

星孢寄生菇个体发育对可控环境因子的响应

赵娅通, 吴丹, 周会明, 梁婷, 沈清林, 谷朝政, 陈雪雯, 宁亚娟

(滇西科技师范学院生物技术与工程学院 云南临沧 677000)

摘要: 为探讨星孢寄生菇个体发育与可控环境因子的关系, 采用 $L_{16}(4^5)$ 正交试验的方法, 研究了 5 种可控环境因子对该菇菌丝生长、原基分化以及子实体发育的影响。结果表明, 星孢寄生菇菌丝生长的最佳组合为温度 25 °C、琼脂浓度 2%、pH 7.0、培养皿直径 70 mm、光照时间 0 h·d⁻¹, 该组合条件下, 菌丝的萌发时间最短(1 d), 生长速度最快 $[(9.02 \pm 0.18) \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}]$ 且长势良好。此外, 在温度 25 °C、琼脂浓度 2%、pH 5.6、培养皿直径 60 mm、光照时间 0 h·d⁻¹ 的正交组合条件下, 该菇原基分化的时间较短(3 d)且数量最多 $[(20.75 \pm 3.31) \text{ 个} \cdot \text{皿}^{-1}]$ 。在温度 25 °C、琼脂浓度 2%、pH 6.2、培养皿直径 100 mm、光照时间 14 h·d⁻¹ 的组合下, 该菇子实体农艺性状较好, 且数量最多 $[(5.50 \pm 0.58) \text{ 个} \cdot \text{皿}^{-1}]$ 。值得注意的是, 除温度外, 上述适宜于星孢寄生菇生长发育的最佳可控环境因子组合与其单因素最佳水平均不相符。在温度 ≤ 10 °C 或 ≥ 30 °C 以及培养基 pH ≤ 4.0 的条件下, 该菇菌丝停止生长, 原基停止分化且子实体无法形成。总之, 可控环境因子对星孢寄生菇的个体发育有较大影响且存在交互作用, 其中琼脂浓度、温度是关键的环境因素。

关键词: 星孢寄生菇; 可控环境因子; 个体发育; 响应

中图分类号: S646.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2023)08-112-11

Response of ontogenetic development of *Asterophora lycoperdoides* to controllable environment factors

ZHAO Yatong, WU Dan, ZHOU Huiming, LIANG Ting, SHEN Qinglin, GU Chaozheng, CHEN Xuewen, NING Yajuan

(School of Biotechnology and Engineering, West Yunnan University, Lincang 677000, Yunnan, China)

Abstract: To explore the relationship between the ontogenetic development of *Asterophora lycoperdoides* and the controllable environmental factors, the researchers studied the effects of five controlled environmental factors on the mycelial growth, primordium differentiation and fruiting body development of *A. lycoperdoides* using the $L_{16}(4^5)$ orthogonal test. The results indicated that the optimal combination of the mycelial growth for *A. lycoperdoides* was at the temperature of 25 °C, agar concentration of 2%, pH of 7.0, petri dish diameter of 70 mm and light time of 0 h·d⁻¹, when, under the orthogonal test, the germination time was found shortest (1 d) with the fastest growth rate $[(9.02 \pm 0.18) \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}]$ and desirable growth. In addition, the orthogonal combination at the temperature of 25 °C, agar concentration of 2%, pH 5.6, petri dish diameter 60 mm and light time 0 h·d⁻¹ resulted in the shortest time to differentiation (3 d) with the greatest number of primordium (20.75±3.31 per petri dish). Furthermore, the combination, at the temperature of 25 °C, agar concentration of 2%, pH of 6.2, petri dish diameter of 100 mm and light time of 14 h·d⁻¹, proved better agronomic characteristics of the fruiting body with the greatest number (5.5±0.58 per petri dish). It is noteworthy that, except for the temperature, none of the above combinations of optimal controllable environmental factors suitable for the growth and development of *A. lycoperdoides* corresponded to their single-factor optimal levels. At the temperatures ≤ 10 °C or ≥ 30 °C and the culture media pH ≤ 4.0 , the mycelial growth stopped growing, the primordium discontinued differentiating, and the fruiting body failed to take shape. In conclusion, the controllable environmental factors exert a prominent influence and interaction on the ontogenetic development of *A. lycoperdoides*, in which agar concentration and temperature are the key environmental factors contributing to the orthogonal combination.

Key words: *Asterophora lycoperdoides*; Controllable environmental factors; Ontogenetic development; Response

收稿日期: 2023-02-13; 修回日期: 2023-05-22

基金项目: 云南省地方本科高校(部分)基础研究联合专项面上项目[2019FH001(-059)]

作者简介: 赵娅通, 女, 在读本科生, 研究方向为大型真菌种质资源开发利用。E-mail: 3220601615@qq.com

通信作者: 周会明, 男, 副教授, 主要从事食用菌驯化、遗传及栽培研究工作。E-mail: 632243530@qq.com

星孢寄生菇隶属于真菌门(Eumycota)、担子菌纲(Basidiomycota)、伞菌目(Agaricales)、离褶伞科(Lyophyllaceae)、寄生菇属(*Asterophora*),主要分布于我国的云南、贵州、四川等地区^[1]。该菇是一种兼有寄生与腐生的菌寄生菇,有着独特的营养方式。在人工培养基上,星孢寄生菇的菌丝体与一般食用菌相比具有生长速度快、出菇迅速的特点^[2]。因此,研究其出菇机制与遗传学原理对推动名贵食用菌真菌人工栽培进程具有重要意义。

适宜的环境因子是众多野生菇类得以出菇的必备条件,而个体发育是菇类在环境因子影响下遗传基因的外在表达,也是菇类对环境因子的最终响应。然而,目前绝大多数野生菇类仍无法有效地人工栽培,其子实体发育机制也难以解释,驯化模式仍受内在因素与环境因素的影响^[3]。笔者以独特的星孢寄生菇为研究对象,探究其个体发育与可控环境因子的关系,对于阐释其出菇机制、遗传学原理及其应用具有重要的意义。

目前,国内外有关星孢寄生菇的研究主要集中在形态学^[4]、种质资源^[5-6]、亲缘关系^[7]等方面。王建东等^[2]对该菇个体发育所需的基础培养基、碳源、氮源、温度以及pH行了初步筛选,但除此之外,关于该菇的生理学研究未见其他报道,导致野生星孢寄生菇的开发与利用严重滞后,因此有必要对该菇进行更深入的研究。

环境因子能够影响菇类的生理代谢过程^[8],从而影响其生长发育全过程。因此,厘清不同环境因子胁迫下菇类个体的发育规律与特点,是野生菇类人工驯化的基础^[9]。与此同时,随着人们生活水平的提高,菇类的消费需求呈快速增长趋势,而野生菇类驯化的速度却缓慢滞后^[10],这种矛盾日益凸显。因此,探究该菇个体发育对可控环境因子的响应对突破野生菇类资源人工化难度大这一瓶颈意义重大。

