

# 不同基质配方对七妹羊肚菌生长及产量的影响

杜璨<sup>1</sup>, 王锋<sup>1</sup>, 李务焜<sup>1</sup>, 赵伟东<sup>2</sup>, 张元<sup>2</sup>

(1. 陕西农林职业技术大学 陕西杨凌 712100; 2. 渭南师范学院 陕西渭南 714000)

**摘要:**为系统探究不同基质配方对七妹羊肚菌(*Morchella eximia*)生长发育及产量形成的影响机制,选取草炭、杂木屑、蛭石、表土和草木灰作为基础基质原料,通过体积比例调配设计5种复合基质配方,并以园艺营养土设为对照(CK)。测定并分析各基质配方的理化性质、养分含量,羊肚菌菌丝生长状况、主要农艺性状及产量指标。结果表明,有机碳、速效磷、速效钾及碱解氮含量表现为:CK<JZ1<JZ2<JZ3<JZ4<JZ5。在羊肚菌生长表现方面,各配方处理间存在差异,其中JZ3处理( $V_{草炭}:V_{杂木屑}:V_{蛭石}:V_{表土}:V_{草木灰}=3:1:1:1:0.5$ )的菌丝生长势最优,且其菌盖直径、菌盖长度、菌柄直径、菌柄长度分别较CK提升183.87%、187.56%、221.88%、199.34%,单菇干质量、单菇鲜质量及干菇产量较CK显著提高,其中折合干菇产量增幅达649.80%。相关性分析表明,羊肚菌产量与电导率、碱解氮及速效磷含量呈显著正相关。综合研究结果证实,JZ3配方可通过优化基质环境与养分供应显著提升七妹羊肚菌的品质与产量,为羊肚菌工厂化栽培的基质筛选及农业废弃物资源化利用提供理论依据与技术支持。

**关键词:**羊肚菌;基质;生长;产量

中图分类号:S646.7

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)05-115-08

## Effects of different substrate formulations on the growth and yield of *Morchella eximia*

DU Can<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>1</sup>, LI Wukun<sup>1</sup>, ZHAO Weidong<sup>2</sup>, ZHANG Siyuan<sup>2</sup>

(1. Shaanxi A&F Technology University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Weinan Normal University, Weinan 714000, Shaanxi, China)

**Abstract:** To systematically investigate the effects of different substrate formulations on the growth, development, and yield formation of *Morchella eximia*, peat, hardwood chips, vermiculite, topsoil, and plant ash were selected as the basic substrate materials. Five composite substrate formulations were designed based on volumetric ratios, with horticultural nutrient soil used as the control (CK). The physicochemical property, nutrient content, mycelial growth, main agronomic traits, and yield indicators of each substrate formulation were measured. The content of organic carbon, available phosphorus, available potassium, and alkali-hydrolyzable nitrogen in each treatment followed the order: CK<JZ1<JZ2<JZ3<JZ4<JZ5. Regarding the growth performance of *Morchella eximia*, differences were observed among the formulations. Among them, the JZ3 treatment ( $V_{peat}:V_{hardwood\ chips}:V_{vermiculite}:V_{topsoil}:V_{plant\ ash}=3:1:1:1:0.5$ ) exhibited the best mycelial growth vigor. Compared with CK, the cap diameter, cap length, stipe diameter, and stipe length of JZ3 increased by 183.87%, 187.56%, 221.88%, and 199.34%, respectively. The dry mass per fruiting body, fresh mass per fruiting body, and dried mushroom yield of this treatment were significantly higher than those of CK, with the equivalent dried mushroom yield increasing by 649.80%. Correlation analysis showed that *Morchella eximia* yield was significantly positively correlated with electrical conductivity, alkali-hydrolyzable nitrogen content, and available potassium content. Comprehensive findings demonstrate that the JZ3 formulation significantly enhances the quality and yield of *Morchella eximia* by optimizing the substrate's physicochemical structure and nutrient supply, providing a theoretical basis and technical support for substrate selection and agricultural waste resource utilization in the industrialized cultivation of *Morchella*.

**Key words:** *Morchella*; Substrate; Growth; Yield

收稿日期:2025-09-15;修回日期:2025-12-20

基金项目:杨凌职业技术学院2024年陕西省高校青年创新团队培育项目(TD2024-001);陕西农林职业技术大学2025年“一师一品”创新团队项目(SP2025-08);陕西省农业农村厅农业关键核心技术攻关项目(2025NYGG010);陕西省科技厅重点研发计划项目(2023-YB-NY-092)

作者简介:杜璨,女,副教授,主要从事食用菌栽培技术研究。E-mail:ducan616@163.com

羊肚菌(*Morchella* spp.)隶属于子囊菌门,是珍稀食药真菌,其菌盖表面分布着蜂窝状凹陷纹理,这种独特的褶皱结构既有利于孢子扩散,又因其形似反刍动物的胃壁褶皱而得名<sup>[1]</sup>。作为一种珍贵的食药真菌,羊肚菌不仅因脆嫩的口感和独特的风味备受青睐,还因其富含多种必需氨基酸、维生素及生物活性物质而受到广泛关注<sup>[2-3]</sup>。研究表明,羊肚菌中的活性成分具有明显的抗菌及免疫调节等药理作用<sup>[4-5]</sup>,在食品、医药及保健品领域具有广阔的应用前景。近年来,随着人们对天然产物需求的增加,羊肚菌的市场价值不断提升,其开发利用潜力也日益凸显。

