使用涡旋振荡器振摇,使混合均匀,置超声提取器中超声提取 30.0 min,4000 r/min 离心 10.0 min,弃上清。不溶物用 10.0 mL 80% 乙醇溶液洗涤离心。用水将上述不溶物转移入圆底烧瓶,加入 40.0 mL 蒸馏水,沸水浴 2.0 h。冷却至室温,过滤,将滤液转移至 50.0 mL 容量瓶中,残渣用蒸馏水洗涤 3 次,一并转移至容量瓶

中,加水定容,得到天麻多糖提取液。用移液器吸取 1.0 mL 多糖提取液,置于 10.0 mL 带塞试管中,精密加 5% 苯酚溶液 1.0 mL,摇匀,再准确加入硫酸 5.0 mL,摇匀,静置 10.0 min,摇匀,30℃ 水浴 20.0 min,于 490 nm 波长处测定吸光度。以葡萄糖为标准品,绘制标准曲线,计算天麻中总多糖含量。

1.2.4 总黄酮含量测定

采用分光光度法测定天麻总黄酮含量。称取天麻粉末(过 3 号筛)0.20 g,用 20.0 mL 60% 乙醇回流提取 2 次后过滤,滤液合并后蒸干,用 60% 乙醇溶解并定容至 25.0 mL。精密量取样品溶液 5.0 mL,置于 25.0 mL 容量瓶中,加入 0.5 mL 5% NaNO_2 溶液后,在 510 nm 波长处测定吸光度。以芦丁为标准品,绘制标准曲线,计算天麻总黄酮的含量。

1.3 抗氧化能力测定

参照总抗氧化能力(DPPH)试剂盒、总抗氧化能力(ABTS)试剂盒、总抗氧化能力(FRAP)测试盒, $\cdot\text{OH}$ 自由基清除能力试剂盒说明书进行天麻抗氧化能力检测,同时以维生素 C 溶液为阳性对照。

1.4 数据处理

试验重复 5 次,采用 Origin 2018 软件进行数据处理,结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示;用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析,用 Duncan 法进行多重比较显著性分析。用 GraphPad Prism 8.0 软件绘图。用 SPSS 20.0 软件进行主成分分析,对 9 种天麻的生物活性成分含量和抗氧化能力进行综合评价。

2 结果

2.1 天麻活性成分含量测定

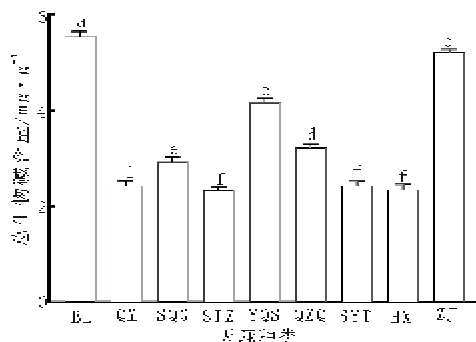
2.1.1 天麻总生物碱含量测定

生物碱是天麻中一类含氮的碱性有机化合物,大多数有复杂的环状结构,氮素多包含在环内,有显著的生物活性,是重要的次级代谢产物。不同菌材栽培天麻的总生物碱含量存在显著差异,结果如图 1 所示。天麻 BL 总生物碱含量最高,达到 $5.55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,且显著高于其他 8 种天麻。天麻 ZJ、YQS、QZQ、SQG 中总生物碱含量次之,分别为 5.22、4.17、3.23、2.93 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,且相互之间存在显著差异。天麻 QM、STZ、SYT、HX 中总生物碱含量较低,在 2.33~2.42 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,且相互之间无显著差异。从总生物碱含量来看,白栎和枳椇是栽培天麻的优选菌材。

2.1.2 天麻总多酚含量测定

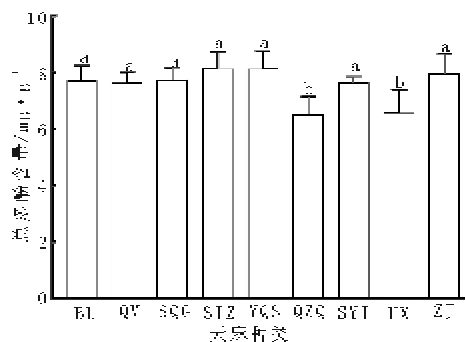
不同菌材栽培天麻的总多酚含量如图 2 所示。天麻 STZ、YQS、ZJ、SQG、BL、SYT 和 QM 中总多酚含量较高,在 7.65~8.14 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,且相互之间无显著差异,表明不同菌材对天麻多酚含量影响较小。天麻 QZQ 和 HX 中总多酚含量较低,分别为 6.57、6.52 $\text{mg} \cdot$

g^{-1} ,且相互之间无显著差异。陈琛等^[31]测定了陕西、云南、贵州和四川 4 个产地红天麻总多酚含量,发现陕西汉中产红天麻总多酚含量最高,为 $0.525 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;廖霞等^[32]发现以 70% 甲醇提取云阳乌天麻的总多酚含量最高,为 $4.006 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;罗紫屹等^[33]发现贵州德江产黄天麻总多酚含量为 $6.26 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,表明不同天麻品种之间总多酚含量存在较大差异。本试验所用天麻是以红杆天麻为母本,乌杆天麻为父本的杂交天麻,其总多酚含量均高于红天麻和乌天麻,从侧面反映出天麻杂交育种的优势性。从总多酚含量来看,山桐子、枳椇、水青冈、白栎和桤木是栽培天麻的优选菌材。



