

木质纤维素酶诱导物对平菇菌包发菌期的影响

潘戈帆¹, 许爱清^{1,2*}

¹湖南科技大学生命科学与健康学院, 湖南 湘潭

²重金属污染土壤生态修复与安全利用湖南省普通高等学校重点实验室, 湖南 湘潭

收稿日期: 2023年4月7日; 录用日期: 2023年5月9日; 发布日期: 2023年5月16日

摘要

在当前转化利用农林废弃生物质资源工厂化生产平菇菌包过程中存在菌包发菌期长的实际问题, 缩短菌包发菌期是菌包生产企业的现实需要。向平菇液体菌种培养体系添加适宜的木质纤维素酶系诱导物, 包括微晶纤维素、纤维二糖、羧甲基纤维素钠或木质素磺酸钠, 对比分析菌包发菌期时长和出菇产量指标。结果表明在I期液体菌种培养物能正常接种前24 h添加微晶纤维素(0.1%)或纤维二糖(0.1%)作为诱导剂, 既都能缩短菌包发菌期3天, 又能提升第一潮菇产量4%或11%。建立了缩短平菇菌包发菌期技术, 能为菌包生产企业提质增效提供参考。

关键词

平菇, 发菌管理期, 木质纤维素酶, 微晶纤维素, 纤维二糖

Effects of Lignocellulase Inducer to Oyster Mushroom Spawning Management Period

Gefan Pan¹, Aiqing Xu^{1,2*}

¹School of Life and Health Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

²Ecological Remediation and Safe Utilization of Heavy Metal-Polluted Soils, College of Hunan Province, Xiangtan Hunan

Received: Apr. 7th, 2023; accepted: May 9th, 2023; published: May 16th, 2023

Abstract

There exists a problem of long spawning management period when factory production of the oyster mushroom spawning bags based on the agriculture and forestry waste biomass resources in

*通讯作者。

the present, therefore the shortening of the period of spawning management is the reality demands for the spawning bags producing enterprise. The lignocellulase inducer such as microcrystalline cellulose, cellobiose, sodium carboxymethyl cellulose and sodium ligninsulfonate was added into the oyster mushroom liquid culture system respectively, the time of spawning management period and the yield of fruit body were detected. The result showed the treatment of adding microcrystalline cellulose (0.1%) or cellobiose (0.1%) to the liquid culture at I stage that 24 h before the time used as normal inoculants, which could shorten the spawning management period by three days, and increased the yield of first tidal mushroom by 4% and 11% respectively. The technology of shortening the spawning management period is constructed in this study, which could provide reference data for the oyster mushroom spawning bags producing enterprise in order to enhance the quality and increase the effect.

Keywords

Oyster Mushroom, Spawning Management Period, Lignocellulase, Microcrystalline Cellulose, Cellobiose

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

侧耳科真菌主要以分解植物残体的木质素与纤维素作为它们的营养源, 在自然界中对有机物的生态循环起重要作用, 多数种类可以食用或药用。侧耳属真菌已经被驯化成功栽培甚至做到了工厂化栽培。中国大陆是平菇主要的生产者, 占世界总产量的 87%, 主要栽培两个种: 糙皮侧耳(*Pleurotus ostreatus*, 俗称平菇)和白黄侧耳(*P. cornucopiae*, 美味侧耳) [1]。

平菇属于白腐真菌类。白腐真菌通过分泌漆酶、木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶、纤维素酶和半纤维素酶等降解植物生物质 [2]。西谷椰子(*Metroxylon sagu*)果实提取淀粉后的西米废弃物富含纤维质, 接种平菇菌种, 菌丝生长发酵基质具有很强的漆酶、纤维素酶和木聚糖酶活性 [3]。糙皮侧耳可分泌相关的水解酶(纤维素酶和半纤维素酶)和降解木素的氧化酶, 因而对各类农业和工业的木质纤维素废弃物具有高度的适应性 [4]。常用各种木质纤维素类废弃物(如玉米芯、甘蔗糖蜜、棉籽壳、废棉、甜菜浆和锯木屑)掺和米糠、麦麸和豆粕作为培养基料。平菇具有生长快速和生物学效率(即新鲜菇产量与基质干重比)高的特性 [5]。八种木质纤维素类基质栽培平菇试验结果是腐熟非洲白木(*Triplochiton scleroxylon*)木屑的菇产量 183.1 g/kg、稻草(151.8 g/kg)、香蕉叶(111.5 g/kg)、玉米秸秆(87.8 g/kg)、玉米皮(49.5 g/kg)、稻壳(23.3 g/kg)、新鲜非洲白木木屑(13.0 g/kg)和象草(0 g/kg), 表明前两者非常适合平菇生长, 产量最高 [6]。

