

野生药用真菌光核纤孔菌的生物学特性和抗氧化活性

唐禄鑫, 季盈仪, 刘阳, 王豪, 叶奕萱, 员瑗*, 司静*

北京林业大学生态与自然保护学院林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083

摘要: 本研究选取广义桑黄类真菌光核纤孔菌 *Inocutis levis* 作为研究对象, 针对光核纤孔菌在固体培养过程中的生物学特性指标及在液体发酵过程中分泌的多糖、多酚、黄酮、抗坏血酸、超氧化物歧化酶、清除自由基能力以及铁离子还原能力变化进行了测定, 证实分离自新疆克拉玛依市小拐乡胡杨林上的野生光核纤孔菌以淀粉、酵母浸粉、 KH_2PO_4 、pH 9、35 °C 作为其最适碳源、氮源、无机盐、pH 和温度, 且具有显著的抗氧化活性 ($P < 0.01$), 该研究为今后该种野生药用真菌资源的保护、开发和利用提供了资源储备和基础数据。

关键词: 野生药用真菌; 光核纤孔菌; 基质偏好性; 抗氧化活性

[引用本文]

唐禄鑫, 季盈仪, 刘阳, 王豪, 叶奕萱, 员瑗, 司静, 2026. 野生药用真菌光核纤孔菌的生物学特性和抗氧化活性. 菌物学报, 45(1): 250218

Tang LX, Ji YY, Liu Y, Wang H, Ye YX, Yuan Y, Si J, 2026. Biological characteristics and antioxidant activities of the wild medicinal mushroom *Inocutis levis*. Mycosystema, 45(1): 250218

资助项目: 北京市科技新星计划(20230484322); 第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0505); 北京林业大学“大学生创新创业训练计划”(X202310022316); 北京林业大学“国家级大学生创新创业训练计划”(202310022109, 202510022140)

This work was supported by the Beijing Nova Program (20230484322), the Third Xinjiang Scientific Expedition Program (2021xjkk0505), the Beijing Forestry University Undergraduate Training Program for Innovation and Entrepreneurship (X202310022316), and the National Undergraduate Training Program for Innovation and Entrepreneurship (202310022109, 202510022140).

*Corresponding authors. E-mails: YUAN Yuan, yuanyuan1018@bjfu.edu.cn; SI Jing, jingsi1788@126.com

Received: 2025-07-17; Accepted: 2025-07-28

Biological characteristics and antioxidant activities of the wild medicinal mushroom *Inocutis levis*

TANG Luxin, JI Yingyi, LIU Yang, WANG Hao, YE Yixuan, YUAN Yuan*, SI Jing*

State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Cultivation of the wild *Inocutis levis* isolated from *Populus euphratica* in Xiaoguai Town in Karamay of Xinjiang was carried out. It was found that using starch and yeast extract as carbon and nitrogen sources, with the addition of KH_2PO_4 as inorganic salt, the fungus grew well under pH 9 and 35 °C conditions. During liquid cultivation, polysaccharide, polyphenol, flavonoid, ascorbic acid, superoxide dismutase, scavenging abilities for free radicals, and ferric reducing antioxidant power of the fungus were determined. The results provide basic data for the protection, evaluation, development, and utilization of this wild medicinal fungus resources in the future.

Keywords: wild medicinal mushroom; *Inocutis levis*; substrate preference; antioxidant ability

光核纤孔菌 *Inocutis levis* (P. Karst.) Y.C. Dai 隶属于真菌界 *Fungi*, 担子菌门 Basidiomycota, 蘑菇纲 Agaricomycetes, 锈革孔菌目 Hymenochaetales, 锈革孔菌科 Hymenochaetaceae (Dai 2010), 是一种一年生大型木生真菌, 目前在我国主要发现生于胡杨上, 是该寄主重要的木材腐朽菌(戴玉成 2012), 也是其典型独特的真菌物种(陈万超等 2020; 吴声华和戴玉成 2020)。光核纤孔菌作为一种药用真菌, 在医药、化工及食品工业中的广泛应用多建立在其抗氧化活性之上(Bjørklund *et al.* 2017; George *et al.* 2017; Raffa *et al.* 2017; 王豪等 2021; 周苗等 2023)。而目前大多数药用真菌抗氧化活性研究集中于灵芝 *Ganoderma*、桑黄 *Sanghuangporus*、桦纤孔菌 *Inonotus obliquus* 和金针菇 *Flammulina filiformis* 等物种(莫顺燕等 2003; 张维博等 2014; 孟歌等 2016, 2018; Si *et al.* 2019; 杨树东等 2019; 宋吉玲等 2020, 2022; 滕李铭等 2021; 崔宝凯等 2023; Wang *et al.* 2023; 张洋洋等 2023; 雷梦婷等 2025), 缺乏对新资源的探索。鉴于光核纤孔菌与桑树桑黄 *Sanghuangporus sanghuang*、粗毛纤孔菌 *I. hispidus*、杨核纤孔菌 *I. rheades* 等多种著名药用真菌的系统发育关系十分相近(吴声华等 2016; 刘鑫等 2018; 戴玉成 2022), 因此, 深

入开展光核纤孔菌抗氧化活性研究, 对于揭示光核纤孔菌的药理作用, 以及今后该类药用真菌资源的保护、开发和利用具有重要意义。

高等真菌的抗氧化活性与多糖、多酚、黄酮和抗坏血酸含量及超氧化物歧化酶活性关系密切, 表现为羟自由基、超氧阴离子、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 自由基和 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS] 自由基等清除能力及铁离子还原能力(ferric reducing antioxidant power, FRAP)等(Pandey *et al.* 2016; 吴声华等 2016; Russo *et al.* 2017; 郑飞等 2017; 陈志娜等 2018; Hou *et al.* 2019; 吕国英等 2021; 李志军和包海鹰 2022; 周苗等 2023)。在液体发酵过程中, 菌株的抗氧化活性与营养代谢强度、次级代谢产物生成水平及胞外酶活性密切相关。菌株对营养物质利用越充分, 菌体增殖及生物质积累越旺盛, 菌株分泌次级代谢产物和胞外酶的能力也就越强, 进而直接增强菌株抵御氧化应激损伤的生理功能(孟歌等 2016)。

已有研究报道了药用真菌的抗氧化活性, 孟歌等(2016)通过测定锦带花桑黄 *S. weigela* 在 14 d 液体发酵过程中菌丝体生物量、pH、还原糖含

量、漆酶活性、多酚含量、丙二醛含量、超氧化物歧化酶活性、总抗氧化活性和 DPPH 自由基清除能力的变化,发现该药用真菌菌株具有较强的抗氧化活性,且这一活性与其对营养物质的利用情况、次级代谢产物的分泌及胞外酶的活性密切相关;钱坤等(2022)针对野生四川灵芝 *Ganoderma sichuanense* 液体发酵过程中的羟自由基清除能力变化进行测定,发现其具有一定的抗氧化活性;周苗等(2023)研究发现粗毛纤孔菌在液体发酵的 14 d 内,多酚和黄酮含量一直处于较高水平,且对羟自由基、DPPH 自由基、ABTS 自由基清除能力以及铁离子还原能力也较强,说明粗毛纤孔菌具有良好的抗氧化活性,可以作为一类天然抗氧化剂开发使用;王一菲等(2019)发现忍冬桑黄 *S. lonicericola* 和栎生桑黄 *S. quercicola* 均具有较强的抗氧化活性;郑飞等(2017)对桑树桑黄液体发酵过程中的抗氧化活性进行了评价,结果显示该菌株对羟自由基、超氧阴离子、DPPH 自由基和 ABTS 自由基的清除能力较强,是一种较好的清除自由基天然原料。而关于光核纤孔菌的抗氧化活性研究目前仅针对其丙酮和乙酸乙酯提取物展开,结果表明其真菌提取物对 ABTS 自由基和 DPPH 自由基具有较强的清除能力,但对其液体发酵过程中的发酵液抗氧化活性研究仍缺乏(Chaharmiri-Dokhaharani *et al.* 2024)。

综上所述,目前缺乏对光核纤孔菌抗氧化活性的系统性研究和全面评估。因此,本研究结合已有报道,研究光核纤孔菌的最适固体培养条件,并通过液体发酵培养法测定发酵液中的多糖、多酚、黄酮和抗坏血酸含量、超氧化物歧化酶活性、清除羟自由基、超氧阴离子、DPPH 自由基和 ABTS 自由基能力及铁离子还原能力,全面评价光核纤孔菌的抗氧化活性,以期为该种真菌进一步的药理研究及保护、开发、利用提供资源储备和基础数据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

1.1.1 菌株

光核纤孔菌菌株 XJ021, 分离自中国新疆克

拉玛依市小拐乡胡杨林上,现保藏于北京林业大学生态与自然保护学院林木资源高效生产全国重点实验室。

1.1.2 培养基

加富 PDA 培养基(g/L): 去皮马铃薯 200, 葡萄糖 20, KNO_3 5, KH_2PO_4 1, 琼脂 20, VB_1 0.01, pH 自然。碳源未添加培养基(g/L): KNO_3 5, KH_2PO_4 1, 琼脂 20, VB_1 0.01, pH 自然。氮源未添加培养基(g/L): 葡萄糖 20, KH_2PO_4 1, 琼脂 20, VB_1 0.01, pH 自然。无机盐未添加培养基(g/L): 葡萄糖 20, KNO_3 5, 琼脂 20, VB_1 0.01, pH 自然。液体培养基(g/L): 除不添加琼脂外,均以优化后的培养基组成成分而定。

1.2 方法

1.2.1 固体活化培养

制备加富 PDA 培养基于 $121\text{ }^\circ\text{C}$ 、 1×10^5 Pa 灭菌 30 min 后倒入培养皿制成平板。将保藏的光核纤孔菌从斜面培养基接种至平板中央,置于 $28\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温暗培养箱中培养 10 d 备用。

1.2.2 单因子试验

碳源: 碳源未添加培养基中分别添加葡萄糖、果糖、麦芽糖、蔗糖、玉米淀粉、可溶性淀粉(20 g/L)为碳源,以碳源未添加培养基为对照,各 5 个重复, $28\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温黑暗静置培养。

