网络出版时间:2025-07-18 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.01.016

茯苓胞外三萜与甾醇分析及其抗氧化活性发掘

谭云[1,2,3],申爱荣[1,2,3],喻锦秀[1],沈宝明[1,2,3],谭著明[1,2,3],刘丽娜[1,2],李赛男[1]

(1 湖南省林业科学院,湖南 长沙 410004;2 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;
3 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)

[摘 要] 【目的】研究茯苓胞外三萜和胞外甾醇化合物的组成并分析其抗氧化活性,为茯苓菌株质量控制和抗氧化产品开发提供参考。【方法】以不同来源的 FLA、FGD、FGZ、FHB、GTR1、GTR2、XJ28、F5.78 等 8 个茯苓菌株为研究对象,利用广泛靶向代谢组学分析茯苓胞外三萜和胞外甾醇的化学成分,利用 ABTS、DPPH、FRAP 和 OH 模型分析各茯苓菌株发酵液的抗氧化能力,并利用聚类分析、主成分分析、正交偏最小二乘法判别分析和 Pearson 相关性分析,确定 8 个茯苓菌株胞外三萜和胞外甾醇的差异成分。【结果】从 8 个茯苓菌株中共定性检测出 24 种化合物,包括 18 种胞外三萜类化合物和 6 种胞外甾醇类化合物。其中 GTR1 菌株相对含量最高的三萜类成分是灵芝酸 N,其他 7 个菌株相对含量最高的三萜类成分均为齐墩果酸甲酯,而菜油甾-4-烯-3β 醇是 8 个菌株相对含量最高的甾醇类成分。GTR2 菌株在 ABTS、DPPH 和 FRAP 模型中均显示出较强的抗氧化能力,而 XJ28 菌株在 OH 模型中显示出极强的抗氧化能力。正交偏最小二乘法判别分析发现,8 个茯苓菌株的胞外三萜和胞外甾醇中存在 10 个差异组分,包括 8 个三萜类化合物和 2 个甾醇类化合物。Pearson 相关性分析发现,ABTS、FRAP、DPPH 模型分别与 24,24,22 种化合物峰面积相对含量呈负相关,而 OH 模型与 12 种化合物峰面积相对含量呈正相关。10 个差异组分中,3-表熊果酸、去氢茯苓酸的相对含量与 DPPH 模型呈显著负相关($P<0.05$),茯苓新酸 B 的相对含量与 ABTS 模型呈显著负相关($P<0.05$),灵芝酸 S、3β-羟基麦角甾-7,24(24(1))-二烯-4α-羧酸酯、4α-甲基-5α-麦角甾-8,14,24(28)-三烯-3β 醇的相对含量与 OH 模型呈极显著正相关($P<0.01$)。【结论】不同茯苓菌株胞外三萜和胞外甾醇类化合物组成存在差异,3-表熊果酸、去氢茯苓酸、茯苓新酸 B、灵芝酸 S、3β-羟基麦角甾-7,24(24(1))-二烯-4α-羧酸酯、4α-甲基-5α-麦角甾-8,14,24(28)-三烯-3β 醇是影响其抗氧化能力的关键成分。

[关键词] 茯苓;胞外三萜;胞外甾醇;广泛靶向代谢组学;抗氧化活性

[中图分类号] S567.3+2 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)01-0156-12

Analysis of extracellular triterpenes and sterols in *Wolfiporia hoelen* and exploration of antioxidant activity

TAN Yun[1,2,3], SHEN Airong[1,2,3], YU Jingxiu[1], SHEN Baoming[1,2,3], TAN Zhuming[1,2,3], LIU Lina[1,2], LI Sainan[1]

(1 *Hunan Academy of Forestry, Changsha, Hunan* 410004, *China*; 2 *Hunan Germplasm Resources Protection and Utilizationg Center for Mycorrhizal Edible Fungi, Changsha, Hunan* 410004, *China*; 3 *Hunan Engineering Research Center for Cultivation and Utilization of Distinctive Bio-resources Under Forest, Changsha, Hunan* 410004, *China*)

Abstract: 【Objective】 The composition of extracellular triterpenoids, extracellular sterols, and the antioxidant activities in *Wolfiporia hoelen* were studied in order to provide reference for quality control and

[收稿日期] 2024-09-20 [修回日期] 2024-12-09
[基金项目] "十四五"国家重点研发计划项目(2023YFD2200903);湖南省林业科技创新项目(XLSF2024002);湖南省林业科技计划项目(XLK202107)
[作者简介] 谭云(1989—),男,湖南宁乡人,助理研究员,主要从事微生物资源学研究。E-mail:tany_hncu@163.com
[通信作者] 喻锦秀(1979—),女,湖南临湘人,副研究员,主要从事植物病理学研究。E-mail:yujinxiu2000@hnlky.cn
谭著明(1966—),男,湖南长沙人,研究员,主要从事菌物学研究。E-mail:tanzm@hnlky.cn

antioxidant product development of *W. hoelen* strains.【Method】8 *W. hoelen* strains from different sources were studied, namely FLA, FGD, FGZ, FHB, GTR1, GTR2, XJ28, and F5. 78. Widely targeted metabolomics was used to analyze the chemical components of extracellular triterpenoids and sterols. ABTS model, DPPH model, FRAP model, and OH model were used to determine the antioxidant capacity of fermentation broth. Cluster analysis, principal component analysis, orthogonal partial least squares-discriminant analysis, and Pearson correlation analysis were used to determine the differential components of extracellular triterpenoids and sterols in 8 *W. hoelen* strains.【Result】24 compounds were qualitatively detected in 8 *W. hoelen* strains, including 18 extracellular triterpenoids and 6 extracellular sterols. The triterpenoid component with the highest relative content in GTR1 strain was ganoderic acid N, while triterpenoid component with the highest relative content in the other seven strains was methyl oleanonate. For all 8 strains, the sterol component with the highest relative content was campest-4-en-3β-ol. The GTR2 strain of *W. hoelen* showed strong antioxidant capacity in the ABTS model, DPPH model, and FRAP model, while the XJ28 strain showed extremely strong antioxidant capacity in the OH model. According to orthogonal partial least squares-discriminant analysis, 10 differential components were identified in 8 *W. hoelen* strains, including 8 triterpenoids and 2 sterols. Pearson correlation analysis showed that ABTS, FRAP and DPPH models were negatively correlated with the relative peak area content of 24, 24 and 22 compounds, respectively, while OH model was positively correlated with the relative peak area content of 12 compounds. Among the 10 differential components, the relative contents of 3-epiursolic acid and dehydropachymic acid were only significantly negatively correlated with DPPH model ($P<0.05$). The relative content of poricoic acid B was only significantly negatively correlated with ABTS model ($P<0.05$). The relative contents of ganoderic acid S, 3β-hydroxyergosta-7, 24(24(1))-dien-4α-carboxylate, 4α-methyl-5α-ergosta-8, 14, 24(28)-trien-3β-ol were only significantly positively correlated with OH model ($P<0.01$).【Conclusion】There were differences in the composition of extracellular triterpenoids and sterols among different *W. hoelen* strains. 3-epiursolic acid, dehydropachymic acid, poricoic acid B, ganoderic acid S, 3β-hydroxyergosta-7, 24(24(1))-dien-4α-carboxylate and 4α-methyl-5α-ergosta-8, 14, 24(28)-trien-3β-ol were key components affecting the antioxidant capacity.