设施园艺是农业产业结构调整中重点发展的优势产业和农业产业化的重要组成部分, 无土栽培是设施园艺的重要内容, 基质栽培是无土栽培发展的主要形式, 现已成为国内外现代化温室主要栽培模式。食用菌工厂化栽培无疑是一种典型的基质栽培。我国是农牧业大国, 拥有丰富的农林生物质资源, 其中固体类生物质主要有作物秸秆、畜禽类便、稻壳、薪材、锯末、甘蔗渣、平茬灌木和林业废弃枝条等农林废弃物, 其种类繁多、来源广泛、富含大量木质纤维素类物质, 这些非食用性生物质不仅贮量丰富, 而且生长快、易获得、价格低, 极具开发应用价值。可将木质纤维素糖化水解得到葡萄糖、木糖及阿拉伯糖等糖类用于微生物发酵培养基 [7] [8]。木质纤维素是地球上数量最丰富的廉价可再生生物质资源。木

质纤维素包括纤维素、半纤维素和多酚类的木质素 3 种高分子聚合物, 其质量占木质纤维素原料质量的 80%~95%, 植物茎叶是农业生物质资源木质纤维素的主要成分, 是世界上最丰富的可再生资源, 约占地球植物干重的 1/3~1/2。木质纤维素降解是规模化快速基质生产的关键[7] [9]。

木质纤维素类生物质常以水不溶性的高分子聚合物形式存在, 不能被直接被真菌细胞吸收利用, 真菌需要借助木质纤维素底物诱导胞内纤维素酶基因的大量诱导表达合成木质素氧化酶和纤维素酶等并分泌到生存环境中降解底物大分子。真菌产纤维素酶多为诱导酶, 诱导产纤维素酶的主要效应物是水溶性纤维素水解物质, 尤其是纤维二糖。乳糖、槐糖等碳源对产纤维素酶的也有诱导作用, 但诱导效果不尽一致。利用真菌产纤维素酶发酵生产中, 天然纤维素原料可以高效地诱导产酶。目前利用真菌大规模生产纤维素酶时, 选择微晶纤维素作为原料, 诱导真菌产纤维素酶的效果较好, 微晶纤维素虽然能够高产纤维素酶, 但成本较高, 酶的水解效果不高[9] [10]。

在以纤维素为主要碳源基质的菌菇生长过程中, 菌丝体产纤维素酶性能是影响菌菇质量的重要因素。利用酸解甜高粱渣水解液能作为产酶促进物质, 有效提高菌体产酶能力, 对鸡腿菇等食用菌的生长和生理调控可能具有良好的作用[11]。微晶纤维素和木质素磺酸钠碳源基质均能诱导香菇纤维素酶基因的表达, 且木质素磺酸钠可能具有协同诱导作用[12]。平菇菌丝在生长发育中通过分泌多种胞外酶将基质中的纤维素、木质素等水解成小分子物质作为主要碳源营养, 其生长分化与分泌胞外纤维素酶的能力大小密切相关[13]。平菇菌种在液体培养基中有很强的木质纤维素降解酶产生能力且产酶速度较快[2]。

平菇作为第三大商品菇, 其工厂化生产程度仍然较低。通常情况下, 一千克左右的平菇菌包发菌期长达 25~30 d。发菌期长无疑增加了发菌期管理成本, 是制约工厂化发展的重要因素。在菌包(棒)的工厂化规模生产环节, 可以从两条途径提高菌包的发菌速度。一是内因控制策略, 筛选廉价高效诱导物促进平菇菌丝体本身的木质纤维素降解酶大量合成分泌, 提高其对农林生物质的有效降解能力, 实现菌丝快速增长并转化合成菌菇蛋白; 二是外因控制策略, 先将富含木质纤维素生物质的基料用木质纤维素酶类降解处理, 成为平菇易于快速利用的营养物质, 制作的菌包发菌较快。本研究探索了 4 种木质纤维素酶诱导物缩短平菇菌包发菌期的规律, 研究结果能为平菇菌包生产和平菇栽培提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 材料与仪器

