DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2026.0329

高温瞬时灭菌制棒工艺对香菇生长发育的影响

刘金玲[1],赵路宽[1],丁 亮[1],樊佳豪[1],梁雅迪[2],
梁雪迪[1],师子文[1],王安建[3],孔维丽[1]

(1.河南省农业科学院食用菌研究所·农业农村部黄淮海食用菌种质资源评价与利用重点实验室 郑州 450002; 2.河南科技学院生命科学学院 河南新乡 453003; 3.河南省农业科学院农副产品加工研究中心 郑州 450002)

摘 要:本研究旨在评价双螺杆挤压瞬时灭菌灌装制棒工艺(HSCFP)对香菇(*Lentinula edodes*)生长发育的影响。以常规微高压蒸汽灭菌制棒工艺(MHSP)为对照,研究 HSCFP 对菌丝生长、出菇特征、子实体发育、营养成分及产量的影响。结果表明,HSCFP 菌棒菌丝前期定殖快、后期(22~45 d)慢,满袋时间较 MHSP 长 4.34 d,养菌期呼吸强度高于 MHSP 2.88~79.22 mg·kg^{-1}·h^{-1}。现蕾密度低于 MHSP 4.88~6.21 个·棒$^{-1}$,子实体农艺性状及营养成分无显著差异,但硬度、黏附性显著大于 MHSP 3.27~4.41 N 和 0.09 N·mm。HSCFP 接种至满袋期培养料 pH 显著低于 MHSP 0.28~1.20,满袋至转色完成水分含量显著高于 MHSP 2.55%~4.18%,转色完成菌棒质量较 MHSP 低 0.993 kg,且纤维素、半纤维素的降解率较 MHSP 分别高 0.87%和 3.17%,木质素的降解率较 MHSP 低 2.28%,但 S5 结束时,纤维素、半纤维素及木质素的降解率较 MHSP 分别低 8.14%、3.68%和 4.68%,整个生长周期木聚糖酶活性高于 MHSP 0~6.75 U·g^{-1},羧甲基纤维素酶、漆酶活性分别低于 MHSP 0.06~2.21 U·g^{-1}和 0.15~10.31 U·g^{-1}。综上所述,HSCFP 基质降解彻底,促进菌丝生长并改善子实体部分质构特性,但加速呼吸、损失较多养分,影响了产量,瞬时工艺有望通过选用较低呼吸强度香菇品种或改善工艺进而提高产量。

关键词:香菇;瞬时灭菌;菌丝;子实体;农艺性状

中图分类号:S646.1^{+}2 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-2871(2026)10-074-11

Effects of the high-temperature instantaneous sterilization stick-making process on the growth and development of *Lentinula edodes*

Liu Jinling[1], Zhao Lukuan[1], Ding Liang[1], Fan Jiahao[1], Liang Yadi[2], Liang Xuedi[1], Shi Ziwen[1], Wang Anjian[3], Kong Weili[1]

(*1. Institute of Edible Fungi, Henan Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Evaluation and Utilization of Edible Fungi Germplasm Resources in Huang-Huai-Hai Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhengzhou 450002, Henan, China; 2. School of Life Science, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, Henan, China; 3. Institute of Agricultural Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China*)

Abstract: To evaluate the effects of the high temperature instantaneous sterilization continuous filling process (HSCFP) on the growth and development of *Lentinula edodes*, this study used the conventional Micro-high pressure steam sterilization rod-making process(MHSP)as the control, compared the differences in mycelial growth, fruiting characteristics, fruiting body development, nutritional components, and yield under HSCFP, and analyzed the reasons for these differences. The results showed that in HSCFP sticks, mycelial colonization was rapid in the early stage but slowed in the later stage (22-45 d), and the time to full colonization was 4.34 days longer than that under MHSP. During the mycelial incubation period, respiration intensity was 2.88-79.22 mg·kg^{-1}·h^{-1} higher than that under MHSP. The primordium density was 4.88-6.21 per stick lower than that under MHSP. The agronomic traits and nutritional components of the fruiting bodies showed no significant differences from those under MHSP, but hardness and adhesion were significantly higher than those under MHSP by 3.27-4.41 N and 0.09 N·mm, respectively. From inoculation to full colonization, the pH of the HSCFP substrate was significantly 0.28-1.20 units lower than that under MHSP. From full colonization to completion of color change, the moisture content was significantly 2.55%-4.18% higher than that under MHSP. At completion of color

收稿日期:2026-04-23;**修回日期:**2026-07-17

基金项目:河南省重点研发专项(231111112500);河南省现代农业产业技术体系(HARS-22-08-S)

作者简介:刘金玲,女,助理研究员,主要从事食用菌栽培研究。E-mail:liujl1023@126.com

通信作者:孔维丽,女,研究员,主要从事食用菌育种及栽培机制研究。E-mail:kongweili2005@126.com

change, the stick mass was 0.993 kg lower than that under MHSP. At completion of color change, the degradation rates of cellulose and hemicellulose were 0.87% and 3.17% higher than those under MHSP, respectively, and lignin was lower than those under MHSP 2.28%; whereas at the end of S5, they were 8.14%, 3.68%, and 4.68% lower than those under MHSP, respectively. Throughout the entire growth cycle, xylanase activity was 0-6.75 $U \cdot g^{-1}$ higher than that under MHSP, while carboxymethylcellulase and laccase activities were 0.06-2.21 $U \cdot g^{-1}$ and 0.15-10.31 $U \cdot g^{-1}$ lower than those under MHSP, respectively. In summary, HSCFP can degrade the substrate more thoroughly, promote mycelial growth, and improve some textural properties of fruiting bodies, but it accelerates respiration, causes greater nutrient loss, and consequently affects yield. This instantaneous sterilization stick-making process has the potential to increase yield by selecting *L. edodes* varieties with lower respiratory intensity or optimizing the process.

Key words: *Lentinula edodes*; Short time sterilization; Mycelium; Fruiting body; Agronomic trait

香菇（*Lentinula edodes*）又名香蕈、香信、冬菇、花菇等，在分类上隶属于真菌界担子菌门（Basidiomycota）伞菌纲（Agaricomycetes）伞菌目（Agaricales）小香菇属（*Lentinula*），是一种单生或丛生于壳斗科阔叶倒木、树桩及枯木上的可食用大型真菌[1-2]。香菇是我国生产量最大的食用菌品种，也是重要的出口品种之一。2023 年我国食用菌产量约为 4 336 万 t，其中香菇产量占比最高，为 1304 万 t，占比 30.07%[3]。

香菇栽培过程中，通常采用湿热灭菌制棒工艺，经预湿、拌料、装袋、灭菌、冷却等流程制备菌棒。其中灭菌环节至关重要，灭菌质量直接影响菌棒成品率、菌丝定殖及产量[4-6]。湿热灭菌法，包括常压灭菌、微高压灭菌和高压灭菌[7]，其中以家庭为单元的散户采用常压蒸汽灭菌，温度在 95~105 ℃，工厂化制棒企业常采用微高压蒸汽灭菌制棒工艺（micro-high pressure steam sterilization rod-making process，MHSP），灭菌温度 115~118 ℃，具有温度高、压力大、自动化程度高、耗时长、投资大、能耗高等特点[8-9]，但对培养料大小、形态、物理性质等影响较小。双螺杆挤压瞬时灭菌灌装制棒工艺（high temperature short time sterilization continuous filling process，HSCFP）是通过将物料混合、搅拌、上料、破碎及阶段性高温灭菌和无菌灌装，从而达到菌棒连续制作的工艺[10-11]，通过物料在螺杆推进过程中的剪切、摩擦与瞬时压力释放，物料会发生一系列物理、化学变化，诸如淀粉糊化、蛋白质变性，以及酶类、有毒成分失活等，从而实现高效灭菌[12-13]。

