

基于 D-optimal 法优化香菇菌种 培养基质配方的研究

任爱民¹, 包玉政², 韩爱民², 李通¹, 刘明军¹, 王晓巍¹, 杨建杰¹,
杨琴¹, 杨仁录³, 付爱芳³

(1. 甘肃省农业科学院蔬菜研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 宕昌县农业技术推广中心,
甘肃 宕昌 742500; 3. 宕昌县兴宕菌业有限责任公司, 甘肃 宕昌 742500)

摘要: 为了筛选和优化香菇原种及栽培种的培养基质配方, 采用 D-optimal 设计方法, 以麦粒和木屑不同配比为原料优化香菇原种培养基质, 以木屑、玉米芯、麸皮不同配比为原料优化香菇栽培种培养基质, 以香菇品种 L808 作为供试菌种, 分别以其菌丝萌发期、菌丝长速、满袋期为评价指标, 通过对各评价指标的测量, 建立了各配比基质与香菇培养基质配方响应值之间的回归模型, 从而科学的优化出香菇原种及栽培种培养基质的配方。试验结果表明, 香菇原种栽培基质最优配方为 50%麦粒+50%木屑; 香菇栽培种栽培基质最优配方为 37.69%玉米芯+23.33%麸皮+38.98%木屑。在以上 2 个配方的栽培基质接种后, 香菇菌丝的生长旺盛, 萌发期短、满袋期短, 且理化性质较优, 说明优化得到的栽培基质配方具有较高的可行性, 该设计方法也在优化培养料配比上是科学并且可行的。

关键词: D-optimal 法; 香菇; 原种; 栽培种; 培养基质; 配方

中图分类号: S646.1

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2024)08-0724-10

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2024.08.006

Optimization of *Lentinula edodes* Spawn Medium Formula Based on D-optimal Method

REN Aiming¹, Bao Yzheng², Han Aimin², LI Tong¹, LIU Mingjun¹, WANG Xiaowei¹,
YANGJianjie¹, Yang Qin¹, YANG Renlu³, FU Aifang³

(1. Institute of Vegetables, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. Agricultural Technology Extension Centre of Tanchang County, Tanchang Gansu 742500, China; 3. Tanchang County Xingtian Fungi Industry Co., Ltd., Tanchang Gansu 742500, China)

Abstract: In order to screen and optimize the culture medium formula of *Lentinula edodes* original and cultivated species, the D-optimal design method was used to optimize the original culture medium of *Lentinula edodes* with different ratios of wheat grain and sawdust as raw materials, and the cultivation medium of *Lentinula edodes* with different ratios of sawdust, corncob and bran as raw materials. The *Lentinula edodes* variety L808 was used as the test strain, and the mycelial germination period, mycelial growth rate and full bag period were used as the evaluation indexes, respectively. Through the measurement of the indexes, the regression model between the ratio matrix and the response value of the *Lentinula edodes* culture medium formula was established, so as to scientifically optimize the formula of the original and cultivated species of *Lentinula edodes*. The results showed that the optimal formula of *Lentinula edodes* original culture was: 50% wheat grain + 50% sawdust; the optimal formula of *Lentinula edodes* cultivation was: 37.69% corncob + 23.33% bran + 38.98% sawdust. After inoculating the cultivation substrates of the above two formulas, the mycelium of *Lentinula edodes* grew vigorously, with a short germination period and a short full bag period, and the physicochemical properties were also superior, indicating that the optimized cultivation substrate formula is highly feasible. This design method is scientific and feasible in optimizing the ratio of cultivation materials.

Key words: D-optimal design; *Lentinula edodes*; Original species; Cultivated species; Culture medium; Formula

收稿日期: 2024-06-11

基金项目: 甘肃省科技计划项目 (22CX8NA031); 国家重点研发计划课题 (2021YFD1100503); 国家食用菌产业技术体系 (CARS-20)。

作者简介: 任爱民(1970—), 男, 甘肃合水人, 研究员, 硕士, 主要从事食用菌栽培技术与推广方面研究工作。Email: gs_ram@126.com。

通信作者: 王晓巍(1968—), 男, 甘肃宁县人, 研究员, 博士, 主要从事生态农业、设施园艺作物栽培等方面的研究与示范推广工作。Email: wangxw@gsagr.ac.cn。