氮源: 氮源未添加培养基中分别添加 KNO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、牛肉膏、蛋白胨、尿素、麦芽浸粉、酵母浸粉、麦麸(5 g/L)为氮源,以氮源未添加培养基为对照,各 5 个重复, $28\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温黑暗静置培养。

无机盐: 无机盐未添加培养基中分别添加 KH_2PO_4 、 MgSO_4 、 MnSO_4 (1 g/L)为无机盐,以无机盐未添加培养基为对照,各 5 个重复, $28\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温黑暗静置培养。

pH: 加富 PDA 培养基高压蒸汽灭菌后凝固前分别添加经 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 过滤除菌的甘氨酸-盐酸缓冲液、柠檬酸-磷酸缓冲液、2-(*N*-吗啉基)乙磺酸缓冲液、磷酸缓冲液、Tris-盐酸缓冲液,对应调整培养基 pH 为 5.0、5.5、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0、8.5、9.0,各 5 个重复, $28\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温黑暗静置培养。

温度：仅加富 PDA 培养基，各 5 个重复，分别于 15、20、25、30、35 °C 恒温黑暗静置培养。

1.2.3 正交试验

将单因子试验最优结果作为 0 水平进行正交试验，具体各因子水平见表 1，各 5 个重复，分别于温度单因子试验得到的最适温度水平恒温黑暗静置培养。

1.2.4 菌丝生长速率测定

采用交叉法测量并记录光核纤孔菌固体培养过程中的菌落生长直径。菌丝生长速率 (mm/d) = (最后一次测量菌落直径-第一次测量菌落直径)/培养时间。

1.2.5 菌悬液制备及液体发酵培养

制备液体培养基于 121 °C、 1×10^5 Pa 灭菌 30 min 备用。每个 250 mL 锥形瓶分装 100 mL 液体培养基，在长满菌丝的平板上用打孔器从边缘取 5 块直径 1 cm 的菌块接种于锥形瓶中，置于摇床 28 °C、150 r/min 黑暗振荡培养。待菌丝球发酵 5 d 后，用内切式匀浆机以 1 000 r/min 将发酵菌液粉碎 1 min 制成均匀菌悬液，充分振荡后吸取 10 mL 接种至 100 mL 液体培养基中，置于摇床 28 °C、150 r/min 黑暗振荡培养 14 d，设 3 个重复。每隔 2 d 取发酵液经 4 °C、12 000 r/min 离心 20 min，所得上清液进行抗氧化活性测定。

1.2.6 抗氧化活性测定

多糖含量：采用总多糖检测试剂盒(北京博奥拓达科技有限公司)，通过分光光度法测定。利用水提醇沉法提取多糖，添加苯酚-浓硫酸测定反应体系在 490 nm 处的吸光值即可计算多糖含量，设 3 个重复。实验制得标准曲线为： $y=15.963x-0.0037$ ，相关系数 $R^2=0.9997$ 。

多酚含量：采用植物总酚检测试剂盒(南京建成生物工程研究所)，通过分光光度法测定。在碱性条件下，酚类物质将钨钼酸还原，产生蓝色化合物，在 760 nm 处有特征吸收峰，测定此处吸光值即可计算多酚含量，设 3 个重复。实验制得标准曲线为： $y=1101.3x-16.165$ ，相关系数 $R^2=0.9988$ 。

黄酮含量：采用植物黄酮检测试剂盒(南京建成生物工程研究所)，通过分光光度法测定。在碱性 NO_2^- 溶液中，黄酮与铝离子形成红色络合物，在 502 nm 处有特征吸收峰，测定此处吸光值即可计算黄酮含量，设 3 个重复。实验制得标准曲线为： $y=0.1101x-0.0015$ ，相关系数 $R^2=0.9998$ 。

抗坏血酸含量：采用抗坏血酸测定试剂盒(南京建成生物工程研究所)，通过分光光度法测定。抗坏血酸可将 Fe^{3+} 还原成 Fe^{2+} ，后者再与菲罗啉发生显色反应，在 536 nm 处有特征吸收峰，测定此处吸光值即可计算抗坏血酸含量，设 3 个重复。

超氧化物歧化酶活性：采用超氧化物歧化酶测定试剂盒(南京建成生物工程研究所)，通过分光光度法测定。在碱性条件下，邻苯三酚会自氧化并同时生成超氧阴离子，添加超氧化物歧化酶可清除超氧阴离子从而抑制邻苯三酚的自氧化过程，在 450 nm 处有特征吸收峰，测定此处吸光值即可计算超氧化物歧化酶活性，设 3 个重复。反应体系中超氧化物歧化酶抑制率达 50% 时所对应的酶量为一个超氧化物歧化酶活力单位(U)。

清除羟自由基能力：采用羟自由基测定试剂盒(南京建成生物工程研究所)，通过分光光度法

表 1 正交试验因子水平

Table 1 Factor levels of the orthogonal experiment

| 水平 | 因子 | | | |
|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|----|
| Level | Factor | | | |
| | 碳源：可溶性淀粉 | 氮源：酵母浸粉 | 无机盐： KH_2PO_4 | pH |
| | Carbon source: soluble starch/(g/L) | Nitrogen source: yeast extract/(g/L) | Inorganic salt: KH_2PO_4 /(g/L) | |
| 1 | 10 | 1 | 0.5 | 8 |
| 2 | 20 | 5 | 1 | 9 |
| 3 | 30 | 9 | 1.5 | 10 |

测定。羟自由基与 griess 显色剂反应, 在 550 nm 处有特征吸收峰, 测定此处吸光值即可计算清除率, 设 3 个重复。反应体系中每 mL 发酵液在 37 °C 条件下反应 1 min 后降低 1 mmol/L 反应体系内的 H₂O₂ 浓度作为 1 个清除羟自由基能力单位。

清除超氧阴离子能力: 采用超氧阴离子测定试剂盒(南京建成生物工程研究所), 通过分光光度法测定。黄嘌呤经黄嘌呤氧化酶作用产生超氧阴离子, 添加 griess 显色剂发生显色反应, 其呈色与超氧阴离子数量成正比关系, 在 550 nm 处有特征吸收峰, 测定此处吸光值即可计算样本对超氧阴离子的清除能力, 设 3 个重复。反应体系中每升发酵液在 37 °C 条件下反应 40 min 后所抑制的超氧阴离子自由基为 1 个清除超氧阴离子能力单位。

清除 DPPH 自由基能力: 采用 DPPH 自由基测定试剂盒(南京建成生物工程研究所), 通过分光光度法测定。DPPH 自由基具单电子, 在 517 nm 处有特征吸收峰, 其醇溶液呈紫色。添加抗氧化剂后, 由于电子配对而使 DPPH 自由基特征吸收峰逐渐减小至消失, 进而测定反应体系在 517 nm 处的吸光值即可计算样本对 DPPH 自由基的清除率, 设 3 个重复。

清除 ABTS 自由基能力: 采用总抗氧化活性测定试剂盒(ABTS 法) (南京建成生物工程研究所), 通过分光光度法测定。ABTS 在适当的氧化剂作用下可被氧化成绿色 ABTS⁺, 在 405 nm 处有特征吸收峰。添加抗氧化剂后, ABTS⁺ 的产生会被抑制, 测定反应体系在 405 nm 处的吸光值即可计算样本对 ABTS 自由基的清除率, 设 3 个重复。

铁离子还原能力: 采用总抗氧化活性测定试剂盒(FRAP 法) (南京建成生物工程研究所), 通过分光光度法测定。抗氧化剂可在酸性条件下还原 Fe³⁺-氯化三苯四氮唑(2,3,5-triphenyltetrazolium chloride, TPTZ)产生蓝色 Fe²⁺-TPTZ, 在 593 nm 处有特征吸收峰, 测定此处吸光值即可计算样本的 FRAP, 设 3 个重复。实验制得标准曲线为: $y=6.0325x-0.9805$, 相关系数 $R^2=0.9427$ 。

1.2.7 统计分析

采取多次平行实验设计, 数据结果以平均值±标准差表示。通过统计软件对所得数据进行单因素方差分析、Walker-Duncan 多重方差检验分析和一元线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 光核纤孔菌的生物学特性

光核纤孔菌野生子实体见图 1A, 固体平板培养菌丝见图 1B。菌丝生长初期呈白色, 后逐渐呈淡黄色, 表明该真菌在生长发育过程中有色素分泌积累, 整体长势相较于同期培养的栓孔菌 *Trametes* 较缓慢, 且在接种块周围呈现先增厚再延展的生长趋势。

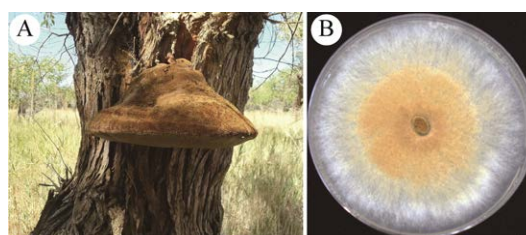


图 1 光核纤孔菌野生子实体和固体平板培养菌丝 A: 野生子实体; B: 固体平板培养菌丝

Fig. 1 Wild basidioma and solid plate cultivation of *Inocutis levis*. A: A wild basidioma; B: Colony on solid plate medium.