羊肚菌栽培技术的发展经历了从野生资源采集到人工驯化栽培的漫长过程<sup>[6-7]</sup>。我国羊肚菌栽培技术发展以2012年为重要转折点,在此之前,以仿生栽培为主,自2012年起,随着外源营养袋技术的突破与创新,羊肚菌栽培正式进入商业化生产阶段,产业规模迅速扩大<sup>[6-8]</sup>。据不完全统计,全国羊肚菌栽培面积从2012年的约70 hm<sup>2</sup>增长至2023年的2.7万 hm<sup>2</sup>,增幅近400倍<sup>[9-10]</sup>,羊肚菌现已成为我国最具市场潜力的食用菌栽培品种之一。然而,目前国内羊肚菌栽培主要采用大田栽培<sup>[11]</sup>、大棚栽培<sup>[12]</sup>和林地栽培<sup>[13]</sup>等室外栽培模式,这些模式易受环境因素制约,在极端气候条件下常出现产量不稳定、品质下降甚至绝收等问题,严重制约了产业的可持续发展。因此,探索环境可控的室内工厂化栽培模式,已成为推动羊肚菌产业高质量发展的必然选择。

羊肚菌工厂化栽培研究的重要突破始于20世纪80年代初期,真菌学家Ower<sup>[14]</sup>团队率先利用环境可控培养装置,首次实现羊肚菌子实体全人工诱导发育,随后其团队揭示了菌核是调控菌丝体向生殖生长阶段转化的关键。美国Diversified Natural Products Corporation(DNP)公司采用此技术初步实现了羊肚菌的工厂化栽培,但由于多种原因最终未能规模化推广<sup>[15]</sup>。近几年,越来越多的国内学者开始关注羊肚菌室内栽培技术创新与生产应用,主要集中在对羊肚菌的生长环境调控研究方面<sup>[16-18]</sup>,而关于栽培基质的研究相对较少。沈彤等<sup>[19]</sup>研究表明,在栽培基质中添加香菇菌糠栽培羊肚菌有利于提高羊肚菌子实体的产量和营养价值。Huang等<sup>[20]</sup>研究表明,在栽培基质中添加草木灰能够改变土壤理化性状,提升羊肚菌的产量和品质。笔者团队前期研究发现羊肚菌在施用草木灰、草炭的土壤中生

长情况良好,产量相对较高<sup>[10]</sup>,因此,笔者以草木灰、草炭等为原料,开展羊肚菌基质配方优化试验,探索基质栽培羊肚菌的技术要点,为我国羊肚菌工厂化发展及实现农业副产物高值化利用提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

本研究于2024年11月20日至2025年3月28日在陕西农林职业技术大学秦岭食用菌产业研发中心人工气候室开展。人工气候室内配备了多层养菌出菇架,温度调控使用格力吸顶式空调,最低可设定室内温度为16℃;光照采用LED灯带进行补光;湿度控制使用工业雾化加湿装置;室内空气调控采用新风系统进行换气。

### 1.2 材料

1.2.1 供试菌种 试验所用菌种为七妹羊肚菌8号,其栽培种由杨凌瑞草沐菌业科技有限公司提供。栽培种培养基配方(w):麦粒40%、玉米芯50%、棉籽皮8%、石灰1%、石膏1%;培养基含水量控制在65%,pH值为8。

1.2.2 外源营养袋 由杨凌瑞草沐菌业科技有限公司提供。配方(w)为:麦粒75%、玉米芯18%、稻壳5%、石膏1%、碳酸钙1%,含水量控制在62%~64%,pH为自然值。营养袋采用折宽12 cm×长24 cm的聚丙烯塑料袋包装,每袋湿质量为500 g。

1.2.3 基质原材料 试验栽培基质原材料为草炭、杂木屑、蛭石、表土和草木灰。其中,杂木屑来源于本地,草炭(pindstrup mosebrug A/S)、草木灰和蛭石均由陕西青禾慧丰农业科技有限公司提供,杂木屑经充分腐熟灭菌后使用。

### 1.3 试验设计

以草炭、草木灰为主要原料配置栽培基质和覆土基质,不同基质配方见表1。试验以园艺营养土(陕西青禾慧丰农业科技有限公司研制,主要成分

表1 不同基质配方(体积比)

处理 Treatment	草炭 Peat	杂木屑 Hardwood chips	蛭石 Vermiculite	表土 Topsoil	草木灰 Plant ash
CK	园艺营养土 Garden potting soil				
JZ1	1	1	1	1	0.5
JZ2	2	1	1	1	0.5
JZ3	3	1	1	1	0.5
JZ4	4	1	1	1	0.5
JZ5	5	1	1	1	0.5

为草炭、蛭石、珍珠岩、沙土)为对照(CK)。采用完全区组设计,栽培基质配比(JZ1~JZ5)及对照相互组合,共6个组合,采用带孔塑料栽培筐(480 mm×345 mm×270 mm)模式种植,每个处理3次重复,每次重复1筐,试验过程中各处理管理措施一致。