图中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

图 1 不同天麻总生物碱含量



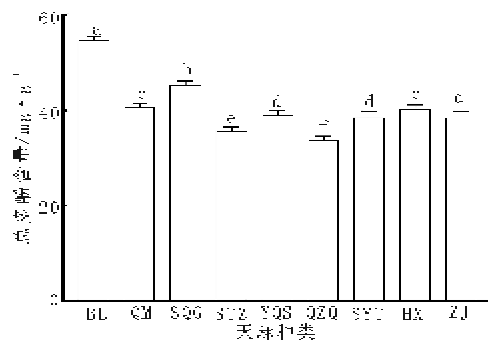
图中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

图 2 不同天麻总多酚含量

2.1.3 天麻多糖含量测定

天麻多糖是天麻中主要的生物活性成分,其具有抗衰老、抗氧化、抗肿瘤,调节微生物菌群,增强免疫力等功能^[26,28,29,34],食药两用价值高,已经被开发成多种功能型食品^[30]。不同菌材栽培天麻的总多糖含量存在显著差异,结果如图 3 所示。天麻 BL 中总多糖含量最高,达到 $54.73 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,且显著高于其他 8 种天麻。天麻 SQG 总多糖含量次之,为 $45.30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,天麻 QM 和 HX 总多糖含量分别为 40.64 、 $40.27 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,且两者之间无显著差异。天麻 YQS、ZJ 和 SYT 中总多

糖含量在 $38.54 \sim 39.00 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 且相互之间无显著差异。天麻 QZQ 中总多糖含量最低, 为 $33.84 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 且显著低于其他 8 种天麻。张双奇等^[34]对超声辅助热水浸提法提取天麻多糖的工艺进行优化, 发现陕西商洛天麻多糖含量为 $32.83 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 与本试验结果接近。从总多糖含量来看, 白栎和水青冈是栽培天麻的优选菌材。

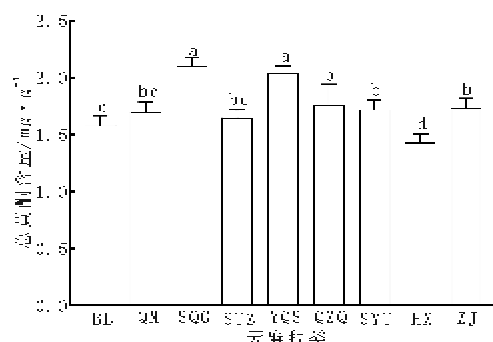


图中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

图 3 不同天麻总多糖含量

2.1.4 天麻总黄酮含量测定

不同菌材栽培天麻的总黄酮含量存在差异, 结果如图 4 所示。天麻 SQG 和 YQS 中总黄酮含量最高, 分别为 2.10 、 $2.04 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 且显著高于其他 7 种天麻。天麻 HX 中总黄酮含量最低, 仅为 $1.43 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 且显著低于其他 8 种天麻。廖霞等^[32]用 5 种溶剂提取云阳乌天麻总黄酮, 发现以 70% 甲醇提取物的总黄酮含量最高, 为 $1.29 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 但是都低于本试验 9 种乌红杂交天麻中总黄酮含量, 推测天麻经杂交育种后, 可以有效促进黄酮类成分的积累。从总黄酮含量来看, 水青冈和野漆树是栽培天麻的优选菌材。



图中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

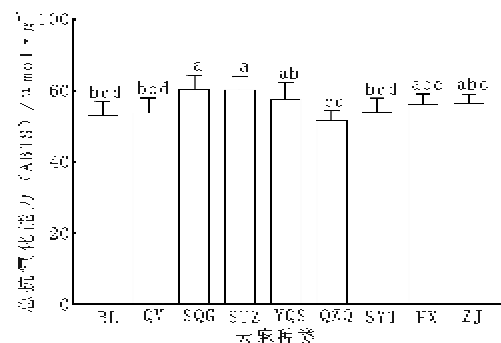
图 4 不同天麻总黄酮含量

2.2 天麻抗氧化能力测定

2.2.1 总抗氧化能力 (ABTS) 测定

ABTS 法常用于亲水性和亲脂性物质抗氧化能力

测定。ABTS·自由基经氧化后生成稳定的蓝绿色阳离子自由基 ABTS^+ , 在 734 nm 波长处有最大吸收峰。以标准曲线上获得的抗氧化剂 Trolox (6-羟基-2,5,7,8-四甲基色烷-2-羧酸) 的量来表示天麻对 ABTS·自由基清除能力。9 种天麻对 ABTS·自由基清除能力存在差异, $40.0 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的维生素 C 溶液对 ABTS·自由基清除能力为 $56.97 \mu\text{mol} \cdot \text{mL}^{-1}$, 结果如图 5 所示。天麻 STZ 和 SQG 的总抗氧化能力 (ABTS) 最高, 分别为 60.41 、 $60.28 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 且二者之间无显著差异。天麻 YQS、ZJ、HX、BL、QM、SYT 的总抗氧化能力 (ABTS) 次之, 为 $53.89 \sim 57.60 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 且相互之间无显著差异。天麻 QZQ 的总抗氧化能力 (ABTS) 最低, 仅为 $51.60 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。从天麻的总抗氧化能力 (ABTS) 看, 山桐子和水青冈是栽培天麻的优选菌材。