平菇 I 期液体菌种: 湖南三农科技有限公司菌种发酵罐中移取平菇 6543 品种的液体菌种 96 h 培养物, 比平时正常放罐接种提前 24 h。液体菌种专用培养基: 葡萄糖 3%, 玉米粉 4%, 酵母浸粉 0.5%, 麸皮 2%, 磷酸二氢钾 0.25%, 硫酸镁 0.1%, 维生素 B 0.01%, 消泡剂 0.05%。

菌包: 湖南三农科技有限公司自制, 以杂木屑(63%)、麦麸(15%)、棉籽壳(10%)、莲子壳(10%)和熟石灰(2%)为原料, 用食用菌菌袋窝口机制作平菇菌包, 规格是直径 10 cm × 高 25 cm, 每包重量 1.5 kg, 中央具接种孔。常压蒸汽灭菌 24 hr, 冷却至室温。

木质纤维素酶诱导物: 微晶纤维素(食品级, 湖州市菱湖新望化学有限公司); 羧甲基纤维素钠(食品级, 重庆力宏精细化工有限公司); 木质素磺酸钠(分析纯, 上海伊卡生物技术有限公司); D-纤维二糖(分析纯, 上海安耐吉化学有限公司)。木质纤维素酶诱导物母液制备: 分别称取微晶纤维素、木质素磺酸钠、D-纤维二糖溶于去离子水配制成 5% (w/v)母液, 羧甲基纤维素钠配制成 1% (w/v)母液。115℃ 高压蒸汽灭菌处理 30 min。

全自动高压蒸汽灭菌器(登冠), 电热恒温鼓风干燥箱, 立式恒温振荡器, 洁净工作台, 人工气候培养箱(上海一恒), 高速冷冻离心机(卢湘仪)。

2.2. 实验方法

2.2.1. 微晶纤维素对平菇菌包发菌期的影响

平菇 II 期液体菌种-W 制备: 取 3 瓶各装 100 ml I 期平菇液体菌种的三角瓶, 分别添加灭菌的 5% 微晶纤维素母液 11.1 ml、5.3 ml 和 2.1 ml, 使 I 期平菇液体菌种中添加的微晶纤维素终浓度依次为 0.5% (w/v)、0.25% (w/v) 和 0.1% (w/v)。将前述含不同微晶纤维素浓度的 I 期平菇液体菌种、未做处理的 I 期平菇液体菌种置于恒温振荡培养箱中, 25℃ 下 150 r/min 培养 24 h, 得到 II 期平菇液体菌种-W。

接种与发菌期管理: 取灭菌平菇菌包 8 个, 分别接种所制得的含 0.5% (w/v) 微晶纤维素、0.25% (w/v) 微晶纤维素、0.1% (w/v) 微晶纤维素处理的 II 期平菇液体菌种和未做诱导处理的 II 期平菇液体菌种, 接种量为每个菌包注入 25 ml, 其中 15 ml 接种到菌包的接种孔内, 10 ml 接种于菌袋开口端培养料的表面, 扎好袋口。各两重复。接种菌包置于 28℃ 恒温培养箱中, 袋口向上竖立放置, 黑暗培养。跟踪观察发菌过程, 记录发菌期时长。发菌期时长为培养起始至平菇菌丝体布满菌包整个料面为止。

2.2.2. 纤维二糖对平菇菌包发菌期的影响

平菇 II 期液体菌种-X 制备: 取 3 瓶各装 100 ml I 期平菇液体菌种的三角瓶, 分别添加灭菌的 5% 纤维二糖母液 11.1 ml、5.3 ml 和 2.1 ml, 使 I 期平菇液体菌种中添加的纤维二糖终浓度依次为 0.5% (w/v)、0.25% (w/v) 和 0.1% (w/v)。将前述含不同纤维二糖浓度的 I 期平菇液体菌种、未做诱导处理的 I 期平菇液体菌种置于恒温振荡培养箱中, 25℃ 下 150 r/min 培养 24 h, 得到 II 期平菇液体菌种-X。

接种与发菌期管理: 取灭菌平菇菌包 8 个, 分别接种所制得的含 0.5% (w/v) 纤维二糖、0.25% (w/v) 纤维二糖、0.1% (w/v) 纤维二糖处理的 II 期平菇液体菌种和未做诱导处理的 II 期平菇液体菌种, 接种方法和培养方法同 2.2.1。

