

姬松茸不同发酵方法栽培料的元素动态变化

李雪松^{1,2}, 孙达锋¹, 李建英¹, 刘绍雄¹, 罗孝坤², 张俊波¹,

岳万松¹, 张晓华¹, 汪祥飞³, 华 蓉¹

(1. 中华全国供销合作总社昆明食用菌研究所 昆明 650221; 2. 云南省食用菌产业发展研究院 昆明 650221;

3. 文山市滇珍菌业有限公司 云南文山 663000)

摘 要:以传统人工法和隧道发酵法的姬松茸发酵料为试验材料, 设置未发酵混合料、第 1 次发酵、第 2 次发酵 3 个阶段, 对发酵过程中的理化性质和元素动态含量进行跟踪研究, 以期为姬松茸的高效绿色规范栽培技术优化和重金属富集机制研究提供参考。依据农业行业标准检测 pH、电导率和水分、有机碳、总氮、总磷、总钾、铁、钙、镁、铜、锌、锰、镉、硒以及 6 种重金属(镍、铅、镉、铬、砷、汞)等含量指标, 采用 Tukey 法进行多重比较分析。结果表明, 两种发酵方式的栽培料 pH 和 C/N 均随发酵进程下降, 各元素含量总体呈上升趋势; 隧道发酵完成 2 次发酵后有机碳含量(w, 后同)(36.13%)、总氮含量(1.65%)及 C/N(21.97)均优于传统人工发酵(29.17%、1.17%、25.00); 在重金属含量方面, 传统人工发酵 2 次发酵后 Pb 含量达 113.67 mg·kg⁻¹, Ni、Pb、Cd、Cr、As 含量分别约为隧道发酵的 1.63、15.49、2、2.96、2.24 倍, 超出绿色食品相关标准限值。综上所述, 在姬松茸栽培料的发酵过程中, 采用隧道发酵技术, 可获得营养指标更优、重金属含量显著较低的栽培料, 有效降低重金属向子实体富集的风险, 为姬松茸高产优质栽培奠定基础。

关键词:姬松茸; 发酵料; 元素动态; 隧道式发酵技术; 传统人工发酵

中图分类号: S646

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)08-072-06

Dynamic change of elements in cultivation substrates of *Agaricus blazei* under different fermentation methods

Li Xuesong^{1, 2}, Sun Dafeng¹, Li Jianying¹, Liu Shaoxiong¹, Luo Xiaokun², Zhang Junbo¹, Yue Wang-song¹, Zhang Xiaohua¹, Wang Xiangfei³, Hua Rong¹

(1. Kunming Edible Fungi Institute of All China Federation of Supply and Marketing Cooperatives, Kunming 650221, Yunnan, China;

2. Yunnan Edible Fungi Industry Development Research Institute, Kunming 650221, Yunnan, China; 3. Wenshan Dianzhen Fungi Co.,

Ltd., Wenshan 663000, Yunnan, China)

Abstract: Using fermented substrates of *Agaricus blazei* prepared by traditional manual fermentation and tunnel fermentation as materials, three stages - unfermented mixed substrate, first fermentation, and second fermentation - were established. The physicochemical properties and elemental dynamic changes during the fermentation process were tracked and determined, aiming to provide a reference for optimizing green and efficient cultivation techniques of *A. Blazei* and investigating the mechanism of cadmium enrichment. In accordance with agricultural industry standards, a total of 21 indicators were measured, including pH, moisture content, electrical conductivity, organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, as well as Fe, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn, La, Se, and 6 heavy metals (Ni, Pb, Cd, Cr, As, Hg). and multiple comparisons were conducted using Tukey's method. The results showed that the pH and C/N of the cultivation substrates from both fermentation methods decreased with the fermentation progress, while the content of various elements generally exhibited an upward trend. After the second fermentation, the tunnel fermentation yielded superior organic carbon content (36.13%), total nitrogen content (1.65%), and C/N (21.97) compared to the traditional manual fermentation (29.17%, 1.17%, 25.00). Regarding heavy metals, after the second fermentation in the traditional manual fermentation, the Pb content reached 113.67 mg·kg⁻¹, and the contents of Ni, Pb, Cd, Cr, and As were 1.63, 15.49, 2, 2.96, and 2.24 times higher than those in the tunnel fermentation, respectively, significantly exceeding the limit values stipulated by relevant green food standards. In conclusion, during the fermentation process of *A. Blazei* cultivation substrates, the adoption of tunnel

