

航天诱变丝球小奥德蘑获得优良菌株

于凤春^{1,2}, 高琪², 魏赛², 严冬², 宋爽², 刘宇², 宗宪春¹, 王守现²

(1. 牡丹江师范学院生命科学与技术学院 黑龙江牡丹江 157011; 2. 北京市农林科学院植物保护研究所 北京 100097)

摘要:丝球小奥德蘑是一类含有丰富营养价值的珍稀食用菌,但现有菌株存在子实体菌柄均一性差的问题,需开展菌种选育工作。本研究采用航天诱变育种技术对丝球小奥德蘑菌丝体进行诱变处理,以未搭载菌株为对照(CK),通过连续继代试验、出菇试验并结合菌丝评价及农艺性状评价,分析了继代过程中诱变菌株的变异方向、变异稳定性和出菇情况。结果表明,共有6株航天诱变菌株(HK)与CK存在稳定的拮抗变异,且随着继代次数增加,生长差异逐渐减小。对筛选到的6株稳定变异HK菌株进行农艺性状的评价,结果表明,航天诱变菌株HK26的拮抗变异稳定,生物学效率较CK提高了46.50%,出菇时间减少了5d,且子实体菌柄的均一性更好,适宜工厂化生产。综上,通过航天诱变育种技术结合农艺性状评价成功选育出产量高、菌柄均一性好的丝球小奥德蘑优良菌株HK26,这种方法可作为品种选育的有效途径,加快了丝球小奥德蘑工厂化应用的进程。

关键词:丝球小奥德蘑; 航天诱变育种; 菌柄均一性; 继代稳定性; 农艺性状评价

中图分类号: S646.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)09-057-08

Space induced *Oudemansiella apalosarca* to obtain excellent strain

YU Fengchun^{1,2}, GAO Qi², WEI Sai², YAN Dong², SONG Shuang², LIU Yu², ZONG Xianchun¹, WANG Shouxian²

(1. School of Life Science and Technology, Mudanjiang Normal University, Mudanjiang 157011, Heilongjiang, China; 2. Institute of Plant Protection, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: *Oudemansiella apalosarca*, a rare edible fungus with high nutritional value, faces the issue of poor uniformity in fruiting body stipes, necessitating strain improvement. In this study, space mutation breeding technology was employed to induce mutations in the mycelium of *O. apalosarca* strains, with a non-mutated strain serving as the control (CK). Continuous subculture tests, fruiting tests, mycelium evaluation, and agronomic trait assessment were conducted to analyze the mutation direction, stability, and fruiting performance of the mutant strains during subculturing. The results indicated that six aerospace mutant strains (HK) demonstrated stable antagonistic variation against CK, with growth differences diminishing with increased subculturing. Agronomic traits of six stable mutant HK strains were assessed, revealing that the space mutation strain HK26 exhibited stable antagonistic variation, a 46.50% higher biological efficiency than CK, reduced fruiting time by 5 days, and improved uniformity of fruiting body stipes, making it suitable for industrial production. In conclusion, through the combination of space mutation breeding technology and agronomic trait evaluation, the excellent strain HK26 with high yield and good stipe uniformity was successfully selected. This method presents an effective approach for breeding and advancing the industrial application of *O. apalosarca*.

Key words: *Oudemansiella apalosarca*; Space mutation breeding; Stipe uniformity; Successive stability; Evaluation of agronomic character

我国食用菌生产方式主要为传统食用菌生产和工厂化栽培两种^[1]。传统食用菌生产耗费大量的人力成本,且受季节限制。工厂化生产可以实现食用菌周年生产和标准化生产,具备生产效率高、产

品质量安全有保障、劳动力投入少等优势,是最具代表性的农业现代化发展模式之一^[2]。然而,我国工厂化食用菌生产的菇种较为单一,主要集中在金针菇、杏鲍菇、海鲜菇、双孢菇和真姬菇等品种,存

收稿日期: 2024-12-05; 修回日期: 2025-08-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32372785); 北京市农林科学院创新能力建设项目(KJCX20230102); 现代农业产业技术体系北京市食用菌创新团队(BAIC03)

作者简介: 于凤春,女,在读硕士研究生,研究方向为食用菌有性生活史。E-mail: a2774554951@163.com

通信作者: 宗宪春,女,教授,研究方向为植物遗传育种与生物技术。E-mail: swxzc@126.com

王守现,男,研究员,研究方向为食用菌资源评价与利用。E-mail: wangshouxian2002@163.com

在严重的同质化问题,导致行业利润空间逐年递减^[3]。有必要开展工厂化专用食用菌新品种研发,满足民众对食用菌品种多样化需求的同时促进食用菌工厂化生产企业提质增效。