刘莉娜等[14]研究发现，2 种灭菌制棒工艺均能达到很好的灭菌效果，其中瞬时灭菌工艺在营养成分保持、纤维素降解、物理性质调控方面的效果更佳，但没有涉及工艺对香菇栽培的研究。通过对香菇培养料双螺杆瞬时灭菌工艺进行参数优化，对 L808 进行了栽培适应性评价，但未涉及对子实体质构、品质、产量、生物学效率等农艺性状及培养料利用的全面分析[15]。本研究以生产中常规微高压灭菌制棒工艺为对照，研究高温瞬时灭菌制棒工艺对香菇菌丝生长发育过程、子实体质构、产量及生物学效率等农艺性状的影响，明确该工艺在香菇栽培中的优势和缺点，为进一步完善制棒工艺和筛选适配品种提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与菌株

木屑、麸皮、石膏购于西峡县孙氏菌业专业合作社；麸皮购自新乡市明阳面粉厂；参试香菇菌株夏 2 由河南省食用菌种质资源库收集保藏。栽培料配方为 81%木屑、18%麦麸、1%石膏。

1.2　方法

1.2.1　试验设计　栽培试验于 2024 年 9 月至 2025 年 5 月在河南省农业科学院河南现代农业研究开发基地进行。分别采用瞬时工艺和微高压工艺制作菌棒，菌袋规格均为 18 cm×55 cm×0.05 cm 的高密度聚乙烯，菌袋一端封口，一端扎口，培养料含水量 51%。瞬时工艺：先将木屑放入搅拌仓，加水搅拌 30 min，再加入其他辅料搅拌均匀，采用双螺杆瞬时灭菌灌装设备（河南省农业科学院农副产品加工研究中心设计定制）进行瞬时灭菌灌装，瞬时工艺参考魏书信等[15]优化后的参数，具体为原料初始水分含量 48.6%、喂料电机频率 27 Hz、III区温度 162 ℃、木屑润水时间 3 h、I区温度 90 ℃、II区温度 140 ℃、IV区温度 130 ℃、螺杆电机频率 21 Hz，无菌套袋配合自动化装袋机，出棒后在距离料棒底部 5 cm 处打孔并粘贴透气膜，制棒结束后，将料棒移至待接种间冷却。微高压工艺：木屑提前 10 d 预湿，制棒时将木屑、麸皮和石膏按 1.1 中比例加入搅拌机，搅拌 15 min，手工套袋配合自动化装袋机装袋，出棒后在距离料棒底部 5 cm 处打孔并粘贴透

气膜，料棒层架式摆放 2 层，置于高温高压蒸汽灭菌锅（型号：YKHMI，兰考华蕈食用菌设备有限公司）进行灭菌，设置灭菌温度 118 ℃，灭菌时长 2 h，待温度降至 70 ℃以下，移至待接种间冷却。待袋温降至 25 ℃左右时接种，采用无菌打穴接种，每棒 4 穴，穴径 3 cm，穴深 4 cm，接种量为 5%。每种制棒工艺各接种 240 袋，接种后培养袋放入 25 ℃发菌室培养至菌丝满袋。

菌丝长至满袋后进行第 1 次刺孔，每棒刺孔 6 排，孔针直径 0.6 cm，每排 8~10 个孔，孔深 5 cm，间隔 7 d 进行第 2 次刺孔，方法同第 1 次。转色条件：温度为 20~22 ℃，LED 条带灯光照射，室内相对湿度为 50%±2%，每间隔 2 h 通风换气 1 次，每次 10~15 min，保证良好通风条件。

转色完成后进行脱袋入棚出菇管理，大棚为日光温室型，加盖保温被和黑白膜，层架出菇，出菇时间为 2025 年 2 月 16 日 5 月 13 日，共采收 2 茬。

1.2.2　菌丝生长速度、长势测定　接种后至菌丝长满料袋，分别选取 2 种制棒方式的固定 10 个菌棒，以接种孔中心位置为测量基点，用直尺测菌丝沿两侧菌袋外周前沿距接种孔距离 L1、L2，结果取平均值，每 7 d 测量记录 1 次，直至 2 种制棒方式均长满菌袋。每次测定时，同步记录菌丝的色泽，菌丝浓密度、整齐度及满袋时间等，其中菌丝色泽分为洁白、白、黄等；菌丝浓密度参照申进文等[16]方法，分为菌丝浓密、较浓密和细密 3 个等级；菌丝整齐度参考孔维丽等[17]的方法，分菌丝尖端整齐、较整齐和不整齐 3 个等级。

1.2.3　菌棒呼吸强度测定　接种后至转色完成，分别选取 2 种工艺的固定 4 个菌棒，每天用果蔬呼吸测定仪（型号：3051H，浙江托普云农科技股份有限公司）进行呼吸强度测定，具体方法参考刘阳[18]的报道。每次重复测定 3 次，结果取平均值。根据公式计算呼吸强度。

$$\text{呼吸强度}\ (\mathrm{mg\cdot kg^{-1}\cdot h^{-1}}) = \frac{a\times\frac{44}{22.4}\times\frac{273}{273+T}-a_0\times\frac{44}{22.4}\times\frac{273}{273+T_0}}{m\times t}\times\frac{V}{1000}。$$

式中，a 为测定后 CO_2 浓度，单位为 $cm^3\cdot m^{-3}$；a_0 为起始 CO_2 浓度，单位为 $cm^3\cdot m^{-3}$；T 为测定后温度，单位为℃；T_0 为测定前温度，单位为 ℃；V 为容器总体积，单位为 dm^3；t 为测定所用时间，单位为 h；m 为待测菌棒质量，单位为 kg。

1.2.4　子实体质构　每 1 茬选取 10~15 朵具有代表性的成菇，在子实体的菌盖与菌柄连接处，切取尺寸为 1 cm×1 cm×1 cm 的立方体样品进行测试，采用质构仪（型号：TMS-PRO，美国 FTC 公司）对香菇子实体的硬度、黏附性、内聚性、弹性、胶黏性和咀嚼性 6 个指标进行测定，参考刘芹等[19]的方法，选用 P/75 探头，采用 TPA 测试模式。具体测定条件如下：测前、测试中和测后速度分别为 10.0、2.0 和 10.0 $mm\cdot s^{-1}$；压缩比设置为 40%，2 次压缩之间的间隔时间为 5 s；触发类型选择自动触发，触发力设置为 5.00 g。每组重复测定 10 次，结果取平均值。