Key words: *Wolfiporia hoelen* (Fr.) Y. C. Dai & V. Papp; extracellular triterpenes; extracellular sterols; widely-targeted metabolomics; antioxidant activity

茯苓(*Wolfiporia hoelen* (Fr.) Y. C. Dai & V. Papp)为多孔菌科多孔菌属真菌[1]，其以干燥菌核入药，味甘、淡，性平，主治水肿尿少，痰饮眩悸，脾虚食少，便溏泄泻，心神不安，惊悸失眠[2]。由于茯苓代谢产物种类的多样性和功能的复杂性，《中华人民共和国药典》[2]只规定了茯苓的性状、鉴别、检查和浸出物，并未明确茯苓的药用成分及含量，缺乏对茯苓品质优劣、质量高低进行判别的依据，无法有效控制茯苓及其相关制剂的整体质量。邓桃妹等[3]从亲缘学及化学成分特有性、传统药效和药性等方面对茯苓中药质量标志物(Q-marker)进行了预测分析，认为茯苓三萜和茯苓多糖是中药茯苓的质量标志物，可以为茯苓质量控制提供参考。茯苓三萜作为茯苓的主要药用成分，是目前研究的热点之一[4]。茯苓三萜主要包括茯苓酸、去氢茯苓酸、松苓新酸、去氢土莫酸、茯苓新酸 A、茯苓新酸 B、猪苓酸 C 等[5]，其在抗肿瘤方面应用潜力巨大[6]。茯苓甾醇是一类重要的次级代谢产物，属二萜类化合物，主要为麦角甾醇及其衍生物，在食品和医药领域应用广泛[7]。虽然目前关于茯苓甾醇的系统研究相对较少，但因其在抗衰老、抗病毒方面功效突出，现已受到研究者的广泛关注。

茯苓在 2002 年入选国家药食同源目录，是重要的食品来源，茯苓面条、茯苓酥和茯苓粥等是常见食品。茯苓作为天然的多功能食品，其中富含多种生物活性成分[8]，主要有改善睡眠[9]、抗抑郁[10-11]、抗焦虑[11]、抗肥胖[12]、抗氧化[13]、抗炎[14]、抗肿瘤[15]等功效，同时还有辅助降血脂[16]、调节肠道菌群[17]、减轻肺损伤[18]、治疗糖尿病溃疡[19]、调节免疫力[20]等多种功能，营养及保健价值极高。国家市场监督

管理总局的特殊食品查询平台检索数据显示,截至2024 年 8 月,以茯苓及其提取物为主要原料的保健食品共计 126 种,其中以增强免疫力、改善睡眠、预防肝损伤和降血脂为主要功能的保健食品分别有52,27,9 和 3 种,可见茯苓及其提取物已被广泛应用于保健食品领域。

目前,关于茯苓三萜和茯苓甾醇的化学成分鉴定基本均以茯苓菌核或茯苓皮为原料进行提取分离[7],而国内外对于茯苓胞外三萜和胞外甾醇的化学成分研究相对较少。本研究以不同来源的 8 个茯苓菌株为研究对象,通过广泛靶向代谢组学分析茯苓胞外三萜和胞外甾醇化学成分,以 ABTS、DPPH、FRAP 和 OH 模型测定茯苓菌株的体外抗氧化能力,利用聚类分析、主成分分析、正交偏最小二乘法判别分析和 Pearson 相关性分析来发掘影响茯苓体外抗氧化作用的关键成分,以期为茯苓胞外三萜类和胞外甾醇类化合物的深度利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与菌株

供试 8 株茯苓菌株 FLA、FGD、FGZ、FHB、GTR1、GTR2、XJ28、F5.78,均保存于湖南省菌根性食用菌种质资源保护与利用中心,各菌株的来源见表 1。8 个茯苓菌株经对峙培养后,确定为不同菌株。ABTS 法、DPPH 法、FRAP 法总抗氧化能力试剂盒(No. ABTS-1-D、No. DPPH-1-D 和 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。

表 1 8 株供试茯苓菌株的来源

Table 1 Source of 8 *Wolfiporia hoelen* strains for test

序号 No.	菌株编号 Strain No.	菌株来源 Source of strains
1	FLA	安徽省六安市 Lu'an City,Anhui Province
2	FGD	广东省广州市 Guangzhou City,Guangdong Province
3	FGZ	贵州省黔东南苗族侗族自治州 Qiandongnan Miao and Dong Autonomous Prefecture,Guizhou Province
4	FHB	湖北省荆州市 Jingzhou City,Hubei Province
5	GTR1	贵州省铜仁市 Tongren City,Guizhou Province
6	GTR2	贵州省铜仁市 Tongren City,Guizhou Province
7	XJ28	湖南省靖州苗族侗族自治县 Jingzhou Miao and Dong Autonomous County,Hunan Province
8	F5.78	上海保藏生物技术中心 Shanghai Conservation Biotechnology Center

1.2 仪器与设备

Infinite 200 Pro M Nano 酶标仪,美国 TECAN 公司;Acquity I-Class PLUS 超高效液相色谱仪,美国沃特世公司;Xevo G2-XS QTOF 高分辨质谱仪,美国沃特世公司。

1.3 试验方法

1.3.1 *茯苓发酵液制备* 液体发酵培养基配方为:葡萄糖 20.0 g/L,蛋白胨 6.0 g/L,酵母提取物 2.5 g/L,磷酸二氢钾 1.5 g/L,硫酸镁 0.8 g/L,氯化钙 0.2 g/L,水杨酸 4.0 g/L,维生素 B_1 1.0 mg/L,pH 6.5。将培养好的 8 个茯苓菌株分别接种到液体培养基中,于 24 ℃、170 r/mim 条件下黑暗培养 12 d。发酵结束后,用双层无菌滤纸过滤掉茯苓菌丝,用无菌试管收集发酵液,直接用于茯苓胞外三萜和胞外甾醇成分测定。

1.3.2 *胞外三萜和胞外甾醇组分鉴定* 用移液器吸取 100.0 μL 茯苓发酵液待测液,加入 500.0 μL 含有内标(V(甲醇):V(乙腈)=1∶1,质量浓度 20 mg/L)的提取液,涡旋混匀 30 s;于 4 ℃冰水浴超声处理 10.0 min,取上清液于进样瓶进行液相色谱-质谱联用(LC-MS)分析,采用峰面积归一法计算各成分的相对含量(%)。

LC-MS 分析的色谱柱为 Acquity UPLCHSS T3 色谱柱(2.1 mm×100 mm,1.8 μm)。色谱条件为:正离子模式(POS):流动相 A 为体积分数 0.1%甲酸水溶液,流动相 B 为体积分数 0.1%甲酸乙腈。负离子模式(NEG):流动相 A 为体积分数 0.1%甲酸水溶液,流动相 B 为体积分数 0.1%甲酸乙腈。梯度洗脱条件:0.0 min,98%A,2%B;0.0~0.25 min,98%A,2%B;0.25~10.0 min,98%~2%A,2%~98%B;10.0~13.0 min,2%A,98%B;13.0~13.1 min,2%~98%A,98%~2%B;13.1~15.0 min,98%A,2%B。流速 400 μL/min,柱温 25 ℃,进样量 1.0 μL。质谱条件:毛细管电压:2 500 V(正离子模式)或-2 000 V(负离子模式);锥孔电压:30 V;离子源温度:100 ℃;脱溶剂气温度:500 ℃;反吹气流速:50 L/h;脱溶剂气流速:800 L/h;质核比(m/z):50~1 200。

1.3.3　抗氧化能力测定　以 0.10 mg/mL 的抗坏血酸溶液为阳性对照，参照 ABTS 法、DPPH 法、FRAP 法测试盒说明书，进行茯苓菌株发酵液抗氧化能力检测，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）的浓度来表示茯苓发酵液的抗氧化能力，单位为 μmol/mL。以 4.0 mg/mL 的抗坏血酸溶液为阳性对照，参照 OH 自由基清除能力试剂盒说明书，对 OH 模型中茯苓发酵液的抗氧化能力进行检测，以 OH 自由基清除率表示茯苓发酵液的抗氧化能力，单位为%。

1.4　数据处理

所有试验均重复 3 次，采用 Origin 2018 软件进行数据处理，结果以“平均值±标准差”表示；用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析，用 Duncan's 法进行多重比较分析。用 Simca 14.0 软件对茯苓菌株胞外三萜和胞外甾醇类化合物进行主成分分析（PCA）和正交偏最小二乘法判别分析（OPLS-DA），其中用 PCA 分析确定茯苓菌株组内聚集和组间分离趋势，用 OPLS-DA 分析计算变量投影重要度（variaxble importance in projection，VIP），进一步确定组间差异，发掘不同茯苓菌株胞外三萜和胞外甾醇类化合物的差异成分。