笔者的研究从星孢寄生菇菌种的活化入手,重点探究不同温度、琼脂浓度、酸碱度、氧气含量、光照时长等可控环境因子单因素及其正交组合对该菇菌丝生长、原基分化及子实体发育的影响,旨在筛选该菇个体发育的最佳可控环境因子组合,厘清该菇生长发育过程中的主要影响因素,并为其进一步开发与利用提供一定的理论参考。

1 材料和方法

1.1 材料

1.1.1 供试菌株 星孢寄生菇菌株 YAASM4665 由云南省农业科学院生物技术与种质资源研究所

鉴定、提供及保存。

1.1.2 培养基 母种培养基(PDA):马铃薯浓度(w,后同)20%、葡萄糖浓度2%、琼脂浓度1.5%、蒸馏水1 L、pH自然。基础培养基(PSA):马铃薯浓度20%、蔗糖浓度2%、琼脂浓度1.5%、蒸馏水1 L、pH自然。

1.2 方法

1.2.1 培养基的制作 试验于2021年5月在滇西科技师范学院食用菌实训室内进行。马铃薯去皮、弃芽眼并清洗干净,将其切成1 cm³的小块,用蒸馏水对其煮沸10 min,并经4层纱布过滤后取滤液,再加入蔗糖和琼脂,待上述药品完全溶解后用蒸馏水定容,将培养基分装于250 mL的锥形瓶内,在121 °C下灭菌30 min。灭菌结束后,趁热倒平板并将其放入自制的缓慢降温容器中,以防止平板内产生小水珠^[11]。

1.2.2 菌种的活化、接菌、培养及测定 取4 °C冰箱内保存的菌株 YAASM4665,将其置于培养室常温下活化培养3~5 d。在无菌操作条件下,取黄豆大小的菌块接种于母种培养基平板中央,将其25 °C下倒置培养7 d,备用。用上述同样的方法,将直径为5 mm的菌块接入培养基平板中央,用保鲜膜密封,记录菌丝萌发时间(d)、菌丝与子实体颜色、原基分化时间(d)。待同一因素下最大菌落直径长到平板2/3时,测定菌丝生长势(“+++及以上”表示浓密健壮,“++”表示较浓密,“+”表示生长稀疏,“-”表示不生长)^[12]、菌落直径(mm)、生长速度(mm·d⁻¹)^[13]、原基分化数量(个·皿⁻¹)、菌盖直径(mm)、菌柄直径(mm)、菌柄长度(mm)以及子实体数量(个·皿⁻¹)。

1.2.3 温度试验 在基础培养基平板上设置9个梯度的5 °C温差(0、5、10、15、20、25、30、35、40 °C)进行初试。根据初试最佳温度范围设计2 °C温差试验。菌丝在遮光下培养,下同。

1.2.4 琼脂浓度试验 通过控制琼脂浓度来改变基础培养基的含水量,设计琼脂浓度为0.2%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%的7个梯度试验。在菌丝生长最佳温度下培养,下同。

1.2.5 pH试验 使用1 mol·L⁻¹ HCl溶液和1 mol·L⁻¹ NaOH溶液调节基础培养基的pH值,设置19个pH梯度试验^[14],分别为4.0、4.5、5.0、5.2、5.4、5.6、5.8、6.0、6.2、6.4、6.6、6.8、7.0、7.5、8.0、8.5、9.0、9.5、10.0。在菌丝生长最佳琼脂浓度下培养,下同。

1.2.6 氧气含量试验 通过改变培养皿直径的大小控制氧气含量,设计培养皿直径为60、70、90、

100 mm 的 4 种基础培养基平板试验。在菌丝生长最佳 pH 值下进行培养,下同。

1.2.7 光照时长试验 在基础培养基平板上,设置光照时间分别为 0、12、24 h·d⁻¹ 的 3 组处理试验^[15]。除氧气试验外,上述研究培养皿直径均为 60 mm。

1.2.8 正交试验 以温度、琼脂浓度、pH、光照和含氧量 5 个单因素进行设计,分别以菌丝体生长速度(表 1)、原基分化数量(表 2)及子实体发育数量(表 3)为指标,进行 L₁₆(4⁵)正交试验。

表 1 基于菌丝体生长速度的正交试验因素与水平
Table 1 The orthogonal test factors and levels based on mycelium growth rate

水平	因素				
	A 琼脂浓度/%	B pH	C 温度/°C	D 培养皿直径/mm	E 光照时长/(h·d ⁻¹)
1	1.5	6.4	21	60	0
2	2.0	6.6	23	70	10
3	2.5	6.8	25	90	14
4	3.0	7.0	27	100	24

表 2 基于原基分化数量的正交试验因素与水平
Table 2 The orthogonal test factors and levels based on number of primordial differentiation

水平	因素				
	A 琼脂浓度/%	B pH	C 温度/°C	D 培养皿直径/mm	E 光照时长/(h·d ⁻¹)
1	1.5	5.2	21	60	0
2	2.0	5.4	23	70	10
3	2.5	5.6	25	90	14
4	3.0	5.8	27	100	24

表 3 基于子实体发育数量的正交试验因素与水平
Table 3 The orthogonal test factors and levels based on number of fruiting body development

水平	因素				
	A 琼脂浓度/%	B pH	C 温度/°C	D 培养皿直径/mm	E 光照时长/(h·d ⁻¹)
1	1.0	6.0	21	60	0
2	1.5	6.2	23	70	10
3	2.0	6.4	25	90	14
4	2.5	6.6	27	100	24

1.2.9 数据分析 所有试验数据均为 3 次重复,采用 SPSS 22.0 软件进行处理分析^[16]。

2 结果与分析

2.1 温度对菌株 YAASM4665 生长发育的影响

2.1.1 5 °C 温差试验 由表 4 可知,当温度 ≤10 °C 或 ≥35 °C 时,该菇菌丝不萌发,而在 15~30 °C 范围内,均能生长且为白色(图 1)。当温度为 25 °C 时,其菌丝萌发时间最短,浓密健壮,菌落直径最大,生长速度最快,达到(6.33±0.06) mm·d⁻¹,与其他处理呈极显著差异,而 30 °C 处理其菌丝生长情况最差。总之,该菇菌丝生长受温度的影响较大,25 °C 是该菇菌丝生长的最适温度。

该菇在温度为 15~25 °C 范围内,原基分化与子实体均能正常发育,而温度 ≤10 °C 或 ≥30 °C 时,该菇无法形成原基和子实体(表 5)。当温度为 25 °C 时,该菇的原基分化与子实体发育各项指标综合表现最佳,与其他处理均呈极显著差异,而 15 °C 处理该菇生长发育情况最差。总之,温度较高或较低时,该菇的原基分化与子实体发育受到限制,25 °C 是该菇