1.2.5　农艺性状　记录每 1 茬菇蕾密度，每 1 茬选取 15~20 朵具有代表性的成菇，测量单菇质量、菌盖直径、菌盖厚度、菌柄长度、菌柄直径等农艺性状，并计算菇形指数，菇形指数定义为菌盖直径与菌柄长度的比值。待子实体成熟后称产量，并统计生物学效率。分析数据为所选取香菇子实体平均数据，参照 NY/T 2560－2014 测定主要农艺性状[20]，其中本研究测定的主要农艺性状包括：菌棒菌丝长速，即在菌棒中菌丝的生长速度；菌棒菌丝长势，指在菌棒中菌丝颜色、浓密度、整齐度；现蕾密度，即所有菌袋 2 茬（第一茬 F1、第一茬 F2）菇蕾数量/所有菌袋总数；单菇质量，即收获期间的单菇鲜质量；菌盖直径，即菌盖最长部位；菌盖厚度，即菌盖平均厚度，测量菌盖最厚部位；菌柄长度，即菌柄的平均长度；菌柄直径，即菌柄中部的宽度；产量，即所有菌袋前 2 茬成熟子实体鲜质量的总和；生物学效率，即所有菌袋 2 茬子实体鲜质量/所有菌袋基质干质量×100%。

1.2.6　子实体营养成分　选取八成熟 15~20 朵具有代表性的成菇，置于 60 ℃烘箱中烘干，称取 100 g 干菇样品，测定粗蛋白质、脂肪、粗多糖、氨基酸和总灰分含量。粗蛋白含量的测定参考 GB 5009.5－2016《食品中蛋白质的测定》[21]。脂肪含量测定依据 GB5009.6－2016《食品中脂肪的测定》[22]。多糖含量测定参考 NY/T1676－2008《食用菌中粗多糖含量的测定》[23]。总灰分含量测定依据 GB 5009.4－2016《食品中灰分的测定》[24]。氨基酸含量测定参照 GB 5009.124－2016《食品中氨基酸的测定》[25]。

1.2.7　培养料 pH、水分含量和菌棒质量　分别对 2 种制棒工艺在灭菌后（S0）、半袋期（S1）、满袋期（S2）、转色结束（S3）4 个时期随机取样各 5 个，将培养料揉碎混匀，称取 10 g 鲜样，加入 10 倍体积超纯水，混匀后磁力搅拌 30 min，静置 10 min，用 pH 计测定 pH。再称取 10 g 鲜样，利用水分测定仪测定

水分含量。同时，于灭菌后（S0）、半袋期（S1）、满袋期（S2）、转色结束（S3）4 个时期分别选取两种工艺的固定 5 个菌棒称质量。每个时期均测量 3 次，结果取平均值。

1.2.8　培养料木质纤维素含量及木质纤维素降解酶活性　分别对两种制棒工艺在灭菌后（S0）、半袋期（S1）、满袋期（S2）、转色结束（S3）、一茬结束（S4）、二茬结束（S5）6 个时期分别随机取样各 5 个菌棒，将培养料揉碎混匀，并冷冻粉碎，称取 5 g 样品粉末加入 25 mL 去离子水，上下振摇 30 min，5000 r·min^{-1} 4 ℃离心 10 min，收集上清液，采用紫外可见分光光度计（型号：UV2500，上海天美科学仪器有限公司）测定酶活性。参照 Yun 等[26]的方法测定羧甲基纤维素酶活性，参照 Qin 等[27]的方法测定漆酶、木聚糖酶活性，每个处理设 5 次重复。同时取 500 g 混匀后样品置于烘箱中 50 ℃烘干，磨碎并过 60 目筛，根据全自动纤维分析仪（型号：DELTAi，美国 ANKOM 公司）操作说明书测定纤维素、半纤维素和木质素含量。

1.3　数据处理

采用 Excel 2019 和 SPSS 15.0 进行数据处理和差异显著性分析。采用 GraphPad Prism 6.0 作图。

2　结果与分析

2.1　不同制棒工艺对香菇菌丝生长速度、生长势的影响

在菌棒培养阶段，两种制棒工艺对菌丝尖端生长速度存在明显的阶段性差异，结果详见表 1 和图 1。发菌前期（0~21 d），瞬时工艺的菌丝生长速度大于微高压工艺（7、14、21 d 生长速度分别为 0.10 和 0.07、0.39 和 0.28、0.69 和 0.54 cm·d^{-1}）。发菌中后期（22~45 d），微高压工艺生长速度超过并显

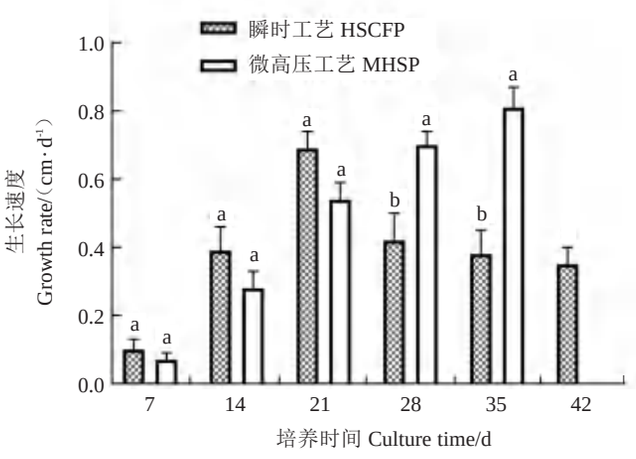
表 1　瞬时工艺和微高压工艺对香菇菌丝生长势的影响

Table 1　Effects of HSCFP and MHSP on the mycelial growth vigor of *L. edodes*

制棒工艺 Substrate preparation process	14 d 菌丝生长势 Mycelial growth vigor at 14 d	35 d 菌丝生长势 Mycelial growth vigor at 35 d	菌丝整齐度 Mycelium uniformity	满袋时间 Time to full colonization of bag/d
瞬时工艺 HSCFP	洁白，+++ Pure white, +++	部分黄色，+++ Partially yellow, +++	+	44.67±2.08 a
微高压工艺 MHSP	白，++ White, ++	白，++ White, ++	+++	40.33±1.52 a

注：1. 菌丝浓密度 +++表示菌丝浓密，++表示菌丝较浓密，+表示菌丝细密；2. 菌丝整齐度 +++表示菌丝尖端整齐，++表示菌丝尖端较整齐，+表示菌丝尖端不整齐；3. 同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: 1. Mycelium density: +++ indicates dense mycelium, ++ indicates relatively dense mycelium, and + indicates fine and sparse mycelium. 2. Mycelium uniformity: +++ indicates uniform mycelium tips, ++ indicates relatively uniform mycelium tips, and + indicates non-uniform mycelium tips. 3. Different lowercase letters in the same colum indicate significant difference at 0.05 level.



注：不同小写字母表示不同工艺同一培养时间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different processes at the same cultivation time at 0.05 level. The same below.