2　结果与分析

2.1　茯苓胞外三萜和甾醇成分分析

在 8 个茯苓菌株发酵液中，共定性获得 24 种化合物，包括 18 种三萜类化合物和 6 种甾醇类化合物，其中正离子模式下鉴定出 5 种化合物，负离子模式下鉴定出 19 种化合物。茯苓胞外三萜主要包括茯苓酸类、熊果酸类、齐墩果酸类和灵芝酸类化合物等，茯苓胞外甾醇主要包括麦角甾醇、菜油甾醇、谷甾醇和豆甾醇等，具体见表 2。

表 2　不同茯苓菌株胞外三萜和甾醇成分的组成

Table 2　Composition of extracellular triterpenes and sterols in different *Wolfiporia hoelen* strains

编号 No.	类别 Category	模式 Mode	化合物 Compound	相对含量/% Relative content							
				FLA	FHB	FGD	FGZ	XJ28	GTR1	GTR2	F5.78
1	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	3-表熊果酸 3-Epiursolic acid	0.000 361	0.000 372	0.000 437	0.000 392	0.000 326	0.001 965	0.000 423	0.000 920
2	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	羽扇豆醇 Lupeol	0.003 522	0.004 047	0.012 602	0.003 849	0.001 868	0.013 447	0.001 934	0.005 898
3	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	去氢土莫酸 Dehydrotumulosic acid	0.010 336	0.011 152	0.029 779	0.010 178	0.005 656	0.043 291	0.007 017	0.020 933
4	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	11-氧代熊果酸 11-Keto-ursolic acid	0.000 343	0.000 125	0.000 227	0.000 302	0.000 115	ND	0.000 007	0.000 057
5	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	茯苓酸 Pachymic acid	0.000 314	0.000 468	ND	0.000 494	0.000 825	ND	0.000 007	ND
6	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	16α-羟基松苓新酸 16α-Hydroxyde-hydrotrametenolic acid	0.001 047	0.001 355	ND	0.000 759	0.001 208	0.000 205	0.000 391	ND
7	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	松苓新酸 3-Dehydrotrame-tenolic acid	0.035792	0.037 823	0.001 297	0.059 488	0.080 708	0.001 084	0.013 874	0.002 931
8	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	去氢茯苓酸 3-Dehydrotrame-tenolic acid	0.000 126	0.000 174	0.000 024	0.000 045	0.000 185	0.004 287	0.000 055	ND
9	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	灵芝酸 G Ganoderic acid G	0.007 611	0.007 515	0.012 142	0.006 467	0.003 403	0.014 679	0.004 314	0.008 529
10	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	茯苓新酸 A Poricoic acid A	0.003 890	0.004 553	0.002 018	0.003 918	0.004 735	0.002 170	0.000 367	0.000 816
11	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	茯苓新酸 B Poricoic acid B	0.003 845	0.004 636	0.002 441	0.003 651	0.002 369	0.000 657	0.000 866	0.001 202
12	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	猪苓酸 C Polyporenic acid C	0.349 276	0.473 521	0.053 515	0.211 213	0.269 853	0.024 414	0.025 400	0.015 907
13	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	齐墩果酸甲酯 Methyl oleanonate	13.315 672	13.930 139	4.275 492	8.296 046	9.023 754	0.064 745	1.375 251	1.285 303
14	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	齐墩果酸-3-*O*-葡萄糖基(1-2)二甲苯基(1-3)葡萄糖醛酸 Oleanolic acid-3-*O*-glucosyl (1-2) xylyl(1-3) glucosi-duronic acid	0.005 146	0.005 265	0.013 925	0.004 773	0.002 379	0.021 533	0.006 878	0.016 597
15	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	齐墩果酸-28-*O*-β-*D*-葡萄苷 Oleanolic acid 28-*O*-β-*D*-glucopyr-anoside	0.006 743	0.004 996	0.000 281	0.004 158	0.002 732	0.000 375	0.000 219	0.000 396

表 2(续) Table 2(continued)

编号 No.	类别 Category	模式 Mode	化合物 Compound	相对含量/% Relative content							
				FLA	FHB	FGD	FGZ	XJ28	GTR1	GTR2	F5.78
16	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	灵芝酸 N Ganoderic acid N	0.048 999	0.047 212	0.161 550	0.036 227	0.007 686	0.192 520	0.035 960	0.114 489
17	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	灵芝酸 F Ganoderic acid F	0.000 290	0.000 505	0.017 845	0.000 408	0.000 100	0.038 793	0.000 994	0.008 760
18	三萜类 Triterpenoids	负离子 Negative ion	灵芝酸 S Ganoderic acid S	0.002 748	0.004 072	ND	0.004 339	0.005 575	0.000 130	0.000 466	ND
19	甾醇类 Sterols	负离子 Negative ion	3β-羟基麦角甾-7,24(24(1))-二烯-4α-羧酸酯 3β-Hydroxyergosta-7,24(24(1))-dien-4α-carboxylate	0.000 110	0.000 112	ND	0.000 100	0.000 173	0.000 014	0.000 008	0.000 029
20	甾醇类 Sterols	正离子 Positive ion	菜油甾-4-烯-3β 醇 Campest-4-en-3β-ol	0.149 684	0.160 570	0.586 886	0.182 105	0.104 515	0.656 787	0.123 529	0.350 619
21	甾醇类 Sterols	正离子 Positive ion	4α-甲基-5α 麦角甾-8,14,24(28)-三烯-3β 醇 4α-Methyl-5α-ergosta-8,14,24(28)-trien-3β-ol	0.002 437	0.004 022	ND	0.003 675	0.009 143	ND	0.001 524	ND
22	甾醇类 Sterols	正离子 Positive ion	麦角甾-5,7,22,24(28)-四烯-3β 醇 Ergosta-5,7,22,24(28)-tetraen-3β-ol	0.002 521	0.002 927	0.004 020	0.002 427	0.001 650	0.004 208	0.000 720	0.002 055
23	甾醇类 Sterols	正离子 Positive ion	β-谷甾醇 β-Sitosterol	0.002 447	0.002 745	0.003 458	0.002 236	0.001 217	0.005 740	0.001 227	0.001 882
24	甾醇类 Sterols	正离子 Positive ion	豆甾醇 Stigmasterol	0.000 340	0.000 389	0.000 830	0.000 368	0.000 258	0.001 091	0.000 168	0.000 436

注:ND 表示未发现。

Note: ND indicates no discovery.

整体来看,齐墩果酸甲酯、猪苓酸 C、灵芝酸 N、松苓新酸、去氢土莫酸、羽扇豆醇和灵芝酸 F 是茯苓三萜类化合物的主要成分,菜油甾-4-烯-3β 醇是茯苓胞外甾醇的主要成分,其峰面积相对含量均大于 0.01%。从三萜类成分来看,各菌株之间存在较大差异,茯苓菌株 FLA、FHB、FGD、FGZ、XJ28、GTR2 和 F5.78 中相对含量最高的三萜类成分均为齐墩果酸甲酯,GTR1 菌株相对含量最高的三萜类组分为灵芝酸 N。从甾醇类成分来看,8 个菌株中相对含量最高的甾醇类组分均为菜油甾-4-烯-3β 醇。从分离鉴定的化合物数量来看,茯苓菌株 FLA、FHB、FGZ、XJ28 和 GTR2 均鉴定到 24 种化合物,茯苓菌株 GTR1 鉴定到 21 种化合物,茯苓菌株 F5.78 和 FGD 均鉴定到 19 种化合物,表明各菌株之间的化合物数量存在一定差异。

8 个茯苓菌株胞外三萜类化合物总相对含量的表现为:FHB(14.54%)>FLA(13.80%)>XJ28(9.41%)>FGZ(8.65%)>FGD(4.58%)>F5.78(1.48%)>GTR2(1.47%)>GTR1(0.42%)。菌株 FHB 和 FLA 胞外三萜类化合物的总相对含量较高,表明其产胞外三萜的能力较强;菌株 F5.78、GTR2 和 GTR1 胞外三萜类化合物的总相对含量较低,表明其产胞外三萜的能力相对较弱。茯苓菌株胞外甾醇类化合物的总相对含量表现为:GTR1(0.67%)>FGD(0.60%)>F5.78(0.36)>FGZ(0.19%)>FHB(0.17%)>FLA(0.16%)>GTR2(0.13%)>XJ28(0.12%)。菌株 GTR1 和 FGD 胞外甾醇类化合物的总相对含量较高,显示出较强的产胞外甾醇能力。

