

花脸香蘑蔗糖转化酶 INV1 响应糖信号的研究



陆民锋*, 覃杰

黔南民族师范学院生物科学与农学院, 贵州都匀 558000

摘要: 花脸香蘑 (*Lepista sordida*) 作为一种珍稀的食药食用菌, 随着野生数量越来越少, 目前只有少量的人工栽培, 市场上供不应求; 在对其栽培的过程中发现菌丝体生长缓慢, 探究提高菌丝体生长速率势在必行。碳源作为食用菌必不可少的能量来源, 对碳源的高效转化利用影响食用菌菌丝体生长与子实体产量。蔗糖转化酶 (Sucrose Invertase, INV1) 是一种水解酶, 属于糖苷酶家族, 能够催化蔗糖水解为等量的葡萄糖和果糖, 生成的单糖可直接被细胞吸收并用于能量代谢或生物合成。对它的研究将为探究花脸香蘑菌丝体生长速率提供理论参考。本研究通过组织分离法获得了一株野生的花脸香蘑菌株菌丝体, 并从广东省科学院生物与医学工程研究所获得花脸香蘑中 INV1 的 CDS 序列与氨基酸序列, 为后面的研究奠定基础。通过实时荧光定量 PCR (Reverse Transcription Quantitative PCR, RT-qPCR) 等技术手段, 对花脸香蘑在无糖、葡萄糖与乳糖以及 PDA 培养条件下的响应情况做了检测。结果表明, 在葡萄糖存在的情况下, 其表达量最低, 在 PDA 与无糖时表达量居中, 而在乳糖的情况下, 蔗糖转化酶表达量最高。这说明花脸香蘑中蔗糖转化酶在碳源只有乳糖存在的情况下, 会响应乳糖的转化。

关键词: 花脸香蘑; 组织分离; ITS 序列; 蔗糖转化酶; 碳源

DOI: 10.57237/j.jaf.2025.04.003

Study on the Response of *Lepista sordida* Sucrose Invertase 1 to Sugar Signals

Lu Minfeng*, Qin Jie

School of Biological Science and Agriculture, Qiannan Normal University for Nationalities, Duyun 558000, China

Abstract: *Lepista sordida*, a rare edible and medicinal mushroom, is currently in short supply in the market due to its declining wild availability and limited artificial cultivation. During cultivation, it has been observed that the mycelial growth rate is slow, making it imperative to explore methods for enhancing mycelial growth. As an essential energy source for edible fungi, the efficient conversion and utilization of carbon substrates significantly influence mycelial growth and fruiting body yield. Sucrose invertase (INV1), a hydrolase belonging to the glycosidase family, catalyzes the hydrolysis of sucrose into equimolar amounts of glucose and fructose. The resulting monosaccharides can be directly absorbed by cells and utilized for energy metabolism or biosynthetic processes. Studying this enzyme will provide a

基金项目: 贵州省科技厅青年引导项目 (黔科合基础-[2024]青年 054);
黔南民族师范学院支持高层次人才引进研究专项 (qnsyrc202312);
黔南民族师范学院大学生创新创业训练计划项目 (qnsycxcy202574).

*通信作者: 陆民锋, luminfeng2021@163.com

收稿日期: 2025-11-25; 接受日期: 2025-12-15; 在线出版日期: 2025-12-24

<http://www.agrforestry.com>

theoretical foundation for investigating the mycelial growth rate of *Lepista sordida*. In this study, a wild strain of *L. sordida* was obtained through tissue isolation, and the CDS and amino acid sequences of INV1 were acquired from the Institute of Biological and Medical Engineering, Guangdong Academy of Sciences, laying the groundwork for subsequent research. Using techniques such as reverse transcription quantitative PCR (RT-qPCR), the expression responses of *L. sordida* under sugar-free, glucose, lactose, and PDA culture conditions were examined. The results indicated that INV1 expression was lowest in the presence of glucose, moderate under PDA and sugar-free conditions, and highest when lactose was supplied as the carbon source. This suggests that sucrose invertase in *L. sordida* responds to lactose conversion when lactose is the sole carbon source.

Keywords: *Lepista sordida*; Tissue Isolation; ITS Sequence (Internal Transcribed Spacer Sequence); Sucrose Invertase; Carbon Source

1 引言

花脸香蘑 (*Lepista sordida*), 又名紫晶香蘑、丁香蘑、紫花脸蘑、紫花脸等[1], 隶属于担子菌门 (*Basidiomycota*)、伞菌纲 (*Agari-comycetes*)、伞菌目 (*Agaricales*)、白蘑科 (*Tricholomata-ceae*)、香蘑属 (*Lepista*) [2]是珍稀的食药兼用菌, 主要分布于中国四川、云南、贵州、陕西、山东等地。其子实体肉质细软, 颜色呈淡紫色, 有特殊蘑菇香味, 富含维生素、蛋白质、氨基酸等营养元素[3, 4], 味道鲜美、营养丰富, 是不可多得的餐桌佳品; 因此人工栽培花脸香蘑具有很好的市场前景[5]。但花脸香蘑在野生状态下, 数量少, 产量低, 十分珍贵, 国内外市场有价无货[6]。