2.2.3. 羧甲基纤维素钠对平菇菌包发菌期的影响

平菇 II 期液体菌种-S 制备: 取 3 瓶各装 100 ml I 期平菇液体菌种的三角瓶, 分别添加灭菌的 1% 羧甲基纤维素钠母液 11.1 ml、5.3 ml 和 2.1 ml, 使 I 期平菇液体菌种中添加的羧甲基纤维素钠终浓度依次为 0.1% (w/v)、0.05% (w/v) 和 0.02% (w/v)。将前述含不同羧甲基纤维素钠浓度的 I 期平菇液体菌种、未做诱导处理的 I 期平菇液体菌种置于恒温振荡培养箱中, 25℃ 下 150 r/min 培养 24 h, 得到 II 期平菇液体菌种-S。

接种与发菌期管理: 取灭菌平菇菌包 8 个, 分别接种所制得的含 0.1% (w/v) 羧甲基纤维素钠、0.05% (w/v) 羧甲基纤维素钠、0.02% (w/v) 羧甲基纤维素钠处理的 II 期平菇液体菌种和未做诱导处理的 II 期平菇液体菌种, 接种方法和培养方法同 2.2.1。

2.2.4. 木质素磺酸钠对平菇菌包发菌期的影响

平菇 II 期液体菌种-M 制备: 取 3 瓶各装 100 ml I 期平菇液体菌种的三角瓶, 分别添加灭菌的 5% 木质素磺酸钠母液 11.1 ml、5.3 ml 和 2.1 ml, 使 I 期平菇液体菌种中添加的木质素磺酸钠终浓度依次为 0.5% (w/v)、0.25% (w/v) 和 0.1% (w/v)。将前述含不同木质素磺酸钠浓度的 I 期平菇液体菌种、未做诱导处理的 I 期平菇液体菌种置于恒温振荡培养箱中, 25℃ 下 150 r/min 培养 24 h, 得到 II 期平菇液体菌种-M。

接种与发菌期管理: 取灭菌平菇菌包 8 个, 分别接种所制得的含 0.5% (w/v) 木质素磺酸钠、0.25% (w/v) 木质素磺酸钠、0.1% (w/v) 木质素磺酸钠处理的 II 期平菇液体菌种和未做诱导处理的 II 期平菇液体菌种, 接种方法和培养方法同 2.2.1。

2.2.5. 木质纤维素酶诱导物对平菇子实体产量的影响

前述四种处理的菌包在 28℃ 完成发菌满袋后, 将恒温培养箱温度调整到 18℃, 进行低温养菌 4 天,

各处理菌包表面出现原基。先将菌袋剪掉上端封口, 菌包浸泡自来水中吸水 10 分钟。排袋于室外树荫下出菇, 期间多阴雨天, 气温 14℃左右, 培养 4~5 天收获第一潮菇。称鲜菇湿重, 比较分析各处理的第一潮菇产量。

3. 结果与分析

3.1. 微晶纤维素对平菇菌包发菌期的影响结果

接种未做诱导处理的 II 期平菇液体菌种的菌包发菌期为 17 天; 接种 0.1% (w/v)微晶纤维素处理的 II 期平菇液体菌种的菌包发菌期为 13 天; 接种 0.25% (w/v)微晶纤维素和 0.5% (w/v)微晶纤维素处理的 II 期平菇液体菌种的菌包发菌期都为 14 天。

各样品在发菌期第 14 天菌丝体生长状况见图 1。图 1 中标号为(a)、(b)、(c)、(d)的样品分别为接种未做诱导处理的 II 期平菇液体菌种的菌包、接种 0.1% (w/v)微晶纤维素处理的 II 期平菇液体菌种的菌包、接种 0.25% (w/v)微晶纤维素处理的 II 期平菇液体菌种的菌包、接种 0.5% (w/v)微晶纤维素处理的 II 期平菇液体菌种的菌包。从图 1 中可看出经 0.1% (w/v)、0.25% (w/v)和 0.5% (w/v)微晶纤维素诱导处理的 II 期平菇液体菌种接种的菌包都已完成发菌, 而未做处理的菌包尚未完成发菌。



Figure 1. Photo of the effects of microcrystalline cellulose on the spawning period of oyster mushroom bags