2.2 茯苓发酵液理化性质及抗氧化能力测定

不同茯苓菌株发酵液的外观颜色如图 1 所示。由图 1 可知,在培养后期,所有菌株发酵液的颜色均有所加深,可能是发酵后期分泌了较多的色素类成分所致。王伟霞等[21]研究发现,培养基中有机态氮含量、初始 pH 值、培养温度以及菌种来源与茯苓菌丝色素的分泌有关。本试验中,在培养基和培养条件一致的情况下,8 个茯苓菌株中只有 GTR2 菌株发酵液明显变成黑褐色,也从侧面验证了茯苓菌丝色素分泌与菌株来源相关的结论。

选择 ABTS、DPPH、FRAP 和 OH 模型来评价茯苓菌株的抗氧化能力,得到不同茯苓菌株发酵液 pH 值和抗氧化能力的测定结果见表 3。由表 3 可知,8 个茯苓菌株经液体培养后,其 pH 值为 3.05~4.05,较初始值(6.50)均有不同程度下降,这与金文松等[22]的结果相似,表明在茯苓菌株生长代谢过程中有较多酸性物质产生。

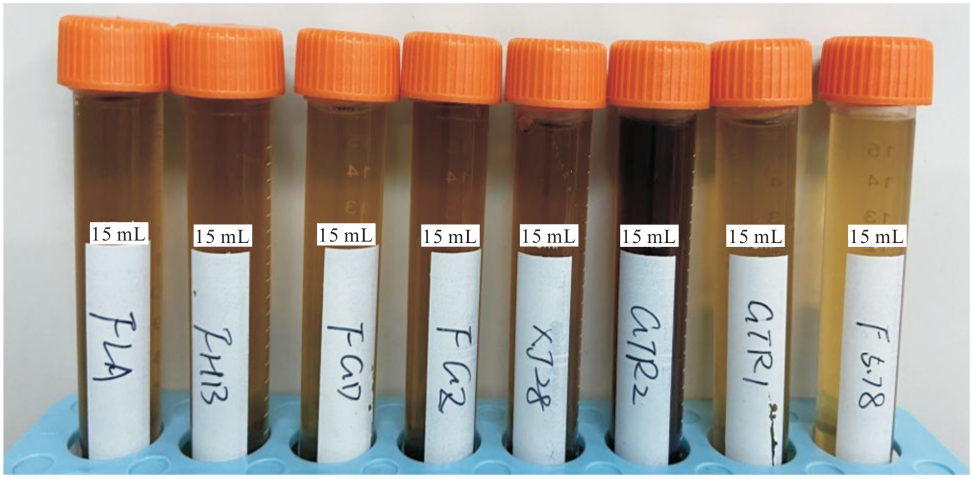


图 1　8 个茯苓菌株发酵液颜色的比较

Fig. 1　Comparison of color in fermentation broth of 8 *Wolfiporia hoelen* strains

表 3　不同茯苓菌株发酵液 pH 值和抗氧化能力的比较

Table 3　Comparison of pH value and antioxidant capacity of fermentation broth of different *Wolfiporia hoelen* strains

菌株编号 Strain No.	pH	抗氧化能力 Antioxidant capacity			
		ABTS 模型/（μmol·mL^{-1}）ABTS model	DPPH 模型/（μmol·mL^{-1}）DPPH model	FRAP 模型/（μmol·mL^{-1}）FRAP model	OH 模型/% OH model
FLA	3.44±0.02 e	0.96±0.03 d	0.24±0.02 cd	0.26±0.02 de	28.85±0.94 c
FHB	3.58±0.01 c	1.01±0.02 c	0.29±0.06 c	0.30±0.01 c	7.50±0.46 e
FGD	3.42±0.03 e	0.77±0.02 f	0.17±0.02 e	0.22±0.01 f	3.76±0.51 f
FGZ	3.72±0.02 b	0.90±0.03 e	0.23±0.02 d	0.24±0.02 e	38.54±2.52 b
XJ28	3.69±0.03 b	0.95±0.02 d	0.23±0.02 d	0.27±0.01 d	81.36±2.59 a
GTR1	4.05±0.02 a	0.74±0.03 f	0.13±0.02 e	0.14±0.01 g	4.41±0.43 f
GTR2	3.52±0.01 d	3.03±0.03 a	0.50±0.02 a	0.85±0.01 a	8.41±0.24 e
F5.78	3.05±0.02 f	1.25±0.01 b	0.26±0.02 cd	0.50±0.02 b	6.18±0.39 ef
CK	—	0.63±0.02 g	0.37±0.01 b	0.51±0.02 b	13.34±0.43 d

注：同列数据后标不同小写字母表示不同菌株间差异显著（$P<0.05$）。

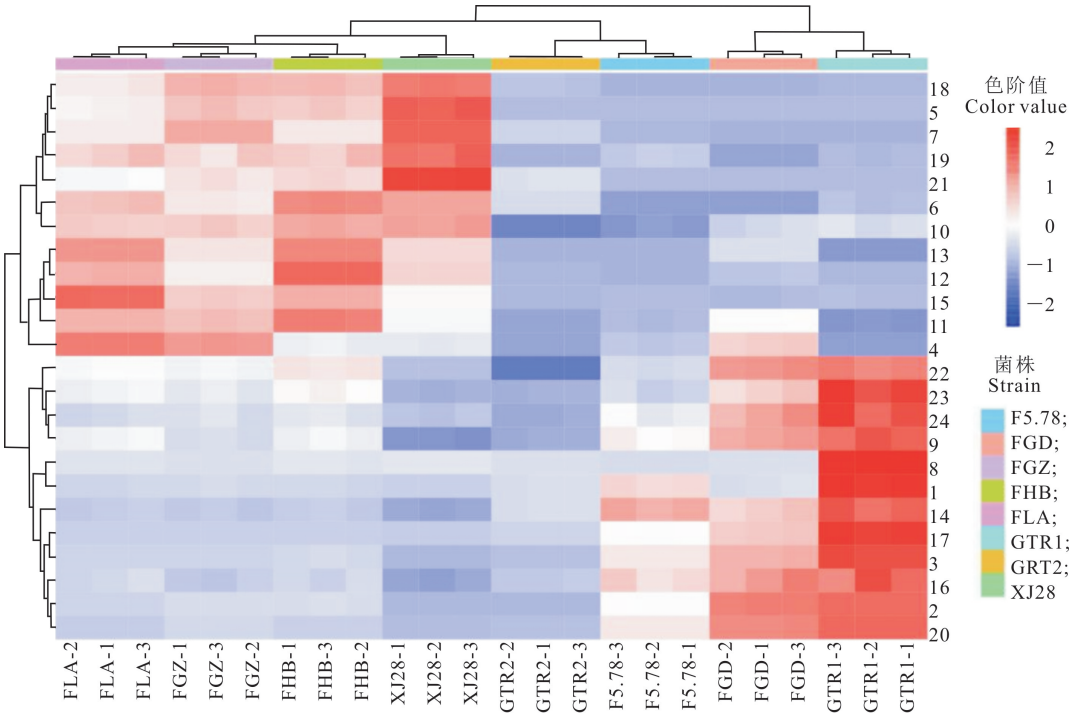
Note：Different lowercase letters after data in the same column represent significant difference（$P<0.05$）.