当前, 花脸香蘑的研究多集中于分离鉴定以及菌丝体生物学特性和培养基优化层面[7-13], 在化学成分与生物活性研究上也取得了一定的进展[14], 其发酵条件及其优化与多糖的提取工艺也进行了探索[15, 16]。在栽培上, 已经报道了小规模栽培试验, 由于缺乏成熟的人工栽培技术而无法进行大规模商业化栽培, 人工栽培花脸香蘑的生物转化率低, 因此影响了花脸香蘑商业化栽培[17]。在分子水平上, 也开始对花脸香蘑的内参基因以及过氧化氢酶相关基因进行研究[18, 19], 在花脸香蘑交配型上也取得了突破[20]。

蔗糖转化酶 (INV1) 是一种水解酶, 属于糖苷酶家族, 在六大蛋白酶类中属于水解酶类, 作用于糖基, 水解氧-糖化合物[21], 能够催化蔗糖水解为等量的葡萄糖和果糖, 生成的单糖可直接被细胞吸收并用于能量代谢或生物合成。蔗糖酶在植物的运输贮藏、碳水化合物代谢中发挥主要作用, 并在渗透调节、抗逆性生长繁殖、以及信号传导方面也发挥着重要的作用[22]。糖在植物中不仅用于能量的代谢, 同时还作为信号分

子调控植物的生长和发育[23]。在食用菌的生长发育过程中, 碳源代谢是支撑其快速生长和品质形成的关键代谢途径之一, 目前关于花脸香蘑中蔗糖转化酶的存在与否以及对碳源信号的响应尚不清楚。

2 材料与方法

2.1 培养基的配制

PDA 培养基 (Patato dextrose agar medium): 马铃薯 200 g 煮烂后纱网袋过滤取滤液、葡萄糖 20 g、琼脂粉 18 g (配制固体培养基时加入)、加水定容至 1 L, 121 °C 15 min 灭菌。

可溶性淀粉培养基 (Soluble starch medium): 马铃薯 200 g 煮烂后纱网袋过滤取滤液、可溶性淀粉 20 g、琼脂粉 18 g (配制固体培养基时加入)、加水定容至 1 L, 121 °C 15 min 灭菌。

改良 PDA 培养基 (Modified patato dextrose agar medium): 马铃薯 200 g 煮烂后纱网袋过滤取滤液、葡萄糖 20 g、酵母浸膏 4 g、水解蛋白胨 2 g、K₂HPO₄ 0.48 g、MgSO₄ 0.5 g、KH₂PO₄ 0.5 g、琼脂粉 20 g (配制固体培养基时加入)、加水定容至 1 L, 121 °C 15 min 灭菌。

综合马铃薯培养基 (Comprehensive potatoes medium): 马铃薯 200 g 煮烂后纱网袋过滤取滤液、葡萄糖 20g、K₂HPO₄ 3g、MgSO₄ 1.5 g、维生素 B1 10mg、琼脂粉 20 g (配制固体培养基时加入)、加水定容至 1 L, 121 °C 15 min 灭菌。

完全培养基 (Complete medium): 蛋白胨 2 g、葡萄糖 20 g、KH₂PO₄ 0.5 g、MgSO₄ 0.5 g、琼脂粉 20 g

(配制固体培养基时加入)、加水定容至 1 L, 121 ℃ 15 min 灭菌。

2.2 菌株分离纯化

采用组织分离法。用 75%酒精对采集到的有柄灵芝子实体进行表面擦拭消毒, 将子实体撕开后切取内部 1 cm² 大小组织放置于 PDA 平板上, 于 25 ℃ 恒温培养箱中黑暗培养, 待菌丝长出约 3-5 d 后, 于边缘处挑取小拇指甲盖大小菌丝块转接到新的 PDA 培养基上, 重新放置于 28 ℃ 恒温培养箱中进行恒温培养, 获得纯化好的菌种后, 使用 PDA 斜面培养基保存菌种。

2.3 菌株的鉴定

菌株形态特征: 观察野生菌株子实体形态, 记录表观特征; 进一步观察纯化菌株在 PDA 培养基上的生长情况, 记录菌落生长形状、菌落大小及颜色等特征; 进一步使用显微镜观察菌丝形态并记录菌丝结构特征。