丝球小奥德蘑(*Oudemansiella apalosarca*),隶属于担子菌门(Basidiomycota)膨瑚菌科(Physalacriaceae)小奥德蘑属(*Oudemansiella*)^[4],曾用名淡褐奥德蘑、热带小奥德蘑。小奥德蘑味道鲜美,富含蛋白质、碳水化合物、多种维生素及矿物质元素,是一种既有观赏价值,又兼具抗氧化、抑制肿瘤细胞增殖等保健功效的珍稀食用菌^[5-6]。目前国内主要栽培的奥德蘑品种为卵孢小奥德蘑^[7],其栽培过程中存在覆土栽培工作量大、后熟时间长、重茬障碍严重等问题^[8]。丝球小奥德蘑在菌丝生长速度、出菇周期、不需覆土等方面展现出显著优势,具备工厂化栽培前景^[9]。然而,在生产过程中,子实体菌柄的均一性仍然是一个亟待解决的问题。因此,为了提高子实体均一性,本研究采用诱变育种技术对丝球小奥德蘑进行品种改良。

航天诱变育种是一种高效的育种方法,在植物^[10]、微生物^[11]领域均有应用。该技术通过返回式航天器将作物种子送入太空,利用微重力、高真空、宇宙辐射和弱磁场等特殊条件,对植物种子、组培细胞或微生物菌种进行诱变,促使其基因发生变异^[12-13]。与人工诱变相似,航天诱变的优势在于育种周期短、变异幅度大,并且不存在转基因技术所带来的潜在安全隐患^[14]。航天诱变的频率、变异幅度和特异变异概率相对较高^[15]。在航天器返回地面后,对其携带的植物种子或微生物菌种进行培育和筛选,最终育成优质高产的新品种,如小麦 L22^[16]、一号灵芝^[17]等。在食用菌领域,该技术已经在灵芝^[17]、香菇^[18]、金针菇^[19]和草菇^[20]等菌种改良中有所报道,在食用菌高产、耐高温性增强以及生物学特性优化等方面效果显著。但是在变异稳定性、生长均一性等方面仍需进一步研究。

本研究利用航天诱变技术,对丝球小奥德蘑进行品种改良。通过连续继代试验,对变异稳定性和变异方向进行分析。通过菌丝评价及出菇农艺性状评价,筛选出变异稳定、子实体菌柄均一性好的菌株,加速丝球小奥德蘑工厂化应用进程。

1 材料与方法

1.1 材料

丝球小奥德蘑 JZB2115055 菌株,为北京市农林科学院植物保护研究所选育的具有自主知识产权

的食用菌新品种,已通过北京市食用菌新品种鉴定,鉴定编号为京品鉴菌 2015031,现保存于北京市食用菌种质资源库。

1.2 方法

1.2.1 航空诱变育种及菌株筛选 将 JZB2115055 菌株在 PDA(马铃薯葡萄糖培养基 1 L:马铃薯葡萄糖琼脂粉 39 g)平板中活化,将活化后的菌株转接至 2 mL 冻存管中,25 °C 培养至萌发,称质量后送样进行航天搭载,以未搭载菌株为对照(CK)。搭载菌株于 2021 年 6 月 17 日搭载神舟十二号飞船,进入我国空间站,在空间站内 92 d,于 2021 年 9 月 17 日返回。对返回的搭载菌株进行尖端分离,共分离 50 株搭载后的航天菌株(HK),将 HK 菌株接种至 PDA 平皿中记为第 1 代,并进行保藏。

1.2.2 变异稳定性检测 将第 1 代的 50 株 HK 菌株和 CK 菌株培养 10 d 后,在无菌环境下使用 6 mm 打孔器打孔后,将菌块分别接入到新的 PDA 培养基中央。25 °C 恒温培养 10 d 后,进行下一次继代培养。如此反复,直至培养到第 10 代。

1.2.3 拮抗反应的测定 在无菌条件下将第 1 代、第 5 代和第 10 代的 HK 菌株和 CK 菌株接种至同一 PDA 综合培养基(马铃薯葡萄糖 PDA 综合培养基 1 L:去皮土豆 200 g 煮熟取滤液,葡萄糖 20 g,琼脂 20 g,磷酸二氢钾 3 g,无水硫酸镁 1.5 g,蛋白胨 5 g,维生素 B₁ 10 mg,去离子水定容至 1 L)上,进行对峙培养。25 °C 恒温培养 25 d 后,观察不同继代次数 HK 菌株与 CK 菌株间的拮抗反应。连续继代后均与 CK 菌株存在拮抗反应的 HK 菌株被认为是稳定变异菌株。后续对稳定变异菌株进行出菇试验及农艺性状测定。

1.2.4 菌丝生长速度的测定 继代 1、5、10 次后的 HK 菌株和 CK 菌株,利用十字交叉法测定其生长速度。在 PDA 培养基 25 °C 培养 2 d 至菌丝萌发后,每 2 d 进行一次生长速度的测定。每个菌株设置 3 个重复^[20]。根据生长速度进行偏差计算,标准偏差可以表示测量值在平均值附近分布的范围大小。对生长速度偏差值统计分析,绘制生长偏差变化趋势图,分析菌株生长速度变化的均一性及稳定性^[21]。