由表 3 还可知，在 ABTS 模型中，与阳性对照相比，GTR2 菌株的抗氧化能力最强，为 3.03 μmol/mL，且显著高于其他 7 个菌株（$P<0.05$），GTR1 和 FGD 菌株的抗氧化能力无显著差异，且均显著低于其他 6 个菌株（$P<0.05$）。在 DPPH 模型中，与阳性对照相比，GTR2 菌株的抗氧化能力最强，为 0.50 μmol/mL，且显著高于其他 7 个菌株（$P<0.05$），GTR1 和 FGD 菌株的抗氧化能力之间无显著差异，且均显著低于其他 6 个菌株（$P<0.05$）。在 FRAP 模型中，与阳性对照相比，GTR2 菌株抗氧化能力最强，为 0.85 μmol/mL，且显著高于其他 7 个菌株（$P<0.05$），GTR1 菌株的抗氧化能力最低且显著低于其他 7 个菌株（$P<0.05$）。在 OH 模型中，与阳性对照相比，XJ28 菌株的 OH 自由基清除率最大，为 81.36%，且显著高于其他 7 个菌株（$P<0.05$），GTR1 和 FGD 菌株的 OH 自由基清除率无显著差异，且均显著低于其他 6 个菌株（$P<0.05$）。上述结果表明，8 个茯苓菌株之间的抗氧化能力存在较大差异，推测是由于茯苓发酵液中胞外代谢产物成分和含量不同所致。

2.3　8 个茯苓菌株的聚类分析

8 个茯苓菌株中 24 种化合物的聚类分析结果如图 2 所示。由图 2 可见，8 个茯苓菌株中的化合物可以分为 4 大类：化合物 18（灵芝酸 S）、化合物 5（茯苓酸）、化合物 7（松苓新酸）、化合物 19（3β-羟基麦角甾-7，24-二烯-4α-羧酸酯）、化合物 21（4α-甲基-5α 麦角甾-8，14，24（28）-三烯-3β 醇）、化合物 6（16α-羟基松苓新酸）和化合物 10（茯苓新酸 A）聚为一类，主要为茯苓酸和麦角甾醇类化合物；化合物 13（齐墩果酸甲酯）、化合物 12（猪苓酸 C）、化合物 15（齐墩果酸-28-*O*-β-*D*-葡萄苷）、化合物 11（茯苓新酸 B）和化合物 4（11-氧代熊果酸）聚为一类，主要为齐墩果酸类化合物；化合物 22（麦角甾-5，7，22，24（28）-四烯-3β 醇）、化合物 23（β-谷甾醇）、化合物 24

(豆甾醇)和化合物 9(灵芝酸 G)聚为一类,主要为茯苓胞外甾醇类化合物;化合物 8(去氢茯苓酸)、化合物 1(3-表熊果酸)、化合物 14(齐墩果酸-3-*O*-葡萄糖基(1-2)二甲苯基(1-3)葡萄糖醛酸)、化合物 17(灵芝酸 F)、化合物 3(去氢土莫酸)、化合物 16(灵芝酸 N)、化合物 2(羽扇豆醇)和化合物 20(菜油甾-4-烯-3β 醇)聚为一类,主要为茯苓三萜酸类化合物和菜油甾醇。从茯苓菌株的聚类结果来看,8 个菌株可以归为 3 大类,菌株 GTR1 和 FGD 为一类,FLA、FHB、FGZ 和 XJ28 为一类,GTR2 和 F5.78 为一类。



横轴为茯苓菌株编号(其中 FLA-1、FLA-2、FLA-3 表示茯苓 FLA 菌株的 3 次重复试验,以此类推,共计 24 个样本),图 3 同;纵轴为 24 个化合物编号,具体信息见表 2,图 4~6 同。各化合物峰面积的相对含量经过归一化处理后,分为 5 个色阶,其中−2 代表最低值,用蓝色表示;2 代表最高值,用红色表示;0 为中间值,用白色表示;通过颜色的深浅表示数值的大小。

The horizontal axis represents the number of *Wolfiporia hoelen* strains (where FLA-1, FLA-2, FLA-3 represent 3 repeated experiments of *Wolfiporia hoelen* FLA strain, and so on, with a total of 24 samples). The same as in Fig. 3; The vertical axis represents 24 compound numbers, as shown in Table 2 and the same as in Fig. 4−6. After normalization, the relative content of peak areas of each compound is divided into 5 color levels, where −2 represents the lowest value and is indicated in blue; 2 represents the highest value, indicated in red; 0 is the median value, represented in white; The darker the color, the larger the value.

图 2 8 个茯苓菌株及其 24 种化合物的聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis results of 8 *Wolfiporia hoelen* strains and its 24 compounds

2.4 8 个茯苓菌株的主成分分析

对 8 个茯苓菌株胞外三萜和甾醇类化合物的峰面积相对含量进行 PCA 分析,共得到 3 个特征值大于 1 的主成分,累计方差贡献率达 93.79%。其中主成分 1 的特征值为 15.80,方差贡献率为 66.00%;主成分的 2 特征值为 4.65,方差贡献率为 19.40%;主成分 3 的特征值为 2.01,方差贡献率为 8.39%。由图 3 可知,所有茯苓菌株均位于 95%置信区间(椭圆)内,说明该模型稳定性强。8 个菌株的组间分布情况表明,茯苓菌株 GTR1 和 FGD 距离较近,且均位于第一象限;茯苓菌株 FHB、FLA、FGZ 和 XJ28 集中分布在第二象限,距离很近,表明 24 种化合物的相对含量在这 4 个菌株之间差异较小。茯苓菌株 GTR2 在 Y 轴附近,茯苓菌株 F5.78 在第四象限。上述结果表明,不同茯苓菌株之间胞外三萜和甾醇类化合物的相对含量存在较大差异。

由图 4 可知,24 种化合物中,对主成分 1 的影响由大到小依次为化合物 14,16,3 和 20,即齐墩果酸-3-*O*-葡萄糖基(1-2)二甲苯基(1-3)葡萄糖醛酸、灵芝酸 N、去氢土莫酸、菜油甾-4-烯-3β 醇。对主成分 2 的影响由大到小依次为化合物 22,10,23 和 11,即麦角甾-5,7,22,24(28)-四烯-3β 醇、茯苓新酸 A、β-谷甾醇、茯苓新酸 B。

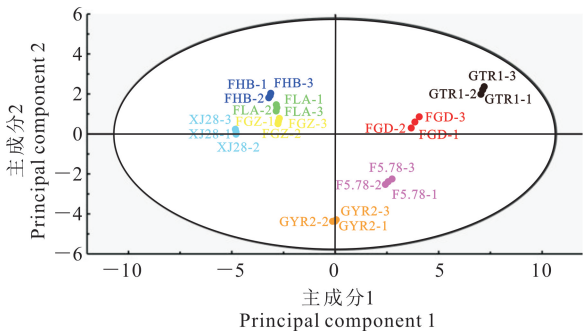


图 3　8 个茯苓菌株 PCA 的得分图

Fig. 3　PCA score plot of 8 *Wolfiporia hoelen* strains

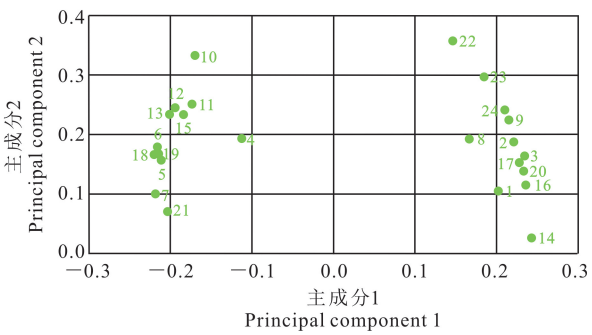


图 4　8 个茯苓菌株中 24 种化合物的 PCA 散点图

Fig. 4　PCA loading scattter plot of 24 compounds in 8 *Wolfiporia hoelen* strains

2.5　8 个茯苓菌株正交偏最小二乘法判别分析

在 OPLS-DA 模型中，模型预测能力参数 Q^2 为 0.983，表明该模型稳定可靠。由图 5 可知，8 个茯苓菌株可大致分为 3 类，茯苓菌株 GTR1 和 FGD 为一类，茯苓菌株 FHB、FLA、FGZ 和 XJ28 为一类，茯苓菌株 GTR2 和 F5.78 为一类，这与 2.3 节中的聚类分析结果一致。由图 5 还可知，茯苓菌株 GTR1 与化合物 8（去氢茯苓酸）距离最近，表明茯苓菌株 GTR1 与化合物 8 有很强的相关性，这与表 2 中去氢茯苓酸相对含量在 GTR1 菌株中最高的结果一致。茯苓菌株 GTR2 和 F5.78 均在横轴上方，且与 24 个化合物距离均较远，相关性不明显。