香菇(*Lentinula edodes*)是目前国内种植规模最大、产量最高的食用菌^[1]。菌种是香菇栽培中的关键,香菇菌种的优劣通常取决于纯度高、活力强的香菇母种以及原种和栽培种培养料的科学合理选择^[2]。近年来,香菇菌种的培养以及菌棒的栽培主要原料为各种阔叶树木的木屑,由于全国乡村振兴战略的开展,香菇栽培面积的扩大,导致栽培原材料木屑缺乏严重^[3],为了缓解木屑资源短缺的问题,培养料中可添加玉米芯、棉籽壳、秸秆等代替木屑培养香菇原种、栽培种及栽培香菇^[4-6],这也是解决目前面临资源短缺困境的有效途径。同时,使用部分麦粒、玉米芯和麸皮代替木屑培养香菇菌种能有效利用多种农业废弃物,缓解对木屑资源的采用,以及减少栽培种植成本,促进农业的可持续发展^[3]。但培养基原料的不同,也会影响原种、栽培种的菌丝的生长速度及活力^[7],并影响后期香菇的营养成分、品质、产量^[8]。因此进行科学的筛选并优化菌种的培养料配方并培养出优质的菌种是香菇栽培过程中的关键途径。杨建杰等^[9]根据对多年文献的汇总,选择出多个优良的配方,再结合当地地理优势筛选并优化出香菇的栽培种配方。夏敏等^[10]通过有限的配方均匀设计筛选并优化出了玉米秸秆代料栽培香菇的优良配方。周韬^[11]采用正交试验设计优化出了香菇液体菌种的优良配方。但是目前采用 D-optimal 设计优化原种及栽培种配方却鲜有研究,更多的使用在蔬菜基质的优化试验和药品处方的优化方面^[12-13]。

本试验将通过 D-optimal 设计对香菇的原种及栽培种的培养料配方进行科学的优化,即用麦粒代替木屑设计不同的配比对原种培养基配方进行优化,用玉米芯和麸皮代替部分木屑设计不同配比的栽培种培养料配方进行优化,从而获得一个优良的原种培养料配方和一个栽培种培养料配方,最终为有效地缓解目前木屑资源短缺的问题

提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

供试菌种为香菇 L808 试管种及麦粒种,由甘肃省农业科学院蔬菜研究所食用菌研究室提供。供试木屑购买于陕西省汉中市宁强县,供试麦粒、玉米芯和麸皮均购买于甘肃省白银市景泰县。各供试原料的理化性质如表 1 所示。

供试设备有 QY-8 型电脑程序控制装袋机(启源机械有限公司)、免锅炉节能环保灭菌锅(诸城市良工机械有限公司)、ST20 型 pH 仪(奥豪斯仪器常州有限公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 混料配方设计 根据前期研究及相关文献^[14-16],本试验将原种所用的麦粒用量设置为 0~50.0%,木屑用量设置为 50.0%~100.0%;将栽培种所用的木屑的用量设置为 20.0%~100.0%,玉米芯的用量设置为 0~40.0%,麸皮的用量设置为 0~40.0%。根据 Design-Expert 8.0.6 软件中的 Mixture-Optimal 进行设计试验,原种栽培料共设计出 13 个混料组合配方(表 2),栽培种栽培料共设计出 16 个混料组合配方(表 3)。

表 2 原种栽培料混料组合配方组成^① %

配方	A麦粒	B木屑
1	25.0	75.0
2	0	100.0
3	50.0	50.0
4	25.0	75.0
5	0	100.0
6	33.3	66.7
7	25.0	75.0
8	50.0	50.0
9	37.5	62.5
10	0	100.0
11	12.5	87.5
12	16.7	83.3
13	50.0	50.0

①麦粒和木屑配比比例为质量比。

表 1 原料的理化性质

原料	容重 (g/cm ³)	总孔隙度 /%	通气孔隙度 /%	持水孔隙度 /%	pH	含水量 (g/kg)	含氮量 (g/kg)
麦粒	0.78	56.36	14.69	41.67	7.13	125.1	15.9
玉米芯	0.15	59.29	16.57	42.72	7.44	88.9	4.9
麸皮	0.21	56.70	13.18	43.52	6.86	93.7	25.2
木屑	0.27	58.37	10.21	48.16	7.01	384.5	3.7

表 3 栽培种栽培料混料组合配方组成^① %

配方	A 玉米芯	B 麸皮	C 木屑
1	7.6	9.5	82.9
2	40.0	38.4	21.6
3	40.0	0	60.0
4	0	26.2	73.8
5	0	0	100.0
6	24.0	0	76.0
7	0	0	100.0
8	15.4	19.9	64.7
9	13.8	32.4	53.9
10	0	40.0	60.0
11	20.0	40.0	40.0
12	40.0	19.3	40.7
13	15.4	19.9	64.7
14	15.4	19.9	64.7
15	40.0	19.3	40.7
16	20.0	40.0	40.0