图 1　瞬时工艺和微高压工艺对香菇菌丝长速的影响

Fig. 1　Effects of HSCFP and MHSP on the mycelial growth rate of *L. edodes*

著高于瞬时工艺（28、35 d 生长速度分别为 0.70 和 0.42、0.81 和 0.38 cm·d^{-1}）。与微高压工艺相比，瞬时工艺的菌丝在发菌前期更加浓密、粗壮，后期菌丝黄白且尖端整齐度较差，而微高压工艺的菌丝表现较浓密、白，且尖端整齐度较好。最后，瞬时工艺的满袋时间（44.67 d）比微高压工艺（40.33 d）延迟 4.34 d。

2.2　不同制棒工艺对菌棒菌丝呼吸强度的影响

两种制棒工艺的菌棒菌丝呼吸强度结果见图 2，整个养菌期内两种工艺的菌棒呼吸强度均呈先升高后下降趋势，且在 2 次刺孔后 1~2 d 出现 2 个呼吸高峰。第 1 次刺孔后达到整个周期的最高值，瞬时工艺和微高压工艺的峰值分别为 330.82 mg·kg^{-1}·h^{-1} 和 251.68 mg·kg^{-1}·h^{-1}，第 2 个峰值分别为 233.24 mg·kg^{-1}·h^{-1} 和 216.42 mg·kg^{-1}·h^{-1}。瞬时工艺整个养菌期呼吸强度均大于微高压工艺，但两种制棒工艺在养菌不同阶段的呼吸强度差值存在差异，在发菌前期（0~22 d）呼吸强度差异较小（2.88~10.49 mg·kg^{-1}·h^{-1}），发菌中、后期（23~60 d）差异较大（11~79.22 mg·kg^{-1}·h^{-1}），发菌末期（60~70 d）差异逐渐缩小（9.95~12.52 mg·kg^{-1}·h^{-1}）。可见，制棒工艺不同，菌棒呼吸强度存在阶段性差异。

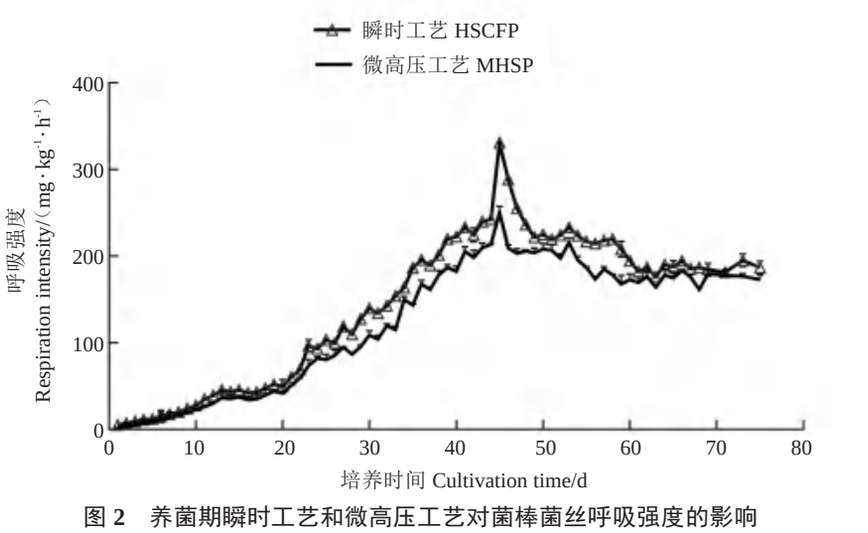


图 2　养菌期瞬时工艺和微高压工艺对菌棒菌丝呼吸强度的影响

Fig. 2　Effects of HSCFP and MHSP on the respiration intensity of mycelia during the incubation period

2.3　不同制棒工艺对香菇子实体现蕾密度的影响

两种制棒工艺的起始现蕾时间相当，但两种工艺的菌棒现蕾密度存在显著差异，结果见表 2。微高压工艺的第一茬和第二茬现蕾密度分别为 19.47、15.61 个•棒$^{-1}$，均显著高于瞬时工艺的 13.26、10.73 个•棒$^{-1}$。此外，两种工艺均呈现蕾密度随出菇茬次增加而下降的趋势。从现蕾密度来看，微高压工艺更有利于提高香菇现蕾密度。

表 2　瞬时工艺和微高压工艺对香菇现蕾密度影响

Table 2　Effects of HSCFP and MHSP on primordium density of *L. edodes*　（个·棒$^{-1}$）（pieces·bag^{-1}）

制棒工艺 Substrate preparation process	第一茬 F1 The first flush F1	第二茬 F2 The second flush F2
瞬时工艺 HSCFP	13.26 ± 5.03 b	10.73 ± 4.25 b
微高压工艺 MHSP	19.47 ± 6.76 a	15.61 ± 4.81 a

注：同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

2.4　不同制棒工艺对香菇子实体质构的影响

两种工艺对香菇子实体质构的影响对比中，各项指标在不同出菇茬次间存在一定差异，结果见图 3。在硬度指标上，第一、第二茬瞬时工艺的菌盖硬度显著高于微高压工艺，瞬时工艺硬度分别为 30.17 N 和 33.13 N，微高压工艺则分别为 26.90 N 和 28.72 N。这表明瞬时工艺更有利于形成高硬度的子实体。

黏附性在两茬次中均表现出显著差异，瞬时工艺的黏附性均高于微高压工艺（如第 1 茬分别为 0.22、0.13 N·mm）。这表明瞬时工艺下的香菇子实体表面特性或内部组分发生了改变，使其与接触物（如仪器探头）之间产生了更强的黏附力。在内聚性与弹性方面，两种工艺在各茬次间均无显著差异，表明两种工艺下的香菇子实体在抵抗自身结构破坏的能力（内聚性）以及受压后恢复变形的能力（弹性）方面较为接近。对于菌盖胶黏性与咀嚼