图 1. 微晶纤维素对平菇菌包发菌期的影响结果照片

3.2. 纤维二糖对平菇菌包发菌期的影响结果

接种 0.5% (w/v)纤维二糖处理的 II 期平菇液体菌种的菌包发菌期为 13 天; 接种 0.1% (w/v)纤维二糖处理处理的 II 期平菇液体菌种的菌包发菌期为 14 天; 接种 0.25% (w/v)纤维二糖处理的 II 期液体菌种的菌包发菌期为 15 天; 接种未做诱导处理的 II 期平菇液体菌种的菌包发菌期为 17 天。

各样品在发菌期第 14 天菌丝体生长状况见图 2。图 2 中标号为(a)、(b)、(c)、(d)的样品分别为接种未做诱导处理的 II 期平菇液体菌种的菌包、接种 0.1% (w/v)纤维二糖处理的 II 期平菇液体菌种的菌包、接种 0.25% (w/v)纤维二糖处理的 II 期平菇液体菌种的菌包、接种 0.5% (w/v)纤维二糖处理的 II 期平菇液体菌种的菌包。从图 2 中可以看出仅有含 0.1% (w/v)和 0.5% (w/v)纤维二糖诱导处理的 II 期平菇液体菌种接种的平菇菌包已完成发菌。

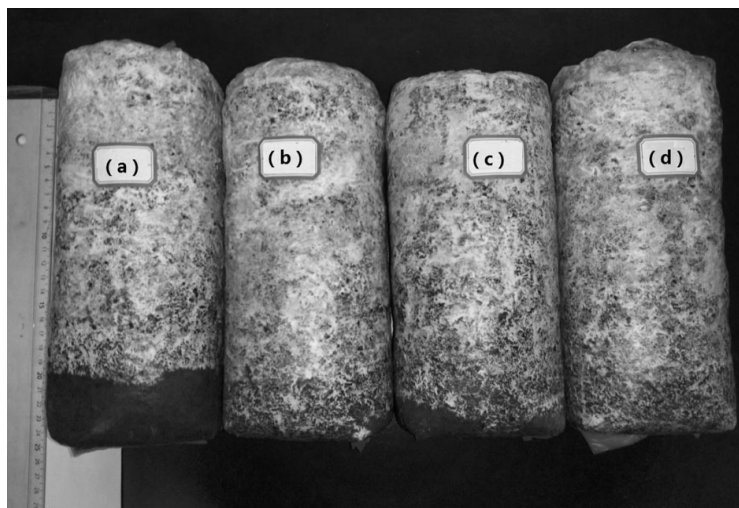


Figure 2. Photo of the effects of *D(+)*-cellobiose on the spawning period of oyster mushroom bags

图 2. 纤维二糖对平菇菌包发菌期的影响结果照片

3.3. 羧甲基纤维素钠对平菇菌包发菌期的影响结果

接种 0.02% (w/v)羧甲基纤维素钠处理的 II 期平菇液体菌种的菌包发菌期为 13 天；接种 0.05% (w/v)羧甲基纤维素钠和 0.1% (w/v)羧甲基纤维素钠处理的 II 期平菇液体菌种的菌包发菌期均为 16 天；接种未做诱导处理的 II 期平菇液体菌种的菌包发菌期为 17 天。

各样品在发菌期第 14 天菌丝体生长状况见图 3。图 3 中标号为(a)、(b)、(c)、(d)的样品分别为接种未做诱导处理的 II 期平菇液体菌种的菌包、接种 0.02% (w/v)羧甲基纤维素钠处理的 II 期平菇液体菌种的菌包、接种 0.05% (w/v)羧甲基纤维素钠处理的 II 期平菇液体菌种的菌包、接种 0.1% (w/v)羧甲基纤维素钠处理的 II 期平菇液体菌种的菌包。从图 3 中可看出仅有经 0.02% (w/v)羧甲基纤维素钠诱导处理的 II 期平菇液体菌种接种的平菇菌包完成发菌。



Figure 3. Photo of the effects of carboxymethylcellulose sodium on the spawning period of oyster mushroom bags

图 3. 羧甲基纤维素钠对平菇菌包发菌期的影响结果照片

3.4. 木质素磺酸钠对平菇菌包发菌期的影响结果

接种 0.5% (w/v)木质素磺酸钠处理的 II 期平菇液体菌种失去活性, 所接种菌包无菌丝体生长; 接种 0.1% (w/v)木质素磺酸钠和 0.25% (w/v)木质素磺酸钠处理的 II 期平菇液体菌种的菌包发菌期都为 13 天; 接种未做诱导处理的 II 期平菇液体菌种的菌包发菌期为 17 天。