2.1.1 固体培养过程中对碳源的偏好

在固体培养的 14 d 内, 菌丝生长速率缓慢加快, 在第 14 天, 不同碳源下的菌丝生长速率大小排序依次为可溶性淀粉>玉米淀粉>麦芽糖>对照>蔗糖>果糖>葡萄糖(图 2A)。方差分析结果见表 2, 不同碳源条件下的菌丝生长速率呈现显著差异。其中, 光核纤孔菌对可溶性淀粉表现出明显的偏好性, 在 14 d 的菌丝生长速率为 (4.751 ± 0.023) mm/d, 而蔗糖、果糖、葡萄糖的菌丝生长速率小于对照组。综合分析表明可溶性淀粉为最适碳源。

2.1.2 固体培养过程中对氮源的偏好

不同氮源培养 8 d, 菌丝生长速率随时间变化呈上升趋势(图 2B)。其中以酵母浸粉的菌丝生长速率为最快, 在 8 d 达到 (7.835 ± 0.053) mm/d, 其次是麦芽浸粉 $[(5.853\pm 0.057)$ mm/d] (表 2)。以

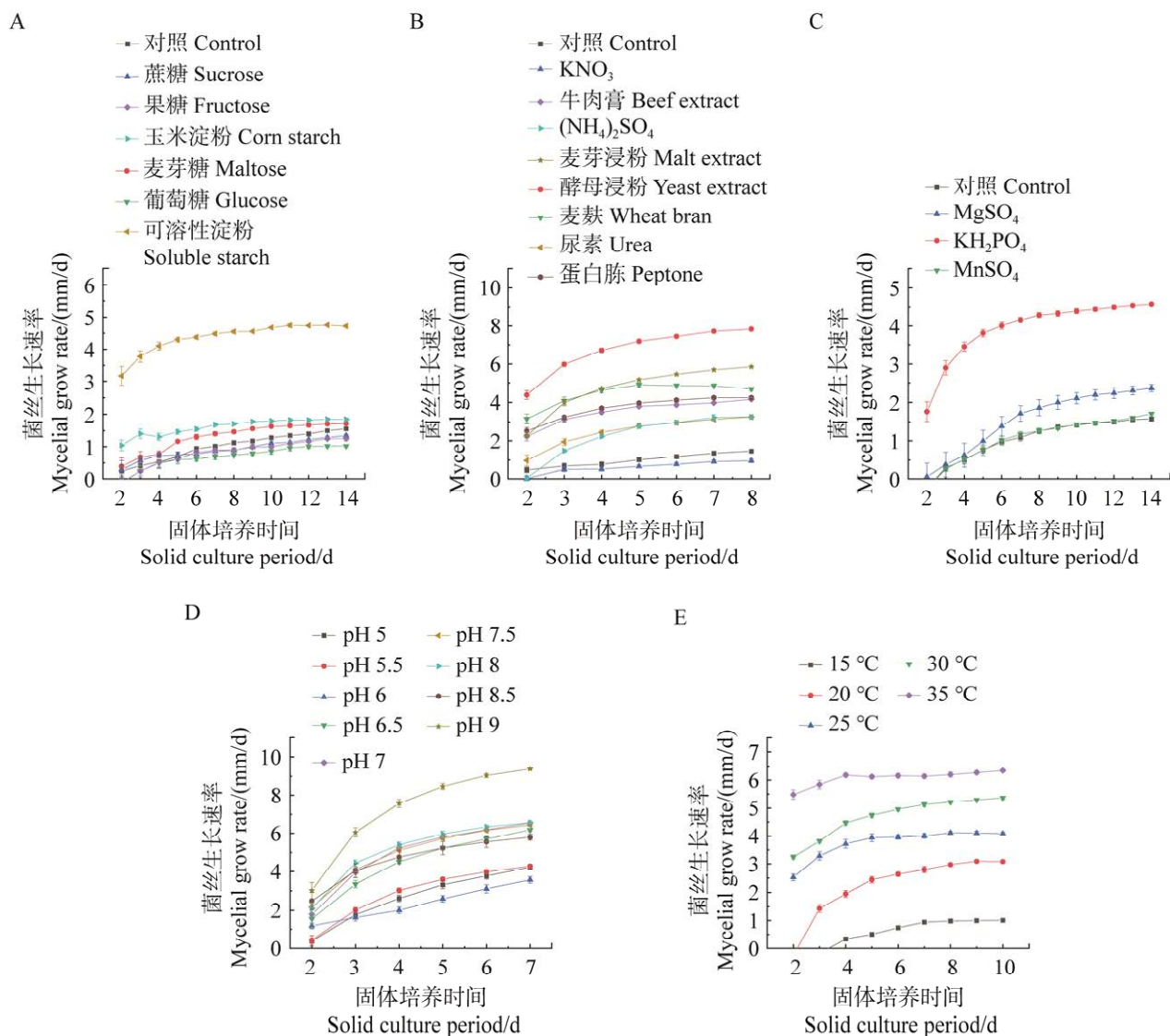


图2 光核纤孔菌固体培养过程中对基质组分、pH和温度的偏好 A: 碳源; B: 氮源; C: 无机盐; D: pH; E: 温度
Fig. 2 Preference of *Inocutis levis* for substrate component, pH and temperature during solid cultivation. A: Carbon source; B: Nitrogen source; C: Inorganic salt; D: pH; E: Temperature.

麦麸为氮源的菌丝生长速率变化趋势不同于其他氮源条件, 在第5天达到峰值后呈下降趋势。方差分析表明, 蛋白胨和牛肉膏为氮源的菌丝生长速率无显著差异, $(NH_4)_2SO_4$ 和尿素为氮源的菌丝生长速率也无显著差异, 而 KNO_3 条件下的菌丝生长速率显著低于对照组, 8 d的菌丝生长速率仅为 (0.958 ± 0.093) mm/d (表2)。综合分析表明, 酵母浸粉为最适氮源。

2.1.3 固体培养过程中对无机盐的偏好

14 d光核纤孔菌菌丝生长速率呈上升趋势, 在第14天时菌丝生长速率达到最快, 3种无机

盐条件下的菌丝生长速率均高于对照组, 按菌丝生长速率快慢依次为 $KH_2PO_4 > MgSO_4 > MnSO_4 >$ 对照(图2C)。方差分析结果表明, 不同无机盐条件下14 d内的平均菌丝生长速率有显著差异, KH_2PO_4 条件下的菌丝生长速率为最快, 达到 (4.570 ± 0.037) mm/d (表2)。综合分析表明, 光核纤孔菌对 KH_2PO_4 表现出明显偏好。

2.1.4 固体培养过程中对pH的偏好

在pH 5-9范围内菌丝均可生长, 且菌丝生长速率随固体培养时间呈上升趋势(图2D)。方差分析结果表明, pH 9时菌丝生长速率最高且

具有显著优势, 7 d 的菌丝生长速率达到(9.385±0.036) mm/d (表 2)。pH 6 时 7 d 的菌丝生长速率最低, 仅为(3.566±0.170) mm/d。综合分析表明, 菌丝在偏酸性环境下的生长速率较低, 在中性和碱性环境下相对较高, 以 pH 9 为最适。

2.1.5 固体培养过程中对温度的偏好

在 15–35 °C 内, 菌丝生长速率随温度的升高而变大(图 2E)。不同温度下培养 10 d 的光核纤孔菌菌丝生长速率方差分析见表 2, 5 °C 的温度差异, 菌丝生长速率差异显著。10 d 的菌丝生长

表 2 光核纤孔菌固体培养过程中对基质组分、pH 和温度的偏好

Table 2 Preference of *Inocutis levis* for substrate component, pH and temperature during solid cultivation

| 基质组分、pH 和温度 Substrate component, pH and temperature | 因子 Factor | 测定时间 Detection time/d | 菌丝生长速率 Mycelial grow rate/(mm/d) | 显著性 Significance | |
|---|---|--------------------------|-------------------------------------|---------------------|------|
| | | | | 0.05 | 0.01 |
| 碳源 Carbon source | 可溶性淀粉 Soluble starch | 14 | 4.751±0.023 | a | A |
| | 玉米淀粉 Corn starch | | 1.851±0.039 | b | B |
| | 麦芽糖 Maltose | | 1.723±0.028 | c | C |
| | 对照 Control | | 1.560±0.024 | d | D |
| | 蔗糖 Sucrose | | 1.347±0.039 | e | E |
| | 果糖 Fructose | | 1.254±0.071 | f | F |
| | 葡萄糖 Glucose | | 1.021±0.037 | g | G |
| 氮源 Nitrogen source | 酵母浸粉 Yeast extract | 8 | 7.835±0.053 | a | A |
| | 麦芽浸粉 Malt extract | | 5.853±0.057 | b | B |
| | 麦麸 Wheat bran | | 4.900±0.119 | c | C |
| | 蛋白胨 Peptone | | 4.237±0.048 | d | D |
| | 牛肉膏 Beef extract | | 4.158±0.078 | d | D |
| | (NH ₄) ₂ SO ₄ | | 3.258±0.064 | e | E |
| | 尿素 Urea | | 3.247±0.057 | e | E |
| 无机盐 Inorganic salt | 对照 Control | | 1.463±0.041 | f | F |
| | KNO ₃ | | 0.958±0.093 | g | G |
| | KH ₂ PO ₄ | 14 | 4.570±0.037 | a | A |
| | MgSO ₄ | | 2.363±0.091 | b | B |
| pH | MnSO ₄ | | 1.712±0.034 | c | C |
| | 对照 Control | | 1.575±0.034 | d | D |
| | 9 | 7 | 9.385±0.036 | a | A |
| | 8 | | 6.556±0.080 | b | B |
| | 7 | | 6.542±0.092 | b | B |
| | 7.5 | | 6.426±0.067 | b | B |
| | 6.5 | | 6.177±0.089 | c | C |
| | 8.5 | | 5.797±0.157 | d | D |
| 温度 Temperature (°C) | 5.5 | | 4.270±0.064 | e | E |
| | 5 | | 4.217±0.131 | e | E |
| | 6 | | 3.566±0.170 | f | F |
| | 35 | 10 | 6.346±0.046 | a | A |
| | 30 | | 5.366±0.055 | b | B |
| | 25 | | 4.114±0.049 | c | C |
| | 20 | | 3.092±0.055 | d | D |
| | 15 | | 1.012±0.047 | e | E |

注: 不同小写和大写字母分别代表实验结果差异显著($P<0.05$)和差异极显著($P<0.01$)。下同

Note: Different lowercase and uppercase letters indicate significant ($P<0.05$) and extremely significant differences ($P<0.01$) of experimental results, respectively. The same below.