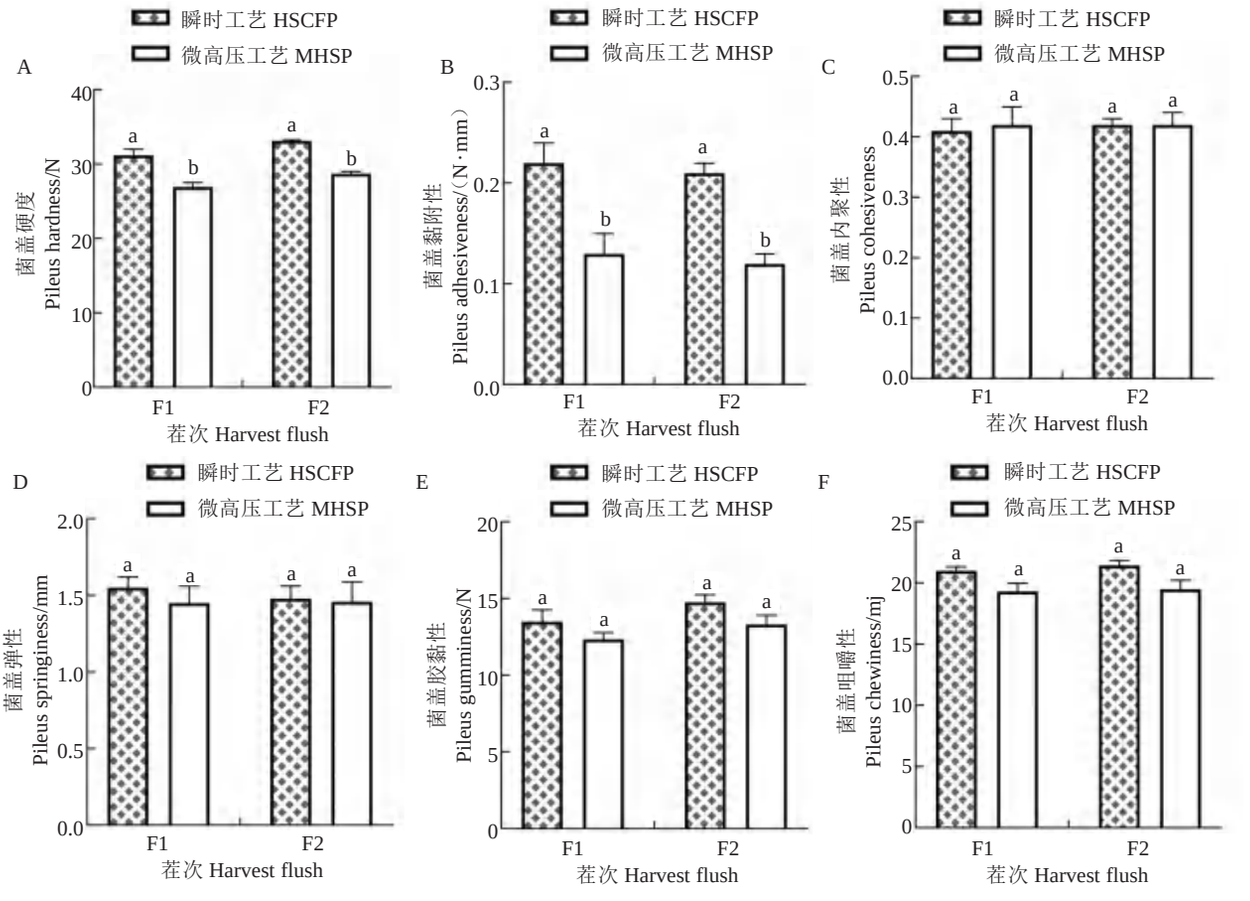


图 3　瞬时工艺和微高压工艺对香菇子实体质构的影响

Fig. 3　Effects of HSCFP and MHSP on the texture of *L. edodes* fruiting bodies

性，各茬次间同样无显著差异。胶黏性（硬度与内聚性的乘积）和咀嚼性（胶黏性与弹性的乘积）是综合评价食用口感的重要指标，其结果说明两种工艺对香菇的整体咀嚼感未产生决定性影响。

2.5　不同制棒工艺对子实体主要农艺性状的影响

两种制棒工艺对香菇不同出菇茬次主要农艺性状的影响详见表 3。从单朵质量看，瞬时工艺的香菇在各茬次中平均值均高于微高压工艺，其中第一茬（25.38、22.50 g）和第二茬（26.73、22.81 g）均呈现相同趋势，但组间差异均未达显著水平。这表明瞬时工艺可能在促进子实体生物量积累方面略有优势，但效应不显著。在菌盖性状方面，菌盖直径与厚度在各茬次间也无显著差异。值得注意的是，随着出菇茬次增加，两种工艺的菌盖直径和菌盖厚度均呈逐茬减小趋势，表明后期子实体发育程度可能逐渐减弱。菌柄长度与直径在不同工艺间同样无显著差异。各处理间菇形指数相近，且均在 1.12 左右波动，说明两种工艺对香菇的总体形态比例未产生显著影响。整体而言，两种工艺对香菇各茬次的主要农艺性状均未造成显著差异。

2.6　不同制棒工艺对香菇产量、生物学效率的影响

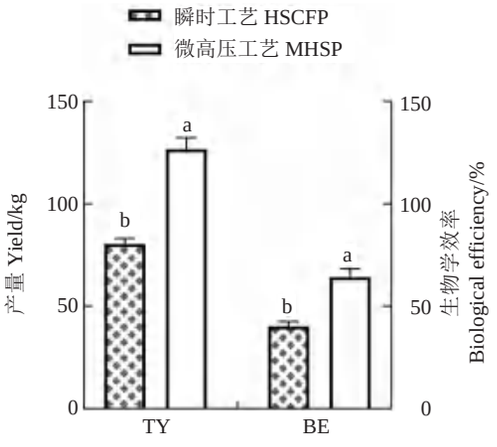
如图 4 所示，两种制棒工艺对香菇产量和生物学效率的影响差异显著。瞬时工艺产量为 80.44 kg，生物学效率为 40.22%；微高压工艺产量达

表 3　瞬时工艺和微高压工艺对子实体主要农艺性状的影响

Table 3　Effects of HSCFP and MHSP on the main agronomic traits of fruiting bodies

茬次 Fruiting flush	制棒工艺 The substrate preparation process	单朵质量 Single mass/g	菌盖直径 Pileus diameter/mm	菌盖厚度 Pileus thickness/mm	菌柄长度 Stipe length/mm	菌柄直径 Stipe diameter/mm	菇形指数 Mushroom shape index
第一茬 F1 The first flush F1	瞬时工艺 HSCFP	25.38±6.68 a	59.21±7.43 a	10.42±1.35 a	53.02±6.30 a	16.20±2.80 a	1.12±0.06 a
	微高压工艺 MHSP	22.50±7.88 a	57.79±6.46 a	9.80±1.64 a	51.90±5.81 a	13.80±3.02 a	1.11±0.09 a
第二茬 F2 The second flush F2	瞬时工艺 HSCFP	26.73±5.16 a	58.61±6.10 a	9.76±0.82 a	51.36±5.07 a	15.64±1.69 a	1.14±0.03 a
	微高压工艺 MHSP	22.81±6.24 a	57.24±6.78 a	9.16±1.24 a	50.72±5.42 a	15.23±2.06 a	1.13±0.05 a

126.66 kg，生物学效率为 64.13%。瞬时工艺的产量和生物学效率均显著低于微高压工艺。瞬时工艺在香菇的产量和生物学效率方面需进一步提高。



注：TY 表示总产量；BE 表示生物学效率。不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: TY stands for Total Yield; BE stands for Biological Efficiency. Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

图 4　瞬时工艺和微高压工艺对香菇产量和生物学效率的影响

Fig. 4　Effects of HSCFP and MHSP on yield and biological efficiency of *L. edodes*

2.7　不同制棒工艺对香菇子实体营养成分的影响

由图 5 可知，瞬时工艺子实体干样的粗蛋白含量为 28.20 mg·g^{-1}，粗脂肪含量为 1.80 mg·g^{-1}，粗多糖含量为 18.40 mg·g^{-1}，总灰分含量为 5.90 mg·g^{-1}。微高压工艺子实体干样的粗蛋白含量为 28.20 mg·g^{-1}，粗脂肪含量为 1.80 mg·g^{-1}，粗多糖含量为 17.40 mg·g^{-1}，总灰分含量为 5.60 mg·g^{-1}。数据分析显示，两种工艺样品的粗蛋白与粗脂肪含量没有差异。瞬时工艺的粗多糖和总灰分含量略高于微高压工艺，但均无显著差异。各指标在不同工艺间均未表现出显著差异，表明两种制棒工艺不影响香菇子实体的主要营养成分。

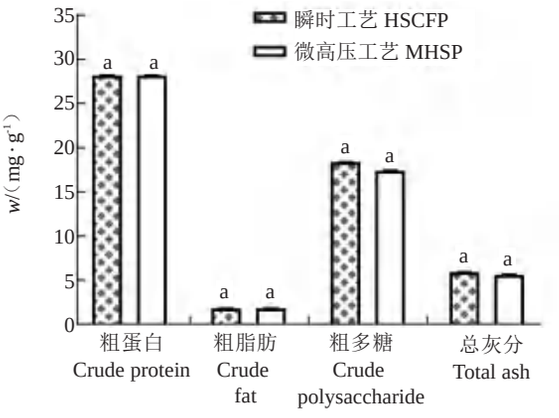


图 5　瞬时工艺和微高压工艺对香菇子实体营养成分的影响

Fig.5　Effects of HSCFP and MHSP on the nutritional composition of *L. edodes*

2.8　不同制棒工艺对香菇子实体氨基酸含量的影响

两种工艺的香菇子实体总氨基酸含量及各类呈味氨基酸含量如表 4 所示。瞬时工艺与微高压工艺的香菇干样总氨基酸含量分别为 19.62 和 19.82 mg·g^{-1}，无显著差异。从呈味氨基酸类别分析，两种工艺样品在鲜味氨基酸、甜味氨基酸、苦味氨基酸、芳香族氨基酸和无味氨基酸之间均无显著性差异。进一步分析氨基酸构成比例，瞬时工艺与微高压工艺的必需氨基酸与非必需氨基酸比值（EAA/NEAA）分别为 52.09%和 53.88%，必需氨基酸占总氨基酸比值（EAA/TAA）分别为 34.25%和 35.02%，差异均不显著。结果表明，两种工艺在保持香菇风味与营养品质方面具有等效性。