基于 ITS 序列的分子鉴定: 使用 CTAB 法提取分离菌株的菌丝体 DNA。从分离出来的菌株边缘取生长好的菌丝体, 将其装入 2 ml Ep 管中, 同时放入部分石英砂。加入 800 μl 的 CTAB 溶液, 在细胞破碎机上进行破碎, 随即放入 65 ℃ 烘箱中放置 30 min 以上, 每 10 min 振荡摇晃一次。然后加入 200 μl 氯仿, 颠倒混匀室温静置 5 min, 随即室温 12000 r/min, 离心 10 min, 取出 400 μl 上清液装入新的 1.5 ml ep 管中; 按照 1:1 比例加入异丙醇, 随即室温 12000 r/min, 离心 10 min; 再用 1 ml 70%酒精进行清洗一遍, 去掉液体后顺离, 使用移液枪吸出剩余液体, 开盖挥发 2 min, 加入 50-100 μl 蒸馏水。待 DNA 充分溶解后作为模版待用。使用 ITS1-TCCGTAGGTGAACCTGCGG 和 ITS4-TCCTCCGCTTATTGATATGC 引物进行 PCR 扩增测序分析鉴定, PCR 反应体系总体积为 50 μl: ddH₂O 18 μl、2xTaq Mix 25 μl、Primer F 1 μl、Primer R 1 μl、Template 5 μl。PCR 反应程序为: 95 ℃ 5 min、95 ℃ 30 s、57 ℃ 30 s、72 ℃ 1 min、12 ℃ 10 min, 32 个循环。将扩增得到的序列送于上海生工测序, 得到测序结果后将测序结果在 NCBI 中做 BLASTN 比对, 找出并下载 > 95%相似性序列, 利用 MEGA11 等软件构建系统发育树[19]。

2.4 菌丝生长速度测定

将供试菌株活化, 当菌落直径达到约 5 cm 时, 制

备接种块。当活化完成后, 使用打孔器打孔, 确保所打菌丝块的菌龄、体积一致。将菌丝块接种于平板培养基上, 待菌丝萌发(约 2d)后采用十字交叉法划线确定菌丝生长起点, 继续培养, 待生长最快的菌丝长满平皿时, 划终止线, 测量菌丝生长距离, 计算每个菌落的生长速度。

2.5 TRIzol 法提取 RNA

将采集到的花脸香蘑菌丝体约 1 g 放置在液氮预冷的陶瓷研钵中, 在液氮环境下, 重复研磨 3 次直到呈粉末状后转入预冷的 2 mL RNase-free ep 管; 立即向管中加入 1 mL TRIzol 试剂, 涡旋震荡 30 s 后冰上静置 20-30 min; 加 200 μl 氯仿抽提匀浆液, 颠倒混匀后冰上静置 5 min, 随后在 4 ℃、12000 g 离心 10 min, 回收上清液; 在回收的上清液中加入等体积的异丙醇溶液, 颠倒混匀沉降 5 min; 随后在 4 ℃、12000 g 离心 10 min, 去掉上清液; 再加入 70%乙醇 1 ml, 在 4 ℃、12000g 离心 2 min 后倒掉余液, 再次重复此步骤后挥发两分钟; 加入 DEPC 水 50-100 μL, 放入 -80 ℃ 冰箱中长期保存。

2.6 RNA 的反转录

使用反转录试剂盒, 主要步骤如下:

总体积 20 μL, 先对 RNA 的浓度进行测定, 同一批样品每个体系中的 RNA 皆定量到 2 μg; 加入 1 μL gDNA Eraser、2 μL 5×gDNA Eraser Buffer、RNA 样液、DEPC 水(RNase free ddH₂O)补充到 10 μL。然后室温下放置 30 min; 然后在体系内继续加入 1 μL Prime Script RT Enzyme MixI、4 μL 5×Prime Script Buffer 2 (for Real Time)、4 μL RT Primer Mix、1 μL RNase Free ddH₂O; 顺离混匀后放于 37 ℃ 金属浴 1 h (转录); 然后 85 ℃ 金属浴 5 min (使转录酶失活); 最后放入 4 ℃ 冰块中冷却, 加入 80 ddH₂O 共 100 μL, 放入 -20 ℃ 中保存。

2.7 实时荧光定量检测

采用实时荧光定量 PCR (qRT-PCR) 技术, 以 β-actin 等为内参基因, 对应的引物为: LsINV1- qPCR-F: ATCGCCGATCTGCAGGTCGTG, LsINV1-qPCR-R: TCTGGTCCCCCAACACAACATCT; GAPDH-qPCR-F: TAAGGCGGTTGGCAAGGT, GAPDH-qPCR -R: CAATGAAGTCAGCGGATACGA。检测花脸香蘑在不同