图中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

图 5 不同天麻的总抗氧化能力 (ABTS)

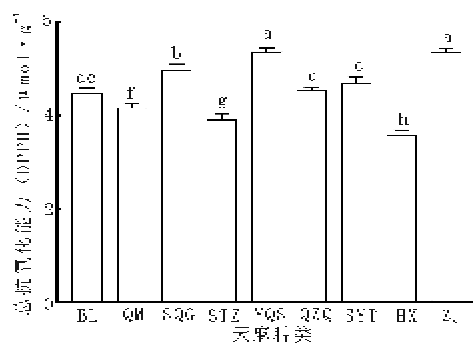
2.2.2 总抗氧化能力 (DPPH) 测定

DPPH·为稳定的自由基, 易溶于甲醇、乙醇等极性溶剂中。向 DPPH·溶液中加入抗氧化剂时, 会发生脱色反应, 在 515 nm 波长处有最大吸收峰。以标准曲线上获得的抗氧化剂 Trolox (6-羟基-2,5,7,8-四甲基色烷-2-羧酸) 的量来表示天麻对 DPPH·自由基清除能力。9 种天麻总抗氧化能力 (DPPH) 存在显著差异, $3.0 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的维生素 C 溶液对 DPPH·自由基清除能力为 $4.25 \mu\text{mol} \cdot \text{mL}^{-1}$, 结果如图 6 所示。天麻 YQS 和 ZJ 的总抗氧化能力 (DPPH) 较高, 分别为 5.36 、 $5.35 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 且显著高于其他 7 种天麻。天麻 SQG、SYT、QZQ、BL、QM 和 STZ 的总抗氧化能力 (DPPH) 次之, 为 $3.91 \sim 4.97 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。天麻 HX 总抗氧化能力 (DPPH) 最低, 分别为 $3.58 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 且显著低于其他 8 种天麻。从天麻总抗氧化能力 (DPPH) 来看, 野漆树和枳椇是栽培天麻的优选菌材。

2.2.3 总抗氧化能力 (FRAP) 测定

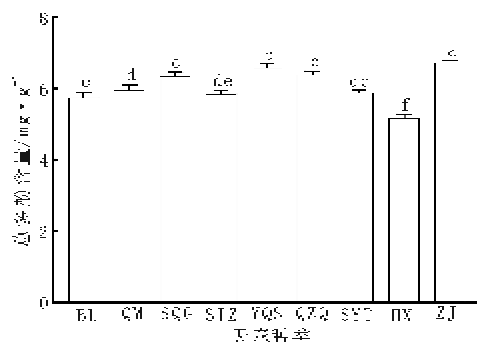
铁还原抗氧化能力 (ferric reducing antioxidant potential assay, FRAP) 是指在酸性环境下, 抗氧化物质将

Fe^{3+} - TPTZ 还原,产生蓝色的 Fe^{2+} - TPTZ 的能力,反映了总抗氧化能力,在波长 593 nm 处有最大吸收峰。以从标准曲线上获得的抗氧化剂 Trolox(6-羟基-2,5,7,8-四甲基色烷-2-羧酸)的量来表示天麻的铁还原抗氧化能力。9 种天麻对铁还原能力存在显著差异,8.0 mg · mL⁻¹ 的维生素 C 溶液对铁还原抗氧化能力为 6.43 $\mu\text{mol} \cdot \text{mL}^{-1}$,结果如图 7 所示。天麻 ZJ 对铁离子有较强还原能力,为 6.74 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,且显著高于其他 8 种天麻。天麻 YQS、QZQ 和 SQG 的铁离子还原能力次之,为 6.39 ~ 6.59 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。天麻 QM、STZ、SYT 和 BL 的铁离子还原能力无显著差异。天麻 HX 铁离子还原能力最低,分别为 5.17 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,且显著低于其他 8 种天麻。从对铁离子还原能力来看,枳椇和野漆树是栽培天麻的优选菌材。



图中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

图 6 不同天麻的总抗氧化能力 (DPPH)



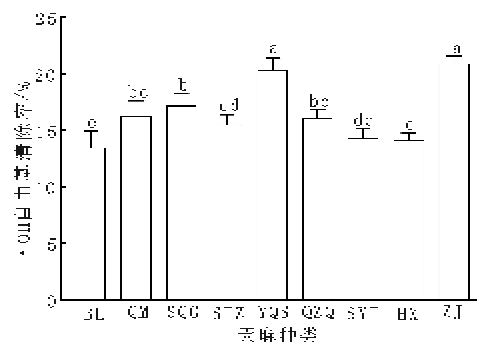
图中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

图 7 不同天麻的总抗氧化能力 (FRAP)

2.2.4 ·OH 自由基清除能力

$\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ 通过 Fenton 反应产生 ·OH 自由基,水杨酸与 ·OH 自由基反应生成有色物质 2,3-二羟基苯甲酸,在 510 nm 波长处有最大吸收峰。可根据天麻对 ·OH 自由基的清除率来评价天麻的抗氧化能力。9 种天麻对 ·OH 自由基清除能力存在显著差异,3.0 mg · mL⁻¹ 的维生素 C 溶液对 ·OH 自由基清除率为