2.9　不同制棒工艺培养料木质纤维素含量及相关降解酶活性的变化

两种制棒工艺下，培养料中半纤维素、纤维素和木质素含量均随栽培进程呈现显著下降趋势（图 6-A~C），且微高压工艺的降解程度整体高于瞬时工艺。微高压工艺半纤维素含量整体略高于瞬时工

表 4　瞬时工艺和微高压工艺对子实体氨基酸含量的影响

Table 4　Effects of HSCFP and MHSP on the amino acid content of *L. edodes*

制棒工艺 Substrate preparation process	*w*（总氨基酸）Total amino acids content/（mg·g^{-1}）	*w*（鲜味氨基酸）Umami amino acid content/（mg·g^{-1}）	*w*（甜味氨基酸）Sweet amino acid content/（mg·g^{-1}）	*w*（苦味氨基酸）Bitter amino acid content/（mg·g^{-1}）	*w*（芳香族氨基酸）Aromatic amino acids content/（mg·g^{-1}）	*w*（无味氨基酸）Tasteless amino acid content/（mg·g^{-1}）	必需氨基酸/非必需氨基酸 EAA/NEAA/%	必需氨基酸/总氨基酸 EAA/TAA/%
瞬时工艺 HSCFP	19.62±0.07 a	7.14±0.03 a	5.22±0.02 a	4.49±0.03 a	1.40±0.01 a	1.37±0.02 a	52.09±0.03 a	34.25±0.03 a
微高压工艺 MHSP	19.82±0.06 a	6.79±0.04 a	5.35±0.02 a	4.74±0.02 a	1.52±0.02 a	1.42±0.03 a	53.88±0.04 a	35.02±0.04 a

艺，且两者均在 S2 后降解速率加快。对于纤维素含量，S0 时瞬时工艺与微高压工艺分别为 40.67% 和 42.22%，S5 时分别降至 29.59%和 27.28%。对于木质素含量，S0 时瞬时工艺与微高压工艺分别为 15.77%和 17.31%，S5 时分别降至 7.47%和 7.39%。转色完成后，瞬时工艺培养料纤维素、半纤维素的降解率较微高压工艺分别高 0.87%和 3.17%，木质素较微高压工艺低 2.28%。S5 结束时，瞬时工艺纤维素、半纤维素及木质素的降解率较微高压工艺分别低 8.14%、3.68%和 4.68%。

木质素和纤维素相关降解酶活性先升后降，峰值出现在不同生长阶段，且两种工艺间存在显著差异（图 6-D~F）。其中，木聚糖酶活性在瞬时工艺组 S4 达到峰值（15.40 U·g^{-1}），微高压工艺组在 S4 达到峰值（12.21 U·g^{-1}），S1~S4 时期瞬时工艺组木聚

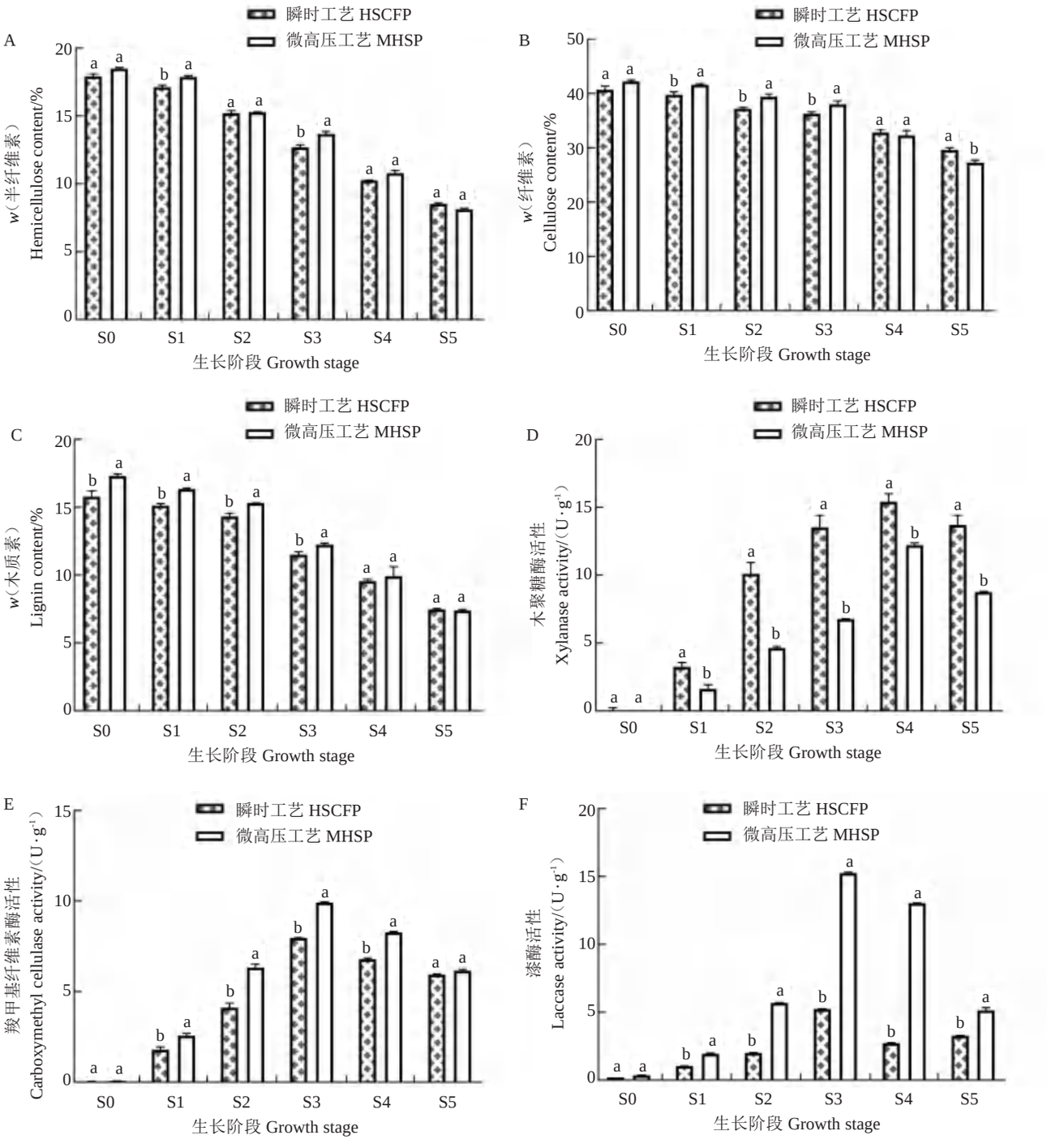


图 6　瞬时工艺和微高压工艺对培养料木质纤维素含量（A~C）及相关降解酶活性（D~F）的影响

Fig. 6　Effects of HSCFP and MHSP on substrate lignocellulose content（A-C）and associated enzyme activity（D-F）