1.2.5 航天诱变丝球小奥德蘑菌株子实体农艺性状分析 对获得的稳定变异的航天菌株进行出菇试验评价。将 HK 菌株及 CK 菌株在 PDA 平皿上活化培养 14 d,待其菌丝生长力最旺盛时转接至 121 °C 高压灭菌 120 min 处理过的栽培袋料中(栽培料配方:60%棉籽壳,38%麸皮,2%石灰。培养料湿度为 65%,pH 为 7~8)。在 25 °C 且通风良好的条

件下培养至菌丝发满。待菌丝发满后转至温度为 20℃、湿度为 90% 的人工气候室中培养,每个菌株接种 10 袋。统计各菌株单袋产量,单菇质量,菌盖直径、硬度,以及菌柄的长度和硬度,计算航天诱变菌株的生物学效率(单袋产量/单袋栽培料质量×100%)以及子实体菌柄长度的变异系数,以筛选优良菌株。变异系数公式: $CV/\% = SD/MN \times 100$ 。 CV : 变异系数; SD : 标准偏差; MN : 平均值。

1.2.6 数据处理与分析 采用 Excel 2021 软件处理试验数据,采用 IBM SPSS Statistics 19 软件进行偏差分析和差异显著性分析,利用 OmicShare 在线软件(<https://www.omicshare.com/tools/>)绘制生长偏差趋势图及小提琴图。使用 Adobe Illustrator CS6 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 丝球小奥德蘑继代培养后 HK 菌株代际间拮抗分析

生物拮抗作用是生物之间的竞争性排斥、干扰和抑制等作用。利用拮抗试验能够快速分辨两个菌株之间的差异。从表 1 可以看出,在第 1、5、10 代培养过程中,始终与 CK 存在拮抗反应的 HK 菌株作为稳定变异的类型,该类型的 HK 菌株有 6 株,即 HK13、HK14、HK15、HK25、HK26、HK28。始终与 CK 不存在拮抗反应的 HK 菌株作为稳定无拮抗的类型,该类型的 HK 菌株有 22 株。将第 1 或第 5 代存在拮抗反应但第 10 代不存在拮抗反应的 HK

表 1 继代培养后 HK 菌株与 CK 代际间拮抗分析

Table 1 Analysis of intergenerational antagonism between HK strain and CK after subculture

指标 Indicator	第 1 代 1st generation	第 5 代 5th generation	第 10 代 10th generation	稳定变异 Stable variation	稳定无拮抗 Non-antagonism	拮抗逐渐积累 Antagonism gradually accumulates	拮抗逐渐消失 Antagonism gradually disappears
与 CK 存在拮抗反应的 航天菌株数量/株 The number of antagonistic aerospace strains with CK/strain	21	17	6	6	22	0	14
占比 Proportion/%	42	34	12	12	44	0	28

菌株作为拮抗反应逐渐消失的类型,该类型的 HK 菌株有 14 株。将第 1 或 5 代不存在拮抗反应但第 10 代存在拮抗反应的 HK 菌株作为拮抗反应逐渐积累的类型,该类型的 HK 菌株有 0 株。仅在第 5 代与 CK 存在拮抗反应的菌株有 6 株。