#### 1.4 栽培管理

**1.4.1 播前工作** 使用高压水枪彻底清洁人工气候室,随后封闭空间进行熏蒸消毒。具体方法为:每 $\text{m}^3$ 使用40%甲醛溶液10 mL与高锰酸钾5 g,保持密闭状态30 min。消毒完成后,启动排风系统进行通风换气。

**1.4.2 播种管理** 于2024年12月19日开展栽培试验。试验使用带孔塑料筐,将其置于栽培架上,筐内均匀铺设栽培基质,控制厚度为20 cm。取500 g羊肚菌菌种,轻轻揉散后均匀撒播于基质表面,随后覆盖一层厚约2 cm的基质。播种完成后立即补水,使基质含水量维持在25%~30%,最后覆盖具备透气孔的黑色地膜,以保持湿度并促进菌丝快速生长。

**1.4.3 外源营养袋放置** 播种后7~15 d是添加外源营养袋的最佳时机。本试验于2024年12月29日放置营养袋,每个栽培筐内放置2袋。营养袋在进入人工气候室前需用75%酒精对外袋进行消毒。放置时,使用消毒过的小刀在袋侧割开2条5 cm长的口,割口朝下均匀放置在菌床表面,并轻轻按压以确保与基质紧密接触,防止杂菌侵入,同时不影响菌丝生长。

**1.4.4 菌丝生长期管理** 羊肚菌播种后的菌丝生长分为发菌期和养菌期2个阶段。

发菌阶段为播种后2~9 d,菌床表面可见菌丝和菌霜,此阶段基质含水量为30%左右,保持人工气候室内相对湿度为50%~70%,温度为14~16℃,CO<sub>2</sub>浓度不超过0.15%,此阶段无需光照。

养菌期从外源营养袋放置至菌丝分化形成原基,此阶段无需光照,人工气候室温度应控制在18~20℃,空气相对湿度50%~70%,CO<sub>2</sub>浓度不超过0.15%,基质含水量约30%。若发现部分筐内气生菌丝过多或“菌霜”过厚,可通过增加风量或调节局部湿度来促使菌霜消退。

**1.4.5 出菇期管理** 培养50 d后,若栽培筐中菌霜已消退,需移除所有外源营养袋。此时,白天人工气候室温度应保持在16~18℃,LED灯带每天开启8 h,夜间人工气候室温度应保持在10~12℃,关闭LED灯带。加湿器早晚各开启30 min。当基质表

面出现少量原基时,开始对塑料筐喷水,并控制人工气候室空气相对湿度在80%~90%,CO<sub>2</sub>浓度不超过0.12%。

**1.4.6 成熟采收** 2025年3月上旬至下旬,原基逐渐发育成羊肚菌子实体,颜色由灰黑转为浅灰或浅黄褐,菌盖表面蜂窝状凹陷展开,达到八九成熟时即可采收。每天早晚各采收1次,确保采收后基质内无菇柄残留。

#### 1.5 测定项目及方法

**1.5.1 基质理化性质测定** 在每个基质区域选取5个采样点,每个处理3次重复,将采集的样品充分混合后置于通风阴凉处自然风干。风干后的样品经研磨处理,过40目筛网,随后测定各处理的电导率(EC)和pH值<sup>[21]</sup>,容重(BD)和孔隙度的测定方法参照孙军利等<sup>[22]</sup>的方法,其中水气比是指土壤持水孔隙度与通气孔隙度的比值,反映土壤保水与通气的平衡能力,计算公式为:

$$\text{水气比} = \frac{\text{持水孔隙度}}{\text{通气孔隙度}}$$

采用碱解扩散法测定碱解氮(AN)含量<sup>[21]</sup>;采用0.5 mol·L<sup>-1</sup>碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定速效磷(AP)含量<sup>[21]</sup>;采用醋酸铵浸提-火焰光度法测定速效钾(AK)含量<sup>[21]</sup>;采用重铬酸钾氧化法测定有机碳(OC)含量<sup>[21]</sup>。

**1.5.2 羊肚菌菌丝生长观测指标与分级标准** 对羊肚菌菌丝在栽培基质中的长势、分生孢子产量以及绿霉污染情况的观测采用以下标准进行分级。

菌丝长势分为3个等级:“+”(菌丝长势弱)指菌丝仅在接种点周围少量生长,肉眼可见稀疏、纤弱的白色菌丝,未能形成优势种群,基质表面大部分区域未被菌丝覆盖(覆盖率<30%);“++”(菌丝长势一般)表现为基质表面有连续的、密度中等的白色菌丝覆盖,覆盖率在30%~70%,菌丝活力旺盛,肉眼观察较为浓密;“+++”(菌丝长势较强)则指基质表面形成浓密、绵厚的白色菌丝层(覆盖率>70%),菌丝活力极强,完全占据基质成为优势种群。

分生孢子产量依据肉眼可见程度分为:“少量”表示在基质表面或菌丝上几乎看不到明显的分生孢子聚集;“适量”指在部分菌丝生长区域肉眼可见局部出现白色粉末状的孢子斑或孢子区,但未大面积连成片;“大量”则为基质表面菌丝上大面积出现白色孢子层,形似覆盖“菌霜”,轻轻振动即会有大量孢子粉扬起。