速率快慢排序依次为 35 °C> 30 °C>25 °C> 20 °C>15 °C, 在 35 °C时菌丝生长速率达到 (6.346±0.046) mm/d。综合分析表明, 35 °C为最适培养温度。

2.1.6 正交试验

根据单因素试验结果进行4因子3水平正交试验, 每组设置5个重复(表3)。其中, 第4组的菌丝生长速率最快, 9 d的生长速率为(6.761±0.116) mm/d。由极差可知, 对光核纤孔菌菌丝生长速率的影响力大小排序为碳源>氮源>无机盐>pH, 碳源对菌丝生长速率的影响最大。最佳组合为可溶性淀粉 20 g/L、酵母浸粉 1 g/L、KH₂PO₄ 1 g/L、pH 10。方差分析结果显示, 碳源、氮源、无机盐及 pH 对光核纤孔菌菌丝生长速率影响极显著($P<0.01$), 模型能够解释 92.95%的菌丝生长速率变异(表4)。

2.2 光核纤孔菌的抗氧化活性

2.2.1 液体发酵过程中多糖含量的变化

液体发酵过程中光核纤孔菌的多糖含量在 2–12 d 呈上升趋势, 6–8 d 上升幅度明显, 8–12 d 上升幅度变小, 在第 12 天达到峰值[(64.285±0.489) μg/mL], 完成多糖的积累过程(图 3A)。

第 14 天的多糖含量较第 12 天略有降低, 但 10–14 d 多糖含量皆维持在较高水平, 均大于 60 μg/mL, 与 2–8 d 的多糖含量相比具有显著差异。

2.2.2 液体发酵过程中多酚含量的变化

光核纤孔菌在液体发酵过程中的多酚含量在前 10 d 整体呈上升趋势, 第 2–4 天上升幅度最大, 在第 6 天的短暂波动后继续进行多酚的累积且至第 10 天达到峰值, 为(8.239±0.483) mmol/L, 随后随着菌丝的逐渐老化多酚含量有所降低, 与初始含量相当(图 3B)。

2.2.3 液体发酵过程中黄酮含量的变化

在液体发酵过程中, 黄酮含量在 2–6 d 迅速积累, 第 6 天达到峰值, 为(104.043±5.401) μg/mL, 而后明显下降, 在 8–10 d 有短暂回升, 第 14 天为(58.462±3.407) μg/mL, 显著低于初始水平(图 3C)。

2.2.4 液体发酵过程中抗坏血酸含量的变化

光核纤孔菌在液体发酵过程中的抗坏血酸含量整体呈上升趋势, 2–10 d 抗坏血酸含量显著上升, 第 10 天达到较高水平, 10–14 d 的抗坏血酸含量无显著差异, 第 14 天的抗坏血酸含量相对更高, 为(54.750±0.388) μg/mL (图 3D)。

表 3 正交试验结果

Table 3 Results of the orthogonal experiment

| 实验 Experiment | 因子 Factor | | | | 菌丝生长速率 Mycelial grow rate/(mm/d) | 显著性 Significance | |
|------------------|---|---|---|--------|--|---------------------|------|
| | 碳源: 可溶性淀粉 Carbon source: soluble starch/(g/L) | 氮源: 酵母浸粉 Nitrogen source: yeast extract/(g/L) | 无机盐: KH ₂ PO ₄ Inorganic salt: KH ₂ PO ₄ /(g/L) | pH | | 0.05 | 0.01 |
| 1 | 10 | 1 | 0.5 | 8 | 5.602±0.048 | c | C |
| 2 | 10 | 5 | 1 | 9 | 5.682±0.124 | c | C |
| 3 | 10 | 9 | 1.5 | 10 | 5.551±0.134 | cd | CD |
| 4 | 20 | 1 | 1 | 10 | 6.761±0.116 | a | A |
| 5 | 20 | 5 | 1.5 | 8 | 6.513±0.096 | b | B |
| 6 | 20 | 9 | 0.5 | 9 | 5.627±0.175 | c | C |
| 7 | 30 | 1 | 1.5 | 9 | 5.669±0.167 | c | C |
| 8 | 30 | 5 | 0.5 | 10 | 5.517±0.173 | d | D |
| 9 | 30 | 9 | 1 | 8 | 5.275±0.041 | d | D |
| K ₁ | 16.835 | 18.032 | 16.746 | 17.390 | — | — | — |
| K ₂ | 18.902 | 17.712 | 17.719 | 16.979 | — | — | — |
| K ₃ | 16.461 | 16.453 | 17.732 | 17.829 | — | — | — |
| X ₁ | 5.612 | 6.011 | 5.582 | 5.797 | — | — | — |
| X ₂ | 6.301 | 5.904 | 5.906 | 5.660 | — | — | — |
| X ₃ | 5.487 | 5.484 | 5.911 | 5.943 | — | — | — |
| R | 0.813 | 0.526 | 0.329 | 0.284 | — | — | — |

表 4 正交试验方差分析

Table 4 Analysis of variances for the orthogonal experiment

| 来源 | III类平方和 | 自由度 | 均方 | F 值 | 显著性 |
|-----------------|-------------------------|-------------------|-------------|------------|--------------|
| Source | Type III sum of squares | Degree of freedom | Mean square | F value | Significance |
| 模型 | 9.751 | 8 | 1.219 | 59.322 | 0.000 |
| Model | | | | | |
| 截距 | 1 513.665 | 1 | 1 513.665 | 73 666.573 | 0.000 |
| Intercept | | | | | |
| 碳源 | 5.759 | 2 | 2.880 | 140.151 | 0.000 |
| Carbon source | | | | | |
| 氮源 | 2.322 | 2 | 1.161 | 56.498 | 0.000 |
| Nitrogen source | | | | | |
| 无机盐 | 1.067 | 2 | 0.533 | 25.962 | 0.000 |
| Inorganic salt | | | | | |
| pH | 0.603 | 2 | 0.302 | 14.676 | 0.000 |
| 误差 | 0.740 | 36 | 0.021 | — | — |
| Error | | | | | |
| 总计 | 1 524.156 | 45 | — | — | — |
| Total | | | | | |
| 修正后总计 | 10.491 | 44 | — | — | — |
| Corrected total | | | | | |

注：模型判定系数 $R^2 = 0.929$ ，修正后判定系数 $R^2 = 0.914$

Note: Coefficient of determination R^2 for the model was 0.929, and corrected coefficient of determination R^2 was 0.914.

2.2.5 液体发酵过程中超氧化物歧化酶活性的变化

超氧化物歧化酶是生物体一类关键的抗氧化酶,通过催化超氧阴离子的歧化反应保护机体免受氧化损伤(Halliwell 2006)。光核纤孔菌在液体发酵过程中的超氧化物歧化酶活性在 2–8 d 呈上升趋势,第 8 天时达到峰值,为 (87.346 ± 0.800) U/mL(图 3E)。第 10 天的活性下降不显著,仍维持在较高水平,后显著下降,在第 14 天时高于初始水平。光核纤孔菌液体发酵 8 d 的超氧化物歧化酶活性是松脂皱皮孔菌 *Ischnoderma resinotum* 的 1.56 倍,表明光核纤孔菌分泌超氧化物歧化酶的能力较强(叶祎璠等 2025)。

2.2.6 液体发酵过程中清除羟自由基能力的变化

羟自由基是活性最强的活性氧之一,极不稳定,具有极高的氧化能力,可快速引发自由基链式反应,将有机物彻底氧化为 CO_2 、 H_2O 和无机盐(邓淑芳等 2004)。光核纤孔菌在液体发酵过程中清除羟自由基的能力随发酵时间表现出较大波动,第 2 天时较强,羟自由基清除率为 $(52.950 \pm 1.272)\%$,在第 4 天短暂下降后迅速提高,并在第 6 天达到峰值,为 $(59.136 \pm 1.277)\%$,而后显著下降且至第 10 天下降至最低值,为

$(42.798 \pm 1.552)\%$,后期羟自由基清除率变化幅度较小,第 12 天和第 14 天分别为 $(47.351 \pm 2.125)\%$ 和 $(43.618 \pm 2.429)\%$ (图 3F)。表明光核纤孔菌具有一定的羟自由基清除能力。

2.2.7 液体发酵过程中清除超氧阴离子能力的变化

光核纤孔菌在液体发酵过程中清除超氧阴离子的能力整体呈先上升后下降的趋势(图 3G)。2–8 d 超氧阴离子清除率显著上升,在第 8 天时达到峰值,为 $(99.531 \pm 0.324)\%$,而后显著下降,第 14 天时的超氧阴离子清除率为 $(76.467 \pm 1.588)\%$,显著高于初始水平。在液体发酵的 14 d 内,超氧化物歧化酶活性与超氧阴离子清除能力的变化趋势一致,这与超氧化物歧化酶对超氧阴离子的歧化作用有关。

2.2.8 液体发酵过程中清除 DPPH 自由基能力的变化

DPPH 自由基是一种以氮为中心的稳定有机自由基,广泛应用于抗氧化剂活性的评估(熊双丽等 2012)。光核纤孔菌在液体发酵过程中清除 DPPH 自由基的能力在 2–10 d 显著上升,并在第 10 天达到峰值,为 $(88.662 \pm 1.302)\%$,而后明显下降且至第 14 天下降至最低值,为 $(76.741 \pm 2.036)\%$,仍显著高于初始水平(图 3H)。