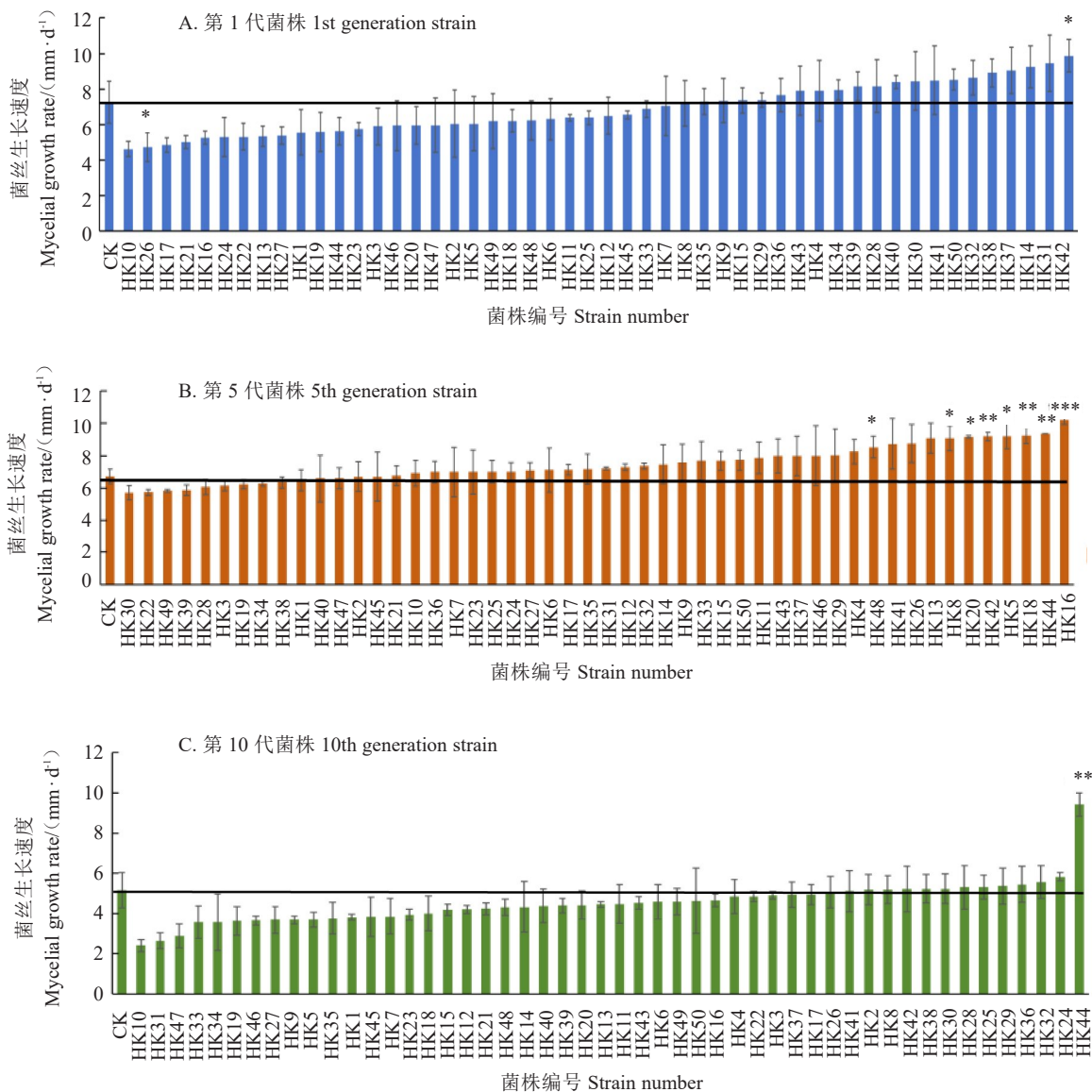
2.2 HK 菌株的菌丝生长速度

菌丝生长速度是直观判断菌株变异的指标之一。使用 IBM SPSS Statistics 19 软件分别对第 1、5、10 代 HK 菌株和 CK 的生长速度进行差异显著性分析。由图 1-A 可知,在第 1 代中,仅 HK26 和 HK42 这 2 株 HK 菌株与 CK 的生长速度存在显著差异。其中 HK42 菌株的生长速度显著高于 CK,而 HK26 菌株生长速度显著低于 CK。由图 1-B 可知,连续继代 5 次后共有 8 株 HK 菌株生长速度显著或极显著高于 CK。由图 1-C 可知,连续继代 10 次后, HK44 菌株的生长速度极显著高于 CK。其中, HK44 菌株在 5 代、10 代的生长速度均极显著高于 CK。

为了更好地分析菌株生长的均一性及稳定性,利用 IBM SPSS Statistics 19 软件和 OmicShare 在线软件对第 1、5、10 代的 HK 菌株及 CK 的生长偏

差变化趋势进行分析(图 2),当 $P < 0.05$ 时,该生长偏差变化趋势被认为具有显著性,共有 5 个趋势具有显著性。根据生长速度偏差变化趋势将 50 株 HK 菌株及 CK 分为 4 类。CK、拮抗稳定变异菌株 HK28 生长偏差均属于第 1 类(图 2-A)。这类生长偏差在第 5 代达到最小值,第 10 代又重新恢复,这类趋势的菌株有 8 株,占 16%。第 2 类趋势生长偏差在第 1 或 5 代最高,第 10 代时降低(图 2-B₁、图 2-B₂),表明随着继代次数增加,菌株在不断地纯化,差异不断地减小,这类趋势的菌株有 16 株,占 32%,拮抗稳定变异菌株 HK13、HK15、HK25、HK26 生长偏差变化均属于这类趋势。第 3 类与第 1 类相似,纯化过程在第 5 代已完成,第 5 和第 10 代偏差值基本无变化(图 2-C),拮抗稳定变异菌株 HK14 生长偏差变化属于这类趋势。第 4 类生长偏差在第 1、5、10 代变化较小,比较稳定(图 2-D),这类趋势菌株有 10 株,占 20%。

综合分析拮抗反应和生长速度,继代过程中始终存在拮抗反应的菌株有 HK13、HK14、HK15、HK25、HK26、HK28,其中除了 HK28 菌株以外其余的 HK 菌株生长速度偏差变化均呈逐渐减小趋势。



注：HK 菌株与 CK 菌株的生长速度存在极显著差异 ($P<0.01$) 时标注为 **, $P<0.0001$ 时标注为 ***; 显著差异 ($0.01<P<0.05$) 时标注为 *。直线表示 CK 生长速度值。

Note: The growth rate of HK strain and CK strain was marked as **, when there was an extremely significant difference ($P<0.01$), and marked as *** when $P<0.0001$; and marked as * when there was a significant difference ($0.01<P<0.05$). The straight line represents the growth rate of CK.