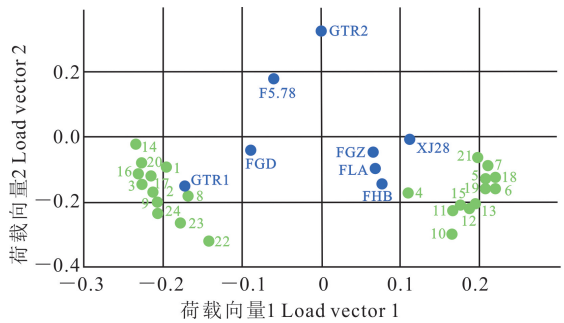


图 5　8 个茯苓菌株 OPLS-DA 的荷载向量

Fig. 5　OPLS-DA loading vectors plot of 8 *Wolfiporia hoelen* strains

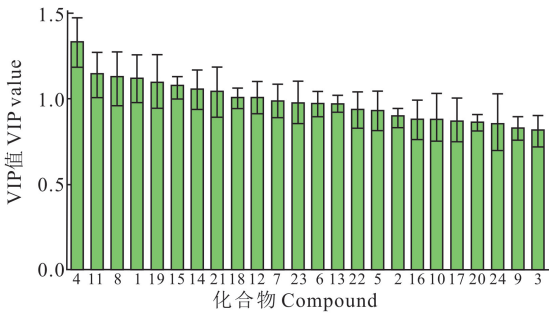


图 6　24 个化合物的变量重要性投影（VIP）值

Fig. 6　Variable importance projection (VIP) value plot of 24 compounds

利用变量重要性投影（variaxble importance in projection，VIP）值可以初步筛选出不同茯苓菌株质量差异的化学成分，VIP 值表示对应化合物对模型的影响强度。从图 6 可知，选择 VIP≥1 的化合物作为不同茯苓菌株质量差异化合物的筛选标准，共筛选出 10 个共有差异成分，分别为化合物 4，11，8，1，19，15，14，21，18 和 12，即 11-氧代熊果酸、茯苓新酸 B、去氢茯苓酸、3-表熊果酸、3β-羟基麦角甾-7，24(24(1))-二烯-4α-羧酸酯、齐墩果酸-28-*O*-β-*D*-葡萄苷、齐墩果酸-3-*O*-葡萄糖基(1-2)二甲苯基(1-3)葡萄糖醛酸、4α-甲基-5α-麦角甾-8，14，24(28)-三烯-3β 醇、灵芝酸 S、猪苓酸 C。

2.6　茯苓化学成分相对含量与抗氧化能力的相关性

以茯苓胞外三萜和胞外甾醇化合物的相对含量与发酵液抗氧化能力进行 Pearson 相关性分析，结果如表 4 所示。由表 4 可知，在 ABTS 和 FRAP 模型中，18 种三萜类化合物和 6 种甾醇类化合物相对含量与抗氧化能力之间均呈负相关性；在 DPPH 模型中，17 种三萜类化合物（16α-羟基松苓新酸除外）和 5 种甾醇类化合物（4α-甲基-5α 麦角甾-8，14，24(28)-三烯-3β 醇除外）相对含量与抗氧化能力之间表现出负相关性，表明茯苓胞外三萜和胞外甾醇在这 3 个模型中显示出较弱的抗氧化能力，且羽扇豆醇、灵芝酸 G、麦角甾-5，7，22，24(28)-4-烯-3β 醇、β-谷甾醇和豆甾醇等 5 种化合物相对含量与抗氧化能力（ABTS、DPPH 和 FRAP 模型）之间均存在显著负相关性（$P<0.05$）。在 OH 模型中，10 种茯苓胞外三萜化合物和 2 种胞外甾醇化合物的相对含量均与抗氧化能力呈正相关，其中茯苓酸、16α-羟基松苓新酸、去氢松苓酸、茯苓新酸 A、灵芝酸 S、3β-羟基麦角甾-7，24(24(1))-二烯-4α-羧酸酯和 4α-甲基-5α-麦

角甾-8,14,24(28)-三烯-3β 醇等 7 种化合物相对含量与 OH 模型抗氧化能力呈极显著正相关($P<0.01$),推测这 7 种化合物具有较强的 OH 自由基清除能力。上述结果表明,茯苓胞外三萜和胞外甾醇化合物相对含量与 ABTS、DPPH、FRAP 模型的抗氧化能力以负相关为主,与 OH 模型的抗氧化能力之间存在极显著正相关或负相关关系,推测茯苓胞外三萜类和胞外甾醇类化合物对抗氧化模型具有一定的选择性,宜以 OH 模型检测茯苓胞外三萜和甾醇的抗氧化能力。

表 4 茯苓胞外三萜和甾醇化合物相对含量与抗氧化能力的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between relative content of extracellular triterpenoids and sterols in *Wolfiporia hoelen* and antioxidant capacity

序号 No.	化合物 Compound	抗氧化能力 Antioxidant capacity							
		ABTS 模型 ABTS model		DPPH 模型 DPPH model		FRAP 模型 FRAP model		OH 模型 OH model	
		R	*P*	*R*	*P*	*R*	*P*	*R*	*P*
1	3-表熊果酸 3-Epiursolic acid	−0.211	0.322	−0.424*	0.039	−0.253	0.233	−0.374	0.071
2	羽扇豆醇 Lupeol	−0.455*	0.025	−0.638**	0.001	−0.494*	0.014	−0.521**	0.009
3	去氢土莫酸 Dehydrotumulosic acid	−0.400	0.053	−0.606**	0.002	−0.431*	0.035	−0.531**	0.008
4	11-氧代熊果酸 11-Keto-ursolic acid	−0.449*	0.028	−0.295	0.162	−0.449*	0.028	0.218	0.307
5	茯苓酸 Pachymic acid	−0.309	0.141	−0.114	0.596	−0.325	0.121	0.861**	<0.001
6	16α-羟基松苓新酸 16α-Hydroxydehydrotrametenolic acid	−0.149	0.488	0.092	0.668	−0.201	0.345	0.581**	0.003
7	松苓新酸 3-Dehydrotrametenolic acid	−0.190	0.374	−00.012	0.955	−0.220	0.302	0.887**	<0.001
8	去氢茯苓酸 3-Dehydrotrametenolic acid	−0.254	0.231	−0.441*	0.031	−0.381	0.066	−0.230	0.28
9	灵芝酸 G Ganoderic acid G	−0.488*	0.016	−0.641**	0.001	−0.519**	0.009	−0.618**	0.001
10	茯苓新酸 APoricoic acid A	−0.597**	0.002	−0.386	0.063	−0.643**	0.001	0.620**	0.001
11	茯苓新酸 BPoricoic acid B	−0.411*	0.046	−0.134	0.534	−0.404	0.05	0.198	0.355
12	猪苓酸 C Polyporenic acid C	−0.318	0.130	−0.040	0.852	−0.332	0.113	0.362	0.082
13	齐墩果酸甲酯 Methyl oleanonate	−0.344	0.100	−0.065	0.762	−0.351	0.093	0.385	0.064
14	齐墩果酸-3-*O*-葡萄糖基(1-2)二甲苯基(1-3)葡萄糖醛酸 Oleanolic acid-3-*O*-glucosyl(1-2)xylyl(1-3)glucosiduronic acid	−0.187	0.383	−0.414*	0.044	−0.154	0.473	−0.619**	0.001
15	齐墩果酸-28-*O*-β-*D*-葡萄苷 Oleanolic acid 28-*O*-β-*D*-glucopyranoside	−0.325	0.121	−0.077	0.722	−0.344	0.099	0.322	0.125
16	灵芝酸 N Ganoderic acid N	−0.334	0.110	−0.532**	0.007	−0.336	0.108	−0.618**	0.001
17	灵芝酸 F Ganoderic acid F	−0.323	0.123	−0.553**	0.005	−0.394	0.057	−0.431*	0.036
18	灵芝酸 S Ganoderic acid S	−0.279	0.187	−0.061	0.776	−0.306	0.147	0.781**	<0.001
19	3β-羟基麦角甾-7,24(24(1))-二烯-4α-羧酸酯 3β-Hydroxyergosta-7,24(24(1))-dien-4α-carboxylate	−0.330	0.115	−0.105	0.624	−0.319	0.128	0.815**	<0.001
20	菜油甾-4-烯-3β 醇 Campest-4-en-3β-ol	−0.396	0.055	−0.602**	0.002	−0.416*	0.043	−0.524**	0.009
21	4α-甲基-5α 麦角甾-8,14,24(28)-三烯-3β 醇 4α-Methyl-5α-ergosta-8, 14, 24(28)-trien-3β-ol	−0.123	0.568	0.032	0.881	−0.149	0.486	0.914**	<0.001
22	麦角甾-5,7,22,24(28)-四烯-3β 醇 Ergosta-5,7,22,24(28)-tetraen-3β-ol	−0.742**	<0.001	−0.803**	<0.001	−0.789**	<0.001	−0.385	0.063
23	β-谷甾醇 β-Sitosterol	−0.499*	0.013	−0.645**	0.001	−0.602**	0.002	−0.469*	0.021
24	豆甾醇 Stigmasterol	−0.519**	0.009	−0.706**	<0.001	−0.581**	0.003	−0.435*	0.034

注:*R* 表示相关性系数。“**”表示在 0.01 水平(双侧)显著相关;“*”表示在 0.05 水平(双侧)显著相关。

Note: *R* means Pearson correlation coefficient. “**” indicates significant correlation at 0.01 level (bilateral). “*” indicates significant correlation at the 0.05 level (bilateral).