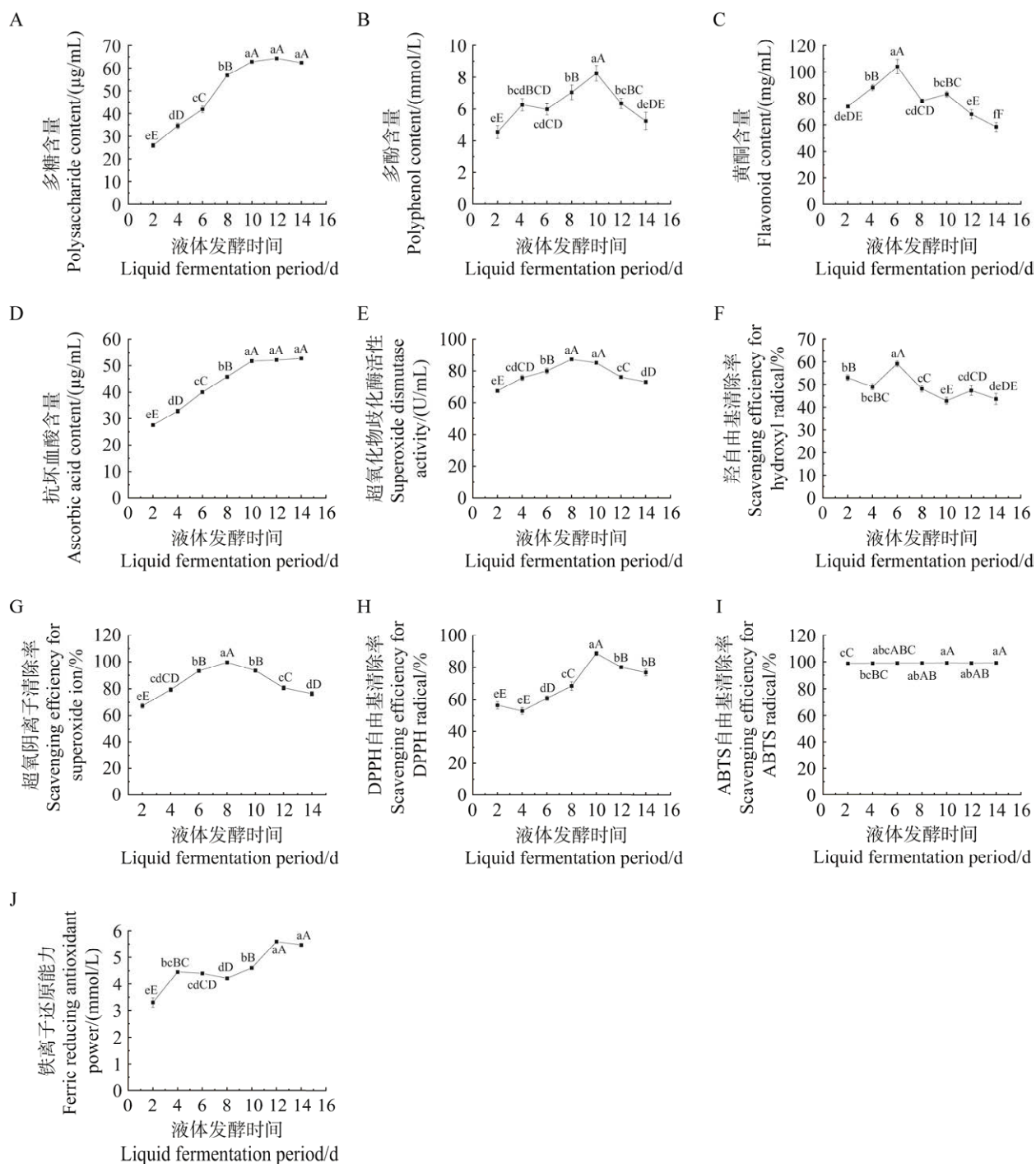


图 3 光核纤孔菌液体发酵过程中抗氧化活性的变化 A: 多糖; B: 多酚; C: 黄酮; D: 抗坏血酸; E: 超氧化物歧化酶; F: 清除羟自由基能力; G: 清除超氧阴离子能力; H: 清除 DPPH 自由基能力; I: 清除 ABTS 自由基能力; J: 铁离子还原能力。不同小写和大写字母分别代表实验结果差异显著 ($P < 0.05$) 和差异极显著 ($P < 0.01$)

Fig. 3 Variations of antioxidant activities during liquid fermentation of *Inocutis levis*. A: Polysaccharide; B: Polyphenol; C: Flavonoid; D: Ascorbic acid; E: Superoxide dismutase; F: Scavenging abilities for hydroxyl radical; G: Scavenging abilities for superoxide ion; H: Scavenging abilities for DPPH radical; I: Scavenging abilities for ABTS radical; J: Ferric reducing antioxidant power. Different lowercase and uppercase letters indicate significant ($P < 0.05$) and extremely significant differences ($P < 0.01$) of experimental results, respectively.

2.2.9 液体发酵过程中 ABTS 自由基清除能力的变化

ABTS 自由基是一种广泛应用于测定抗氧化活性的化学探针(Bedlovičová *et al.* 2020)。光核纤孔菌在液体发酵过程中清除 ABTS 自由基的能力始终保持较高水平,在第 2 天已经达到(98.783±0.092)%,此后逐渐提高且在第 10 天达到(99.147±0.118)%,在第 12 天短暂波动后继续升高,在第 14 天达到最大值,为(99.191±0.171)% (图 3I)。光核纤孔菌在发酵的 14 d 内较高的 ABTS 自由基清除能力也反映了该菌株具有很强的抗氧化活性。

2.2.10 液体发酵过程中铁离子还原能力的变化

光核纤孔菌在液体发酵过程中 FRAP 值整体呈上升趋势(图 3J)。第 2–4 天 FRAP 值大幅提升,第 4–10 天较为平稳,10–12 d 迅速上升并达到峰值,为(5.595±0.062) mmol/L。第 14 天 FRAP 值有小幅下降,但仍保持在较高水平,为(5.474±0.034) mmol/L。

2.2.11 药理成分含量和抗氧化活性相关性分析

对光核纤孔菌菌株在液体发酵过程中测得的药理成分多糖、多酚、黄酮、抗坏血酸含量与抗氧化活性指标超氧化物歧化酶活性、清除羟自由基、超氧阴离子、DPPH 自由基、ABTS 自由基能力以及铁离子还原能力进行一元线性回归分析,以探究光核纤孔菌所含药理成分与其抗氧化活性的相关性。 $P<0.05$ 代表显著相关, $P<0.01$ 代表极显著相关, $R^2>0.775$ 代表线性拟合程度较好。

光核纤孔菌中多糖含量与超氧化物歧化酶活性、清除羟自由基及超氧阴离子能力之间的线性相关关系不显著($P>0.05$),与铁离子还原能力的线性相关关系显著($P<0.05$),但拟合程度不高($R^2<0.775$),与清除 DPPH 自由基、ABTS 自由基能力的线性相关关系极为显著($P<0.01$)且拟合效果好($R^2>0.775$) (图 4)。而抗坏血酸含量表现出与多糖近似的线性相关关系。多酚含量与超氧化物歧化酶活性的线性相关关系极为显著($P<0.01$)且拟合效果好($R^2>0.775$),与清除超氧阴离子能力呈显著线性相关关系($P<0.05$),但拟合

程度不高($R^2<0.775$)。黄酮含量与各抗氧化活性间无显著线性相关关系($P>0.05$)。

3 讨论

光核纤孔菌在分类学和系统发育关系上与药用价值高的桑黄孔菌属 *Sanghuangporus*、纤孔菌属 *Inonotus* 真菌分类地位较近,目前已有研究揭示光核纤孔菌提取物可缓解胰岛素抵抗、抗氧化和抗菌,具有潜在的药用价值(Ehsanifard *et al.* 2017; Chaharmiri-Dokharani *et al.* 2024)。但缺乏关于光核纤孔菌生物学特性和抗氧化活性的系统性研究。

本研究对光核纤孔菌的生物学特性进行了单因素实验和正交试验,以探究固体培养的最适条件。单因素实验发现光核纤孔菌在各培养条件下都能进行菌丝生长,对可溶性淀粉、酵母浸粉、 KH_2PO_4 具有偏好性,菌丝生长更快,且偏好 35 °C、pH 9 环境。正交试验表明,碳源、氮源、无机盐及 pH 在光核纤孔菌菌丝生长过程中具有极显著影响,其中,碳源对菌丝生长速率的影响最为突出,这与紫色秃马勃 *Calvatia lilacina*、四川灵芝 *G. sichuanense*、松脂皱皮孔菌 *I. resinotum* 相似(穆双双等 2020; 钱坤等 2022; 叶祎璠等 2025),但不同于受氮源影响最大的粗毛纤孔菌(周苗等 2023),不同大型真菌表现出菌丝生长条件偏好差异性。正交实验结果显示固体培养的最佳组合为可溶性淀粉 20 g/L、酵母浸粉 1 g/L、 KH_2PO_4 1 g/L、pH 10。大部分大型真菌偏好中性或偏酸性环境,如绒柄小皮伞 *Marasmius confluens*、四川灵芝、卷须猴头菌 *Hericium cirrhatum*、松脂皱皮孔菌(柴新义等 2017; 钱坤等 2022; 潘长澍等 2024; 叶祎璠等 2025),而单因素实验和正交试验都表明光核纤孔菌在偏碱性条件下菌丝生长速率更快,与粗毛纤孔菌具有同样的碱性条件偏好(王华等 2022; 周苗等 2023)。

多糖、多酚、黄酮等次级代谢产物是大型真菌药用作用的主要活性物质,同时也具有抗氧化作用(李峻志等 2014)。研究发现在液体发酵的 14 d 内,多糖、多酚和黄酮含量整体上都