图1 不同继代次生 HK 菌株与 CK 菌株的生长速度
Fig. 1 The growth rate of different secondary HK strains and CK strains

因此,后续对这 6 株 HK 菌株开展出菇试验并进行农艺性状评价。

2.3 稳定变异 HK 菌株农艺性状评价

对筛选到的 6 株稳定变异 HK 菌株与 CK 进行出菇试验,并对其子实体农艺性状进行统计分析。7 株菌株均能成功形成子实体。由表 2 可知,在子实体形成时间上, HK13、HK14 及 CK 均需 42 d 可形成子实体, HK15、HK25、HK26 和 HK28 均仅需 37 d 即可形成子实体,均较 CK 减少了 5 d。在产量

方面, HK26 的每袋平均产量显著高于 CK。生物学效率方面, HK26 也显著高于 CK,较 CK 显著提高了 46.50%。对子实体形成数量进行统计分析发现,除 HK15 菌株外,其余 HK 菌株单袋子实体个数均高于 CK。对丝球小奥德蘑单个子实体农艺性状进行系统分析表明 HK26 平均单菇质量高于 CK,较 CK 提高了 4.06%。对菌盖及菌柄进行分析,每个菌袋收集 6 个子实体数据,表明各 HK 菌株的菌盖的直径均与 CK 均无显著差异; HK26 菌株的菌