中碳源培养条件下, *LsINV1* 基因的相对表达量变化情况。

qPCR 反应体系配制: 在冰上进行反应体系的配制, 一般 20 μ L 的反应体系如下: 2 $\times$ SYBR Green qPCR Master Mix 10 μ L、上游引物 0.4 μ L、下游引物 0.4 μ L、cDNA 模板 2 μ L、ddH₂O 补足至 20 μ L。将各成分依次加入到 qPCR 管, 轻轻混匀, 瞬离使液体聚集在管底。将配制好的反应管放入实时荧光定量 PCR 仪中, 设置反应程序: 预变性: 95 $^{\circ}$ C, 3-5 分钟, 使 DNA 模板充分变性。

扩增循环: 95 $^{\circ}$ C, 10-15 秒 (变性); 根据引物的退火温度设置退火步骤, 一般为 55-60 $^{\circ}$ C, 20-30 秒; 72 $^{\circ}$ C, 20-30 秒 (延伸), 进行 40 个循环。在每个循环的延伸阶段采集荧光信号。

3 结果与分析

3.1 花脸香蘑菌丝体观察

为了观察花脸香蘑菌丝体生物学特性, 通过组织分离法分离后用 PDA 培养基对花脸香蘑菌丝进行培养, 连续观测记录菌丝在固体培养基上的生长状况, 如图 1 菌丝体 PDA 培养基中生长势旺盛, 菌丝体粗壮, 菌丝体在生长约 10 d 左右开始出现色素, 后期变为紫色。通过光学显微镜进一步观察, 菌丝体细胞间有隔膜,

且具有锁状联合现象。

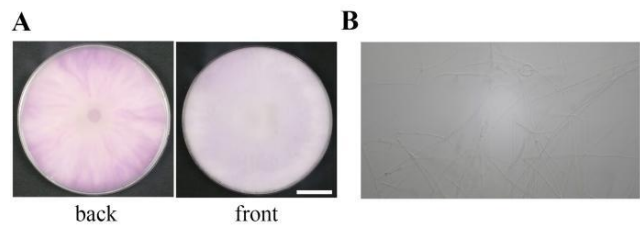


图 1 花脸香蘑菌丝体观察

Figure 1 Observation of mycelium of *Tricholoma grisea*

3.2 ITS 序列鉴定分析

为了较为准确知道分离获得的菌丝体是否为花脸香蘑, 本研究使用 ITS 通用引物 ITS1 与 ITS4 以花脸香蘑菌丝体 DNA 为模版进行 PCR 扩增, 将获得的 PCR 产物送于生物公司进行测序分析, 获得该条带 DNA 序列。使用 NCBI 数据库与 MEG.11 软件, 进行 ITS 序列进化树的制备, 最后结果如图 2 所示, 聚为两大支, 菌株样本与 5 个 *Lepista sordida* 聚为一支, 且之间亲缘关系较近。ITS 序列鉴定结果表明, 分离获得的菌丝体为花脸香蘑菌株。

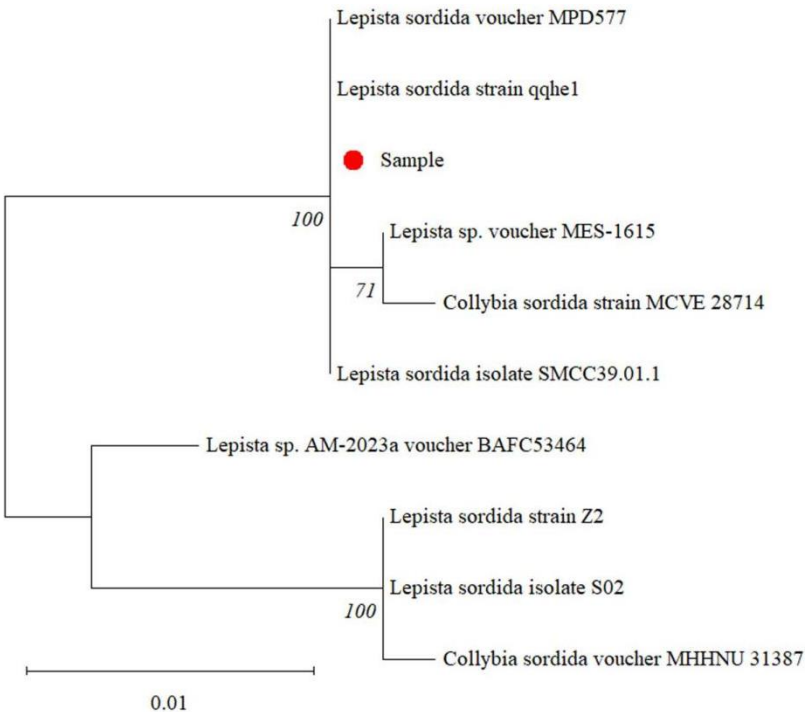


图 2 花脸香蘑 ITS 序列分析

Figure 2 Analysis of ITS sequence of *Lepista sordida*

3.3 不同培养基对花脸香蘑菌丝生长的影响

为了了解花脸香蘑菌丝体生长的最适培养基，用 5 种固体培养基对分离的花脸香蘑菌丝进行培养，连续观测记录菌丝在固体培养基上的生长状况。最终结果由图 3 可知，花脸香蘑菌丝生长速度和长势在 5 种不同培养基上表现有差异，可溶性淀粉培养基中生长速度最块，7 d 生长 0.51 cm，但无色素产生；其次为马