由表 4 还可知,3-表熊果酸、去氢茯苓酸的相对含量与 DPPH 模型呈显著负相关($P<0.05$),茯苓

新酸 B 相对含量与 ABTS 模型呈显著负相关（$P<0.05$），灵芝酸 S、3β-羟基麦角甾-7，24(24(1))-二烯-4α-羧酸酯、4α-甲基-5α-麦角甾-8，14，24(28)-三烯-3β 醇与 OH 模型呈极显著正相关（$P<0.01$）。上述 6 种成分均只与 1 种模型的抗氧化能力显著相关，显示出较强的专一性，这 6 种成分的含量高低是导致 8 个茯苓菌株在不同模型抗氧化能力方面表现出显著差异的根本原因。

3　讨　论

一般认为，茯苓三萜类成分主要为茯苓酸、土莫酸、猪苓酸、熊果酸和齐墩果酸及其衍生物，但本试验还发现有 4 种灵芝酸型三萜类化合物，这与王利亚等[23]从茯苓菌核中鉴定出灵芝酸成分的结论相似。本试验从 8 个茯苓菌株仅鉴定出 18 种胞外三萜类化合物和 6 种胞外甾醇类化合物，而张年等[7]总结前人研究结果认为，已从茯苓菌核和茯苓皮中鉴定出 84 种茯苓三萜类化合物和 19 种甾醇类化合物，表明茯苓菌丝体和菌核之间在次级代谢产物表达方面存在较大差异，茯苓菌核由茯苓菌丝紧密连接交织而成，其生物代谢途径更为复杂，生物活性成分相对更为丰富。

本研究经主成分分析得到的 8 种化合物成分和经正交偏最小二乘法判别分析得到的 10 种成分中，只有齐墩果酸-3-*O*-葡萄糖基(1-2)二甲苯基(1-3)葡萄糖醛酸是重复出现的，原因可能是主成分分析主要侧重于化学成分的相对含量，而正交偏最小二乘法判别分析主要侧重于筛选差异组分，以揭示茯苓发酵液抗氧化能力的差异。从化合物 22，23 和 24 与抗氧化能力的相关性来看，3 种化合物与 4 个抗氧化模型均为负相关，显示出较强的协同作用。化合物 5，6，7，10，18，19 和 21 等 7 种化合物与抗氧化能力模型 ABTS、DPPH 和 FRAP 均呈负相关，而与 OH 模型均呈显著正相关，说明化合物与不同模型的抗氧化能力之间还存在互斥作用，这表明茯苓胞外代谢产物与抗氧化能力的相关性不仅取决于化合物本身特性，还与所选择的抗氧化模型有关[24]。

在茯苓抗氧化能力测定中，ABTS、DPPH 和 FRAP 模型均以 0.10 mg/mL 抗坏血酸为阳性对照，其抗氧化能力分别为 0.63，0.37 和 0.51 μmol/mL，且相互之间差异不大，表明茯苓发酵液在这 3 个模型中的抗氧化能力差异较小。而在 OH 模型中，当抗坏血酸的质量浓度为 0.10 mg/mL 时，其对 OH 自由基的清除率仅为 0.16%，远低于 8 个茯苓菌株中表现最差的 FGD 菌株（OH 自由基清除率为 3.76%），故在 OH 模型中，选择抗坏血酸的质量浓度为 4.0 mg/mL。

茯苓人工栽培的主要原材料是松科植物，包括马尾松、云南松、湿地松等。松材线虫是松科植物的一类检疫性病害，其致病力强，传播速度快，治理难度大。利用松材线虫疫木来栽培茯苓可以杀死松材线虫[25]，并可显著抑制松墨天牛的发育[26]，有效防控松材线虫病，但作用机理尚不清楚，推测与茯苓胞外代谢产物中的活性成分有关。有研究表明，β-谷甾醇、熊果酸和豆甾醇等均具有杀线虫的效果[27-28]，而本研究的 8 个茯苓菌株均能产生 β-谷甾醇、豆甾醇和熊果酸类化合物，后续可进一步开展茯苓胞外代谢产物对松材线虫毒杀作用机制的研究。

4　结　论

本研究从 8 个茯苓菌株中共鉴定出 18 种胞外三萜类化合物和 6 种胞外甾醇类化合物。不同茯苓菌株胞外三萜和胞外甾醇化学成分及其相对含量存在差异，茯苓 GTR1 菌株相对含量最高的三萜类成分是灵芝酸 N，其他 7 个菌株相对含量最高的三萜类成分均为齐墩果酸甲酯。8 个菌株相对含量最高的甾醇类成分均为菜油甾-4-烯-3β 醇。采用 ABTS、DPPH、FRAP 和 OH 模型测定 8 个茯苓菌株的体外抗氧化能力，发现 3-表熊果酸、去氢茯苓酸、茯苓新酸 B、灵芝酸 S、3β-羟基麦角甾-7，24(24(1))-二烯-4α-羧酸酯、4α-甲基-5α-麦角甾-8，14，24(28)-三烯-3β 醇是影响其抗氧化能力的关键成分。该研究结果可为茯苓菌株质量评价及其代谢产物抗氧化产品的开发提供参考。

[参考文献]

[1] PAPP V，DAI Y C. What is the correct scientific name for ‘Fuling’ medicinal mushroom? [J]. Mycology，2022，13(3)：207-211.

[2] 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，2020：251-252.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People’s Republic of China：I [S]. Beijing：China Medical Science and Technology Press，2020：251-252.

[3] 邓桃妹，彭代银，俞年军，等. 茯苓化学成分和药理作用研究进展及质量标志物的预测分析[J]. 中草药，2020，51(10)：2703-2717.
DENG T M，PENG D Y，YU N J，et al. Research progress on chemical composition and pharmacological effects of *Poria cocos* and predictive analysis on quality markers[J]. Chinese Tra-

ditional and Herbal Drugs,2020,51(10):2703-2717.

[4] 叶青,刘东升,王兰霞,等.茯苓化学成分、药理作用及质量控制研究进展[J].中医药信息,2023,40(2):75-79.
YE Q, LIU D S, WANG L X, et al. Research progress on chemical constituents, pharmacological effects and quality control of *Poria cocos*[J]. Information on Traditional Chinese Medicine,2023,40(2):75-79.

[5] 占慧慧,丁婵,彭思源,等.茯苓皮与白茯苓中三萜类成分的HPLC指纹图谱与化学模式识别研究[J].天然产物研究与开发,2023,35(9):1469-1479.
ZHAN H H,DING C,PENG S Y,et al. Study on HPLC fingerprint and chemical pattern recognition of triterpenoids in poriae cutis and white poria[J]. Natural Product Research and Development,2023,35(9):1469-1479.

[6] 谭钤文,邹存超,侯春英,等.茯苓液体发酵及活性产物抗肿瘤机制研究进展[J].食品与发酵工业,2024,50(14):385-392.
TAN Q W,ZOU C C,HOU C Y,et al. Research progress of liquid fermentation and anti-tumor mechanisms of active substances from *Poria cocos*[J]. Food and Fermentation Industries,2024,50(14):385-392.