收稿日期: 2025-12-31; 修回日期: 2026-03-06

基金项目: 云南省科技厅科技计划项目(202404BP090002); 云南省剑川县食用菌产业科技特派团(202404BI090003)

作者简介: 李雪松, 男, 助理研究员, 主要从事食药食用菌驯化、遗传育种方面的研究。E-mail: lixuesong1@qq.com

通信作者: 华 蓉, 女, 研究员, 现主要从事食用菌育种、栽培及品质评价等研究工作。E-mail: 626300629@qq.com

fermentation technology can produce substrates with better nutritional indicators and lower heavy metal content, effectively reducing the risk of heavy metal enrichment in fruiting body, and thereby laying a foundation for high-yield and high-quality cultivation of *A. blazei*.

Key words: *Agaricus blazei*; Fermentation substrate; Element dynamics; Tunnel fermentation technology; Traditional manual fermentation

姬松茸(*Agaricus blazei*)又名巴西蘑菇,属担子菌亚门伞菌目蘑菇科蘑菇属,原产于美国、巴西、秘鲁等国^[1]。姬松茸不但味道鲜美、营养丰富^[2],而且含有多糖、甾醇等活性物质,在降低血糖等方面有较好的效果。有研究报道,在15种食用菌中姬松茸所含多糖的抗肿瘤活性排名第一,说明姬松茸具有较高的药用价值^[3]。近年来,姬松茸由于营养丰富且具有较高的药用价值而受到广大消费者的欢迎。

我国对于姬松茸的研究起步较晚,1992年才由福建省农业科学院引进菌种,对其开展相关研究工作。目前,姬松茸的人工栽培技术较为成熟,可实现设施化的大棚层架栽培,在云南、福建等省份有较大的栽培面积。中国食用菌协会的统计数据显示,2023年姬松茸的全国总产量为7.23万t;其中,主要产区为云南省,产量为3.45万t,占全国总产量的47.72%^[4]。

培养料的发酵过程是利用培养料自身及微生物的生长代谢活动,将培养料降解并转化成腐殖质的过程,从而使培养料更适于食用菌的生长发育^[5]。在草菇(*Volvariella volvacea*)和双孢蘑菇(*Agaricus bisporus*)的研究中发现,培养料对食用菌的菌丝生长、农艺性状和产量有重要的决定作用^[6-7]。目前,国内的姬松茸栽培料发酵以简易农法发酵为主,依靠经验,工艺落后,规模小,配比不合理,操作不规范。其中,培养料的一次发酵受外界气候(温度、下雨、大风等)影响,容易导致发酵不均匀,二次发酵的巴氏消毒和维持温度不到位,导致培养料质量差、杂菌多、虫卵污染,严重影响产量。隧道发酵技术是将培养料置于保温隔热的隧道式发酵房中,通过强制通风系统精确调控温度、湿度、氧气等关键参数,实现发酵过程的人工控制,其优势在于能够有效控制培养料的温度和湿度,提高发酵效率,减少能源消耗,具有发酵时间短、发酵质量好、节约人工、规模生产、成本低等优点,已经在草菇、双孢蘑菇^[6-7]等食用菌生产中得到应用,正在姬松茸种植中逐步推广。