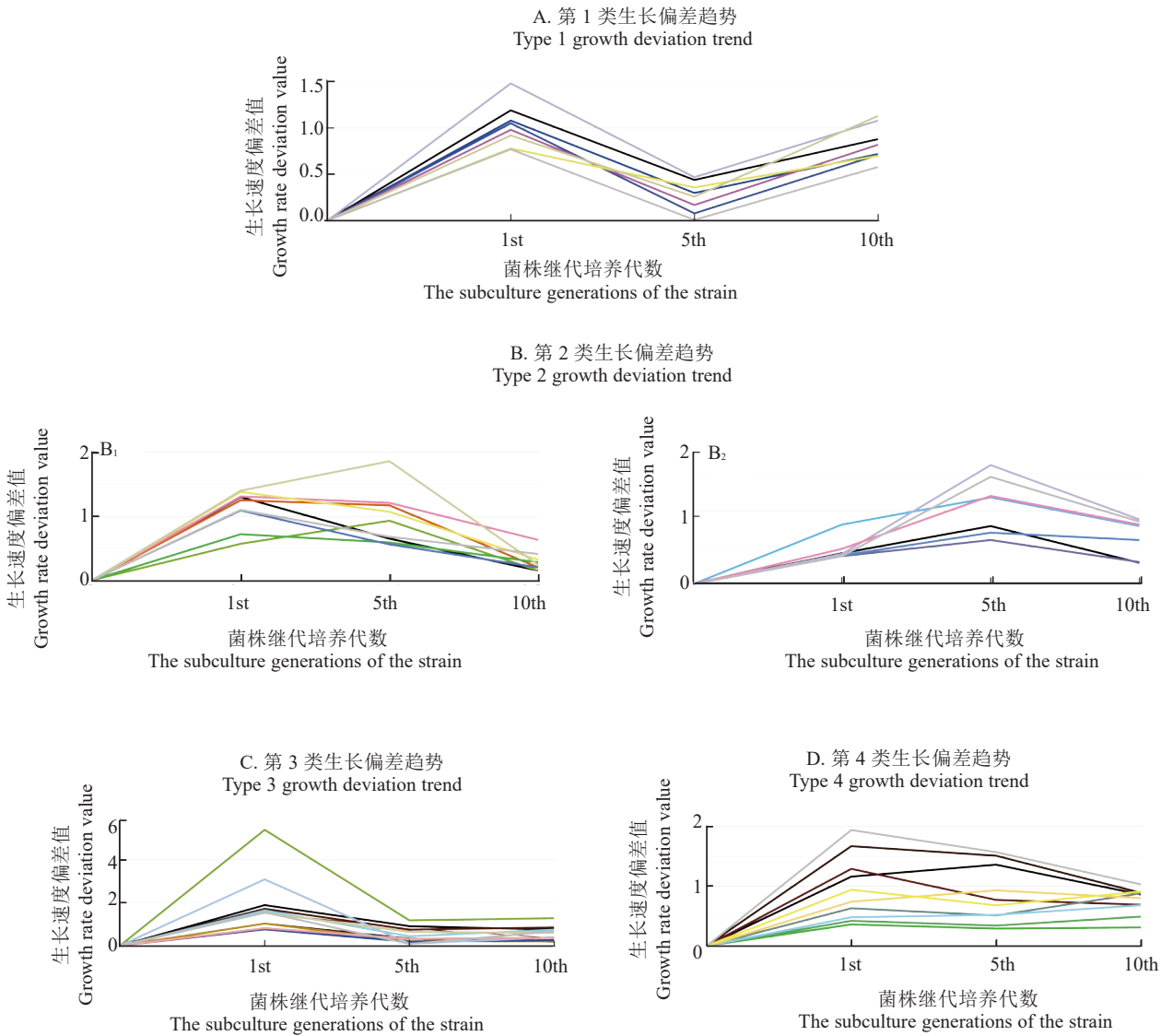


图 2 生长速度偏差趋势变化分析
Fig. 2 Analysis of variation trend of growth rate deviation

表 2 HK 菌株和 CK 子实体的农艺学性状分析

Table 2 Fruiting body agronomic characteristics analysis of HK strain and CK strain									
菌株 编号 Strain No.	产量 Yield/(g·bag ⁻¹)	生物学效率 Biological efficiency/%	子实体个数 Numbers of fruiting body	出菇时间 Fruiting time/d	单个子实体质量 Single mushroom mass/g	菌盖 Pileus		菌柄 Stipe	
						直径 Diameter/ mm	硬度 Hardness/ (N·cm ⁻²)	长度 Length/ mm	硬度 Hardness/ (N·cm ⁻²)
CK	214.38±70.26	42.88±14.05	23.00±9.00	42	10.10±3.04	38.25±8.94	1.29±0.48	107.67±22.90	2.28±1.07
HK13	206.406±77.51	41.28±15.50	33.00±14.00	42	6.80±2.50*	35.62±5.56	0.90±0.27	113.31±19.43	2.33±0.66
HK14	242.28±80.91	48.46±16.18	39.00±12.00**	42	6.44±1.70**	42.07±7.34	0.99±0.29	107.99±17.63	2.54±0.78
HK15	143.18±97.54	28.64±19.51	19.00±12.00	37	8.32±3.90	34.00±5.15	1.35±0.55	110.60±18.40	2.43±0.57
HK25	193.53±83.06	38.71±16.61	29.00±13.00	37	7.02±2.30*	39.72±9.80	1.15±0.43	88.33±22.16	2.85±0.97
HK26	314.12±97.63*	62.82±19.53*	34.00±20.00	37	10.51±3.20	45.93±8.68	1.27±0.39	135.06±12.68**	2.98±0.65
HK28	206.57±90.54	41.31±18.11	34.00±13.00	37	6.06±1.80**	41.00±6.94	0.88±0.28*	114.72±15.00	2.29±0.39

注: HK 菌株与 CK 菌株的农艺学性状存在极显著差异($P<0.01$)时标注为**, 显著差异($0.01<P<0.05$)时标注为*。
Note: The agronomic traits of HK strain and CK strain were marked as ** when there was an extremely significant difference ($P<0.01$), and marked as * when there was a significant difference ($0.01<P<0.05$).

柄长度极显著高于CK,是CK的1.25倍(表1、图3),且菌柄长度偏差最小。在硬度方面, HK28的菌盖硬度显著低于CK, HK13的菌盖硬度偏差最小。各个HK菌株与CK的菌柄硬度无显著差异, HK26的菌柄硬度最大, HK28的菌柄硬度偏差最小。

丝球小奥德蘑作为小奥德蘑属的一种,其菌柄长度的均一性是作为子实体农艺评价的重要指标,利用OmicShare在线软件对HK菌株和CK子实体的菌柄长度作小提琴图,如图4所示。小提琴图的形状越扁平,表明各子实体间菌柄长度差异越小,

相反越狭长,表明子实体间菌柄长度差异越大。对小提琴图进行分析,纵坐标表示7株菌株的菌柄长度,中间的白色圆点表示7株菌株的菌柄长度中位数值,黑色粗线表示的是数据的主要分布区域,结果表明HK26的菌柄平均长度及中位数均高于CK。HK26的小提琴图形状扁平,表明各子实体菌柄长度比较均匀;CK的小提琴图形状狭长,表明各子实体菌柄长度差异较大, HK26的菌柄长度均一性显著优于CK,且HK26菌柄硬度也高于CK(表2)。对HK菌株和CK子实体菌柄长度的变异系数进行