15.33%,结果如图 8 所示。天麻 ZJ 和 YQS 对 ·OH 自由基清除率最强,分别为 20.89% 和 20.31%,且显著高于其他 7 种天麻。天麻 SQG、QZQ、QM 和 STZ 对 ·OH 自由基清除率之间无显著差异;天麻 HX 和 BL 对 ·OH 自由基清除率最低,分别为 14.11%、13.48%,且相互之间无显著差异。从对 ·OH 自由基清除能力来看,枳椇和野漆树是栽培天麻的优选菌材。



图中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

图 8 不同天麻对 ·OH 自由基清除率

2.3 相关性分析

天麻的生物活性成分和抗氧化性能是决定其品质的关键因子,对不同菌材栽培天麻的生物活性成分和体外抗氧化能力进行 Pearson 相关性分析,结果如图 9 所示。从天麻的 4 个生物活性成分来看,天麻总多糖含量与总生物碱含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$),天麻总多酚含量与总黄酮含量呈显著正相关 ($P < 0.05$)。从天麻生物活性成分和抗氧化能力来看,天麻总生物碱含量与总抗氧化能力 (DPPH) 和总抗氧化能力 (FRAP) 呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与 ·OH 自由基清除率呈显著正相关 ($P < 0.05$),显示出较强的抗氧化能力;天麻总多酚含量与总抗氧化能力 (ABTS) 和 ·OH 自由基清除率呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与总抗氧化能力 (DPPH) 和总抗氧化能力 (FRAP) 呈显著正相关 ($P < 0.05$),显示出极强的抗氧化能力,这与廖霞^[32]等发现天麻总多酚含量与 DPPH · 自由基清除能力呈显著正相关的结论相符。天麻总黄酮含量与总抗氧化能力 (ABTS) 呈显著正相关 ($P < 0.05$),与总抗氧化能力 (DPPH)、总抗氧化能力 (FRAP) 和 ·OH 自由基清除率呈极显著正相关 ($P < 0.01$),显示出极强的抗氧化能力,这与廖霞等^[32]发现天麻总黄酮含量与 ABTS · 自由基清除能力呈显著正相关的结论相符。上述相关性分析的结果表明,天麻总生物碱、总多酚与总黄酮,对 4 种不同的自由基都有较强的清除能力,显示出较强的抗氧化活性^[31],是天麻体外抗氧化作用的主要活性成分。

2.4 聚类分析

将 9 种天麻所测生物活性成分含量和抗氧化能力的 8 个指标值导入微生信网站 (<http://www.bioinformatics.com.cn/>), 采用组间连接法, 以欧氏距离为度量进行双向聚类, 结果如图 10 所示。从天麻的生物活性成分和抗氧化能力来看, 总生物碱含量与总多糖含量聚为一类, 和图 9 中 Tac 与 Tpsc 呈极显著正相关的结果相符。天麻总多酚含量与总抗氧化能力 (ABTS) 聚为一类, 和图 9 中 Tppc 与 TaocA 呈极显著正相关的结果相符。天麻总黄酮含量与总抗氧化能力 (ABTS)、总抗氧化能力 (FRAP)、·OH 自由基清除率聚为一类, 和图 9 中 Tfc 与 TaocA、TaocF、Ofsr 呈极显著正相关的结果相符。从天麻聚类来看, 9 种天麻可以分为三大类, 天麻 ZJ、YQS 和 SQG 为一类; 天麻 BL 单独聚为一类; 天麻 QZQ、QM、STZ、SYT 和 HX 聚为一类。从天麻菌材聚类分析的结果来看, 天麻菌材与树种生物学分类的科属来源没有直接相关性, 推测天麻对菌材营养的利用没有直接偏好。后续可以进一步研究天麻栽培前后, 菌材营养成分 (包括纤维素、半纤维、木质素、有机碳、全氮、全磷和全钾等) 的变化规律, 发掘菌材中对天麻产量和品质起关键作用的成分, 为高品质天麻的栽培提供依据。