糖酶活性显著高于微高压工艺，与半纤维素快速降解阶段趋势一致。两种制棒工艺的羧甲基纤维素酶活性均在S3达到峰值，瞬时工艺为7.97 U·g^{-1}，微高压工艺为9.91 U·g^{-1}，但S2~S4时期微高压工艺酶活性显著高于瞬时工艺组，与纤维素后期高效降解相匹配。漆酶活性均在S3达到峰值，瞬时工艺为5.25 U·g^{-1}，微高压工艺为15.26 U·g^{-1}，S1~S5时期微高压工艺组的漆酶活性显著高于瞬时工艺，与微高压工艺木质素降解率更高的结果相对应，这可能是木质素高效降解的关键因素。

2.10　不同制棒工艺对培养料pH、水分含量及棒质量的影响

两种制棒工艺下，培养料pH、水分含量及菌棒质量随栽培进程均呈现显著差异与规律性变化（图7）。两种制棒工艺对培养料pH影响差异显著，灭菌后（S0）瞬时工艺的pH显著下降，S0期瞬时工艺与微高压工艺pH分别为5.87和7.07，两种工艺pH均随栽培进程持续下降，且S0~S2时期微高压工艺pH均显著高于瞬时工艺，至S3期分别降至4.33和4.61，其中微高压工艺pH降幅（34.8%）大于瞬时工艺（26.2%），说明微高压工艺更易导致培养料pH下降。瞬时工艺与微高压工艺培养料水分含量在灭菌后（S0）分别为49.26%和50.57%，随菌丝生长，瞬时工艺水分含量持续上升，至转色末期（S3）达到56.74%，显著高于同期微高压工艺的52.56%，表明转色期瞬时工艺菌丝代谢更旺盛，导致基质中水分更多。随着菌丝生长、营养消耗，两种工艺菌棒质量持续降低，S0~S2期间菌棒质量在两种工艺间无显著变化，至S3期瞬时工艺质量为1.898 2 kg，显著低于微高压工艺的1.997 5 kg，对应质量损失率分别为22.5%和18.6%，表明瞬时工艺下培养料物质代谢与消耗速率更快。

3　讨论与结论

制棒工艺除了直接影响培养料的物料性质外[14-15]，还影响菌丝生长过程中的传质、传热、代谢、

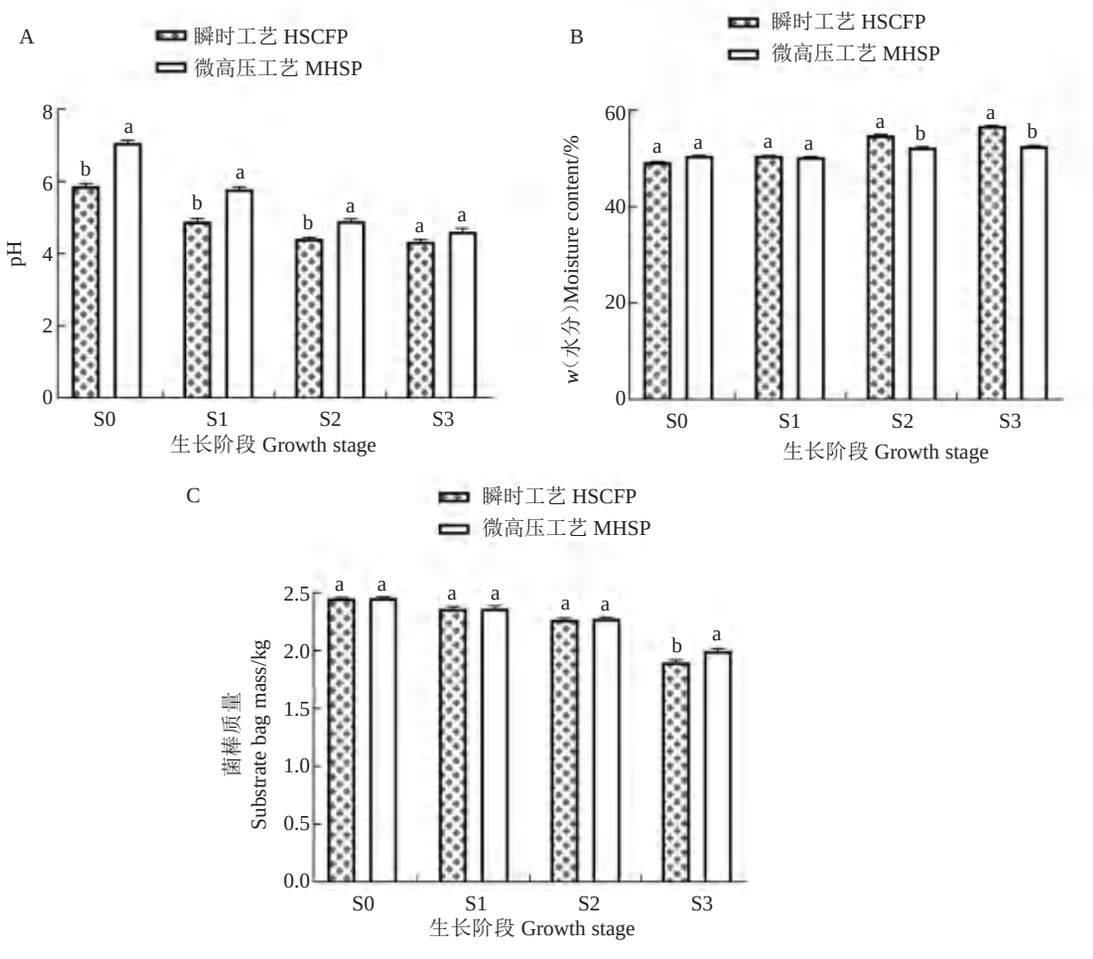


图7　瞬时工艺和微高压工艺对培养料pH（A）、水分含量（B）及菌棒质量（C）的影响

Fig. 7　Effects of HSCFP and MHSP on the pH（A）, moisture content（B）, and substrate bag mass（C）in culture substrates

产量和质量[28]。本研究结果表明，接种至转色完成，瞬时工艺的菌棒呼吸强度均高于微高压工艺，差值先增加后缩小，最小（接种后 1 d）为 2.88 mg·kg^{-1}·h^{-1}，最大（第一次刺孔后 2 d）为 79.22 mg·kg^{-1}·h^{-1}，表明瞬时工艺在发菌前期促进了菌丝生长和呼吸代谢，可能与该工艺培养料物理结构改变（如木屑纤维断裂、淀粉糊化）有关[12-13]。瞬时工艺菌丝长速长势前期具有明显优势，但中后期（28~42 d）菌丝出现部分黄色、生长速度下降和尖端不整齐，满袋时间较微高压工艺推迟 4.34 d，且瞬时工艺提高了子实体硬度和黏附性。两种工艺对各茬次子实体的单朵质量、菌盖、菌柄、菇形指数等主要农艺性状以及子实体营养成分均无显著影响，表明两种工艺对子实体形态与大小无决定性作用。但瞬时工艺的现蕾密度小于微高压工艺 4.88~6.21 个•棒$^{-1}$，总产量低于微高压工艺 46.22 kg，生物学效率低于微高压工艺 23.91 百分点，三者均显著低于微高压工艺。