图3 各菌株子实体
Fig. 3 Fruiting bodies of various strains

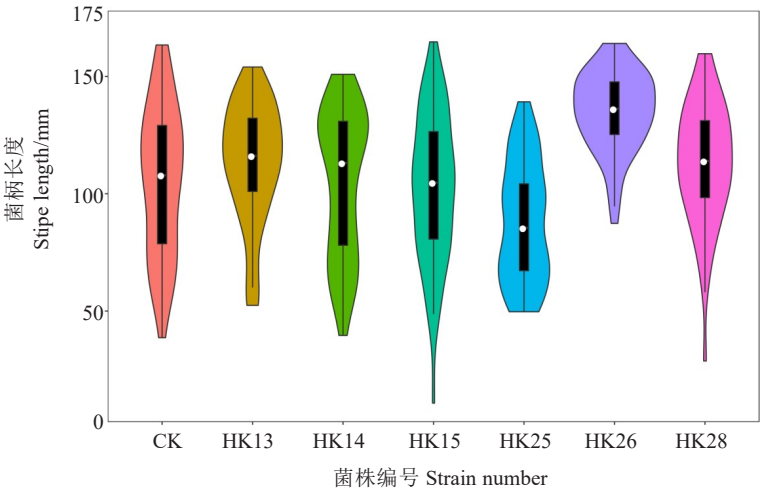


图4 稳定变异HK菌株与CK子实体菌柄长度分析
Fig. 4 Analysis of stipe length of fruiting body of stable mutant HK strain and CK strain

统计分析(表3),与小提琴图结果相同,HK26子实体菌柄长度的变异系数最小,进一步说明了HK26子实体的菌柄长度较均一。

表3 HK菌株和CK子实体菌柄长度的变异系数
Table 3 Coefficient of variation of stipe length of HK strain and CK strain fruiting body

菌株编号 Strain No.	变异系数 CV/%
CK	21.27
HK13	17.15
HK14	16.33
HK15	16.64
HK25	25.09
HK26	9.39
HK28	13.08

3 讨论与结论

航天诱变育种是航天技术与生物技术、农业育种技术相结合的技术,是综合了宇航、遗传、辐射、育种等跨学科的高新技术^[22]。航天诱变育种技术具有可提高作物产量、改良作物性状等优点。孙宇航等^[23]利用航天诱变技术对水稻品种进行改良,并分析改良后子代产量与品质的差异,结果表明,航天诱变改变了水稻的某些基因功能,部分突变会使有益基因的功能增强,从而导致水稻产量的增加。

航天诱变育种在食用菌中的研究应用也较多,利用航天诱变技术结合农艺性状评价可筛选到综合性状好、适合推广的理想品种。王雪婷等^[17]通过航天诱变灵芝,诱变菌株的生长速度较未诱变菌株提高了25.10%。林艺美等^[24]通过航天诱变金针菇,诱变菌株的生长速度较未诱变金针菇菌株提高了31.20%,谷凤举等^[20]研究发现,对草菇进行航天诱变后,其菇体纵径较未诱变菌株提高了10.92%。但是,上述研究均未对食用菌变异稳定性进行系统分析。本研究通过连续继代试验,结合菌丝表型分析开展了航天菌株变异稳定性的研究。拮抗试验结果表明,与CK始终存在稳定拮抗反应的菌株仅占有所有菌株的12%,28%的航天菌株随着继代次数的增加拮抗反应逐渐消失。说明航天搭载后的诱变菌株存在回复突变的可能,因此通过连续继代试验评价诱变性状的稳定性,筛选稳定变异菌株是极其必要的。第1代航天菌株生长偏差较大,随着继代次数的增加,部分菌株生长偏差逐渐减小。说明,变异可能存在

部分菌丝细胞中,随着继代过程,变异或回复变异会被不断筛选纯化,进而展现出菌落均一性高的趋势。祝芳等^[25]通过对草分枝杆菌进行复合诱变后也发现了类似的现象。本研究中,稳定变异的HK菌株的子实体农艺性状也发生了不同程度的变异,筛选到的与CK有拮抗反应的稳定遗传的6株菌株中,有4株菌株的出菇时间均较CK减少了5d,且子实体个数多于CK。利用小提琴图分析不同菌株菌柄长度的结果表明,筛选到的6株HK菌株的菌柄长度值的小提琴图呈不同形状,小提琴图形越扁平的HK菌株,表明菌柄长度差异与变异系数越小。相比传统的表格分析,可以更直观地分析各子实体菌柄长度的均一性。

丝球小奥德蘑是新驯化成功的一类食药兼优且具有较高商品价值的珍稀食用菌,其口感脆嫩,具有菌丝生长速度快、出菇周期短、不需覆土等优点。但现有菌株存在子实体生长均一性差、品质不佳等问题,致使目前尚无成熟的广泛栽培品种^[9]。本试验通过航天诱变育种结合农艺性状评价,筛选到变异稳定、出菇周期更短、子实体生长均一性好、产量高的丝球小奥德蘑航天变异优良菌株HK26,极具工厂化应用前景。综上所述,利用航天诱变育种技术结合农艺性状评价筛选到了优良菌株HK26。