目前,对姬松茸栽培料的相关研究报道较

少^[8-10]。本研究比较了传统人工发酵法与隧道发酵法,有助于明确不同发酵方法的优势及不足,同时开展栽培料发酵过程中的元素含量动态监测,对优化姬松茸栽培料品质、规范栽培技术流程和探索姬松茸重金属的富集机制等具有重要意义。本文以姬松茸传统人工发酵法和隧道发酵法的发酵料为试验材料,对发酵过程中的理化性质和元素含量动态进行跟踪研究,以期对姬松茸的高效绿色规范栽培技术优化和姬松茸重金属富集机制等研究提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

本试验样品采集地点为云南省文山州文山市马塘镇塘子寨村姬松茸栽培基地,时间为2025年3—5月。所用姬松茸(*A. blazei*)发酵料的原料配方为甘蔗渣含量(w,下同)38%、玉米芯含量38%、牛粪含量16%、复合肥料含量1.5%、石灰含量1.5%、石膏粉含量1.5%、碳酸氢铵含量1.5%、尿素含量1%、碳酸钙含量1%、含水量60%。传统人工发酵法是指采用传统的人工堆料、翻堆及经验判断的方法来制备发酵料,其发酵料制作参考刘绍雄等^[11]报道的方法;隧道发酵法的发酵过程及参数参考李雪松等^[12]报道的姬松茸用栽培料的二次发酵制备法。传统人工法和隧道发酵法各取3个阶段的培养料,每个阶段3个样品重复。采样阶段为未发酵混合料、完成1次发酵料和完成2次发酵料3个阶段。采用五点采样法,随机选择发酵料堆,取0~10 cm处基质混合后用50 mL的离心管进行分装,带回实验室4℃保存备用。

1.2 方法

以中华人民共和国农业行业标准《有机肥料》(NY 525—2012)^[13]和《土壤中全硒的测定》(NY/T 1104—2006)^[14]为依据,检测指标包括pH、水分、有机碳(C)、总氮(N)、总磷(P)、总钾(K)、硒(Se)、镧(La,检测方法同Se)含量。铁(Fe)、钙(Ca)、镁(Mg)、铜(Cu)、锌(Zn)、锰(Mn)含量的检测以GB/T 34764—2017为依据^[15]。电导率参考NY/T 2118—2012测定^[16]。

重金属元素汞(Hg)、砷(As)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、镍(Ni)含量的参考 NY/T 1978—2022 测定^[17]。

1.3 数据处理

采用 DPS 9.01 处理数据,采用 Tukey 法对两组和多组数据进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 pH、水分含量和电导率的动态

发酵料的 pH、水分含量和电导率对姬松茸菌种的定殖、菌丝萌发及菌丝生长均具有一定的影

响。从表 1 中可以看出,传统人工发酵与隧道发酵相比,完成 2 次发酵后隧道发酵料的 pH 和水分含量更高,但水分含量与传统人工发酵无显著差异;隧道发酵料的 pH 在 8 以上,发酵较为充分,而传统人工发酵相比于未发酵的混合料 pH 显著下降。在培养料发酵的过程中,电导率可用来判断发酵料的发酵程度。隧道发酵无论是 1 次发酵还是 2 次发酵的电导率均显著高于传统人工发酵;其中,隧道发酵 2 次后电导率比未发酵的混合料增加了约 2.3 倍。说明隧道发酵的培养料质量好,稳定性高。

表 1 栽培料发酵过程中的 pH、水分含量和电导率的动态变化
Table 1 Dynamic changes in pH, moisture content, and electrical conductivity during the fermentation process of the cultivation substrate

阶段 Stage	pH	w(水分) Moisture content/%	电导率 Electrical conductivity/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
未发酵混合料 Unfermented mixture	8.14±0.01 b	73.33±1.77 a	459.67±1.53 e
传统人工发酵 1 次 Traditional first fermentation	7.71±0.03 e	70.50±2.69 a	662.67±5.03 d
传统人工发酵 2 次 Traditional second fermentation	7.91±0.02 d	70.87±2.43 a	819.67±3.79 c
隧道发酵 1 次 Tunnel first fermentation	8.38±0.01 a	69.43±4.01 a	1 141.33±9.07 b
隧道发酵 2 次 Tunnel second fermentation	8.03±0.02 c	75.90±0.95 a	1 528.00±4.58 a

注:同列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.