铃薯葡萄糖琼脂培养基和完全培养基，7 d 生长分别为 0.4cm、0.37 cm，再次是改良马铃薯葡萄糖琼脂培养基，7 d 生长为 0.35 cm，最慢为综合马铃薯培养基 7 d 生长仅为 0.30 cm。从菌丝长势上来看，在 5 种固体培养基上均能很快萌发，虽然可溶性淀粉培养基上的菌丝率先长满培养皿，但其色素产生较少。综合生长速度和菌丝长势，花脸香蘑菌丝生长的最适合培养基为 PDA 培养基。

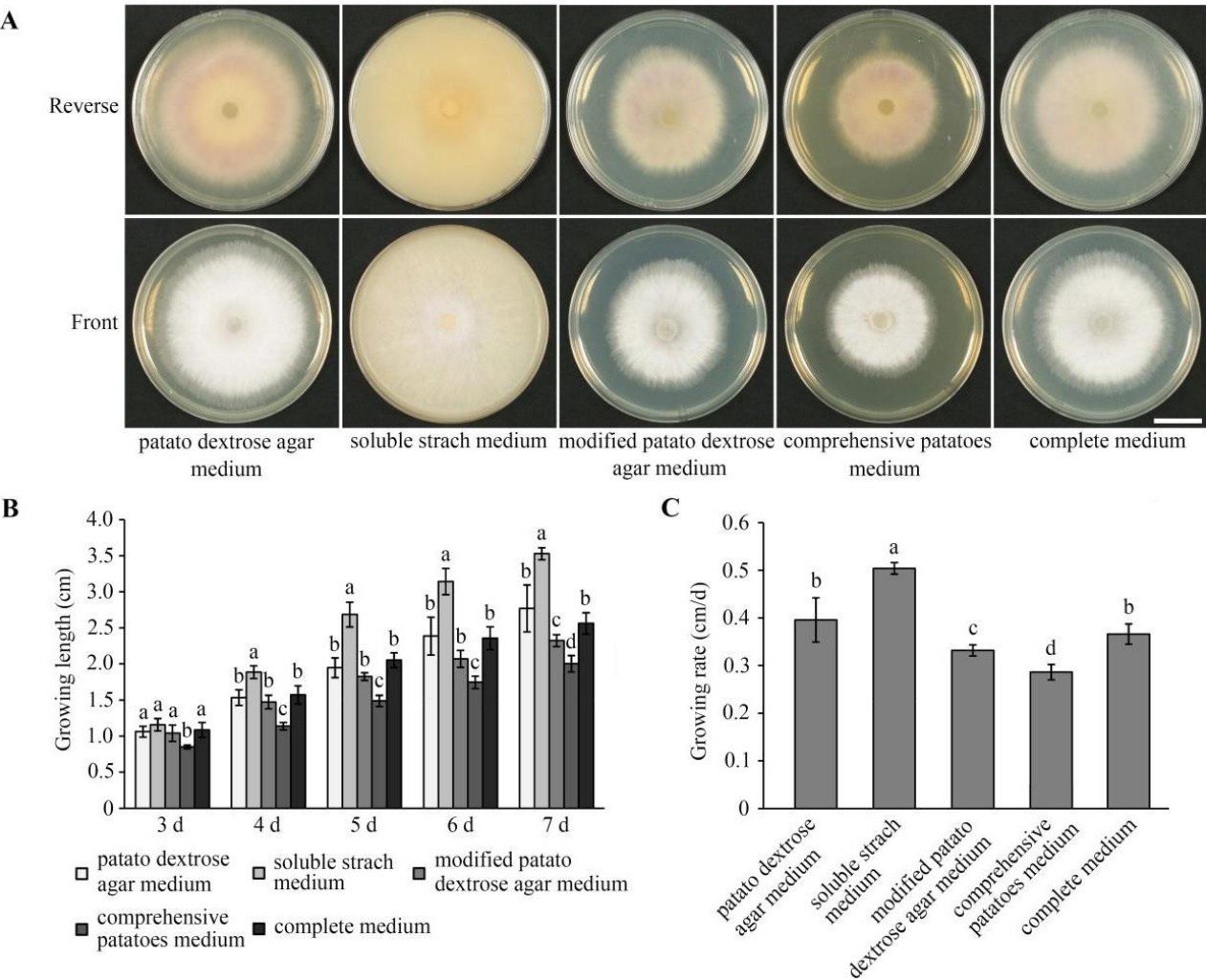


图 3 不同培养基中花脸香蘑菌丝生长状况

Figure 3 Mycelium growth in different media of *Lepista sordida*

3.4 *LsINV1* CDS 序列与氨基酸序列分析

为了研究 *LsINV1* 对不同糖信号响应的情况。从广东省科学院生物与医学工程研究所获得花脸香蘑中蔗

糖转化酶的 CDS 序列与蛋白氨基酸序列(如图 4 所示)。通过 Edit-seq 软件对序列进行分析，其 CDS 序列全长 1023 bp，编码 340 个氨基酸。氨基酸序列全长 340 aa，蛋白大小为 37.28 D，等电点为 4.608。