参考文献

- [1] 苏雅迪. 食用菌产业发展历史、现状分析[J]. 农村经济与科技, 2018, 29(10): 140.
- [2] 鲍大鹏, 邹根, 裴晓东, 等. 中国食用菌产业实现高质量现代化发展的路径探讨[J]. 食用菌学报, 2022, 29(6): 103-110.
- [3] 董浩然, 于海龙, 姜宁, 等. 中国食用菌工厂化生产发展现状及趋势[J]. 食药菌, 2024, 32(1): 1-9.
- [4] ASHTON H. Ainsworth and bisby's dictionary of the fungi (10th edition)[J]. Reference Reviews, 2009, 23(5): 42.
- [5] 崔玉进, 荣成博, 高琪, 等. 丝球小奥德蘑白色菌株特异性标记开发[J]. 中国食用菌, 2021, 40(11): 70-75.
- [6] GAO Z, ZHANG C, LIU H, et al. The characteristics and antioxidant of *Oudemansiella radicata* selenium polysaccharides on lipopolysaccharide-induced endo-toxicemic mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018(116): 753-764.
- [7] 秦文韬, 赵娟, 高琳, 等. 卵孢小奥德蘑覆土真菌群落特征及其影响因素[J]. 菌物学报, 2022, 41(9): 1458-1470.
- [8] 杜娜, 胡惠萍, 谢意珍, 等. 卵孢小奥德蘑的研究进展[J]. 中国食用菌, 2020, 39(10): 1-5.
- [9] 崔玉进, 荣成博, 秦文韬, 等. 我国小奥德蘑属食用菌研究现状与展望[J]. 食药菌, 2021, 29(2): 116-122.
- [10] FAN Q L, LIU M. Research progress in space plant breeding[J]. Aerospace Medicine and Medical Engineering, 2002, 15(3):

- 231-234.
- [11] GUO S, SUN Y, WU T, et al. Metabolic profiling and growth characteristics of a spaceflight-induced mutant of *Lactocaseibacillus rhamnosus*: Unveiling enhanced carbohydrate and amino acid metabolism for improved probiotic potential[J]. Food Bioscience, 2024, 58: 103758.
- [12] 陈志强, 周丹华, 郭涛, 等. 植物航天育种的发展及其展望[J]. 卫星应用, 2021(12): 19-24.
- [13] 黄力, 刘功良, 费永涛, 等. 微生物航天育种及其在发酵食品微生物中的应用研究概述[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(9): 321-327.
- [14] 周孟焦, 史芳芳, 康明, 等. 航天育种技术对药用植物影响的研究进展[J]. 中国中医药现代远程教育, 2019, 17(20): 129-131.
- [15] 马碧花. 水杨酸、航天诱变和内生真菌对多年生黑麦草抗逆性的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [16] 韩涤平, 杜久元, 白斌, 等. 航天诱变抗病优质中强筋小麦新品种兰航选 L622[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(12): 1492.
- [17] 王雪婷, 张振伟, 龙泽雄, 等. 一号灵芝航天诱变菌株的筛选与鉴定[J]. 食品科技, 2022, 47(8): 1-7.
- [18] 边银丙, 翁曼丽, 孙勇, 等. 香菇菌丝体太空诱变效应研究II. 太空环境对香菇同工酶和子实体性状的影响[J]. 食用菌学报, 2001, 8(3): 6-10.
- [19] 周庆红, 杨寅桂, 周歆, 等. 航天诱变金针菇耐高温和早熟性栽培研究[J]. 现代园艺, 2011(6): 11-12.
- [20] 谷凤举, 赖亮民, 杜敏如, 等. 航天诱变处理对草菇生物学特性的影响[J]. 北方园艺, 2022(17): 112-120.
- [21] MU H, CHEN J, HUANG W, et al. OmicShare tools: A zero-code interactive online platform for biological data analysis and visualization[J]. Imeta, 2024, 3(5): e228.
- [22] 萨如拉, 胡晓林. 我国航天诱变育种研究进展 [J]. 西藏农业科技, 2009, 31(4): 1-3.
- [23] 孙宇航, 司勇林, 张振宇, 等. 水稻航天诱变后代产量与品质的差异研究[J]. 北方水稻, 2023, 53(5): 55-59.
- [24] 林艺美, 赖亮民, 钟武杰, 等. 航天诱变育种对金针菇遗传和药用品质性状的影响[J]. 南京农业大学学报, 2024, 47(3): 575-582.
- [25] 祝芳, 彭剑勇, 于晓丹, 等. 高生物量草分枝杆菌突变株诱变选育的研究[J]. 生物技术, 2014, 24(2): 76-80.