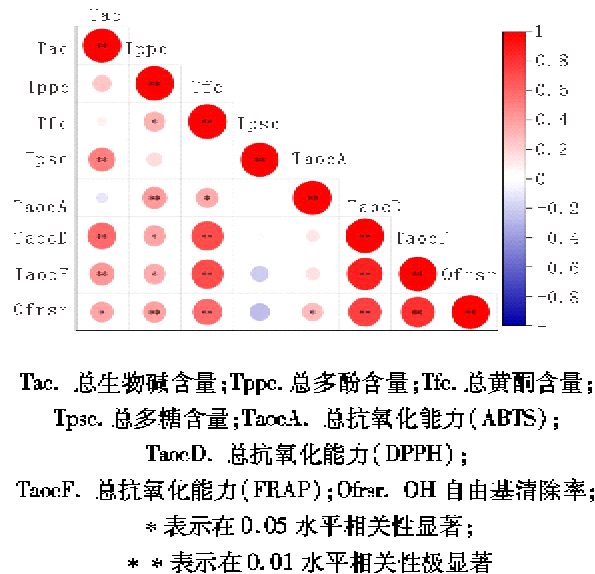


图 9 天麻生物活性成分与抗氧化活性的相关性分析

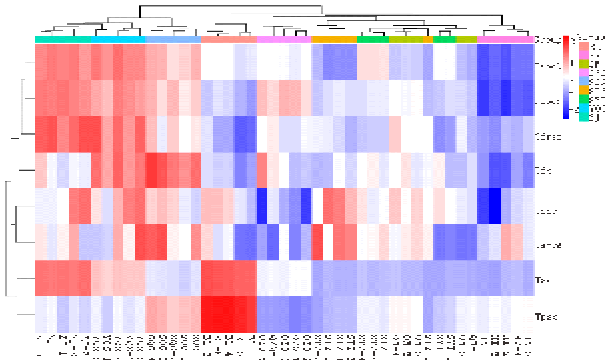
2.5 主成分分析

2.5.1 主成分计算

主成分分析 (principal components analysis, PCA) 是一种可靠的质量评价方法, 可以将多个变量转化为少数的综合指标, 可最大限度保留原始高维的变量信息。对不同菌材栽培天麻的总生物碱含量、总多酚含量、总多糖含量、总黄酮含量、总抗氧化能力 (ABTS)、总抗氧化能力 (DPPH)、总抗氧化能力 (FRAP) 和 ·OH 自由

基清除率 8 项指标进行主成分分析, 其 KMO (Kaiser - Meyer - Olkin) 检验系数为 0.613, Bartlett 球形度检验 P 值小于 0.001, 数据呈球形分布, 各个变量在一定程度上相互独立, 符合检验标准, 可以进行主成分分析。PCA 结果如表 2、图 11 所示。

从表 2 可知, PCA 得到特征值大于 1 的 3 个主成分, 累计方差贡献率达 82.180%, 表明这 3 个主成分能反映 8 项指标的大部分的信息。其中 PC1 特征值为 3.758, 方差贡献率为 46.975%, 其中贡献最大的为总抗氧化能力 (DPPH), 载荷值为 0.922, 其次为总抗氧化能力 (FRAP) 和总黄酮含量, 载荷值分别为 0.918 和 0.780。表明 PC1 主要与天麻中总黄酮含量及其总抗氧化能力相关, 主要反映了天麻的抗氧化成分及抗氧化活性。PC2 特征值为 1.572, 方差贡献率为 19.652%, 其中贡献最大的为总多糖含量, 载荷值为 0.881, 其次是总生物碱含量, 载荷值为 0.757, 主要反映了天麻生物活性成分总多糖和总生物碱含量。PC3 特征值为 1.244, 方差贡献率为 15.552%, 其中贡献最大的为总抗氧化能力 (ABTS), 载荷值为 0.784, 主要反映了天麻对 ABTS · 自由基的清除能力。



Tac. 总生物碱含量; Tppc. 总多酚含量; Tfc. 总黄酮含量;
Tpsc. 总多糖含量; TaocA. 总抗氧化能力 (ABTS);
TaocD. 总抗氧化能力 (DPPH); TaocF. 总抗氧化能力 (FRAP);
Ofsr. ·OH 自由基清除率

图 10 聚类分析结果

表 2 不同天麻主成分载荷矩阵、特征值及贡献率

因子	主成分		
	PC1	PC2	PC3
总生物碱含量	0.518	0.757	-0.208
总多酚含量	0.554	0.126	0.579
总多糖含量	-0.012	0.881	0.327
总黄酮含量	0.780	-0.224	0.093
总抗氧化能力 (ABTS)	0.352	-0.275	0.784
总抗氧化能力 (DPPH)	0.922	0.135	-0.214
总抗氧化能力 (FRAP)	0.918	-0.125	-0.27
·OH 自由基清除率	0.87	-0.219	-0.129
特征值	3.758	1.572	1.244
方差贡献率/%	46.975	19.652	15.552
累计贡献率/%	46.975	66.628	82.180

由图 11 可知,天麻 BL 位于 X 轴上方,且与其他样本距离较远,差异较明显,与图 10 聚类分析中,将天麻菌材白栎单独聚为一类的结果相符。天麻 ZJ、YQS 和 SQG 均位于 Y 轴左侧,距离较近,与图 10 聚类分析中天麻菌材野漆树、枳椇和水青冈聚为一类的结果一致。天麻 QZQ、SYT、QM、STZ 都集中分布在第四象限,且距离很近,互有交集,与图 10 聚类分析中,天麻菌材青榨槭、山樱桃、枳椇和山桐子共同聚集在一个分支的结果一致。图中圆环代表各指标的相关性,其中 Tfc 与 Ofnsr 和 TaocF、Tppc 与 TaocD 都在圆环附近,都显示出较强的相关性,与图 9 中 pearson 相关性分析的结果一致。