转色结束，两种工艺培养料的水分含量和菌棒质量差异显著。许方方等[29]研究也发现相似结果，菌棒持水力增强，纤维素和木质素含量降低。笔者认为，瞬时制棒工艺的培养料膨化性质[14]和灭菌后低 pH 促进了前期菌丝生长，发菌阶段高水平的呼吸强度增加了基质含水量，影响了基质通气性和菌丝生长。余家洋等[30]通过在培养料中添加适量稻壳和无磷活性炭来提高培养料透气性，去除抑制物，有助于糙皮侧耳高产稳产。此外，香菇品种之间的菌龄、温型等存在差异[31]，探究适宜该工艺的香菇品种将有利于促进该工艺的进一步应用[32]。

于海龙等[33]发现，木屑颗粒度在 0~8 mm 内时，随木屑颗粒度增大，香菇菌丝生长速度与产量提高，其中 M3 组合具有潜在优势，适宜工厂化应用。瞬时工艺颗粒度减小、可溶性纤维含量增加、纤维保水力提高[34]、木质纤维素可降解性增强[35]，这些变化导致发菌前期养分被迅速消耗，而微高压制棒工艺更好地保持了木质纤维素等基质的物理结构[14]，从而为出菇期养分的缓释及后期生殖转化提供了保障。

综上，瞬时工艺能加速发菌前期（0~21 d）菌丝定殖并提高子实体硬度和黏附性，但菌丝呼吸强度在养菌期较常规微高压工艺高 2.88~79.22 mg·kg^{-1}·h^{-1}，中后期（28~42 d）菌丝长势下降，满袋时间延长 4.34 d，且总产量降低 46.22 kg，生物学效率降低 23.91 百分点。因此，瞬时工艺尚不能直接替代微高压工艺，未来可通过筛选低呼吸强度的短菌龄品种、优化工艺参数及调整培养料配方来提升产量和生物学效率，为香菇菌棒高效制作提供新途径。

参考文献

[1] 吕作舟.食用菌栽培学[M].北京：高等教育出版社，2006.

[2] 边银丙.食用菌栽培学[M].3 版.北京：高等教育出版社，2017.

[3] 中国食用菌协会.2023 年度全国食用菌统计调查结果分析[J].中国食用菌，2025，44（1）：120-129.

[4] 张永民，刘文晖，郭来民 . 香菇生产中应重视的几个技术环节[J].食用菌，2013，35（5）：34.

[5] 段庆虎，龚凤萍，竹玮，等.秋栽香菇接种后菌丝不吃料的原因分析与预防措施[J].食用菌，2023，45（1）：43-45.

[6] 朱香澔，段振华，刘艳，等.食用菌菌棒微波灭菌工艺优化[J].北方园艺，2018（23）：143-149.

[7] 王安建，刘丽娜，李顺峰，等.河南省香菇菌棒生产灭菌技术与装备现状及发展趋势[N].河南经济报，2026-01-15（011）.

[8] 李玉，尚晓冬，宋春艳，等.香菇菌棒传统生产模式与工厂化生产模式的比较[J].食药用菌，2017，25（2）：138-140.

[9] 夏宏志，李希政，路晓玉.食用菌菌种制作技术[J].农业与技术，2017，37（23）：21-23.

[10] 叶琼娟，杨公明，张全凯，等.挤压膨化技术及其最新应用进展[J].食品安全质量检测学报，2013，4（5）：1329-1334.

[11] Shevtsov A A，Vasilenko V N，Ojerelieva O N，et al.Research of forage microstructure as an object of short time technology[J].Kormoproizvodstvo，2011，46（2）：43-44.

[12] 杜冰，黄守耀，姜龙波，等.双螺杆挤压对绿豆皮中膳食纤维的改性研究[J].食品工业科技，2012，33（10）：170-173.

[13] Sobota A，Sykut- Domanska E，Rzedzii Z. Effect of extrusion- cooking process on the chemical composition of corn-wheat extrudates，with particular emphasis on dietary fibre fraction[J]. Polish Journal Food and Nutrition Science，2010，60（3）：251-259.

[14] 刘丽娜，李顺峰，崔国梅，等.两种灭菌方式对香菇培养料性质的影响[J].北方园艺，2024（3）：112-118.

[15] 魏书信，王安建，高帅平，等.香菇培养料的双螺杆挤压灭菌工艺优化[J].河南农业科学，2024，53（1）：172-179.

[16] 申进文，马浩佳，邹明，等.棉籽壳质量对平菇熟料栽培的影响初探[J].食用菌，2018，40（4）：24-25.

[17] 孔维丽，张玉亭，康源春，等.培养料含水量对平菇菌丝生长和生物学效率的影响[J].河南农业科学，2013，42（12）：110-111.

[18] 刘阳.香菇菌棒转色条件优化及转色期代谢产物分析[D].河南新乡：河南科技学院，2025.

[19] 刘芹，胡素娟，牛森园，等.不同干燥方式对香菇品质、质构和微观结构的影响[J].北方园艺，2023（11）：98-106.

[20] NY/T 2560－2014　植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南 香菇[S].

[21] GB 5009.5－2016　食品安全国家标准　食品中蛋白质的测定[S].

[22] GB 5009.6－2016　食品安全国家标准　食品中脂肪的测定[S].

[23] NY/T 1676－2008　食用菌中粗多糖含量的测定[S].

[24] GB 5009.4－2016　食品安全国家标准　食品中灰分的测定[S].

[25] GB 5009.124－2016 食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定[S].

[26] Yun H S，Leem H T，Kong W S，et al. The influence on cultivation characteristics of winter mushroom by carbon dioxide concentration[J]. Journal of Mushroom，2010，8(3)：131-136.

[27] Qin L，Sen Y N，Su J H，et al. Lignocellulose degradation pattern and structural change of the sawdust substrate and enzyme secretion by *Lentinula edodes* during its production[J]. Wood Science and Technology，2023，57：389-405.

[28] Phan C W，Sabaratnam V. Potential uses of spent mushroom substrate and its associated lignocellulosic enzymes[J]. Applied Microbiology and Biotechnology，2012，96(4)：863-873.

[29] 许方方，刘丽娜，李顺峰，等.高效瞬时灭菌技术对平菇栽培基质的影响[J].中国瓜菜，2024，37(7)：144-148.

[30] 余家洋，柴豪鹏，孔维丽，等.糙皮侧耳培养料高温瞬时灭菌工艺优化及应用[J].食用菌学报，2026，33(1)：11-20.

[31] 孔维丽，刘金玲，吴杰，等.香菇品种间菌龄、有效积温、温型差异性分析[J].中国瓜菜，2025，38(4)：99-106.

[32] 刘丽娜，李顺峰，王安建，等.短菌龄香菇菌棒生长过程中养分及理化性质的动态变化[J].中国瓜菜，2026，39(1)：116-125.

[33] 于海龙，高成，王秋兰，等.不同木屑颗粒度对工厂化压块香菇生长的影响[J].食用菌学报，2017，24(2)：5-9.

[34] Jing Y，Chi Y J. Effects of twin-screw extrusion on soluble dietary fibre and physicochemical properties of soybean residue[J]. Food Chemistry，2013，138(2/3)：884-889.

[35] Zheng J，Choo K，Rehmann L. The effects of screw elements on enzymatic digestibility of corncobs after pretreatment in a twin- screw extruder[J]. Biomass and Bioenergy，2015，74：224-232.