绿霉污染情况划分为:“无污染”指整个栽培筐

内未发现任何绿色霉斑;“少量绿霉”表示基质局部区域出现1~2个独立的、直径小于1 cm的绿色霉菌斑,且羊肚菌菌丝生长未受明显影响;“较多绿霉”则指出出现多个绿色霉菌斑或霉斑连成小片,总面积不超过栽培筐表面积的1/4(<25%),此时羊肚菌菌丝生长可能受到一定程度抑制,与绿霉形成竞争态势。

**1.5.3 羊肚菌子实体形状及产量测定** 于2025年3月28日完成采收,在每个栽培筐内随机选取3个羊肚菌,使用游标卡尺对其子实体进行形态学测量,包括菌盖长度与直径、菌柄长度与直径等参数。采用电子天平分别测定单个子实体的鲜质量,并通过烘干处理获取其干质量。鲜菇产量按照各处理栽培筐分别称量记录,直至采收结束,统计确定每个处理3个重复栽培筐产量,取平均值计算栽培筐产量,烘干后计算干菇产量。根据栽培筐产量计算单位面积羊肚菌子实体产量。

**1.6 数据处理**

采用WPS Excel进行数据处理,使用IBM SPSS Statistics 19软件进行单因素方差分析(ANO-

VA),并采用Duncan多重比较检验差异显著性;同时采用Pearson相关系数法进行相关性分析。采用OriginPro 9.0绘图。

**2 结果与分析**

**2.1 不同基质配方的理化性状**

如表2所示,各处理组的pH值分布在6.04~7.15,其中CK处理的pH值最低,而JZ1处理的pH值最高。各处理EC值均在0.61~1.53 mS·cm<sup>-1</sup>,符合羊肚菌生长的适宜EC值区间,其中CK处理的EC值最低,JZ5处理的EC值最高。在物理性质方面,各基质配方的容重均显著高于对照组,JZ1处理的容重最大,其次是JZ2处理。总孔隙度分析显示,各处理组的总孔隙度在55.76%~61.44%,其中JZ5处理的总孔隙度显著高于其他处理,而JZ1处理的总孔隙度最低。进一步分析孔隙结构发现,JZ1处理的通气孔隙度最低,JZ5处理的持水孔隙度最大,而JZ1处理的持水孔隙度最低。水气比分析结果表明,各处理的水气比范围为1.15~1.39,其中JZ5处理的水

表2 不同基质配方的理化性状

Table 2 Physicochemical properties of different substrate formulations

处理 Treatment	pH	电导率 Electrical conductivity/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	容重 Bulk density/ (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度 Total porosity/ %	通气孔隙度 Air-filled porosity/ %	持水孔隙度 Water-holding porosity/ %	水气比 Water-air ratio
CK	6.04±0.05 f	0.61±0.01 e	0.25±0.01 e	58.72±0.01 b	27.45±0.01 a	31.60±0.01 c	1.15±0.13 d
JZ1	7.15±0.24 a	1.05±0.03 d	0.62±0.01 a	55.76±0.02 c	25.31±0.01 b	30.55±0.01 c	1.21±0.17 c
JZ2	7.07±0.13 b	1.11±0.01 c	0.60±0.01 b	56.06±0.01 c	25.48±0.02 b	30.58±0.01 c	1.20±0.06 c
JZ3	6.71±0.04 c	1.28±0.00 b	0.54±0.02 c	56.99±0.01 bc	25.83±0.02 b	31.59±0.01 c	1.22±0.07 c
JZ4	6.54±0.03 d	1.30±0.04 b	0.47±0.01 d	58.47±0.02 b	25.86±0.02 b	33.29±0.02 b	1.29±0.10 b
JZ5	6.36±0.06 e	1.53±0.03 a	0.48±0.01 d	61.44±0.01 a	25.76±0.01 b	35.68±0.01 a	1.39±0.02 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.