ATGACTGTCGCACTTTCACAGGCCTACCAAATCTGTTTTTTCTTCCCCAGATCTCAAGTCATGGACCGAGCTTAGTCGATT
CGAGGTCTCTGGTATCCTTGGATTCCAATATGAATGTCTGGGCTATTCCAAGTTCCAACCATCGGGGGTCTAACGACGGA
ACAAAAACCTGGGTTCTCTGGATCTCCGTCGGCCCGGGCGCCCCCTTGGTGGAACCGTCATGCAATACTTTTCGGCGATT
GGGACGGTACGACATTACACCACACGACCATGCAGCACGTATCCTTGACTTCGGTCTGAATTTTACGCGGCACAGACATT
TTTCGAAGTAGGTGATGTATCAACAACCTACCACGATTGGCTGGGCATCAAACGGGCAGTATACAAACGTGGTACCTACCTC
GCCGTGGAGGTCTGAAATGACCGTAGCGCGCAACTATCCCTCCGCTACGTCAGATACAACCAATGTATAGCAATTATGT
GTTGGCACAGACGCCATATCAACCACACCCATAGAAGCGGGAACCTTCGTGAATATCTCACAGCCAGTGTGAGAGAACCA
AAGTATCAATTCGCGGGGTGGCAAGGAGCAATTGACGTCCGGGCATCCTTTTCAGGGGGCTCTGGAGTGGAATTGCGTAT
CGGTGCAAGTGGGGGCCAAGTGCTCAAAATAGGTGCTAGTTTCGGGGAGCCTTAATACTATATACATCGATCGCCGATCTGC
AGGTGCTGCATGGGCGGATGATAATCCAACCTTTCAGGTGCGGTACAGTAGGATACTAATGGCGAACAGGAGAGACGACG
GAAGTGATCATTCTCCTCCACATCATTATTGATCGTTCCTGTTGGAAGTGTGTTGCAAATGATGGGGTGGCGAGTGCAGT
TAGTAACGTGTTTTGGGACGATAACGCATTGCCTGAGAAGTTAGATGTTGTGTTGGGGGACCAGAATGTGGTTTTGGAAAA
TCTAGTCGTCAGAAAGTTAAGAGGAACATGGACATGTTCTACTTAA

图 4 花脸香蘑 *LsINV1*CDS 序列

Figure 4 CDS sequence of *Lepista sordida*

MTVALSQAYQILFFSPDLKSWTELSRFEVSGILGFQYECPLGFQVPTIGGPNDGKTWVLWISVGPAPLGGTVMQYFFGDWDGT
TFTPHDHAARILDFGPEFYAAQTFFEVGDVSTTTTIGWASNGQYTNVPTSPWRSEMTVARELSLRYVRYNPMYSNYVLAQTPIST
TPIEAGNFVNISQPVSENQSFAGWQGAIDVRASFSGSGVELRIGASGGQVLKIGASFGEPLTIYIDRRSAGRAWADDNPTFAGRY
SRILMANRRDDGSDHFSFHIIIDRSLVEVFANDGVASAVSNVFWDDNALPEKLDVVLGDQNVVLENLVVQKLRTWTCST

图 5 花脸香蘑 *LsINV1* 蛋白序列

Figure 5 Protein sequence of *Lepista sordida*

3.5 *LsINV1* 对不同碳源的响应

为了了解 *LsINV1* 对不同碳源的响应情况，用 3 种不同碳源条件的培养基对花脸香蘑菌丝进行培养，连续观测记录菌丝在培养基上的生长状况。

最终结果由图 6A 可知，花脸香蘑菌丝长势及基因表达量在 3 种不同碳源培养基上表现有差异。在无碳源（free-sucrose）生长最快为 2.9 cm，但菌丝体较为稀疏；其次为葡萄糖（glucose）为 2.4 cm，菌丝体较为稠密；最慢为乳糖（lactose）为 1.6 cm（图 6B）。*LsINV1* 基因在不同碳源的基因表达量也不同，以乳糖表达量最高，蔗糖次之，葡萄糖最低（图 6C）。以上结果说明 *LsINV1* 在不同碳源下表达情况存在较大区别，当培养基中存在葡萄糖时，其表达量较低，当只存在乳糖时，其表达量较高，说明在碳源只有乳糖时 *LsINV1* 可能参与乳糖的转化以期菌丝体提供可利用的能量。