表 4 5 °C 温度梯度下菌丝体生长情况
Table 4 The mycelium growth at 5 °C temperature gradient

处理/°C	萌发时间/d	培养时间/d	生长势	颜色	菌落直径/mm	生长速度/(mm·d ⁻¹)
0	—	10	—	—	—	—
5	—	10	—	—	—	—
10	—	10	—	—	—	—
15	7	10	+	白色	8.56	0.86±0.07 cC
20	4	10	++++	白色	37.11	3.71±0.20 bB
25	2	10	+++++	白色	63.33	6.33±0.06 aA
30	3	10	+	白色	7.78	0.78±0.05 cC
35	—	10	—	—	—	—
40	—	10	—	—	—	—

注:生长速度为 3 个重复的平均值±标准差,同列数字后不同大小写字母分别表示在 0.01 和 0.05 水平上差异显著性^[17],下同。

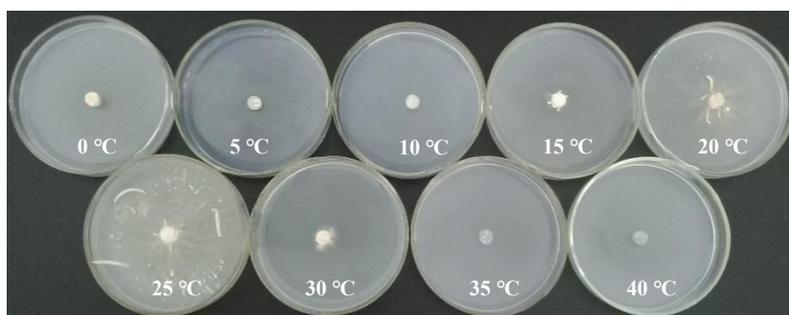


图 1 5 °C 温度梯度下菌株 YAASM4665 在 PSA 平板中的培养情况

Fig. 1 The cultivation of bacterial strain YAASM4665 in PSA slab at 5 °C temperature gradient

表5 5℃温度梯度下原基分化与子实体发育情况

Table 5 The primordial differentiation and fruiting body development at 5℃ temperature gradient

温度/ ℃	原基		子实体				
	分化时间/d	数量/(个·皿 ⁻¹)	颜色	菌柄长度/mm	菌柄直径/mm	菌盖直径/mm	数量/(个·皿 ⁻¹)
0	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—
15	7	8±0.72 cB	白色	1~2	0.70	0.80	4.00±0.65 cC
20	4	13±1.31 bB	灰白色	4~8	0.80	1.00	5.10±0.73 bB
25	3	63±3.94 aA	生成色	1~14	1.00	0.50	11.00±1.06 aA
30	—	—	—	—	—	—	—
35	—	—	—	—	—	—	—
40	—	—	—	—	—	—	—

注:原基数量和子实体数量为3个重复的平均值±标准差。下同。

原基分化与子实体发育的最适温度。

2.1.2 2℃温差试验 由表6可知,在19~29℃范围内,该菇菌丝为白色且均能生长(图2)。25℃的温度处理下其菌丝生长情况各项参数表现最佳,该结果与5℃温差试验结果相符。

由表7可知,19~27℃是该菇原基分化与子实体发育正常进行的温度范围,而温度≥29℃时,该菇停止发育。在25℃的温度处理下,该菇原基分化与子实体发育的各项指标也表现最佳,与上述5℃温差试验结果相符。

表6 2℃温度梯度下菌丝体生长情况

Table 6 The mycelium growth at 2℃ temperature gradient

温度/ ℃	萌发时 间/d	培养时 间/d	生长势	颜色	菌落直 径/mm	生长速度/ (mm·d ⁻¹)
19	4	8	++	白色	24.00	3.00±0.08 eD
21	3	8	++	白色	36.33	4.54±0.27 cC
23	3	8	++	白色	45.56	5.69±0.10 bB
25	2	8	+++	白色	52.22	6.53±0.06 aA
27	3	8	++	白色	34.56	4.32±0.30 dC
29	3	8	+	白色	9.67	1.21±0.04 fE

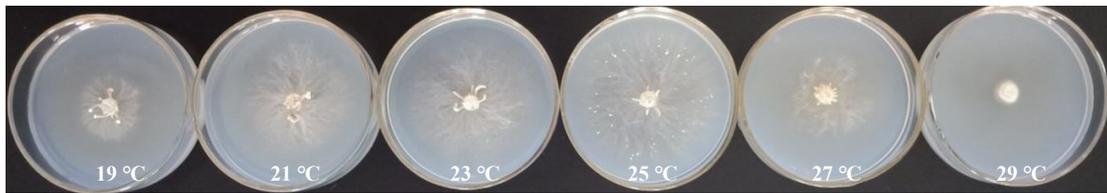


图2 2℃温度梯度下菌株YAASM4665在PSA平板中的培养情况

Fig. 2 The cultivation of bacterial strain YAASM4665 in PSA slab at 2℃ temperature gradient

表7 2℃温度梯度下原基分化与子实体发育情况

Table 7 The primordial differentiation and fruiting body development at 2℃ temperature gradient

温度/ ℃	原基		子实体				
	分化时间/d	数量/(个·皿 ⁻¹)	颜色	菌柄长度/mm	菌柄直径/mm	菌盖直径/mm	数量/(个·皿 ⁻¹)
19	4	15±1.33 dD	乳白色	3~6	1.17	1.50	4.00±0.67 eE
21	3	16±2.11 cdD	灰白色	3~6	1.67	2.10	5.33±0.31 dD
23	3	19±2.19 cC	白色	2~5	1.33	1.47	6.00±0.84 cC
25	3	66±4.22 aA	乳白色	3~5	1.33	1.43	10.33±0.51 aA
27	3	27±3.75 bB	胡粉色	2~3	0.83	1.00	9.00±0.69 bB
29	—	—	—	—	—	—	—

2.2 琼脂浓度对菌株YAASM4665生长发育的影响

由表8可知,在培养基琼脂浓度0.2%~3.0%的范围内,该菇菌丝均能正常生长,呈白色,萌发时间均为2d。当琼脂浓度为3.0%时,菌丝较浓密(图3),菌落直径最大,生长速度最快[(7.17±0.10) mm·d⁻¹],

与其他处理呈极显著差异,而琼脂浓度为0.2%时,菌丝长势稀疏,生长速度最慢[(5.51±0.10) mm·d⁻¹]。总之,不同的培养基琼脂浓度对该菇菌丝生长影响较大,3.0%是其菌丝生长最佳琼脂浓度。

由表9可知,该菇在所有琼脂浓度处理下均能正常生长发育,其中原基分化时间均为3d。

表8 不同琼脂浓度下菌丝体生长情况

Table 8 The mycelium growth at different agarose gel concentration

w(琼脂)/%	萌发时间/d	培养时间/d	生长势	颜色	菌落直径/mm	生长速度/(mm·d ⁻¹)
0.2	2	7	+	白色	38.56	5.51±0.10 fF
0.5	2	7	++	白色	43.67	6.24±0.19 eE
1.0	2	7	++	白色	46.44	6.63±0.07 dD
1.5	2	7	+++	白色	47.56	6.79±0.10 cC
2.0	2	7	+++	白色	48.89	6.98±0.03 bB
2.5	2	7	+++	白色	48.56	6.94±0.07 bB
3.0	2	7	++	白色	50.22	7.17±0.10 aA