气比最大,CK处理的水气比最小。

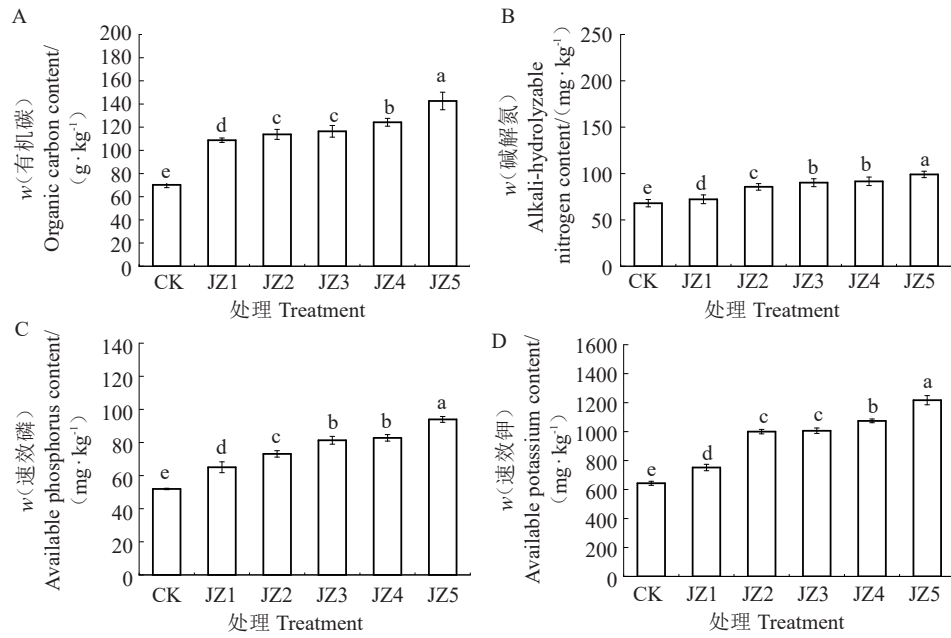
**2.2 不同基质配方的养分性状**

如图1所示,6种基质配方的OC、AN、AP和AK含量从CK到JZ5呈现出逐渐增加的变化趋势。各处理的OC含量(w,后同)范围为70.20~145.57 g·kg<sup>-1</sup>,其中JZ5处理OC含量较JZ1、JZ2、JZ3、JZ4处理分别显著提升了31.07%、25.28%、22.41%、14.72%,且较CK处理显著提升103.09%。各处理的AN含量范围为68.05~99.03 mg·kg<sup>-1</sup>,其中JZ5处理AN含量较JZ1、JZ2、JZ3、JZ4处理分别显著提升了37.10%、15.65%、9.88%、8.12%,且较CK处理显著提升45.52%。各处理的AP含量范围为51.94~93.95 mg·kg<sup>-1</sup>,其中JZ5处理AP含量较JZ1、JZ2、JZ3、JZ4处理分别显著提升了44.41%、

28.47%、15.51%、13.46%,且较CK处理显著提升80.88%。各处理的AK含量范围为643.09~1 216.76 mg·kg<sup>-1</sup>,其中JZ5处理AK含量较JZ1、JZ2、JZ3、JZ4处理分别显著提升了61.82%、21.70%、20.95%、13.27%,且较CK处理显著提升89.20%。

**2.3 不同基质配方对羊肚菌菌丝体生长的影响**

由表3可知,JZ3和JZ4处理的菌丝出土时间、满埒时间及菌丝长势均优于CK、JZ1、JZ2和JZ5处理,与CK相比表现出明显优势。此外,在6种配方基质中,除CK处理未观察到分生孢子形成外,其余处理均出现了分生孢子,其中JZ3处理的分生孢子形成量最多,其次是JZ4处理,JZ1、JZ2、JZ5处理较少。在菌丝生长阶段,仅JZ5和CK处



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

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

图 1 不同基质配方的养分性状

Fig. 1 Nutrient characteristics of different substrate formulations

表 3 不同基质配方对羊肚菌菌丝体生长的影响

Table 3 Effects of different substrate formulations on the mycelial growth of *Morchella eximia*

处理 Treatment	菌丝出土时间 Mycelial emergence time/d	菌丝满墙时间 Mycelial full colonization time/d	菌丝长势 Mycelial growth	分生孢子 Conidia	基质污染情况 Substrate contamination status
CK	4	9	+	无 None	较多绿色木霉 Severe contamination by <i>Trichoderma</i>
JZ1	3	8	++	少量 Low	无 None
JZ2	3	8	++	少量 Low	无 None
JZ3	2	6	+++	大量 High	无 None
JZ4	2	6	+++	适量 Moderate	无 None
JZ5	3	7	++	少量 Low	少量绿色木霉 Slight contamination by <i>Trichoderma</i>

注:+++、++、+分别表示菌丝长势较强、长势一般、长势弱。

Note: +++, ++, and + indicate relatively strong mycelial growth, moderate mycelial growth, and weak mycelial growth, respectively.

理出现了绿色木霉污染,而其他处理均未观察到基质污染现象。

### 2.4 不同基质配方对羊肚菌子实体农艺性状的影响

由图 2 可知,不同基质配方对羊肚菌菌盖、菌柄生长有显著影响,其中 JZ3 处理的子实体菌盖长度和菌盖直径均最大,菌盖直径比 JZ1、JZ2、JZ4 和 JZ5 处理分别显著提升 46.06%、55.75%、12.46%、48.52%,比 CK 处理显著提升了 183.87%。菌盖长度比 JZ1、JZ2、JZ4 和 JZ5 处理分别显著提升 28.18%、17.09%、13.50%、17.58%,比 CK 处理显著提升 187.56%。JZ3 处理的菌柄长度、菌柄直径均最大,菌柄直径比 JZ1、JZ2、JZ4 和 JZ5 处理分别提

升 6.19%、6.74%、1.48%和 22.62%,比 CK 处理显著提升 221.88%;菌柄长度比 JZ1、JZ2、JZ4 和 JZ5 处理分别显著提升 43.53%、29.63%、14.90%和 24.66%,比 CK 处理显著提升 199.34%。