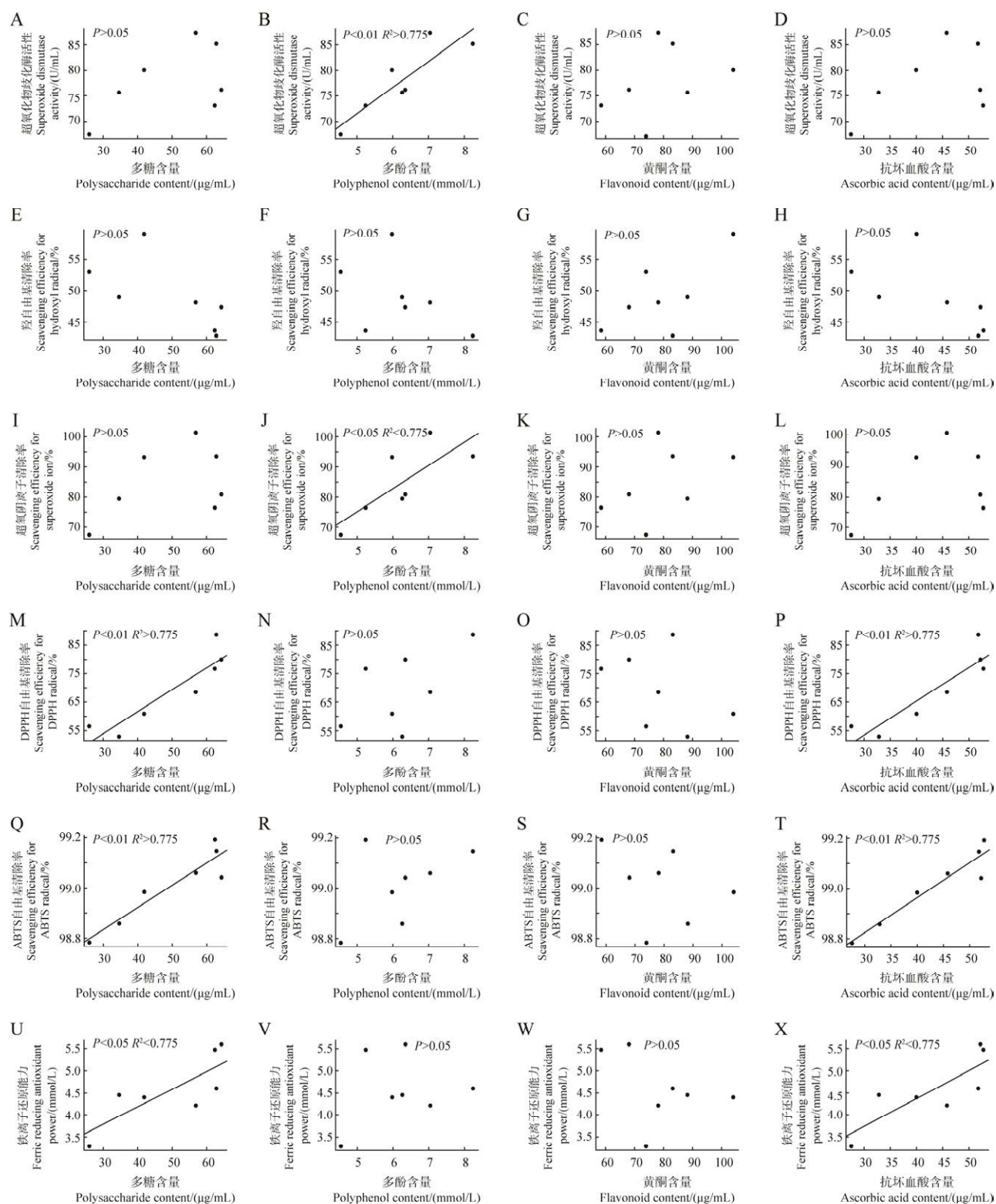


图 4 光核纤孔菌液体发酵过程中分泌的多糖、多酚、黄酮、抗坏血酸含量与超氧化物歧化酶活性(A-D)、羟自由基清除率(E-H)、超氧阴离子清除率(I-L)、DPPH 自由基清除率(M-P)、ABTS 自由基清除率(Q-T)、铁离子还原能力(U-X)的相关性分析

Fig. 4 Correlation between the content of polysaccharide, polyphenol, flavonoid, and ascorbic acid and superoxide dismutase activity (A-D), scavenging efficiencies for hydroxyl radical (E-H), superoxide ion (I-L), DPPH radical (M-P), ABTS radical (Q-T), and ferric reducing antioxidant power (U-X) during liquid fermentation of *Inocutis levis*.

呈先上升后下降的趋势,可能因为前期摇瓶中 O_2 含量相对较高使得多糖、多酚和黄酮含量迅速增加以抵抗环境氧化作用,而后 O_2 的逐渐消耗使得菌株抗氧化的需求降低,进而多糖、多酚和黄酮含量随之降低(孟歌等 2016)。但抗坏血酸含量仍维持在较高水平,并在发酵后期抗环境氧化胁迫中发挥主要作用。光核纤孔菌的抗坏血酸含量在第 14 天达到 (54.750 ± 0.388) $\mu\text{g}/\text{mL}$,高于四川灵芝 (13.97 ± 0.97) $\mu\text{g}/\text{mL}$ 、松脂皱皮孔菌 (24.11 ± 1.59) $\mu\text{g}/\text{mL}$ (钱坤等 2022; 叶祎璠等 2025)及 Wang *et al.* (2023)研究得到的高山桑黄 *Sanghuangporus alpinus*、鲍姆桑黄 *Sanghuangporus baumii*、忍冬桑黄 *S. lonicericola*、栎生桑黄 *S. quercicola*、瓦尼桑黄 *S. vaninii* 在液体发酵 14 d 内的抗坏血酸含量最高值,但相比桑树桑黄 *S. sanghuang*、锦带花桑黄 *Sanghuangporus weigela* 和环区桑黄 *Sanghuangporus zonatus* 略低。在液体发酵的 14 d 内,光核纤孔菌对羟自由基、超氧阴离子、DPPH 自由基的清除能力以及铁离子还原能力较强,对 ABTS 自由基清除能力极强。且相较于栎生桑黄、忍冬桑黄和粗毛纤孔菌,光核纤孔菌的 ABTS 自由基清除能力在 14 d 内更为稳定,波动不显著(王一菲等 2019; 周苗等 2023),说明该菌株具有良好的抗氧化活性,能作为天然抗氧化剂开发利用。对于药用真菌的次级代谢产物与抗氧化活性研究较多,在菌株、培养发酵条件、评价方法上有所不同,如张思瑶等(2024)先对东亚木层孔菌 *Phellinus orientoasiaticus*、鲍姆桑黄和忍冬桑黄的粗多糖、总黄酮和总三萜进行提取,再测定提取物的抗氧化活性;王一菲等(2019)、Wang *et al.* (2023)分别采用 Yang *et al.* (2016)的粗多糖提取方法、苯酚硫酸法对栎生桑黄菌株 Wei 7575 与忍冬桑黄 Dai 17304 的多糖含量进行测定,得到的多糖含量差异较大。将各菌株进行相同条件的活化、发酵和抗氧化活性测定有利于系统比较各菌株差异;另外,借助组学手段对次级代谢产物合成基因簇和代谢通路进行研究也是揭示次级代谢产物和抗氧化活性差异性机理的有效方法(Liu *et al.* 2022; Jin *et al.* 2024; Ma *et al.* 2024)。

对光核纤孔菌在液体发酵过程中分泌的药理成分与抗氧化活性进行一元线性回归模型分析,结果显示,多糖、抗坏血酸含量与清除 DPPH 自由基、ABTS 自由基能力的线性相关关系极为显著($P<0.01$)且拟合效果好($R^2>0.775$)。多糖和抗坏血酸可分别通过还原性羟基和烯醇羟基提供强还原性,直接进行单电子转移和氢原子转移,从而终止自由基链式反应(Nemzer *et al.* 2019; Santos *et al.* 2022)。多酚含量与超氧化物歧化酶活性的线性相关关系极为显著($P<0.01$)且拟合效果好($R^2>0.775$),与超氧阴离子去除能力呈显著线性相关关系($P<0.05$)但拟合程度不高($R^2<0.775$),推测多酚主要通过增加超氧化物歧化酶活性从而发挥抗氧化作用,其次是对超氧阴离子的直接清除(Yang *et al.* 2020)。黄酮含量与抗氧化活性之间的相关性较差($P>0.05$),推测黄酮需通过多种活性成分的协同作用对抗氧化活性产生影响,这一机制在粗毛纤孔菌中也有报道(周苗等 2023)。清除羟自由基能力与各药理成分含量的线性相关关系同样不显著($P>0.05$),羟自由基作为氧化能力极强、寿命极短的活性氧,可与抗氧化剂的电子或氢原子直接中和,或通过多酚等的金属螯合作用减少生成(Lü *et al.* 2010),易受具抗氧化作用的药理成分的综合影响。

综上所述,本文通过对光核纤孔菌生物学特性和抗氧化活性的研究得到光核纤孔菌固体培养的培养条件偏好及最优方案,并证实了菌株 XJ021 具有较强的抗氧化活性,为保护、开发和利用光核纤孔菌资源提供了菌株储备和研究数据。

作者贡献

唐禄鑫: 论文构思及撰写、实验操作、数据分析和验证、软件使用、图片绘制; 季盈仪: 论文构思及撰写、实验菌株分离纯化、数据分析、软件使用; 刘阳: 论文构思及撰写、实验操作、数据分析; 王豪: 实验菌株纯化、数据管理、图片绘制; 叶奕萱: 实验操作、数据验证; 员瑗:

提供实验材料、论文构思、数据管理、项目管理与监督；司静：论文构思、审核与修改、数据分析、管理和验证、项目管理与监督。

利益冲突声明

该研究不存在任何潜在利益冲突的商业或财务关系。

[REFERENCES]

- Bedlovičová Z, Strapáč I, Baláž M, Salayová A, 2020. A brief overview on antioxidant activity determination of silver nanoparticles. *Molecules*, 25(14): 3191
- Bjørklund G, Dadar M, Chirumbolo S, Lysiuk R, 2017. Flavonoids as detoxifying and pro-survival agents: what's new. *Food and Chemical Toxicology*, 110: 240-250
- Chaharmiri-Dokhaharani S, Ghobad-Nejhad M, Moghimi H, Norouzi H, Moghaddam M, 2024. Bioactivity and chemical profiling of medicinal fungi *Inonotus cuticularis* and *Inocutis levis* (Hymenochaetaceae) using chromatography and mass spectrometry. *Journal of Medicinal Plants and By-products*, 13(1): 147-159
- Chai XY, Ye CH, Zhang WW, Ma YH, 2017. Screening the strain with antibacterial activity from wild fungus and optimization of its fermentation conditions. *Food Research and Development*, 38(6): 170-174 (in Chinese)
- Chen WC, Yang Y, Zhang JS, Li ZP, Lu BK, Wang K, 2020. Recent advances in bioactive metabolites from 'Sanghuang' mushrooms. *Acta Edulis Fungi*, 27(4): 188-201 (in Chinese)
- Chen ZN, Xu JM, Ye T, Zhou JW, Sun YC, Xie XY, Yu J, Liu Y, 2018. Identification of *Inonotus hispidus* and antioxidant and antimicrobial activities of different solvent extracts from its fruiting bodies. *Science and Technology of Food Industry*, 39(23): 99-104 (in Chinese)
- Cui BK, Pan XH, Pan F, Sun YF, Xing JH, Dai YC, 2023. Species diversity and resources of *Ganoderma* in China. *Mycosystema*, 42(1): 170-178 (in Chinese)
- Dai YC, 2010. Hymenochaetaceae (Basidiomycota) in China. *Fungal Diversity*, 45: 131-343
- Dai YC, 2012. Pathogenic wood-decaying fungi on woody plants in China. *Mycosystema*, 31(4): 493-509 (in Chinese)
- Dai YC, 2022. New trend of edible and medicinal fungi research in China—based on publications in *Mycosystema* during 2000–2021. *Journal of Fungal Research*, 20(2): 141-156 (in Chinese)
- Deng SF, Bai MD, Bai XY, Liu XW, 2004. Characteristics and chemical reaction of hydroxyl radical. *Journal of Dalian Maritime University*, 30(3): 62-64 (in Chinese)
- Ehsanifard Z, Mir-Mohammadrezaei F, Safarzadeh A, Ghobad-Nejhad M, 2017. Aqueous extract of *Inocutis levis* improves insulin resistance and glucose tolerance in high sucrose-fed Wistar rats. *Journal of Herbmec Pharmacology*, 6(4): 160-164
- George VC, Dellaire G, Rupasinghe HPV, 2017. Plant flavonoids in cancer chemoprevention: role in genome stability. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 45: 1-14
- Halliwell B, 2006. Reactive species and antioxidants. Redox biology is a fundamental theme of aerobic life. *Plant Physiology*, 141(2): 312-322
- Hou RL, Liu X, Xiang KK, Chen LT, Wu XP, Lin WX, Zheng MF, Fu JS, 2019. Characterization of the physicochemical properties and extraction optimization of natural melanin from *Inonotus hispidus* mushroom. *Food Chemistry*, 277: 533-542
- Jin C, Ma JX, Wang H, Tang LX, Ye YF, Li X, Si J, 2024. First genome assembly and annotation of *Sanghuangporus weigela* uncovers its medicinal functions, metabolic pathways, and evolution. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 13: 1325418
- Lei MT, Liang XM, Han J, Cui YQ, Liu X, Wang B, Jia DH, Peng WH, Xiang QJ, He XL, 2025. Comparison of growth characteristics and nutrient composition among five species of *Flammulina*. *Mycosystema*, 44(6): 250024 (in Chinese)
- Li JZ, Wu XJ, Dang Y, Li AL, 2014. Recent progress on antioxidant activity material from macrofungi. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 33(5): 455-465 (in Chinese)
- Li ZJ, Bao HY, 2022. Research advances on chemical constituents and pharmacological effects of traditional Chinese medicine sanghuang-*Inonotus hispidus*. *Journal of Fungal Research*, 20(3): 203-213 (in Chinese)
- Liu X, Hou RL, Ren YQ, Jin SS, Chen L, Lin WX, Zheng MF, Fu JS, 2018. Mycelial culture of wild *Inonotus hispidus* parasitizing the jujube tree and the cultivation conditions of its fruit body on rice medium. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 24(6): 1283-1289 (in Chinese)
- Liu ZC, Tong XY, Liu RP, Zou L, 2022. Metabolome and transcriptome profiling reveal that four terpenoid hormones dominate the growth and development of