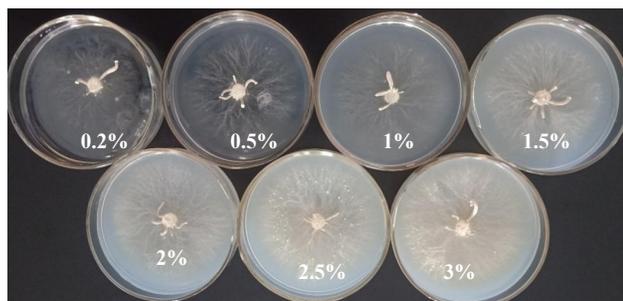


图3 不同琼脂浓度下菌株 YAASM4665 在 PSA 平板中的培养情况

Fig. 3 The cultivation of bacterial strain YAASM4665 in PSA slab at different agarose gel concentration

表9 不同琼脂浓度下原基分化与子实体发育情况

Table 9 The primordial differentiation and fruiting body development at different agarose gel concentration

w(琼脂)/%	原基 分化时间/d	数量/(个·皿 ⁻¹)	子实体 颜色	菌柄长度/mm	菌柄直径/mm	菌盖直径/mm	数量(个·皿 ⁻¹)
0.2	3	13±1.09 dCD	胡粉色	3~12	1.33	1.67	4.67±0.58 eE
0.5	3	11±1.14 dD	乳白色	4~7	1.00	1.23	5.00±0.70 eDE
1.0	3	9±1.21 dD	胡粉色	3~8	1.50	1.63	8.00±1.00 bA
1.5	3	18±2.05 cC	灰白色	3~10	1.50	1.93	8.67±0.58 aA
2.0	3	12±0.99 dCD	灰白色	5~10	1.17	1.20	5.67±0.53 dCD
2.5	3	106±7.13 aA	灰白色	3~6	1.07	1.13	7.00±0.09 cB
3.0	3	43±4.34 bB	灰白色	2~7	1.50	1.63	6.00±0.11 dC

而琼脂浓度为 2.5% 时,该菇的原基分化数量最多 [(106±7.13)个·皿⁻¹],与其他处理相比,达到极显著差异,而 1.0% 的琼脂浓度处理,该菇原基分化情况最差。当琼脂浓度为 1.5% 时,该菇子实体呈灰白色,农艺性状综合表现最佳,发育数量最多 [(8.67±0.58)个·皿⁻¹],与其他处理呈显著差异,而 0.2% 的琼脂浓度处理,该菇子实体发育情况较差,数量最少。总之,培养基琼脂浓度的大小影响该菇的生长发育情况,其原基分化与子实体发育的最适琼脂浓度依次为 2.5%、1.5%。

2.3 pH 值对菌株 YAASM4665 生长发育的影响

由表 10 可知,在培养基 pH 4.0~10.0 的范围内,该菇菌丝均能正常生长,萌发时间均为 2 d(图 4)。当培养基 pH 6.6 时,该菇菌丝较浓密,菌落直径最大,生长速度最快 [(6.89±0.15) mm·d⁻¹],除与培养基 pH 6.8 的处理相比差异不显著外,与其他处理呈极显著差异。而培养基 pH 4.0 时,该菇菌落直径最小,生长速度最慢 [(4.48±0.54) mm·d⁻¹]。总之,该菇在不同酸碱度的培养基上菌丝生长差异较大且最佳 pH 为 6.6~6.8。

在培养基 pH 4.5~10.0 的范围内,该菇均能生长

表10 不同 pH 值下菌丝体生长情况

Table 10 The mycelium growth at different pH

pH	萌发时间/d	培养时间/d	生长势	颜色	菌落直径/mm	生长速度/(mm·d ⁻¹)
4.0	2	7	++	白色	31.33	4.48±0.54 jJ
4.5	2	7	++	白色	37.92	5.42±0.23 iI
5.0	2	7	++	白色	42.00	6.00±0.36 fgEFH
5.2	2	7	+++	白色	41.83	5.98±0.13 fgEFH
5.4	2	7	+++	白色	40.17	5.74±0.08 hH
5.6	2	7	+++	白色	40.67	5.81±0.12 ghFH
5.8	2	7	+++	白色	43.67	6.24±0.25 deCDE
6.0	2	7	+++	白色	42.33	6.05±0.55 efEFH
6.2	2	7	+++	白色	42.83	6.12±0.29 efDEF
6.4	2	7	+++	白色	46.00	6.57±0.24 bcBC
6.6	2	7	++	白色	48.25	6.89±0.15 aA
6.8	2	7	++	白色	47.08	6.73±0.14 abAB
7.0	2	7	++	白色	45.33	6.48±0.25 cdBC
7.5	2	7	++	乳白色	45.00	6.43±0.18 cdBCD
8.0	2	7	++	乳白色	45.83	6.55±0.11 bcBC
8.5	2	7	+	乳白色	43.92	6.27±0.17 deCDE
9.0	2	7	+	乳白色	43.75	6.25±0.21 deCDE
9.5	2	7	+	乳白色	43.83	6.26±0.14 deCDE
10.0	2	7	+	乳白色	40.42	5.77±0.27 ghH

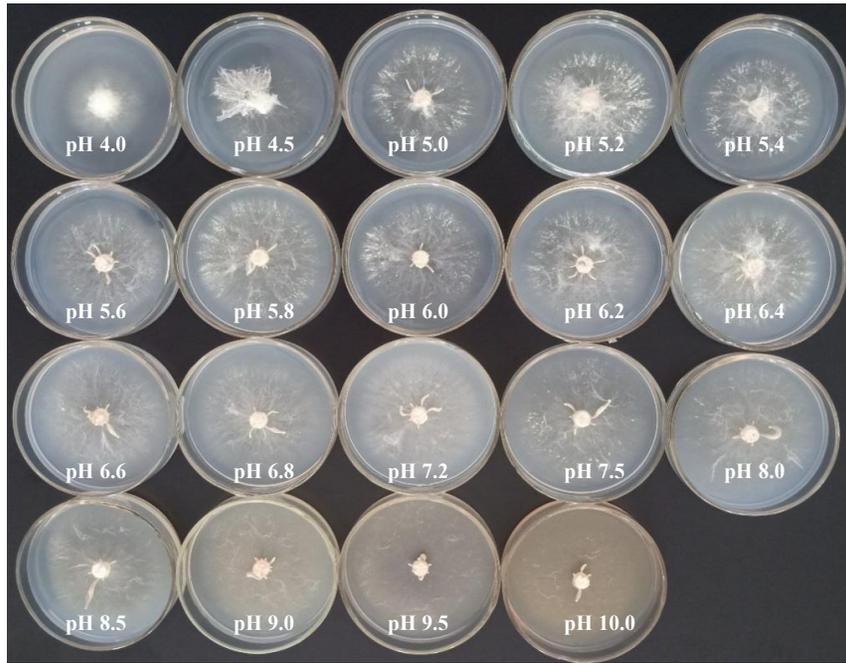


图 4 不同 pH 值下菌株 YAASM4665 在 PSA 平板中的培养情况

Fig. 4 The cultivation of bacterial strain YAASM 4665 in PSA slab at different pH