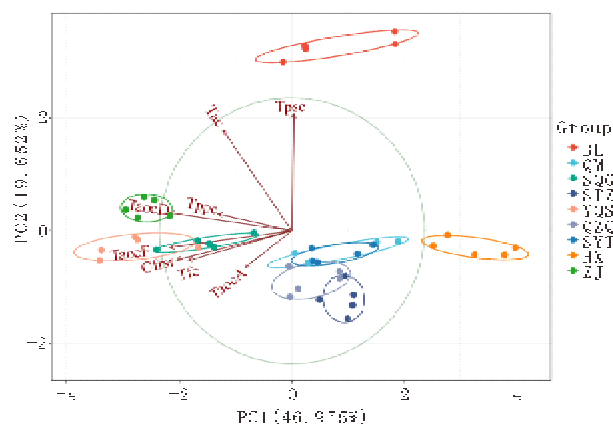


图 11 天麻各指标 PCA 图

2.5.2 主成分得分和综合得分

根据成分得分系数矩阵,计算各主成分得分,计算结果如下: $F_1 = 0.138X_1 - 0.147X_2 - 0.003X_3 + 0.208X_4 + 0.094X_5 + 0.245X_6 + 0.244X_7 + 0.232X_8$; $F_2 = 0.481X_1 + 0.080X_2 + 0.560X_3 - 0.142X_4 - 0.175X_5 + 0.086X_6 - 0.079X_7 - 0.140X_8$; $F_3 = -0.167X_1 + 0.465X_2 + 0.263X_3 + 0.075X_4 + 0.630X_5 - 0.172X_6 - 0.217X_7 - 0.104X_8$ 。其中, X_1 为总生物碱含量标准化值、 X_2 为总多酚含量标准化值、 X_3 为总多糖含量标准化值、 X_4 为总黄酮含量标准化值、 X_5 为总抗氧化能力 (ABTS) 标准化值、 X_6 为总抗氧化能力 (DPPH) 标准化值、 X_7 为总抗氧化能力 (FRAP) 标准化值、 X_8 为 $\cdot OH$ 自由基清除率标准化值。根据主成分分析结果,提出 3 个主成分 PC1、PC2 和 PC3,构建出综合得分评价模型: $F = 0.469F_1 + 0.196F_2 + 0.155F_3$ 。

由 PCA 分析得到的 3 个主成分来代替 8 项指标对不同菌材栽培天麻进行综合评价,根据所建立的综合得分评价模型,获得各天麻的综合得分及排名,得分高低反映出天麻的综合品质。由表 3 可知,天麻 YQS 主成分 1 得分最高,为 1.299 分;天麻 BL 主成分 2 得分最高,为 1.607 分;天麻 SQG 主成分 3 得分最高,为

1.247 分。综合得分排名前 4 的天麻品种分别为天麻 YQS、天麻 ZJ、天麻 SQG 和天麻 BL,表明野漆树、枳椇、水青冈和白栎作为菌材栽培的天麻生物活性成分含量较高,抗氧化活力较强,是天麻栽培的优选菌材。

表 3 不同天麻主成分得分及综合得分

天麻编号	F_1	F_2	F_3	F	排名
BL	-0.141	1.607	0.507	0.328	4
QM	-0.450	-0.171	-0.116	-0.263	6
SQG	0.913	-0.485	1.247	0.528	3
STZ	-0.660	-0.127	1.175	-0.152	5
YQS	1.299	0.327	-0.142	0.652	1
QZQ	-0.186	-0.913	-1.934	-0.567	8
SYT	-0.476	-0.035	-0.293	-0.276	7
HX	-1.480	-0.986	0.385	-0.829	9
ZJ	1.181	0.783	-0.829	0.580	2

3 讨论

本试验测定了 9 种菌材栽培天麻生物活性成分含量和抗氧化能力,发现以白栎为菌材栽培的天麻 BL 总生物碱含量和总多糖含量最高,分别为 $(5.55 \pm 0.10) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $(54.73 \pm 0.55) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;以山桐子和野漆树为菌材栽培的天麻 STZ 和 YQS 总多酚含量最高,分别为 $(8.14 \pm 0.59) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $(8.14 \pm 0.62) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;以水青冈为菌材栽培的天麻 SQG 中总黄酮含量最高,为 $(2.10 \pm 0.08) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。体外抗氧化试验结果表明,9 种天麻都有清除自由基的能力,显示出较强的抗氧化活性。以山桐子为菌材栽培的天麻 STZ 总抗氧化能力 (ABTS) 最强,为 $(60.41 \pm 3.81) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$;以野漆树为菌材栽培的天麻 YQS 总抗氧化能力 (DPPH) 最强,为 $(5.36 \pm 0.09) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$;以枳椇为菌材栽培的天麻 ZJ 总抗氧化能力 (FRAP) 和 $\cdot OH$ 自由基清除率最高,分别为 $(6.74 \pm 0.05) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $(20.89 \pm 0.65) \%$ 。

Pearson 相关性分析的结果表明,天麻总生物碱、总多酚与总黄酮是天麻体外抗氧化作用的主要活性成分^[3,32,36]。天麻的 4 种生物活性成分含量与总抗氧化能力 (DPPH) 之间均呈正相关,表明天麻的总抗氧化能力是 4 种生物活性成分协同作用的结果。同时,从天麻对 $\cdot OH$ 自由基清除率和总抗氧化能力 (FRAP) 来看,其与天麻总生物碱、总多酚和总黄酮含量呈显著正相关,而与天麻多糖含量呈负相关,表明各生物活性成分之间还存在互斥作用。上述结果说明,天麻活性成分含量与抗氧化活性的相关性还取决于所运用的抗氧化模型。从 9 种天麻和阳性对照维生素 C 的抗氧化能力来看,天麻对 DPPH $\cdot$ 自由基和 $\cdot OH$ 自由基有较强的清除率,而对 ABTS $\cdot$ 自由基清除的效果较差,表明天麻对作用的自由基有一定的选择性,后续可以用更多的抗氧化模型来验证天麻的抗氧化能力。