- Sanghuangporus baumii*. Journal of Fungi, 8(7): 648
- Lü GY, Song TT, Cai WM, Zhang ZF, 2021. Comparative study of chemical components and antioxidant activities of wild *Sanghuangporus sanghuang* and *Sanghuangporus vaninii*. Mycosystema, 40(7): 1833-1843 (in Chinese)
- Lü JM, Lin PH, Yao QZ, Chen CY, 2010. Chemical and molecular mechanisms of antioxidants: experimental approaches and model systems. Journal of Cellular and Molecular Medicine, 14(4): 840-860
- Ma JX, Wang H, Jin C, Ye YF, Tang LX, Si J, Song J, 2024. Whole genome sequencing and annotation of *Daedaleopsis sinensis*, a wood-decaying fungus significantly degrading lignocellulose. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 11: 1325088
- Meng G, Cui BK, Li CD, Liu HX, Si J, 2018. Antioxidant activities of medicinal fungus *Ganoderma lingzhi* in the process of liquid cultivation. Mycosystema, 37(4): 486-501 (in Chinese)
- Meng G, Zheng F, Liu HX, Si J, Cui BK, 2016. Antioxidant activity of *Inonotus weigelae* during the liquid cultivation. Biotechnology Bulletin, 32(9): 140-148 (in Chinese)
- Mo SY, Yang YC, Shi JG, 2003. Isolation and synthesis of phelligrins A and B. Acta Chimica Sinica, 61(7): 1161-1163 (in Chinese)
- Mu SS, Bu HS, Hu D, Li XH, Li ZL, Wang H, Wang SM, 2020. Biological characteristics of *Calvatia lilacina*. Journal of Fungal Research, 18(1): 31-36, 42 (in Chinese)
- Nemzer BV, Kalita D, Yashin AY, Nifantiev NE, Yashin YI, 2019. *In vitro* antioxidant activities of natural polysaccharides: an overview. Journal of Food Research, 8(6): 78-93
- Pan CM, Wang YS, Huang QY, He JQ, Basang WM, Zhang GJ, 2024. Identification and biological characteristics of *Hericium cirrhatum*. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 36(10): 2229-2237 (in Chinese)
- Pandey RP, Parajuli P, Koffas MAG, Sohng JK, 2016. Microbial production of natural and non-natural flavonoids: pathway engineering, directed evolution and systems/synthetic biology. Biotechnology Advances, 34(5): 634-662
- Qian K, Wu DM, Wang H, Sun YF, Si J, Cui BK, 2022. Biological characteristics and antioxidant activities of wild *Ganoderma sichuanense*. Mycosystema, 41(4): 601-617 (in Chinese)
- Raffa D, Maggio B, Raimondi MV, Plescia F, Daidone G, 2017. Recent discoveries of anticancer flavonoids. European Journal of Medicinal Chemistry, 142: 213-228
- Russo GL, Tedesco I, Spagnuolo C, Russo M, 2017. Antioxidant polyphenols in cancer treatment: friend, foe or foil. Seminars in Cancer Biology, 46: 1-13
- Santos KLB, Bragança VAN, Pacheco LV, Ota SSB, Aguiar CPO, Borges RS, 2022. Essential features for antioxidant capacity of ascorbic acid (vitamin C). Journal of Molecular Modeling, 28: 1
- Si J, Meng G, Wu Y, Ma HF, Cui BK, Dai YC, 2019. Medium composition optimization, structural characterization, and antioxidant activity of exopolysaccharides from the medicinal mushroom *Ganoderma lingzhi*. International Journal of Biological Macromolecules, 124: 1186-1196
- Song JL, Wang WK, Yan J, Lu N, Zhou ZF, Yuan WD, 2022. Antioxidant substances and activity of medicinal fungus *Sanghuangporus*. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 50(3): 144-154 (in Chinese)
- Song JL, Yuan WD, Zhou ZF, Wang WK, Lu N, Cheng JW, Yan J, 2020. Activities of extracellular enzymes and polysaccharides in liquid culture of *Sanghuangporus*. Mycosystema, 39(2): 352-361 (in Chinese)
- Teng LM, Tian XM, Wu F, Dai YC, 2021. A comparison of triterpenoids and polysaccharides in 13 species of wild *Ganoderma*. Mycosystema, 40(7): 1811-1819 (in Chinese)
- Wang H, Ma JX, Wu DM, Gao N, Si J, Cui BK, 2023. Identifying bioactive ingredients and antioxidant activities of wild *Sanghuangporus* species of medicinal fungi. Journal of Fungi, 9(2): 242
- Wang H, Nie BB, Bao LJ, Liu S, Zhang MJ, Su C, 2022. Isolation and identification of a wild sanghuang strain in northern Shaanxi, optimization of solid medium and determination of medicinal component content. Science of Sericulture, 48(1): 69-76 (in Chinese)
- Wang H, Qian K, Si J, Cui BK, 2021. Research advances on polysaccharides from sanghuang. Mycosystema, 40(4): 895-911 (in Chinese)
- Wang YF, Yu XD, Tian XM, Wang XW, Wei YL, Jiang JH, Zhou LW, 2019. Antioxidant activities of *Sanghuangporus quercicola* and *S. lonicericola* from fermentation broth in liquid cultivation. Mycosystema, 38(6): 938-950 (in Chinese)
- Wu SH, Dai YC, 2020. Species clarification of the medicinal fungus Sanghuang. Mycosystema, 39(5): 781-794 (in Chinese)
- Wu SH, Huang GZ, Chen YP, Dai YC, Zhou LW, 2016. Taxonomy and development prospects of Sanghuang (*Sanghuangporus sanghuang*). Journal of Fungal Research, 14(4): 187-200, 185 (in Chinese)