发育(表 11)。当培养基 pH 4.0 时,该菇无法形成原基,pH 10.0 时,子实体发育情况最差。在 pH 5.4 的培养基上,该菇原基分化时间短(3 d),数量最多[(214±13.04)个·皿⁻¹],与其他处理呈极显著差异。

当培养基 pH 为 6.2 时,该菇子实体呈乳白色,农艺性状综合表现较佳,发育数量最多[(8.00±0.94)个·皿⁻¹],除与培养基 pH 6.0、6.4、6.6 的处理相比差异不显著外,与其他处理呈极显著差异。总之,该菇的生长发

表 11 不同 pH 值下原基分化与子实体发育情况

Table 11 The primordial differentiation and fruiting body development at different pH

pH	原基		子实体				
	分化时间/d	数量/(个·皿 ⁻¹)	颜色	菌柄长度/mm	菌柄直径/mm	菌盖直径/mm	数量/(个·皿 ⁻¹)
4.0	—	—	—	—	—	—	—
4.5	5	5±0.25 jI	乳白色	1~3	0.50	—	4.00±0.41 hiFG
5.0	4	84±4.58 eE	胡粉色	2~8	0.50	—	4.33±0.53 ghFG
5.2	3	126±12.11 cC	灰白色	1~7	1.00	—	5.00±0.82 fgEF
5.4	3	214±13.04 aA	乳白色	2~6	1.00	—	5.50±0.12 efDE
5.6	3	43±2.88 gG	胡粉色	1~5	1.00	—	5.75±1.06 deDE
5.8	3	196±12.09 bB	胡粉色	1~7	1.00	—	6.00±0.82 deDE
6.0	3	108±5.24 dD	灰白色	1~4	1.00	—	7.33±1.89 abAB
6.2	3	86±3.12 eE	乳白色	1~5	1.00	1.00	8.00±0.94 aA
6.4	3	112±7.22 dD	乳白色	1~8	1.00	1.00	7.50±0.91 abA
6.6	3	11±1.26 jI	胡粉色	1~10	1.20	0.50	7.05±0.30 bcABC
6.8	3	22±2.06 iH	灰白色	2~9	1.20	0.60	6.50±0.29 cdBCD
7.0	3	12±1.34 jI	灰白色	1~8	1.00	0.40	6.25±0.96 deCD
7.5	3	58±2.22 fF	灰白色	1~11	1.20	0.50	6.06±0.82 deD
8.0	3	31±2.17 hH	灰白色	1~8	1.00	1.00	6.00±0.82 deDE
8.5	3	8±1.03 jI	生成色	1~13	1.00	0.30	5.00±0.15 fgEF
9.0	3	8±0.45 jI	生成色	1~7	1.00	0.20	4.50±0.73 ghFG
9.5	3	7±0.33 jI	生成色	1~5	1.00	—	4.33±0.53 ghG
10.0	4	4±0.09 jI	乳白色	1~5	1.00	0.30	3.50±0.58 iG

育受酸碱度影响较大,其原基分化与子实体发育的最适 pH 值依次为 5.4、6.0~6.6。

2.4 氧气对菌株 YAASM4665 生长发育的影响

由表 12 可知,该菇在所有型号的培养皿平板上均能生长,菌丝呈白色(图 5),且萌发时间均为 1 d。

然而,随着培养皿直径的增大,该菇菌落的生长势逐渐减弱,其菌丝生长速度在各处理下无显著差异。因此,氧气对菌丝生长的影响较小。

由表 13 可知,该菇在各种型号的培养皿处理下均能生长发育,且原基分化时间均为 2 d,子实体

表 12 不同含氧量下菌丝体生长情况

Table 12 The mycelium growth at different oxygen content

培养皿直径/mm	萌发时间/d	培养时间/d	生长势	颜色	菌落直径/mm	生长速度/(mm·d ⁻¹)
60	1	5	++	白色	47.22	9.44±0.10 aA
70	1	5	++	白色	47.11	9.42±0.14 aA
90	1	5	+	白色	45.33	9.07±0.18 aA
100	1	5	+	白色	45.00	9.00±0.55 aA

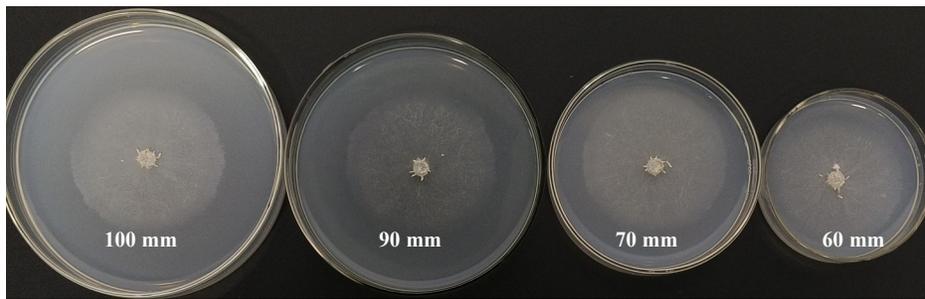


图 5 不同含氧量下菌株 YAASM4665 在 PSA 平板中的培养情况

Fig. 5 The cultivation of bacterial strain YAASM4665 in PSA slab at different oxygen content

表 13 不同含氧量下原基分化与子实体发育情况

Table 13 The primordial differentiation and fruiting body development at different oxygen content

培养皿直径/mm	原基		子实体				
	分化时间/d	数量/(个·皿 ⁻¹)	颜色	菌柄长度/mm	菌柄直径/mm	菌盖直径/mm	数量/(个·皿 ⁻¹)
60	2	17.00±1.00 bB	胡粉色	1~2	1.00	0.50	3.00±1.00 bA
70	2	19.67±0.58 aA	胡粉色	1~2	1.00	0.50	4.00±1.00 aA
90	2	16.33±1.53 bB	胡粉色	1~2	1.00	0.50	4.00±0.00 aA
100	2	16.33±0.58 bB	胡粉色	1~2	1.00	1.00	4.33±0.58 aA

呈胡粉色。在培养皿直径为 70 mm 的条件下,该菇的原基分化数量最多[(19.67±0.58)个·皿⁻¹],且与其他处理呈极显著差异。而培养皿直径为 100 mm 时,该菇的子实体农艺性状综合表现较佳,发育数量最多[(4.33±0.58)个·皿⁻¹],并且与培养皿直径为 60 mm 的处理相比达到显著差异。总之,各类型号培养皿对该菇生长发育具有一定程度的影响,其原基分化与子实体发育的最适培养皿直径依次为 70、70~100 mm。