各样品在发菌期第 13 天菌丝体生长状况见图 4。图 4 中标号为(a)、(b)、(c)、(d)的样品分别为接种未做诱导处理的 II 期平菇液体菌种的菌包、接种 0.1% (w/v)木质素磺酸钠处理的 II 期平菇液体菌种的菌包、接种 0.25% (w/v)木质素磺酸钠处理的 II 期平菇液体菌种的菌包、接种 0.5% (w/v)木质素磺酸钠处理的 II 期平菇液体菌种的菌包。从图 4 中可以看出, 仅有经 0.1% (w/v)和 0.25% (w/v)木质素磺酸钠诱导处理的 II 期平菇液体菌种接种的平菇菌包完成发菌, 而经 0.5% (w/v)木质素磺酸钠处理的 II 期平菇液体菌种已经失去活力。

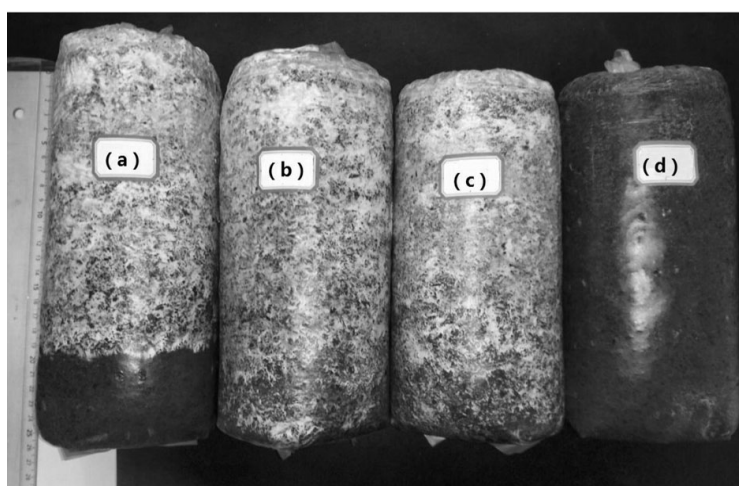


Figure 4. Photo of the effects of sodium ligninsulfonate on the spawning period of oyster mushroom bags

图 4. 木质素磺酸钠对平菇菌包发菌期的影响结果照片

3.5. 木质纤维素酶诱导物对平菇子实体产量的影响

菌包完成发菌后, 在适宜出菇的天气条件下室外培养 5 天, 出菇情况照片见图 5。采摘各菌包生长的第一潮平菇子实体总重量见表 1。由表 1 各处理与对照的比值数据可知, 经微晶纤维素(0.1%)、纤维二糖(0.1%)诱导处理所得子实体产量分别高出正常对照组的 4% 和 11%, 表明这两种处理方法不仅能缩短菌包发菌期, 还对菌包出菇有增产效应。经添加 0.1% 和 0.05% 羧甲基纤维素钠诱导处理后, 出菇量略低于对照组。木质素磺酸钠诱导处理后菇产量比正常对照显著降低, 甚至不出菇, 表明该处理不适宜应用于生产实际中。

Table 1. The fruit body yield of each treatment of the oyster mushroom bags and contrast analysis results

表 1. 各处理平菇菌包的子实体产量与比较分析

序号	诱导物名称	诱导物添加量	第一潮菇产量/g	与对照比值
1	微晶纤维素	0.1%	278.59	1.04
2	微晶纤维素	0.25%	233.64	0.87

Continued

3	微晶纤维素	0.5%	240.28	0.90
4	纤维二糖	0.1%	297.09	1.11
5	纤维二糖	0.25%	245.82	0.92
6	纤维二糖	0.5%	264.99	0.99
7	木质素磺酸钠	0.1%	165.97	0.62
8	木质素磺酸钠	0.25%	0	0.00
9	羧甲基纤维素钠	0.02%	212.4	0.79
10	羧甲基纤维素钠	0.05%	251.8	0.94
11	羧甲基纤维素钠	0.1%	259.36	0.97
12	正常对照	0	267.73	1.00



Figure 5. Photo of the fifth day during management of mushroom growing period of oyster mushroom bags placed in the open-air