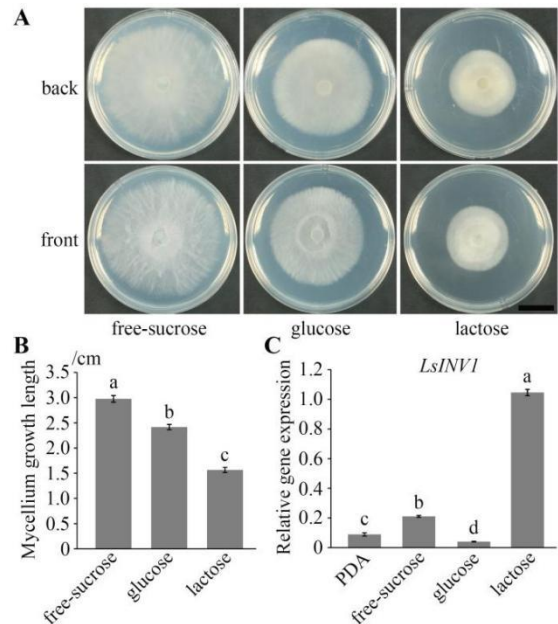


图 6 不同碳源花脸香蘑菌丝生长状况及基因表达量

Figure 6 Mycelium growth and gene expression of *Lepista sordida* with different carbon sources

4 讨论

蔗糖转化酶是一种水解酶，属于糖苷酶家族，能够催化蔗糖水解为等量的葡萄糖和果糖，生成的单糖可直接被细胞吸收并用于能量代谢或生物合成，在真菌中广泛参与蔗糖分解代谢。与杏鲍菇、平菇等担子菌类似，花脸香蘑作为腐生型食药菌，依赖蔗糖转化酶分解环境中的蔗糖，为菌丝生长提供单糖底物。然而，不同真菌的碳源代谢策略存在显著差异：部分木腐菌（如灵芝）因基因组中缺乏蔗糖转化酶基因，主要依赖纤维素酶、木聚糖酶等分解复杂碳水化合物；而花脸香蘑的蔗糖转化酶基因表达特性，反映了其对自然生境中蔗糖类碳源的适应性，通过高效水解蔗糖快速获取能量，支持菌丝在腐殖质环境中的定植与扩展。蔗糖转化酶在真菌碳代谢中具有关键作用[20]，本实验进一步证实，花脸香蘑的 *LsINV1* 基因不仅存在，且其表达量与碳源类型密切相关从而支持菌丝快速生长，为解析该菌的碳源利用机制提供了新视角。

在不同碳源实验当中，本次实验主要选用了乳糖、葡萄糖以及无糖这三种糖源条件，花脸香蘑菌丝长势及基因表达量在 3 种不同糖培养基上互相之间存在显著性差异，*LsINV1* 可能参与乳糖的转化以期菌丝体提供可利用的能量。花脸香蘑在自然环境中可能利用多种碳水化合物，本研究仅测试了葡萄糖、乳糖及无糖三种糖源条件以及对 PDA 培养时的响应情况，并未考虑其他糖如果糖、木糖等，后期应加以补充，看其对复杂碳源是否响应，通过对不同糖源的初步结果分析，发现其表达量可能与葡萄糖的浓度有关系，当生存环境当中存在较丰富的葡萄糖时，*LsINV1* 起不到作用，其表达量会降低，而当存在一些需要转化的碳源时，其表达量会增高参与碳源的转化。

本研究通过分子生物学与生理实验，证实花脸香蘑蔗糖转化酶（*LsINV1*）在碳源代谢中的关键作用：该酶的表达情况受碳源类型调控，在乳糖等非优势双糖存在时高表达，在葡萄糖等易利用单糖存在时低表达。与其他真菌相比，花脸香蘑的蔗糖转化酶系统体现了其对腐生环境中蔗糖类碳源的适应性，区别于依赖复杂多糖降解的木腐菌。然而，本次研究仍有局限：仅测试了 3 种单一碳源及 PDA 培养基，未涉及果糖、麦芽糖等其他糖类及天然基质（如木屑、秸秆）的影响。此外，蔗糖转化酶与其他糖代谢酶（如果糖激酶、己糖转运蛋白）的协同机制尚未明确。未来可进一步拓展碳源类型，结合转录组学分析，全面解析花脸香