2.5 光照时长对菌株 YAASM4665 生长发育的影响

由表 14 可知,该菇菌丝在不同光照时长处理下均能生长,呈白色(图 6),且萌发时间均为 2 d。在 0 h·d⁻¹ 的光照处理下该菇菌丝生长浓密健壮,菌落直径最大,菌丝生长速度最快[(7.15±0.25) mm·d⁻¹],

表 14 不同光照时长的菌丝体生长情况

Table 14 The mycelium growth at different light time

光照时间/(h·d ⁻¹)	萌发时间/d	培养时间/d	生长势	颜色	菌落直径/mm	生长速度/(mm·d ⁻¹)
24	2	6	++	白色	42.08	7.01±0.07 bA
12	2	6	+++	白色	40.83	6.81±0.22 abA
0	2	6	+++	白色	42.92	7.15±0.25 aA



图 6 不同光照时长的菌株 YAASM4665 在 PSA 平板中的培养情况

Fig. 6 The cultivation of bacterial strain YAASM4665 in PSA slab at different light time

与 24 h·d⁻¹ 的光照时长处理相比差异显著,但与 12 h·d⁻¹ 的光照时长处理相比差异不显著。总之,黑暗处理组下该菇菌丝生长情况优于光照组。

该菇在不同光照时长下均能生长发育,其原基分化时间均为 3 d(表 15)。在 12 h·d⁻¹ 的光照下,该

菇的原基分化数量最多[(16±3.14)个·皿⁻¹],与其他处理相比有极显著差异,而 24 h·d⁻¹ 的光照处理下原基分化情况最差。当光照时间为 24 h·d⁻¹ 时,该菇的子实体呈生成色,其农艺性状综合表现最好,发育数量最多[(7.75±0.71)个·皿⁻¹],与 12 h·d⁻¹ 的光照

表 15 不同光照时间下原基分化与子实体发育情况

Table 15 The primordial differentiation and fruiting body development at different light time

光照时间/ (h·d ⁻¹)	原基		子实体				
	分化时间/d	数量/(个·皿 ⁻¹)	颜色	菌柄长度/mm	菌柄直径/mm	菌盖直径/mm	数量/(个·皿 ⁻¹)
24	3	6±0.77 cB	生成色	2~6	1.56	2.88	7.75±0.71 aA
12	3	16±3.14 aA	胡粉色	2~5	1.00	1.20	7.25±0.50 aA
0	3	9±1.23 bB	生成色	2~7	1.00	0.00	5.00±0.15 bB

处理相比差异不显著,与 0 h·d⁻¹ 的光照时长处理呈极显著差异。总之,适宜的散射光有利于该菇原基的分化与子实体发育,其最适光照时间依次为 12、12~24 h·d⁻¹。

2.6 正交试验

2.6.1 以菌丝体生长速度为指标的正交试验 由表 16 可知,在 16 种正交组合下,该菇菌丝呈白色且均能生长。在组合 8 上菌丝萌发时间短,菌丝浓密健壮,生长速度最快[(9.72±0.38) mm·d⁻¹](表 17),与其他处理相比呈极显著差异,而组合 9 和 11 上菌丝生长情况最差。

极差分析表明,各列极差大小顺序为 R₁>R₃>R₂>R₄>R₅,试验因素的主次顺序为 A>C>B>D>E,即琼脂浓度对菌丝生长速度影响最大,其最优组合

表 16 不同正交组合下菌丝体生长情况

Table 16 The mycelium growth at different orthogonal combination

试验号	萌发时间/d	培养时间/d	生长势	颜色	菌落直径/mm
1	2	6	++	白色	35.25
2	2	6	++	白色	35.50
3	1	6	+++	白色	50.83
4	1	6	+++	白色	49.25
5	2	6	++	白色	36.42
6	2	6	+	白色	28.92
7	2	6	++	白色	34.50
8	1	6	+++	白色	58.33
9	2	6	++	白色	21.42
10	2	6	++	白色	24.42
11	2	6	++	白色	21.75
12	2	6	++	白色	26.17
13	2	6	++	白色	42.92
14	1	6	+++	白色	46.67
15	2	6	++	白色	30.50
16	2	6	++	白色	39.17

表 17 以菌丝体生长速度为指标的极差分析

Table 17 The range analysis based on mycelium growth rate

试验号	A 琼脂浓度	B pH	C 温度	D 氧气	E 光照	菌丝生长速度/(mm·d ⁻¹)
1	1	1	1	1	1	5.88±0.27 fEF
2	1	2	2	2	2	5.92±0.14 fEF
3	1	3	3	3	3	8.47±0.72 bB
4	1	4	4	4	4	8.21±0.94 bcB
5	2	1	2	3	4	6.07±0.80 efEF
6	2	2	1	4	3	4.82±0.99 ghHI
7	2	3	4	1	2	5.75±0.13 fFG
8	2	4	3	2	1	9.72±0.38 aA
9	3	1	3	4	2	3.57±0.53 jK
10	3	2	4	3	1	4.07±0.41 ijJK
11	3	3	1	2	4	3.63±0.55 jK
12	3	4	2	1	3	4.36±0.71 hiIJ
13	4	1	4	2	3	7.15±0.04 dCD
14	4	2	3	1	4	7.78±0.05 cBC
15	4	3	2	4	1	5.08±0.54 gGH
16	4	4	1	3	2	6.53±0.61 eDE
K ₁	28.48	22.67	20.86	23.77	24.75	
K ₂	26.36	22.59	21.43	26.42	21.77	
K ₃	15.63	22.93	29.54	25.14	24.80	
K ₄	26.54	28.82	25.18	21.68	25.69	
k ₁	7.12	5.67	5.22	5.94	6.19	
k ₂	6.59	5.65	5.36	6.61	5.44	
k ₃	3.91	5.73	7.39	6.29	6.20	
k ₄	6.64	7.21	6.30	5.42	6.42	
极差 R	3.21	1.56	2.17	1.19	0.98	
主次顺序	A>C>B>D>E					
优水平	A ₁	B ₄	C ₃	D ₂	E ₄	
优组合	A ₁ B ₄ C ₃ D ₂ E ₄					

为 A₁B₄C₃D₂E₄, 该组合与显著性分析结果(A₂B₄C₃D₂E₁)不一致。经试验验证,在组合

A₂B₄C₃D₂E₁培养基上,该菇菌丝生长速度最快[(9.02±0.18) mm·d⁻¹].因此,最优组合为琼脂浓度2%、pH 7.0、温度25℃、培养皿直径70 mm、0 h·d⁻¹光照。

2.6.2 以原基数量为指标的正交试验 由表18可知,在16种正交组合条件下,该菇原基均能分化,在组合8条件下,该菇原基分化数量最多[(17.67±1.06)个·皿⁻¹],与其他处理相比有极显著差异。