2.2 营养元素含量动态

碳和氮含量及比例在菌丝生长、原基形成和子实体发育等多个阶段均具有重要作用。从表 2 可以看出,隧道发酵和传统人工发酵碳氮比(C/N)的变化趋势是一致的,随着发酵过程的不断进行,C/N 不断下降,且均显著低于未发酵的混合料。在完成 2 次发酵后,传统人工发酵的 C/N 约为 25:1,隧道发酵的 C/N 约为 22:1。完成 2 次发酵后,隧道发酵法的发酵料的有机碳和总氮含量均显著高于传统

人工发酵法,说明隧道发酵法在发酵过程中保留了更多的营养。而 P 和 K 的变化与 C/N 相反,完成 2 次发酵后,隧道发酵法和传统人工发酵法的发酵料中总磷和总钾含量均显著高于未发酵混合料。

除 C、N、P 和 K 外,Fe、Ca、Mg 也是姬松茸生长发育中必不可少的营养元素。从表 3 中可以看出,每种发酵方法在 2 次发酵后 Fe、Ca、Mg 元素含量均比未发酵混合料增加。传统人工发酵法生产的发酵料中 Fe 含量,无论是 1 次还是 2 次发酵

表 2 栽培料发酵过程中的大量营养元素占比变化
Table 2 Variation in the proportions of major nutrient elements during the fermentation process of the cultivation substrate

阶段 Stage	w(有机碳) Organic carbon content/%	w(总氮) Total N content/%	C/N	w(总磷) P_2O_5 content/%	w(总钾) K_2O content/%
未发酵混合料 Unfermented mixture	30.03±1.20 bc	0.77±0.06 d	39.25±4.35 a	0.22±0.02 d	0.69±0.05 c
传统人工发酵 1 次 Traditional first fermentation	31.97±0.47 b	1.05±0.04 c	30.53±1.20 b	0.69±0.04 bc	0.79±0.03 b
传统人工发酵 2 次 Traditional second fermentation	29.17±0.45 c	1.17±0.10 c	25.00±1.84 bc	0.61±0.06 c	1.04±0.05 a
隧道发酵 1 次 Tunnel first fermentation	35.60±1.61 a	1.42±0.12 b	25.28±2.55 bc	0.75±0.03 b	0.88±0.02 b
隧道发酵 2 次 Tunnel second fermentation	36.13±0.50 a	1.65±0.06 a	21.97±0.52 c	1.02±0.02 a	1.02±0.00 a

表 3 栽培料发酵过程中的 Fe、Ca、Mg 元素含量动态变化			
Table 3 Dynamic changes of Fe, Ca, and Mg content during the fermentation process of the cultivation substrate			
阶段 Stage	w(Fe)/(mg·kg ⁻¹)	w(Ca)/(g·kg ⁻¹)	w(Mg)/(g·kg ⁻¹)
未发酵混合料 Unfermented mixture	611.00±75.97 d	3.60±0.12 d	0.56±0.02 e
传统人工发酵 1 次 Traditional first fermentation	13 999.33±796.16 a	25.47±0.12 c	6.63±0.02 a
传统人工发酵 2 次 Traditional second fermentation	5 877.00±396.04 b	26.17±0.31 c	1.98±0.02 c
隧道发酵 1 次 Tunnel first fermentation	1 316.33±125.96 cd	28.67±0.25 b	1.75±0.01 d
隧道发酵 2 次 Tunnel second fermentation	1 754.67±74.14 c	34.00±0.70 a	2.29±0.03 b