由图 3 可知,在 6 个处理中,JZ3 处理羊肚菌子实体单菇鲜质量最大,其次是 JZ4,2 个处理的单菇鲜质量差异不显著,JZ3 处理单菇鲜质量比 JZ1、JZ2、JZ4 和 JZ5 处理分别高 31.23%、22.42%、1.95%和 15.61%,比 CK 处理显著高 214.95%;在单菇干质量方面,JZ3 处理羊肚菌子实体单菇干质量最大,其次是 JZ4,2 个处理的单菇干质量差异不显著,JZ3 处理比 JZ1、JZ2、JZ4 和 JZ5 处理分别高 12.99%、19.76%、

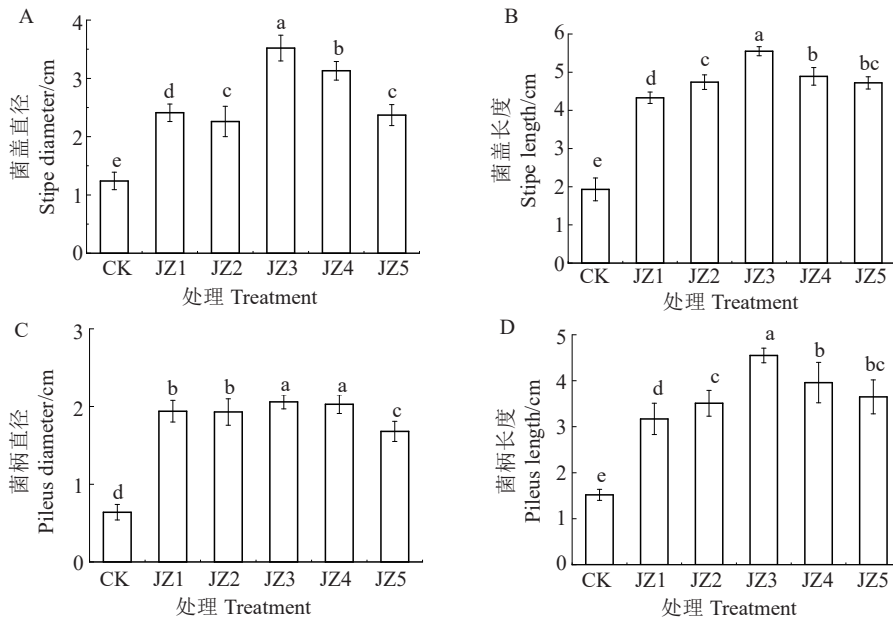


图2 不同基质配方对羊肚菌子实体农艺性状的影响

Fig. 2 Effects of different substrate formulations on the agronomic traits of *Morchella eximia* fruiting bodies

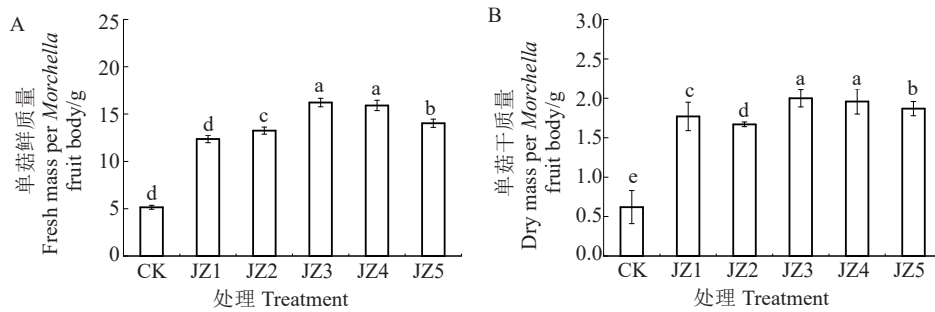


图3 不同基质配方对羊肚菌单菇鲜质量和干质量的影响

Fig. 3 Effects of different substrate formulations on the fresh mass and dry mass of *Morchella eximia* single fruiting body

2.04%和6.95%，比CK处理显著高222.58%。

### 2.5 不同基质配方对羊肚菌产量的影响

由表4可知，在鲜产量方面，不同处理栽培筐鲜羊肚菌产量及折合单产从高到低为JZ3>JZ4>JZ5>JZ2>JZ1>CK，且JZ3处理栽培筐鲜菇产量比CK、JZ1、JZ2、JZ4和JZ5处理分别显著提升337.36%、105.59%、53.74%、7.23%和10.25%；JZ3处理鲜菇折合单产比CK、JZ1、JZ2、JZ4和JZ5处理分别提升337.34%、105.57%、53.73%、7.23%和10.24%。在干产量方面，栽培筐干菇产量和折合单产均表现为JZ3>JZ4>JZ5>JZ2>JZ1>CK，JZ3处理栽培筐干菇产量比CK、JZ1、JZ2、JZ4和JZ5处理分别显著提升650.32%、97.96%、52.03%、27.24%和36.10%；JZ3处理干菇折合单产比CK、JZ1、JZ2、JZ4和JZ5处理分别显著提升649.80%、98.10%、52.11%、27.27%和36.15%。