聚类分析表明,天麻 YQS、ZJ 和 SQG 在同一分支,距离较近,可以聚为一类。主成分分析发现天麻活性成分含量与抗氧化能力的 8 个指标值可以得到 3 个主成分,累计方差贡献率达 82.180%。根据 PCA 评价,得分较高的是天麻 YQS、ZJ、SQG 和 BL,可进一步开发为抗氧化的功能食品。主成分分析及相关分析表明,天麻的生物活性成分及其抗氧化活性可以全面调节营养和质量,从而可能决定天麻的加工价值。现有研究发现以白栎和水青冈为菌材栽培天麻,其产量和药用成分含量较高^[9],而本试验也发现水青冈和白栎作为菌材栽培天麻的生物活性成分含量和抗氧化能力较强,反映出水青冈和白栎作为菌材栽培天麻的优越性。

以野漆树、枳椇、水青冈和白栎作为菌材栽培的天麻,生物活性成分含量较高,抗氧化能力较强,是天麻栽培的优选菌材。在天麻规模化栽培过程中,可结合当地菌材树种资源分布的实际情况,推荐以野漆树、枳椇、水青冈和白栎为主要菌材树种,同时可以适量辅助以其他树种进行混合栽培,以期收获高品质天麻。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典一部. [S]. 北京:中国医药科技出版社, 2020:59.
- [2] 李新月,张辰辰,程蒙,等. 不同规格天麻主要营养成分分析[J]. 中国中药杂志, 2024, 49(17): 4572.
- [3] 徐锦堂. 我国天麻栽培 50 年研究历史的回顾[J]. 食药菌, 2013, 21(1): 58.
- [4] 蔡成坤,王亚洲,吴旭东,等. 天麻设施化栽培技术[J]. 食用菌, 2023, 45(2): 34.
- [5] 谢海彬,叶彦慧,解修超,等. 蜜环菌新品种“陕蜜 2009”的选育[J]. 北方园艺, 2022, (5): 155.
- [6] 刘丽娜,申爱荣,沈宝明,等. 促天麻种子萌发的广义小菇属真菌物种多样性[J]. 食用菌学报, 2025, 32(1): 65.
- [7] 王永,王彩云,侯俊,等. 不同蜜环菌菌株对红天麻农艺性状、产量及质量的影响[J]. 微生物学杂志, 2020, 40(6): 59.
- [8] 杨雄,赵长林. 昭通马天麻新旧菌株 3 种主要成分变化分析[J]. 贵州林业科技, 2022, 50(2): 16.
- [9] 覃云,谭著明,唐树云,等. 基于天麻产量和品质的菌株优劣评价[J]. 中药材, 2022, 45(2): 284.
- [10] 代波,罗夫来,李金玲,等. 不同菌材伴栽天麻对其产量与品质的影响研究[J]. 时珍国医国药, 2023, 34(2): 431.
- [11] 罗夫来,刘威,张博华,等. 菌株、菌材、播种量与种植层数对云贵高原仿野生栽培天麻产量影响的研究[J]. 中药材, 2021, 44(5): 1052.
- [12] 申爱荣,覃云,谭著明,等. 菌材树种对天麻产量和品质的影响[J]. 湖南林业科技, 2021, 48(2): 1.
- [13] 段昊,闫文杰. 天麻生物活性成分及功效研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(17): 332.
- [14] SU Z, YANG Y, XU H, et al. Study on the chemical composition and in vitro enzyme inhibition of different processed products of *Gastrodia elata* [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2024, 130: 106148.
- [15] HUANG N K, CHERN Y, FANG J M, et al. Neuroprotective principles from *Gastrodia elata* [J]. *Journal of Natural Products*, 2007, 70(4): 571.
- [16] CHOI J J, OH E H, LEE M K, et al. *Gastrodia rhizoma* ethanol extract enhances pentobarbital-induced sleeping behaviors and rapid eye movement sleep via the activation of GABA_A-ergic transmission in rodents [J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2014, 2014: 426843.
- [17] ZHU H, ZHANG D, ZHANG Q, et al. 4-Hydroxybenzyl alcohol derivatives and their sedative-hypnotic activities [J]. *RSC Advances*, 2018, 8(35): 19539.
- [18] SHIN M, SEO B, KWON O J, et al. Anticonvulsant effect of *Gastrodia Rhizoma* processed at different steaming times with scavenging NO and antiinflammatory activity [J]. *International Journal of Plant Research*, 2017, 30(2): 36.
- [19] YANG C S, CHIU S C, LIU P Y, et al. *Gastrodin* alleviates seizure severity and neuronal excitotoxicities in the rat lithium-pilocarpine model of temporal lobe epilepsy via enhancing GABAergic transmission [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2021, 269: 113751.
- [20] KIM Y H, PARK J H. Vanillin and 4-hydroxybenzyl alcohol attenuate cognitive impairment and the reduction of cell proliferation and neuroblast differentiation in the dentate gyrus in a mouse model of scopolamine-induced amnesia [J]. *Anatomy & Cell Biology*, 2017, 50(2): 143.
- [21] Won K L, Young M L. Quality characteristics of *Gastrodia elata* powder joehung with antioxidant activity [J]. *Journal of The Korean Society of Food Culture*, 2015, 30(5): 656.
- [22] KIM N H, XIN M J, CHA J Y, et al. Antitumor and immunomodulatory effect of *Gastrodia elata* on colon cancer in vitro and in vivo [J]. *The American journal of Chinese medicine*, 2017, 45(2): 319.
- [23] XIN C, CHENG Z, LIU W, et al. The antibacterial and hemostatic activity of *Gastrodia elata* polysaccharide-based hydrogel embedded with drug-carrying microspheres accelerates diabetic wound healing [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 492: 152403.
- [24] 孙航,代蓉,宁尧,等. 天麻乙醇提取物辅助降血脂保健功能评价[J]. 云南中医学院学报, 2020, 43(6): 6.
- [25] FANG H, ZHANG W J, ZHANG J C, et al. Antihypertensive effect of *Gastrodia elata* BL leaf extract in rats [J]. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 2017, 16(8): 1887.
- [26] GAN Q, CHEN L, XIAN J, et al. Digestive characteristics of *Gastrodia elata* Blume polysaccharide and related impacts on human gut microbiota in vitro [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2024, 328: 118064.
- [27] LEE Y S, PARK Y R, LEE H B, et al. The preventive effect of *Gastrodia elata* Blume extract on vancomycin-induced acute kidney injury in rats [J]. *Laboratory Animal Research*, 2024, 40: 14.
- [28] BAO Q W, QIAN L, GONG C, et al. Immune-enhancing activity of polysaccharides from *Gastrodia elata* [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(4): e13016.
- [29] GAN Q X, PENG M Y, WEI H B, et al. *Gastrodia elata* polysaccharide alleviates Parkinson's disease via inhibiting apoptotic and inflammatory signaling pathways and modulating the gut microbiota [J]. *Food & function*, 2024, 15(6): 2920.
- [30] 段昊,周亚西,周士琦,等. 天麻在我国保健食品中的应用[J]. 食品工业科技, 2023, 44(9): 403.
- [31] 陈琛,黄蓓蓓,苏鹏超,等. 不同产地红天麻多酚组成及体外抗氧化活性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 144.
- [32] 廖霞,吴挺,杨勇,等. 马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.
- [33] 罗紫屹, 邱俊杰, 吴伊莉, 等. 不同变型与产地天麻中 6 种多酚类成分的比较[J]. 华西药科学杂志, 2022, 37(3):280.
- [34] 张双奇, 刘琳, 何念武, 等. 超声辅助提取陕产天麻多糖的工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 中国农业通报, 2021, 37(9):131.