后,均显著高于隧道发酵法的发酵料和未发酵的混合料;两种发酵方法在完成 2 次发酵后的 Fe 含量均增加了 1.8 倍以上。Ca 含量在隧道发酵法完成 2 次发酵后,显著高于传统人工发酵法;两种发酵方法在完成 2 次发酵后的 Ca 含量均增加了 6 倍以上。Mg 含量在传统人工发酵 1 次后最高。

微量营养元素的检测包括 Cu、Zn、Mn、Se、

La。所有样品 Se 含量均低于 0.01 mg·kg⁻¹,含量较低。除此之外,Cu、Zn、Mn、La 在传统人工发酵法的发酵料中均检测到较高的含量,并显著高于隧道发酵法的发酵料和未发酵混合料。在完成 2 次发酵后,传统人工发酵法的发酵料相较于隧道发酵法的发酵料,Cu 含量高 1.88 mg·kg⁻¹,Zn 含量高 43.16 mg·kg⁻¹,Mn 含量高 129 mg·kg⁻¹,La 含量高 4.71 mg·kg⁻¹(表 4)。

表 4 栽培料发酵过程中的微量营养元素含量动态变化					
Table 4 Dynamic changes of trace nutrient elements content during the fermentation process of the cultivation substrate					
阶段 Stage	(mg·kg ⁻¹)				
	w(Cu)	w(Zn)	w(Mn)	w(Se)	w(La)
未发酵混合料 Unfermented mixture	3.18±0.40 c	18.13±0.55 c	97.47±6.57 d	<0.01	1.41±0.02 e
传统人工发酵 1 次 Traditional first fermentation	7.25±0.36 a	603.33±28.68 a	1223.67±61.78 a	<0.01	11.90±0.36 a
传统人工发酵 2 次 Traditional second fermentation	7.08±0.35 a	74.53±2.37 b	379.00±14.73 b	<0.01	8.39±0.04 b
隧道发酵 1 次 Tunnel first fermentation	3.66±0.53 c	23.03±3.26 c	151.33±14.98 d	<0.01	2.80±0.04 d
隧道发酵 2 次 Tunnel second fermentation	5.20±0.12 b	31.37±0.75 c	250.00±1.00 c	<0.01	3.68±0.06 c

2.3 重金属元素含量动态

在姬松茸栽培过程中,栽培发酵料和覆盖土壤是姬松茸吸收重金属元素的主要来源。从表 5 可以看出,传统人工发酵法和隧道发酵法均在不同程

度上检测到 6 种重金属(Ni、Pb、Cd、Cr、As、Hg),其中,尤其以 Pb 和 Cr 最为突出。在未发酵混合料中,除 Cr 含量较高(46.27 mg·kg⁻¹)外,其他 5 种重金属含量均低于 3 mg·kg⁻¹。传统人工发酵法在完

表 5 栽培料发酵过程中的重金属元素含量动态变化						
Table 5 Dynamic changes of heavy metal elements content during the fermentation process of the cultivation substrate						
阶段 Stage	(mg·kg ⁻¹)					
	w(Ni)	w(Pb)	w(Cd)	w(Cr)	w(As)	w(Hg)
未发酵混合料 Unfermented mixture	2.21±0.03 e	1.24±0.02 c	0.07±0.00 d	46.27±5.81 c	0.26±0.01 d	0.01±0.00 d
传统人工发酵 1 次 Traditional first fermentation	9.47±0.18 a	145.33±4.93 a	1.81±0.05 a	100.07±0.90 b	13.30±0.20 a	0.05±0.00 a
传统人工发酵 2 次 Traditional second fermentation	6.18±0.03 b	113.67±1.53 b	0.30±0.00 b	108.67±1.53 a	2.49±0.02 b	0.03±0.00 b
隧道发酵 1 次 Tunnel first fermentation	3.41±0.03 d	6.84±0.39 c	0.13±0.01 c	48.00±1.73 c	0.87±0.02 c	0.01±0.00 c
隧道发酵 2 次 Tunnel second fermentation	3.78±0.05 c	7.34±0.22 c	0.15±0.00 c	36.73±0.95 d	1.11±0.02 c	0.02±0.00 c