蘑的糖信号响应网络，开展相关研究不仅有助于揭示蔗糖转化酶在花脸香蘑生长发育中的功能作用，还有助于为栽培管理提供理论依据和技术支持。

参考文献

- [1] 隋业璇, 徐伟良, 李春冬, 等. 一株草原野生花脸香蘑菌种培养基的筛选研究 [J]. 农业与技术, 2023, 43(03): 14-17.
- [2] 戴玉成, 周丽伟, 杨祝良, 等. 中国食用菌名录 [J]. 菌物学报, 2010, 29(01): 1-21.
- [3] 胡先运, 李香莉, 张勇民, 等. 花脸香蘑菌丝体氨基酸分析 [J]. 氨基酸和生物资源, 2007, (01): 51-52.
- [4] 胡先运, 江家志, 罗心毅. 花脸香蘑子实体蛋白质营养评价 [J]. 氨基酸和生物资源, 2011, 33(04): 55-57.
- [5] 张秀伟, 鲍菊, 蔡甫格, 等. 4 个贵州野生花脸香蘑菌株的菌丝体生物学特性研究 [J]. 食药菌, 2023, 31(03): 182-186.
- [6] 张京良, 李蓉, 孙炳竹, 等. 花脸香蘑功能饮料的研制 [J]. 食用菌, 2010, 32(02): 61-62.
- [7] 郭昱秀, 王军, 栾倩倩, 等. 祁连山地区野生花脸香蘑的鉴定及培养条件研究 [J/OL]. 天津农林科技, 1-8 (2025-11-24).
- [8] 万群, 熊维全, 张金容, 等. 1 株野生花脸香蘑菌株的鉴定及其培养基筛选 [J]. 中国食用菌, 2025, 44(04): 31-36.
- [9] 陈扬, 王鑫, 普普赤, 等. 一株野生花脸香蘑的鉴定及生物学特性 [J]. 食用菌, 2025, 47(04): 27-34.
- [10] 魏洁, 孙叶光, 涂镜, 等. 野生花脸香蘑分离鉴定及其培养基优化 [J]. 食用菌, 2025, 47(05): 33-41.
- [11] 何雪梅, 赵辉, 冯慧, 等. 三个花脸香蘑菌株母种的培养条件筛选试验 [J]. 四川农业科技, 2025, (11): 30-36.
- [12] 张秀伟, 鲍菊, 张万萍, 等. 贵州 4 株花脸香蘑的分离鉴定及秋栽驯化 [J]. 中国食用菌, 2022, 41(10): 26-30.
- [13] 崔晓, 丛倩倩, 王庆武, 等. 一株野生花脸香蘑的鉴定及其液体培养基的筛选 [J]. 中国食用菌, 2022, 41(08): 17-20+33.
- [14] 李菲菲, 郑永标. 花脸香蘑的化学成分及生物活性研究进展 [J]. 食药菌, 2024, 32(06): 379-385.
- [15] 鲁铁, 董梦帆, 王合, 等. 伏牛山地区花脸香蘑液体发酵菌丝体多糖提取工艺优化及活性研究 [J]. 河南城建学院学报, 2025, 34(03): 117-126.
- [16] 王艺学, 赵辉, 李彪, 等. 花脸香蘑 E70 菌株发酵条件优化及其胞外多糖生物活性 [J]. 食品研究与开发, 2024, 45(20): 125-134.

- [17] 贺永国, 耿秀英, 姚春, 等. 白参菌菌糠高效栽培花脸香蘑技术 [J]. 食用菌, 2020, 42(06): 53-54+56.
- [18] 王丽宁, 黄清铎, 蒋丽群, 等. 花脸香蘑过氧化氢酶基因鉴定及表达分析 [J]. 食用菌学报, 2022, 29(05): 12-21.
- [19] 范敏, 吴克刚, 王丽宁, 等. 花脸香蘑荧光定量 PCR 内参基因筛选及多糖合成代谢相关基因表达量测定 [J]. 食用菌学报, 2021, 28(05): 20-28.
- [20] 张秀伟, 牛力立, 蔡甫格. 花脸香蘑交配型研究 [J]. 食用菌学报, 2025, 32(04): 9-12.
- [21] 梁敏, 李楠楠, 邹东恢. 蔗糖酶的提取工艺及性质研究 [J]. 湖北农业科学, 2010, 49(09): 2218-2220.
- [22] GIBSON S I. Plant sugar-response pathways: Part of a complex regulatory web [J]. Plant Physiol, 2000, 124: 1532-1539.
- [23] IRAQI D, TREMBLAY F M. Analysis of carbohydrate metabolism enzymes and cellular contents of sugars and pro-teins during spruce somatic embryogenesis suggests a regulatory role of exogenous sucrose in embryo development [J]. J Exp Bot, 2001, 52: 2301-2311.

作者简介

陆民锋

1995 年生, 男, 博士, 黔南民族师范学院副教授, 研究方向: 食用菌种质资源利用; 植物病原菌与植物互作机理.

E-mail: luminfeng2021@163.com