[7] 张年,李兆星,李娟,等.茯苓的化学成分与生物活性研究进展[J].世界科学技术-中医药现代化,2019,21(2):220-233.
ZHANG N,LI Z X,LI J,et al. Advances in the research of constituents and pharmacological effects of *Poria cocos* (Schw.) Wolf[J]. Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica-World Science and Technology,2019,21(2):220-233.

[8] 路平,史汶龙,杨思雨,等.茯苓化学成分及药理作用研究进展[J].中成药,2024,46(4):1246-1254.
LU P, SHI W L, YANG S Y, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Poria cocos*[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2024, 46(4): 1246-1254.

[9] RANTEH O,TEDASEN A,RAHMAN M A,et al. Bioactive compounds from *Ocimum tenuiflorum* and *Poria cocos*:a novel natural compound for insomnia treatment based on a computational approach[J]. Computers in Biology and Medicine,2024,175:108491.

[10] ZHANG W X,CHEN L, LI P,et al. Antidepressant and immunosuppressive activities of two polysaccharides from *Poria cocos* (Schw.) Wolf[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2018,120:1696-1704.

[11] 史云静,李玉霞.茯苓多糖通过NF-κB和NLRP3信号通路调节脂多糖引起的焦虑和抑郁样行为[J].食品工业科技,2023,44(12):371-377.
SHI Y J,LI Y X. *Poria cocos* polysaccharides regulate anxiety and depression-like behaviors induced by lipopolysaccharide through NF-κB and NLRP3 signaling pathways[J]. Science and Technology of Food Industry,2023,44(12):371-377.

[12] JIANG S F,LIANG C,WAN X W,et al. Integrative analysis reveals the anti-obesity roles of *Poria cocos* polysaccharides through beneficial effects on gut microbiota[J]. Journal of Functional Foods,2024,119:106308.

[13] 程水明,桂元,沈思,等.茯苓皮三萜类物质抗氧化活性研究[J].食品科学,2011,32(9):27-30.
CHENG S M,GUI Y,SHEN S,et al. Antioxidant properties of triterpenes from *Poria cocos* peel[J]. Food Science,2011,32(9):27-30.

[14] SONG X J,WANG W,LIU L,et al. *Poria cocos* attenuated DSS-induced ulcerative colitis *via* NF-κB signaling pathway and regulating gut microbiota[J]. Molecules, 2024, 29(9):2154.

[15] YANG H T,ZHAO Y,REN B N,et al. Poria acid inhibit the growth and metastasis of renal cell carcinoma by inhibiting the PI3K/Akt/NF-κb signaling pathway[J]. Heliyon,2024,10(10):e31106.

[16] ZHANG X Y,LIN W,LEI S Y,et al. The anti-hyperlipidemic effects of *Poria cocos* (Schw.) Wolf extract:modulating cholesterol homeostasis in hepatocytes via PPARα pathway[J]. Journal of Ethnopharmacology,2024,321:117532.

[17] WANG M J,ZHANG G Z,GUO J B,et al. Study on the physicochemical properties and gut microbiota regulation of *Poria cocos* pachyman treated by ball milling[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2024,277:134399.

[18] CHENG X,CAO L,SUN X J,et al. Metabolomic profile of plasma approach to investigate the mechanism of *Poria cocos* oligosaccharides attenuated LPS-induced acute lung injury in mice[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis,2024,247:116262.

[19] DING X F,LI S Y,HUANG H Y,et al. Bioactive triterpenoid compounds of *Poria cocos* (Schw.) Wolf in the treatment of diabetic ulcers *via* regulating the PI3K-AKT signaling pathway[J]. Journal of Ethnopharmacology,2024,325:117812.

[20] SUN M J,YAO L,YU Q M,et al. Screening of *Poria cocos* polysaccharide with immunomodulatory activity and its activation effects on TLR4/MD2/NF-κB pathway[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 273:132931.

[21] 王伟霞,王文锋,陈立国.茯苓菌丝体固体培养与分泌色素关系的研究[J].江苏农业科学,2010(3):311-313.
WANG W X,WANG W F,CHEN L G. Study on the relationship between solid culture and pigment secretion of *Poria cocos* mycelium[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2010(3):311-313.

[22] 金文松,刘文君,李立志,等.16种茯苓菌株液体发酵产胞内多糖与三萜的比较研究[J].天然产物研究与开发,2019,31(5):878-886.
JIN W S,LIU W J,LI L Z,et al. Comparative study on the intracellular polysaccharides and triterpenoids produced by 16 *Wolfiporia cocos* strains with submerged fermentation strategies[J]. Natural Product Research and Development,2019,31(5):878-886.

[23] 王利亚,万惠杰.茯苓化学成分的研究[J].中草药,1998,29(3):145-148.

WANG L Y，WAN H J. Studies on the chemical constituents of *Poria cocos*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs，1998，29(3)：145-148.

[24] 张小龙，吴斌霞，朱钊宇，等. 山栀子不同部位活性成分含量及抗氧化活性[J]. 食品工业科技，2024，45(12)：10-17.
ZHANG X L，WU B X，ZHU Z Y，et al. Content and antioxidant activity of active components in different parts of *Gardenia jasminoides* Ellis[J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(12)：10-17.

[25] 谭著明，沈宝明，谭云，等. 以松材线虫病疫木为基质栽培茯苓的安全性评价[J]. 湖南林业科技，2025，52(1)：91-95.
TAN Z M，SHEN B M，TAN Y，et al. A safety evaluation of culturing *Wolfiporia hoelen* with plague woodas base material which infected with *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. Hunan Forestry Science & Technology，2025，52(1)：91-95.

[26] 吴云忠. 松材线虫病疫木种植茯苓试验[J]. 福建林业科技，2013，40(4)：51-55.
WU Y Z. A preliminary study on cultivation of *Poria cocos* on nematode affected pine wood[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology，2013，40(4)：51-55.

[27] VELASCO-AZORSA R，CRUZ-SANTIAGO H，DEL PRADO-VERA I C，et al. Chemical characterization of plant extracts and evaluation of their nematicidal and phytotoxic potential[J]. Molecules，2021，26(8)：2216.

[28] FERHEEN S，AKHTAR M，AHMED A N，et al. Nematicidal potential of the *Galinsoga parviflora*[J]. Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research：Biological Sciences，2011，54(2)：83-87.

（责任编辑：温晓平）

（上接第 155 页）

[28] 冯伟林，金群力，沈颖越，等. 金针菇‘浙金 102’、香菇‘L901’和猴头‘浙林猴 2 号’的选育报告[J]. 菌物学报，2023，42(10)：2152-2156.
FENG W L，JIN Q L，SHEN Y Y，et al. Breeding new cultivars of *Flammulina filiformis* ‘Zhejin 102’，*Lentinula edodes* ‘L901’ and *Hericium erinaceus* ‘Zhelinhou No. 2’[J]. Mycosystema，2023，42(10)：2152-2156.

[29] 王彬彬，李茂淋，王三，等. 提取方法对猴头菇不溶性膳食纤维结构、理化及功能特性的影响[J]. 食品研究与开发，2024，45(17)：14-22.
WANG B B，LI M L，WANG S，et al. Effects of extraction methods on structure，physicochemical and functional properties of insoluble dietary fiber from *Hericium erinaceus*[J]. Food Research and Development，2024，45(17)：14-22.

[30] SOLIMAN G A. Dietary fiber，atherosclerosis，and cardiovascular disease[J]. Nutrients，2019，11(5)：1155.

[31] 董慧，张会婷，杨艳玲，等. 膳食纤维：改善胃肠道功能的关键性营养素[J]. 中国实用儿科杂志，2023，38(10)：751-754.
DONG H，ZHANG H T，YANG Y L，et al. Dietary fibre as a key nutrient to improve the gastrointestinal function[J]. Chinese Journal of Practical Pediatrics，2023，38(10)：751-754.

[32] 冯志彬，殷曰彩，米阳，等. 天冬氨酸生产工艺的研究进展[J]. 发酵科技通讯，2012，41(2)：38-41.
FENG Z B，YIN Y C，MI Y，et al. Research progress on aspartic acid production process[J]. Bulletin of Fermentation Science and Technology，2012，41(2)：38-41.

（责任编辑：陈丽）