### 2.6 基质指标与羊肚菌产量间的相关性分析

由表5可知，羊肚菌产量与土壤电导率、碱解氮及速效磷含量呈显著正相关，而与土壤pH值、容重、通气孔隙度、持水孔隙度、有机碳含量无显著相关关系。这表明在本试验条件下，土壤中可直接被羊肚菌吸收利用的氮、磷速效养分供给水平及土壤离子强度是影响羊肚菌产量的主要土壤环境因子，其中碱解氮、速效磷含量提升及适宜的电导率水平对羊肚菌子实体的形成和产量提高具有显著的正向促进作用。

## 3 讨论与结论

栽培基质作为羊肚菌生长的主要环境，其理化性质对菌丝发育及出菇具有决定性影响。本研究通过对不同基质配方的比较，发现JZ3处理在菌丝生长速度、子实体形态指标及产量方面均表现最优，JZ4处理次之，说明草炭基质可通过优化容重、孔隙度及养分供应，为羊肚菌创造良好的微生态环境，这一结果与

表 4 不同栽培基质配方对羊肚菌产量的影响

Table 4 Effects of different cultivation substrate formulations on the yield of *Morchella eximia*

处理 Treatment	鲜产量 Fresh yield		干产量 Dry yield	
	栽培筐产量 Yield per cultivation basket/g	折合单产 Converted to per m <sup>2</sup> yield/g	栽培筐产量 Yield per cultivation basket/g	折合单产 Converted to per m <sup>2</sup> yield/g
CK	26.55±2.07 f	152.40±11.88 f	3.10±0.12 e	17.81±0.66 f
JZ1	56.48±0.65 e	324.22±3.71 e	11.75±1.23 d	67.41±7.05 e
JZ2	75.53±2.41 d	433.56±13.86 d	15.30±0.55 c	87.79±3.18 d
JZ3	116.12±1.32 a	666.50±7.58 a	23.26±0.96 a	133.54±5.48 a
JZ4	108.29±3.09 b	621.58±17.72 b	18.28±1.18 b	104.93±6.78 b
JZ5	98.43±1.74 c	563.11±10.02 c	17.09±0.68 c	98.08±3.92 c

表 5 基质指标与羊肚菌产量间的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between substrate indicators and *Morchella eximia* yield

指标 Index	pH	电导率 Electricalcon- ductivity	容重 Bulk den- sity	总孔隙度 Total poro- sity	通气孔隙度 Air-filled porosity	持水孔隙度 Water-hold- ing porosity	水气比 Water- airratio	有机碳含量 Organic matter content	碱解氮含量 Alkali- hydrolyz- ablenitro- gen content	速效磷含量 Avail- ablephos- phorus content	速效钾含量 Avail- ablepo- tassium content	折合单产 Conver- ted to per m <sup>2</sup> yield content
pH	1.000	0.217	0.937**	-0.779	-0.846*	-0.552	-0.150	0.290	-0.011	0.074	0.047	0.363
电导率 Electricalcon- ductivity		1.000	0.536	0.351	-0.693	0.638	0.871*	0.988**	0.931**	0.984**	0.938**	0.849*
容重 Bulk density			1.000	-0.545	-0.969**	-0.255	0.172	0.591	0.309	0.406	0.359	0.609
总孔隙度 Total porosity				1.000	0.352	0.938**	0.716	0.318	0.483	0.458	0.466	-0.022
通气孔隙度 Air-filled porosity					1.000	0.031	-0.393	-0.751	-0.467	-0.572	-0.523	-0.669
持水孔隙度 Water- holding porosity						1.000	0.907*	0.613	0.706	0.714	0.698	0.264
水气比 Water- airratio							1.000	0.876*	0.833*	0.887*	0.852*	0.506
有机碳含量 Organic matter content								1.000	0.898*	0.959**	0.924**	0.792
碱解氮含量 Alkali-hydroly- zable nitrogen content									1.000	0.978**	0.992**	0.819*
速效磷含量 Available phosphorus content										1.000	0.976**	0.834*
速效钾含量 Available potassium content											1.000	0.787
折合单产 Converted to per m <sup>2</sup> yield												1.000

注:\*表示在 0.05 水平显著相关;\*\*表示在 0.01 水平极显著相关。

Note: \* indicate significant correlation at 0.05 level; \*\* indicate extremely significant correlation at 0.01 level.

王海金<sup>[23]</sup>、闫静等<sup>[24]</sup>和唐杰等<sup>[25]</sup>的研究结论一致。值得注意的是, JZ5 处理虽然养分含量较高, 但其产量和品质却低于 JZ3。这种高养分低产量的现象表明, 羊肚菌的生长发育不仅依赖养分丰富程度, 更受基质物理结构、通气性和水分状况的综合调控。JZ5 因持水孔隙度过高, 可能导致局部湿度过大、透气性下降, 从而抑制菌丝呼吸与代谢活性, 影响子实体形成。这一发现提示, 在基质筛选过程中, 应避免片面追求高养分含量, 而忽视其物理性状的整体协调性。