成1次发酵和2次发酵后,6种重金属的含量均显著高于隧道发酵法的发酵料;传统人工发酵法在完成2次发酵后,Ni、Pb、Cd、Cr和As含量是隧道发酵法在完成2次发酵后的1.63倍、15.49倍、2倍、2.96倍、2.24倍。这说明传统人工发酵法获得的姬松茸栽培发酵料中的重金属含量较高,不利于后续的姬松茸栽培生产。

3 讨论与结论

本研究以传统人工发酵法和隧道发酵法的姬松茸发酵料为试验材料,对发酵过程中的理化性质和19种元素含量动态进行跟踪研究。在发酵料的理化性质检测中发现,pH在发酵过程中降低,这与赵玉阳等^[10]的结果一致;但传统人工发酵法的发酵料pH下降幅度较大。pH在发酵过程中对氨氧化菌、硝酸盐还原菌、亚硝酸盐还原菌等菌群的生长和繁殖有显著影响^[18],姬松茸的菌丝生长喜好的pH偏碱性。而隧道发酵法的发酵料pH在8左右,有利于后续姬松茸菌种的定殖萌发和菌丝的生长。同时,传统人工发酵法和隧道发酵法发酵获得的培养料电导率均显著高于未发酵混合料,这与赵玉阳等^[10]的结果不同,这样的差异可能是发酵料的配方组成及比例不同和发酵过程的参数不一致导致的。本研究使用的发酵料的配方以甘蔗渣(38%)、玉米芯(38%)和牛粪(16%)为主,而赵玉阳等^[10]以麦秸(31%)、鸡粪(24%)、牛粪(24%)和玉米芯(15%)为主。此外,人工发酵法与隧道发酵法的水分含量无显著变化,而赵玉阳等^[10]的研究结果中,水分含量随着发酵进程不断下降,这可能与发酵过程中使用的技术参数不同有关。

在营养元素含量的动态跟踪中发现,隧道发酵法和传统人工发酵法的C/N的变化趋势是一致的,随着发酵过程不断推进,C/N不断下降,这与赵玉阳等^[10]的结果一致。而P和K元素的含量变化与C/N相反,隧道发酵法和传统人工发酵法均表现为含量增加,且均显著高于未发酵混合料。镁和钙元素含量在隧道发酵法和传统人工发酵法中均增加,可能是发酵料分解导致的。铁元素含量在传统人工发酵中较高,且在第1次发酵完成后检测到最高值,这可能是传统人工发酵中大量使用铁铲和锄头等工具进行发酵料的搅拌与翻堆导致的。在微量营养元素的检测结果中,Cu、Zn、Mn、La元素在传统人工发酵法中检测到较高的含量,并显著高

于隧道发酵法和未发酵混合料;这可能是由于传统人工发酵法的发酵时间较长,元素不断积累,或是人工搅拌与翻堆的过程中外源元素不断累加。

丁玲等^[19]以NY/T 749—2018《绿色食品食用菌》^[20]标准中的重金属含量为标准,得出培养基质中4种重金属(Pb、As、Hg、Cd)含量的临界值分别是7.34、1.74、0.07、0.11 mg·kg⁻¹。笔者在之前的研究中发现,姬松茸发酵料原材料中的Pb、Hg、As、Cd含量均超过了临界值,甘蔗渣、复合肥料和牛粪是原材料中重金属的主要来源^[12]。在本研究中,传统人工发酵法和隧道发酵法均不同程度地检测到6种重金属(Ni、Pb、Cd、Cr、As、Hg),其中以Pb和Cr的含量尤其突出。同时,传统人工发酵法的6种重金属含量均显著高于隧道发酵法,栽培料中的重金属含量较高不利于后续的姬松茸栽培生产。而传统人工发酵法相较于隧道发酵法重金属含量较高,可能是传统人工发酵的时间较长,重金属元素富集导致的。但本研究也存在着不足,在不同发酵方式及不同阶段的检测过程中仅检测了元素的总量,未检测和分析其生物有效形态,使得研究结果具有一定的局限性。在后续研究中应增加元素物质有效形态的检测和分析,同时与不同发酵料栽培的姬松茸产量、品质及子实体重金属含量等相关指标进行关联,更好地优化和规范姬松茸栽培技术。