- Xiong SL, Lu F, Shi MJ, Wu ZM, 2012. Advancement of evaluation methods about DPPH radical scavenging activity in screening antioxidant. *Science and Technology of Food Industry*, 33(8): 380-383 (in Chinese)
- Yang BY, Dong YX, Wang F, Zhang Y, 2020. Nanoformulations to enhance the bioavailability and physiological functions of polyphenols. *Molecules*, 25(20): 4613
- Yang NC, Wu CC, Liu RH, Chai YC, Tseng CY, 2016. Comparing the functional components, SOD-like activities, antimutagenicity, and nutrient compositions of *Phellinus igniarius* and *Phellinus linteus* mushrooms. *Journal of Food and Drug Analysis*, 24(2): 343-349
- Yang SD, Bao HY, Wang H, 2019. Chemical components and anti-tumour compounds from *Inonotus hispidus*. *Mycosystema*, 38(1): 127-133 (in Chinese)
- Ye YF, Jin C, Tang LX, Ji YY, Liu L, Liu JC, Si J, 2025. Biological characteristics and antioxidant activities of both medicinal and edible *Ischnoderma resinosum*. *Mycosystema*, 44(2): 97-115 (in Chinese)
- Zhang SY, Yu SW, Wei YL, 2024. A comparative study on the bioactive components and antioxidant activities of *Phellinus orientoasiaticus* and two species of *Sanghuangporus*. *Mycosystema*, 43(2): 74-89 (in Chinese)
- Zhang WB, Wang JG, Li ZK, Yang LQ, Qin J, Xiang ZH, Cui HJ, 2014. Progress of studies on medicinal fungus *Phellinus*. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 39(15): 2838-2845 (in Chinese)
- Zhang YY, Zhang ZF, Song TT, Cai WM, Lü GY, 2023. Purification and antioxidant activities of polyphenolic compounds from *Sanghuangporus vaninii*. *Mycosystema*, 42(4): 973-983 (in Chinese)
- Zheng F, Meng G, An Q, Tian XM, Si J, 2017. Antioxidant activities of medicinal fungus *Sanghuangporus sanghuang* during liquid cultivation. *Mycosystema*, 36(1): 98-111 (in Chinese)
- Zhou M, Wang H, Si J, Sun YF, Gao N, Wu DM, Cui BK, 2023. Biological characteristics and antioxidant activities of *Inonotus hispidus*. *Mycosystema*, 42(4): 916-931 (in Chinese)
- [附中文参考文献]**
- 柴新义, 叶承红, 张微微, 马玉华, 2017. 野生大型真菌抑菌菌株的筛选及培养基优化. *食品研究与开发*, 38(6): 170-174
- 陈万超, 杨焱, 张劲松, 李正鹏, 陆本坤, 王琨, 2020. 桑黄类真菌活性代谢产物的研究进展. *食用菌学报*, 27(4): 188-201
- 陈志娜, 许嘉敏, 叶韬, 周江雯, 孙雨晨, 解昕媛, 余璟, 刘宇, 2018. 粗毛纤孔菌(*Inonotus hispidus*)的鉴定及其子实体不同溶剂提取物的抗氧化活性与抑菌活性研究. *食品工业科技*, 39(23): 99-104
- 崔宝凯, 潘新华, 潘峰, 孙一翡, 邢佳慧, 戴玉成, 2023. 中国灵芝属真菌的多样性与资源. *菌物学报*, 42(1): 170-178
- 戴玉成, 2012. 中国木本植物病原木材腐朽菌研究. *菌物学报*, 31(4): 493-509
- 戴玉成, 2022. 中国食药真菌研究发展的新趋势——以《菌物学报》2000-2021年发表论文分析. *菌物研究*, 20(2): 141-156
- 邓淑芳, 白敏冬, 白希尧, 刘兴旺, 2004. 羟基自由基特性及其化学反应. *大连海事大学学报*, 30(3): 62-64
- 雷梦婷, 梁欣敏, 韩婧, 崔玉琴, 刘询, 王波, 贾定洪, 彭卫红, 向泉桔, 何晓兰, 2025. 冬菇属五个物种生长特征与营养成分比较. *菌物学报*, 44(6): 250024
- 李峻志, 吴小杰, 党永, 李安利, 2014. 大型真菌抗氧化活性物质的研究进展. *食品与生物技术学报*, 33(5): 455-465
- 李志军, 包海鹰, 2022. 中药桑黄粗毛纤孔菌的化学成分与药理作用研究进展. *菌物研究*, 20(3): 203-213
- 刘鑫, 侯若琳, 任亚倩, 金珊珊, 陈磊, 林文雄, 郑明锋, 傅俊生, 2018. 寄生枣树的野生粗毛纤孔菌菌丝培养及其子实体大米栽培条件. *应用与环境生物学报*, 24(6): 1283-1289
- 吕国英, 宋婷婷, 蔡为明, 张作法, 2021. 野生桑树桑黄和杨树桑黄化学成分及抗氧化活性比较. *菌物学报*, 40(7): 1833-1843
- 孟歌, 崔宝凯, 李春道, 刘红霞, 司静, 2018. 药用真菌灵芝液体培养过程中的抗氧化活性研究. *菌物学报*, 37(4): 486-501
- 孟歌, 郑飞, 刘红霞, 司静, 崔宝凯, 2016. 锦带花纤孔菌液体培养过程中的抗氧化活性. *生物技术通报*, 32(9): 140-148
- 莫顺燕, 杨永春, 石建功, 2003. 桑黄黄酮 A 和 B 的分离与合成. *化学学报*, 61(7): 1161-1163
- 穆双双, 步洪石, 胡德, 李小欢, 李正龙, 王欢, 王淑敏, 2020. 紫色秃马勃的生物学特性. *菌物研究*, 18(1): 31-36, 42
- 潘长滢, 王玉珊, 黄秋月, 何建清, 巴桑旺姆, 张格杰, 2024. 卷须猴头菌的鉴定及生物学特性研究. *浙江农业学报*, 36(10): 2229-2237
- 钱坤, 武冬梅, 王豪, 孙一翡, 司静, 崔宝凯, 2022. 野生四川灵芝的生物学特性和抗氧化活性. *菌物学报*, 41(4): 601-617

- 宋吉玲, 王伟科, 闫静, 陆娜, 周祖法, 袁卫东, 2022. 药用真菌桑黄抗氧化物质及其活性研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 50(3): 144-154
- 宋吉玲, 袁卫东, 周祖法, 王伟科, 陆娜, 程俊文, 闫静, 2020. 桑黄菌液体培养过程中酶活及多糖含量变化规律. 菌物学报, 39(2): 352-361
- 滕李铭, 田雪梅, 吴芳, 戴玉成, 2021. 13种野生灵芝菌丝体中胞内三萜与多糖含量的比较. 菌物学报, 40(7): 1811-1819
- 王豪, 钱坤, 司静, 崔宝凯, 2021. 桑黄类真菌多糖研究进展. 菌物学报, 40(4): 895-911
- 王华, 聂蓓蓓, 包立军, 刘爽, 张敏娟, 苏超, 2022. 一株陕北野生桑黄菌的分离鉴定及固体培养基优化和药用成分含量检测. 蚕业科学, 48(1): 69-76
- 王一菲, 于晓丹, 田雪梅, 王雪蔚, 魏玉莲, 姜雾航, 周丽伟, 2019. 栎生桑黄和忍冬桑黄液体培养过程中发酵液抗氧化能力. 菌物学报, 38(6): 938-950
- 吴声华, 戴玉成, 2020. 药用真菌桑黄的种类解析. 菌物学报, 39(5): 781-794
- 吴声华, 黄冠中, 陈愉萍, 戴玉成, 周丽伟, 2016. 桑黄的分类及开发前景. 菌物研究, 14(4): 187-200, 185
- 熊双丽, 卢飞, 史敏娟, 吴照民, 2012. DPPH 自由基清除活性评价方法在抗氧化剂筛选中的研究进展. 食品工业科技, 33(8): 380-383
- 杨树东, 包海鹰, 王辉, 2019. 粗毛纤孔菌的化学成分及抗肿瘤活性成分. 菌物学报, 38(1): 127-133
- 叶玮璠, 金灿, 唐禄鑫, 王豪, 季盈仪, 刘璐, 刘嘉诚, 司静, 2025. 药食兼用真菌松脂皱皮孔菌的生物学特性和抗氧化活性. 菌物学报, 44(2): 97-115
- 张思瑶, 余盛武, 魏玉莲, 2024. 东亚木层孔菌与两种野生桑黄的活性成分及其抗氧化活性比较. 菌物学报, 43(2): 74-89
- 张维博, 王家国, 李正阔, 杨丽群, 秦俭, 向仲怀, 崔红娟, 2014. 药用真菌桑黄的研究进展. 中国中药杂志, 39(15): 2838-2845
- 张洋洋, 张作法, 宋婷婷, 蔡为明, 吕国英, 2023. 瓦尼桑黄多酚类化合物纯化及抗氧化活性. 菌物学报, 42(4): 973-983
- 郑飞, 孟歌, 安琪, 田雪梅, 司静, 2017. 药用真菌桑黄液体培养过程中的抗氧化活性研究. 菌物学报, 36(1): 98-111
- 周苗, 王豪, 司静, 孙一翡, 高能, 武冬梅, 崔宝凯, 2023. 粗毛纤孔菌的生物学特性和抗氧化活性研究. 菌物学报, 42(4): 916-931

致谢审稿专家

在过去的一年中, 感谢所有审稿专家在繁忙的科研工作之余, 以严谨的学术态度、深厚的专业素养和无私的奉献精神, 为《菌物学报》遴选优质稿件。2025年, 《菌物学报》共发表了162篇论文, 在中国科学引文数据库(CSCD)中影响因子排在第一名, 并持续入选中文核心期刊要目总览、中国精品科技期刊、中国最具国际影响力学术期刊; 入选“中国科技期刊提能拓展计划”“首都科技期刊卓越行动计划”。《菌物学报》的进步得益于每一位审稿专家的爱护与支持。

值此辞旧迎新之际, 《菌物学报》全体同仁向2025年度参与本刊审稿工作的每一位专家致以诚挚的感谢与崇高的敬意! 律回春渐, 新元肇始。在未来的日子里, 期待更多学者加入我们的审稿团队, 我们愿与您携手同行、并肩努力, 把《菌物学报》推向更高水平, 为读者提供更丰富、更优质的学术资源!

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| 包海鹰 | 范宇光 | 胡小平 | 李秦辉 | 刘中华 | 田雪梅 | 应盛华 | 赵鹏 |
| 鲍大鹏 | 房文霞 | 胡晓棣 | 李伟 | 卢永仲 | 图力古尔 | 员媛 | 赵琪 |
| 蔡磊 | 冯虎元 | 黄勃 | 梁晨 | 陆玲 | 汪世华 | 袁海生 | 赵瑞琳 |
| 曹向宇 | 冯佩英 | 黄晨阳 | 梁晓飞 | 吕国忠 | 汪滢 | 曾念开 | 周丽伟 |
| 陈双林 | 高 程 | 黄广华 | 刘成伟 | 骆祝华 | 王成树 | 曾昭清 | 周欣 |
| 陈叶福 | 龚 杰 | 黄金光 | 刘芳 | 马海霞 | 王洪凯 | 张波 | 周亚彬 |
| 陈作红 | 郭良栋 | 贾泽峰 | 刘钢 | 邱君志 | 王丽 | 张敬泽 | 朱平 |
| 崔宝凯 | 郭守玉 | 江 聪 | 刘高强 | 冉玉平 | 王阳 | 张猛 | 朱兆香 |
| 戴玉成 | 国立耘 | 姜子德 | 刘宏伟 | 任强 | 魏鑫丽 | 张明 | 邹根 |
| 邓旺秋 | 韩培杰 | 金 城 | 刘玲 | 申进文 | 吴芳 | 张石柱 | |
| 邓懿祯 | 何晓兰 | 李 冰 | 刘朴 | 师亮 | 肖扬 | 张永杰 | |
| 丁 刚 | 何秀萍 | 李传华 | 刘润进 | 司静 | 邢晓科 | 张永军 | |
| 董彩虹 | 贺 超 | 李东明 | 刘小勇 | 宋厚辉 | 杨文建 | 赵长林 | |
| 杜习慧 | 贺学礼 | 李国杰 | 刘杏忠 | 孙广宇 | 杨祝良 | 赵杰 | |
| 范 黎 | 胡丰林 | 李海蛟 | 刘艳芳 | 孙淑静 | 尹文兵 | 赵明文 | |