极差分析表明,各列极差大小顺序为R₁>R₂>R₅>R₄>R₃,试验因素的主次顺序为A>B>E>D>C,即琼脂浓度对原基分化影响最大,其最优组合为A₂B₃C₃D₁E₁,该组合与显著性分析结果(A₂B₄C₃D₂E₁)不一致。经试验验证,在组合A₂B₃C₃D₁E₁培养基上,该菇的原基分化时间短(3 d),数量最多[(20.75±3.31)个·皿⁻¹].因此,最优

表18 以原基数量为指标的极差分析

Table 18 The range analysis based on number of primordial

试验号	A 琼脂浓度	B pH	C 温度	D 氧气	E 光照	原基数量/(个·皿 ⁻¹)
1	1	1	1	1	1	13.25±1.75 cC
2	1	2	2	2	2	5.25±0.50 iH
3	1	3	3	3	3	10.00±0.82 efEFG
4	1	4	4	4	4	13.50±1.70 cC
5	2	1	2	3	4	11.50±0.91 dD
6	2	2	1	4	3	11.00±0.97 dDE
7	2	3	4	1	2	16.25±1.30 bB
8	2	4	3	2	1	17.67±1.06 aA
9	3	1	3	4	2	6.25±0.22 hH
10	3	2	4	3	1	5.67±0.73 hiH
11	3	3	1	2	4	9.50±0.65 fgG
12	3	4	2	1	3	9.75±0.30 fgFG
13	4	1	4	2	3	9.00±1.83 gG
14	4	2	3	1	4	10.75±0.86 deDEF
15	4	3	2	4	1	15.75±1.08 bB
16	4	4	1	3	2	9.25±0.99 fgG
K ₁	42.00	40.00	43.00	50.00	52.34	
K ₂	56.42	32.67	42.25	41.42	37.00	
K ₃	31.17	51.50	44.67	36.42	39.75	
K ₄	44.75	50.17	44.42	46.50	45.25	
k ₁	10.50	10.00	10.75	12.50	13.09	
k ₂	14.11	8.17	10.56	10.36	9.25	
k ₃	7.79	12.88	11.17	9.11	9.94	
k ₄	11.19	12.54	11.11	11.63	11.31	
极差 R	6.32	4.71	0.61	3.39	3.84	
主次顺序	A>B>E>D>C					
优水平	A ₂	B ₃	C ₃	D ₁	E ₁	
优组合	A ₂ B ₃ C ₃ D ₁ E ₁					

组合为:琼脂浓度2%、pH 5.6、温度25℃、培养皿直径60 mm、0 h·d⁻¹光照。

2.6.3 以子实体数量为指标的正交试验 由表19可知,在16种正交组合条件下,该菇子实体均能发育。在组合10条件下,该菇子实体呈白色,其农艺性状综合良好,发育数量最多[(5.25±0.71)个·皿⁻¹](表20),与其他处理相比有显著差异。

表19 不同正交组合条件下子实体发育情况

Table 19 The fruiting body development at different orthogonal combination

试验号	颜色	菌柄长度/mm	菌柄直径/mm	菌盖直径/mm
1	白色	1~3.0	1.50	1.50
2	胡粉色	1~3.0	1.50	2.00
3	灰白色	1~2.5	1.85	2.50
4	白色	1~2.0	1.00	2.00
5	白色	1~3.0	1.50	2.50
6	白色	1~2.5	1.50	1.75
7	胡粉色	1~2.0	0.75	0.50
8	白色	1~2.0	1.00	1.50
9	生成色	1~2.0	0.50	0.75
10	白色	1~2.0	1.50	2.00
11	白色	1~2.0	1.50	1.00
12	白色	1~2.0	1.00	1.50
13	白色	1~2.5	1.00	1.25
14	灰白色	1~3.0	1.00	1.75
15	白色	1~1.5	1.00	1.25
16	白色	1~1.5	1.00	1.50

极差分析表明,各列极差大小顺序为R₃>R₄>R₅>R₂>R₁,试验因素的主次顺序为C>D>E>B>A,即温度对子实体发育影响最大,其最优组合A₃B₂C₄D₄E₃,该组合与显著性分析结果(A₃B₂C₄D₃E₁)不一致。经试验验证,在组合A₃B₂C₄D₄E₃培养基上,该菇子实体发育数量最多[(5.50±0.58)个·皿⁻¹].因此,最优组合为:琼脂浓度2%、pH 6.2、温度25℃、培养皿直径100 mm、14 h·d⁻¹光照。

3 讨论与结论

环境因子与个体发育的关系是菇类研究的热点和难点问题,也是野生菇类驯化栽培的研究基础^[18]。通过对菇类生长的环境因子进行人为控制,能有效提高农业生产方面的经济效益^[19]。

研究表明,星孢寄生菇在温度15~27℃、培养基pH 4.5~10.0以及其他可控环境条件所有处理下均能生长发育,以25℃为最适温度。单因素试验条件下,在琼脂浓度3%、pH 6.6~6.8、光照时间0 h·d⁻¹

表 20 以子实体数量为指标的极差分析
Table 20 The range analysis based on number
of fruiting body

试验号	A 琼脂 浓度	B pH	C 温度	D 氧气	E 光照	子实体数量/ (个·皿 ⁻¹)
1	1	1	1	1	1	3.75±0.50 dCD
2	1	2	2	2	2	3.00±0.82 efEF
3	1	3	3	3	3	4.50±0.29 bcB
4	1	4	4	4	4	3.75±0.05 dCD
5	2	1	2	3	4	2.50±0.05 ghFG
6	2	2	1	4	3	4.50±0.65 bcB
7	2	3	4	1	2	2.25±0.06 hG
8	2	4	3	2	1	3.75±0.22 dCD
9	3	1	3	4	2	4.75±0.26 bAB
10	3	2	4	3	1	5.25±0.71 aA
11	3	3	1	2	4	2.75±0.16 fgEFG
12	3	4	2	1	3	2.75±0.70 fgEFG
13	4	1	4	2	3	4.25±0.19 cBC
14	4	2	3	1	4	3.25±0.22 eDE
15	4	3	2	4	1	3.00±0.41 efEF
16	4	4	1	3	2	2.25±0.50 hG
K ₁	15.00	15.25	12.00	12.00	15.75	
K ₂	13.00	16.00	11.25	13.75	12.25	
K ₃	15.50	12.50	16.25	14.50	16.00	
K ₄	12.75	12.50	15.50	16.00	12.25	
k ₁	3.75	3.81	3.00	3.00	3.94	
k ₂	3.25	4.00	2.81	3.44	3.06	
k ₃	3.88	3.13	4.06	3.63	4.00	
k ₄	3.19	3.13	3.87	4.00	3.06	
极差 R	0.69	0.87	1.25	1.00	0.94	
主次顺序	C>D>E>B>A					
优水平	A ₃	B ₂	C ₃	D ₄	E ₃	
优组合	A ₃ B ₂ C ₃ D ₄ E ₃					