不同基质配方通过调控理化性状, 对七妹羊肚菌的菌丝生长、分生孢子形成及抗杂菌能力产生显著影响。从污染情况来看, JZ5 与 CK 处理均出现绿霉污染, 但诱因不同。JZ5 因孔隙结构失衡诱发高湿环境, CK 则因有机质匮乏、菌丝长势弱而丧失生态位竞争优势。相比之下, JZ3 与 JZ4 处理凭借均衡的配比, 在保障通气与适度保水的同时, 维持了适宜的 EC 值与养分水平, 促进菌丝健壮生长与分生孢子形成, 从而增强了对杂菌的生物抑制作用, 与王海金<sup>[23]</sup>的研究结果一致。该结果印证了沈彤等<sup>[19]</sup>通过综合优化基质理化性状以促进菌丝健康、提升产量与抗逆性的观点, 进一步明确了基质优化需兼顾物理、化学与生物三方面因素的综合调控思路。

综上所述, JZ3 配方可作为羊肚菌栽培的推荐基质, 其良好的理化协同效应为菌丝生长与高产形成提供了有力保障。未来将在增加品种数量验证的基础上, 结合营养品质评价与经济效益分析, 推动该配方的标准化应用与产业化推广, 为羊肚菌绿色高效栽培提供技术支持。

### 参考文献

- [1] 杜习慧, 赵琪, 杨祝良. 羊肚菌的多样性、演化历史及栽培研究进展[J]. 菌物学报, 2014, 33(2): 183-197.
- [2] 田金凤, 尚远宏, 肖宗妮. 羊肚菌的营养成分、功能和加工的研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 419-428.
- [3] 任茜. 羊肚菌营养功能特性[J]. 中国食用菌, 2020, 39(9): 212-215.
- [4] LI F H, ZHENG S J, ZHAO J C, et al. Phenolic extract of *Morchella angusticeps* Peck inhibited the proliferation of HepG2 cells *in vitro* by inducing the signal transduction pathway of p38/MAPK[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(11): 2829-2838.
- [5] LI S H, GAO A, DONG S, et al. Purification, antitumor and immunomodulatory activity of polysaccharides from soybean residue fermented with *Morchella esculenta*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 96: 26-34.
- [6] 刘伟, 何培新, 时晓菲, 等. 我国羊肚菌栽培历程及相关基础研究进展[J]. 食药菌, 2022, 30(4): 261-270.
- [7] 刘伟, 蔡英丽, 张亚, 等. 我国羊肚菌人工栽培快速发展的关键技术解析[J]. 食药菌, 2018, 26(3): 142-147.
- [8] 刘伟, 张亚, 何培新, 等. 我国羊肚菌人工大田栽培新技术[C]//中国菌物学会 2015 年学术年会论文摘要. 上海: 中国菌物学会, 2015.
- [9] 李美琦, 彭浩, 邱宇豪, 等. 汉中地区羊肚菌种植现状调查分析[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2025, 41(4): 19-25.
- [10] 杜璨, 王锋, 李应涛, 等. 不同施肥类型下设施羊肚菌产量表现及经济效益[J]. 湖北农业科学, 2025, 64(2): 69-74.
- [11] 羊晨, 魏宝阳. 羊肚菌栽培技术及产业发展建议[J]. 湖南农业科学, 2018(7): 122-126.
- [12] 张自启, 马克义, 王淑枝, 等. 设施羊肚菌与小果型西瓜轮作高效栽培技术[J]. 北方园艺, 2023(22): 153-157.
- [13] 苗人云, 刘天海, 干雪梅, 等. 银杏林下套种白及和羊肚菌的栽培技术及效益分析[J]. 中国食用菌, 2020, 39(12): 63-72.
- [14] OWER R. Notes on the development of the morel ascocarp: *Morchella esculenta*[J]. Mycologia, 1982, 74(1): 142-144.
- [15] 赵永昌, 柴红梅, 张小雷. 我国羊肚菌产业化的困境和前景[J]. 食药菌, 2016, 24(3): 133-139.
- [16] 刘跃鹏, 王咪, 裴蕾, 等. 利用栽培基质周年化立体栽培羊肚菌关键技术[J]. 北方园艺, 2023(2): 153-157.
- [17] 冉永红, 康国铭, 马小军. 羊肚菌室内层架高产栽培技术[J]. 北方园艺, 2023(24): 151-153.
- [18] 杨文杰, 金群力, 吴杭波, 等. 羊肚菌室内栽培关键技术研究[J]. 食药菌, 2024, 32(3): 211-216.
- [19] 沈彤, 杜军, 李鸣雷, 等. 不同栽培基质对羊肚菌产量和营养成分的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 187-192.
- [20] HUANG K, LI L, WU W J, et al. Enhancing *Morchella* mushroom yield and quality through the amendment of soil physico-chemical properties and microbial community with wood ash[J]. Microorganisms, 2024, 12(12): 2406.
- [21] 林大仪. 土壤学实验指导[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [22] 孙军利, 章智钧, 张坤, 等. 不同配方基质的理化性质及其对草莓生长的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(3): 118-121.
- [23] 王海金. 设施羊肚菌无土栽培基质配方筛选[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- [24] 闫静, 周祖法, 龚佩珍, 等. 不同覆土材料对双孢蘑菇菌丝爬土的影响[J]. 北方园艺, 2011(17): 181-182.
- [25] 唐杰, 王勇, 许瀛引, 等. 羊肚菌产业发展关键问题研究进展[J]. 菌物研究, 2021, 19(4): 217-231.