图 5. 菌包室外出菇管理第 5 天的照片

4. 结论

未经处理的正常液体菌种接种菌包的发菌期为 17 天。发酵罐中培养平菇液体菌种达到一定的生物量, 在菌丝体能用于正常接种前 24 h 时, 向培养物体系中添加一种木质纤维素酶诱导物, 继续通气培养 24 h, 使菌丝体受到适宜浓度的木质纤维素酶诱导物的诱导刺激, 再用诱导处理后的液体菌种接种到灭菌菌包, 最后进行常规的发菌期管理。添加微晶纤维素的终浓度为 0.1%~0.5% (w/v), 能缩短平菇菌包发菌期 3~4 d; 添加纤维二糖的终浓度为 0.1%~0.5% (w/v), 能缩短平菇菌包发菌期 2~4 d; 添加羧甲基纤维素钠的终浓度为 0.02%~0.1% (w/v), 能缩短平菇菌包发菌期 1~4 d; 或者, 添加木质素磺酸钠的终浓度为 0.1%~0.25% (w/v), 能缩短平菇菌包发菌期 4 d。综合考虑菌包出菇转化率, 经各处理的出菇测试, 第一潮菇产量测定结果表明微晶纤维素(0.1%)和纤维二糖(0.1%)作为诱导剂, 既都能缩短菌包发菌 3 天, 又能提升菇产量

4%或 11%。

基金项目

湖南省自然科学基金项目(2020JJ6026); 湖南省教育厅资助科研项目(19K030)。

参考文献

- [1] Royse, D.J., Baars, J. and Tan, Q. (2017) Current Overview of Mushroom Production in the World. In: Zied, D.C. and Pardo-Giménez, A., Eds., *Edible and Medicinal Mushrooms: Technology and Applications*, John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119149446.ch2>
- [2] 谢君, 黄乾明, 冯蕾, 等. 白腐菌液体和固体培养产生木质纤维素降解酶的比较研究[J]. 菌物学报, 2007, 26(2): 266-272.
- [3] Kumaran, S., Sastry, C.A. and Vikineswary, S. (1997) Laccase, Cellulase and Xylanase Activities during Growth of *Pleurotus sajor-caju* on Sago Hampas. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, **13**, 43-49. <https://doi.org/10.1007/BF02770806>
- [4] 韩美玲, 安琪, 吴雪君, 等. 不同木质纤维素诱导对糙皮侧耳液体发酵产漆酶活性的影响[J]. 菌物学报, 2017, 36(3): 349-357.
- [5] Corrêa, R.C.G., da Silva, B.P., Castoldi, R., et al. (2016) Spent Mushroom Substrate of *Pleurotus pulmonarius*: A Source of Easily Hydrolyzable Lignocellulose. *Folia Microbiologica*, **61**, 439-448. <https://doi.org/10.1007/s12223-016-0457-8>
- [6] Obodai, M., Cleland-Okine, J. and Vowotor, K.A. (2003) Comparative Study on the Growth and Yield of *Pleurotus ostreatus* Mushroom on Different Lignocellulosic By-Products. *Journal of India Microbiology Biotechnology*, **30**, 146-149. <https://doi.org/10.1007/s10295-002-0021-1>
- [7] 冯海萍, 杨冬艳, 谢华, 等. 农业生物质资源木质纤维素及基质化利用研究进展[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(5): 144-147.
- [8] 李登龙, 李明源, 王继莲, 等. 木质纤维素预处理方法研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(19): 326-332.
- [9] 张飞, 白凤武, 赵心清. 丝状真菌纤维素酶合成诱导及转录调控[J]. 生物工程学报, 2016, 32(11): 1481-1495.
- [10] Ariff, I.N.M., Bahrin, E.K., Ramli, N., et al. (2019) Direct Use of Spent Mushroom Substrate from *Pleurotus pulmonarius* as a Readily Delignified Feedstock for Cellulase Production. *Waste and Biomass Valorization*, **10**, 839-850. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0106-8>
- [11] 沈建, 孙凌燕, 奚菊红, 等. 纤维素水解液对鸡腿菇纤维素酶诱导特征[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2007, 36(6): 63-67.
- [12] 蔡英丽, 刘伟, 陈连福, 等. 香菇菌丝在不同碳源诱导下纤维素酶基因表达模式研究[C]//中国菌物学会. 中国菌物学会 2015 年学术年会论文摘要集: 2015 年卷. 2015.
- [13] 龚娜, 刘国丽, 陈珣, 等. 玉米芯对平菇菌丝体生长和胞外纤维素酶活性的影响研究[J]. 中国食用菌, 2019, 38(1): 41-44.