各处理下,该菇菌丝生长最快且培养皿直径大小对其无显著影响;在琼脂浓度 2.5%、pH 5.4、培养皿直径 70 mm、光照时间 12 h·d⁻¹ 各处理下,该菇原基数量最多。在琼脂浓度 1.5%、pH 6.2、培养皿直径 70~100 mm、光照时间 12~24 h·d⁻¹ 处理下该菇子实体数量最多。然而,除温度外,该菇生长发育的单因素最佳水平与最佳可控环境因子组合均不相符,其中琼脂浓度、温度是该菇关键的环境因素。

上述结果验证了适宜温度范围是菇类细胞正常代谢的基础^[20],且不同菇类或同一菇类的不同品种,甚至同一品种在不同生长阶段其菌丝生长发育所需的温度也有所不同^[21],该菇生长发育的温度以及 pH 范围与王建东等^[2]研究结果基本相同。前人也充分证明了菇类在整个发育过程中均依赖细胞

储存的水分^[22];酸碱度决定营养物质吸收的快慢进而影响菇类的农艺性状^[23-24];多数菇类菌丝生长不需要光照,而子实体发育需要光的刺激;大多数菇类是好氧型真菌,O₂的含量会影响菇类菌丝萌发和子实体发育^[25]。同时,该菇的个体发育除与可控环境因子有关外,有必要进一步探究营养条件^[26]、胞外酶活性^[27]、基因转录组学^[28]等与该菇个体发育的关系。

总之,星孢寄生菇菌丝生长的最佳组合为:温度 25 °C、琼脂浓度 2%、pH 7.0、培养皿直径 70 mm、光照时间 0 h·d⁻¹。该菇原基分化的最佳组合为:温度 25 °C、琼脂浓度 2%、pH 5.6、培养皿直径 60 mm、光照时间 0 h·d⁻¹。该菇子实体发育的最佳组合为:温度 25 °C、琼脂浓度 2%、pH 6.2、培养皿直径 100 mm、光照时间 14 h·d⁻¹。

参考文献

- [1] 卯晓岚. 中国大型真菌[M]. 郑州:河南科学技术出版社,2000.
- [2] 王建东,赵建,张杰,等. 星孢寄生菇出菇培养及生物活性初探[J]. 四川大学学报(自然科学版),2004,41(1):198-202.
- [3] 袁鹏宇,崔凤仙,周国平,等. 可栽培食用菌子实体发育相关的调控基因研究进展[J]. 中国食用菌,2020,39(2):1-6.
- [4] PRILLINGER H, LOPANDIC K, SUGITA T, et al. *Asterotremella* gen. nov. *albida*, an anamorphic tremelloid yeast isolated from the agarics *Asterophora lycoperoides* and *Asterophora parasitica*[J]. Journal of General and Applied Microbiology, 2007, 53(3):167-175.
- [5] AKATA I, UZUN Y. Macrofungi determined in Uzungöl Nature Park (Trabzon)[J]. Trakya University Journal of Natural Sciences, 2017, 18(1):15-24.
- [6] FOKSHEI S I, DERZHYPILSKYI L M. Rare species of macrofungi from Kamenystyi forest parcel (Hutsulshchyna National Nature Park)[J]. Ukrainian Botanical Journal, 2019, 76(4):362-366.
- [7] HOFSTETTER V, REDHEAD S A, KAUFF F, et al. Taxonomic revision and examination of ecological transitions of the Lyophyllaceae (Basidiomycota, Agaricales) based on a multi-gene phylogeny[J]. Cryptogamie, Mycologie, 2014, 35 (4): 399-425.
- [8] 边银丙. 食用菌栽培学[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2017.
- [9] 周会明,张焱珍,柴红梅,等. 一株野生花脸香蘑的生物学特性及其栽培[J]. 食用菌学报,2017,24(1):39-44.
- [10] 吴素蕊,罗晓莉,刘蓓,等. 野生食用菌研究开发浅析及建议[J]. 食品科技,2010,35(4):100-103.
- [11] 周会明. 食用菌栽培技术[M]. 北京:中国农业大学出版社,2017.
- [12] 何俊,罗宗龙,邓瑞民,等. 野生柳生金针菇和金针菇的分离,生物学特性及驯化栽培[J]. 菌物学报,2022,41(4):630-646.
- [13] 窦晓丽,胡文静,刘凡,等. 新疆2种苜蓿叶斑病原菌主要生物学特性[J]. 新疆农业科学,2020,57(10):1863-1870.
- [14] 梁倩倩,宋利茹,牛鑫,等. 絮缘蘑菇生物学特性及驯化栽培[J].

- 菌物学报,2020,39(7):1301-1311.
- [15] 侯占山,邹亚杰,杜芳,等.不同光照时间对杏鲍菇生长发育的影响[J].应用与环境生物学报,2021,27(1):89-95.
- [16] 陈敬国,陈敬礼,杨雅儒,等.基于互联网大数据的嗅觉味觉丧失与新冠肺炎疫情发展趋势的相关性分析[J].中华耳鼻咽喉头颈外科杂志,2022,57(3):282-288.
- [17] 张焱珍,周会明,白玉英,等.一株临沧野生灵芝的鉴定与驯化栽培[J].热带作物学报,2020,41(11):2176-2182.
- [18] 于传宗.锡林郭勒主要野生食用菌种质资源多样性及系统发育研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
- [19] 张子奇.基于物联网的食用菌生长监测系统关键技术研究[D].上海:上海海洋大学,2018.
- [20] 于海龙,郭倩,杨娟,等.环境因子对食用菌生长发育影响的研究进展[J].上海农业学报,2009,25(3):100-104.
- [21] 杨庆尧.食用菌生物学基础[M].上海:上海科学技术出版社,1981.
- [22] 郑子乔,罗星.温度和湿度控制对食用菌生态高产栽培效果的影响分析[J].中国食用菌,2019,38(8):21-24.
- [23] 黄敏敏,刘洋,颜振兰,等.酸碱度对秀珍菇新品种福秀163菌丝体形态及锁状个数的影响[J].热带农业科学,2019,39(9):68-73.
- [24] 杨顺强,罗家刚,桑正林,等.不同pH值PDA培养基对平菇、香菇母种培养的影响[J].现代农业科技,2016(14):67-68.
- [25] 李燕萍,李艳婷,徐莉娜.环境条件和营养因素对食用菌生长发育的影响[J].安徽农学通报,2022,28(3):39-40.
- [26] 苏荣荣,张宇慧,马鑫旺,等.外施营养液对平菇生长发育及品质的影响[J].中国食用菌,2020,39(3):13-16.
- [27] 李子豪,李小凤,杜芳,等.刺芹侧耳不同生长发育阶段漆酶基因家族表达[J].食用菌学报,2021,28(4):1-6.
- [28] 曹子健,胡宝,徐子昕,等.逆境胁迫下食用菌转录组学研究进展[J].北方园艺,2022(6):131-136.