综上所述,在姬松茸栽培料的发酵过程中,采用隧道发酵技术,可以获得pH和水分含量适宜、质量高、发酵效果好且重金属含量较低的栽培料,为后续高产、优质的姬松茸栽培打下基础。本研究有助于姬松茸栽培料隧道发酵技术的普及应用,为隧道发酵技术提供参考依据与数据支撑。同时,配合优良菌株^[21]、规范化栽培技术^[11]和病虫害防治技术^[22]等,可进一步促进姬松茸产业健康快速发展。

参考文献

- [1] 张树庭,赵铭.关于巴氏蘑菇拉丁学名的异议[J].中国食用菌,2003,22(5):3.
- [2] 华蓉,李雪松,刘绍雄,等.姬松茸新品种中菌姬松茸1号不同潮次子实体营养成分比较[J].中国食用菌,2022,41(12):16-20.
- [3] 水野卓,黄年来.姬松茸及药效[J].江苏食用菌,1994,8(3):29-31.
- [4] 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.
- [5] Nakasaki K, Hirai H, Mimoto H, et al. Succession of microbial

community during vigorous organic matter degradation in the primary fermentation stage of food waste composting[J]. Science of the Total Environment, 2019, 671: 1237-1244.

[6] 查磊, 全宗军, 李正鹏, 等. 隧道发酵技术在草菇工厂化栽培料制备的应用[J]. 北方园艺, 2022(22): 116-123.

[7] 张昊琳, 陈青君, 张国庆, 等. 不同基质培养料理化性状及其对双孢蘑菇农艺性状与产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(23): 4622-4631.

[8] 李月明. 以玉米芯和牛粪为主要发酵基质优化巴西菇发酵料的研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2015.

[9] 李文华. 发酵料组分与巴西菇子实体生长状况探索[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2017.

[10] 赵玉阳, 冯璠, 郝刘斌, 等. 姬松茸发酵培养料的理化性质及微生物群落研究[J]. 北方园艺, 2024(9): 70-77.

[11] 刘绍雄, 罗孝坤, 孙达锋, 等. 食用菌规范化栽培技术[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2021.

[12] 李雪松, 华蓉, 孙达锋, 等. 姬松茸栽培中培养料及土壤的元素含量动态变化分析[J]. 中国食用菌, 2024, 43(6): 85-90.

[13] NY 525—2012 有机肥料[S].

[14] NY/T 1104—2006 土壤中全硒的测定[S].

[15] GB/T 34764—2017 肥料中铜、铁、锰、锌、硼、钼含量的测定 等离子体发射光谱法[S].

[16] NY/T 2118—2012 蔬菜育苗基质[S].

[17] NY/T 1978—2022 肥料 汞、砷、镉、铅、铬、镍含量的测定[S].

[18] 吴娟. 过磷酸钙对猪粪堆肥碳、氮转化及减缓有机质降解技术机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.

[19] 丁玲, 别运清, 应正河. 姬松茸对四种重金属的富集能力及其培养基质重金属的临界值[J]. 中南农业科技, 2023, 44(11): 28-31.

[20] NY/T 749—2018 绿色食品 食用菌[S].

[21] 李雪松, 刘绍雄, 华蓉, 等. 一种姬松茸菌株 ZJJSR001 及其栽培方法: CN202210695980.6[P]. 2023-04-28.

[22] 李雪松, 孙达锋, 刘绍雄, 等. 畸形病害姬松茸栽培基质及土壤的微生物多样性研究[J]. 北方园艺, 2025(20): 99-107.