Comparison of bioactive ingredient contents and antioxidant capacities of *Gastrodia elata* Bl. cultivated with different woods

TAN Yun^{1,2,3}, SHEN Airong^{1,2,3*}, SHEN Baoming^{1,2,3}, LIU Lina^{1,2,3}, LI Sainan¹, TANG Shuyuan⁴, TAN Zhuming^{1,2,3*}

(1. Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, China; 2. Hunan Engineering Research Center for Cultivation and Utilization of Distinctive Bio-resources Under Forest, Changsha 410004, China; 3. Hunan Germplasm Resources Protection and Utilization Center for Mycorrhizal Edible Fungi, Changsha 410004, China; 4. Boshikang Tianma Technology Development Co. Ltd., Suining 422600, China)

Abstract; Objective To explore the effects of different woods on the bioactive ingredient contents and antioxidant capacities of *Gastrodia elata* B. (*G. elata*), and provide reference for the development of *G. elata* antioxidant products. **Methods** The content of bioactive ingredients (total alkaloids, total polyphenols, total polysaccharides, total flavonoids) and in vitro antioxidant capacity of *G. elata* cultivated with 9 different woods were measured. The correlation analysis, cluster analysis (CA), and principal component analysis (PCA) were used to comprehensively evaluate these 9 types of *G. elata*. **Results** There were differences in the contents of bioactive ingredients in *G. elata* cultivated with different woods. The total alkaloid content and the total polysaccharide content of *G. elata* BL cultivated with *Quercus fabri* were the highest; the total polyphenol content of *G. elata* STZ and *G. elata* YQS cultivated with *Idesia polycarpa* and *Toxicodendron sylvestre* respectively were the highest; the total flavonoid content of *G. elata* SQG cultivated with *Fagus longipetiolata* was the highest. The results of antioxidant tests in vitro showed that there were differences in the antioxidant capacities of *G. elata* cultivated with different woods. The total antioxidant capacity (ABTS) of *G. elata* STZ was the strongest, reaching $(60.41 \pm 3.81) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$; the total antioxidant capacity (DPPH) of *G. elata* YQS was the strongest, reaching $(5.36 \pm 0.09) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$; the total antioxidant capacity (FRAP) and $\cdot\text{OH}$ free radical scavenging rate of *G. elata* ZJ was the highest, reaching $(6.74 \pm 0.05) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ and $(20.89 \pm 0.65)\%$ respectively. The results of pearson correlation analysis found that there was a strong correlation between the content of bioactive ingredients in *G. elata* and its antioxidant capacity. Total alkaloids, total polyphenols and total flavonoids were the main active components of *G. elata* in vitro antioxidant activity. The CA results indicate that the *G. elata* YQS, *G. elata* ZJ, and *G. elata* SQG, were clustered together. According to PCA evaluation, *G. elata* YQS, *G. elata* ZJ, *G. elata* SQG and *G. elata* BL have higher scores and they can be further developed into antioxidant functional foods. **Conclusion** When *G. elata* was cultivated with *Toxicodendron sylvestre*, *Hovenia acerba*, *Fagus longipetiolata* and *Quercus fabri*, the contents of bioactive components were higher and the antioxidant capacities were stronger in *G. elata*, making them the preferred woods for *G. elata* cultivation.

Key words: *Gastrodia elata* Bl.; Wood; Bioactive ingredients; Antioxidant capacity; Cluster analysis; Principal component analysis

(责任编辑:杜国安)