①玉米芯、麸皮、木屑配比比例为质量比。

1.2.2 制作方法 分别按照表 2、表 3 中不同混料组合配方将原料混合均匀，使用装料机将原料装入 17 cm × 33 cm 的菌袋，每个配方制作 15 袋，完成装袋后转移至灭菌锅 121 °C 灭菌 3 h，灭菌完成后转移至已消毒的接种室中冷却备用。随机从灭菌后每个配方中的菌袋中取出 6 袋用于测量培养基质的容重、总孔隙度、通气孔隙度、持水孔隙度、pH、含水量、含氮量；不同混料组合配方的原种培养基质中均使用试管种接种，栽培种培养基质中均使用麦粒种接种。接种后转移至养菌室中培养，并观察记录菌丝长速、萌发期、满袋期。每个处理均重复 6 次。

1.2.3 指标测量 采用环刀法并参考倪琳^[17]的方法测量培养料的容重、总孔隙度、通气孔隙度、持水孔隙度；参考王涛等^[18]方法并稍作修改，测量培养料 pH。即称取 5 g 培养料，放入 50 mL 去离子水中充分震荡，静置 30 min 后取上清液使用 pH 仪测量 pH。含水量用烘干恒重法测量，含氮量用凯式法测量。菌丝萌发期、满袋期通过感官观察进行记录，菌丝长速测量参考常婷婷等^[19]的方法采用划线法测量。

1.2.4 验证实验 验证试验的制作方法同 1.2.2，测量方法同 1.2.3。

1.3 数据整理与分析

数据采用 Microsoft Excel 2016 软件进行计算、

整理；使用 SPSS 26.0 统计软件单因素 ANOVA 检测对数据进行方差分析并使用 Duncan 法做差异显著性分析；使用 Design Expert 8.0.6 软件分析模型、进行拟合分析、建立回归方程模型，得出等高线图和响应曲面图，利用 Optimization 功能，进行多目标的优化分析。

2 结果与分析

2.1 不同混料组合配方栽培基质的理化性质

2.1.1 原种混料组合配方基质的理化性质 由表 4 可知，不同原种混料组合配方栽培基质的容重以配方 3、8 最高，均为 0.310 g/cm³，均显著高于其余配方 ($P < 0.05$)；配方 1、4、6、7、9、12 的容重次之，均为 0.290 g/cm³，均与配方 2、5、11 差异显著 ($P < 0.05$)，均与配方 10、13 差异不显著 ($P > 0.05$)；配方 5 的容重最小，仅为 0.260 g/cm³，与配方 2、11 均差异不显著 ($P > 0.05$)，与其余配方均差异显著 ($P < 0.05$)。总孔隙度以配方 10、12、11 的较高，分别为 75.01%、74.23%、71.91%，与其他配方均差异显著 ($P < 0.05$)。通气孔隙度以配方 8 最高，为 22.33%，与配方 13 差异不显著 ($P > 0.05$)，与其他配方均差异显著 ($P < 0.05$)；配方 13 次之，为 18.78%，与配方 3、6、9、10、12 均差异不显著 ($P > 0.05$)，与配方 1、2、4、5、7、11 均差异显著 ($P < 0.05$)；配方 5 的通气孔隙度最小，为 9.36%，与配方 1、2、4、7 均差异不显著 ($P > 0.05$)，与其余配方均差异显著 ($P < 0.05$)。持水孔隙度以配方 10 的最高，为 60.43%，显著高于其他配方 ($P < 0.05$)；配方 11 次之，为 57.72%，与配方 12 差异不显著 ($P > 0.05$)，与其余配方均差异显著 ($P < 0.05$)；配方 8 最小，为 31.44%，与其余配方均差异显著 ($P < 0.05$)。pH 以配方 2 的最高，为 7.71，均显著高于其他配方 ($P < 0.05$)。含水量以配方 1 的最高，为 496.8 g/kg，除与配方 12 的差异显著 ($P < 0.05$) 外，与其余配方均无显著性差异 ($P > 0.05$)。含氮量以配方 13、9、8 的较高，分别为 13.6、13.3、13.1 g/kg，均与配方 3 差异不显著 ($P > 0.05$)，均与其余配方差异显著 ($P < 0.05$)；配方 5 含氮量最低，为 3.6 g/kg，与配方 2、10、11 差异不显著 ($P > 0.05$)，与其余配方均差异显著 ($P < 0.05$)。

2.1.2 栽培种混料组合配方栽培基质的理化性质

由表 5 可知, 不同栽培种混料组合配方栽培基质的容重以配方 10 最大, 为 0.32 g/cm^3 , 与其他配方均呈现显著性差异 ($P < 0.05$); 配方 4、11 的容重次之, 均为 0.30 g/cm^3 , 均与配方 14、16 差异不显著 ($P > 0.05$), 均与其余配方差异显著 ($P < 0.05$); 配方 2、3 容重最小, 均为 0.25 g/cm^3 , 均与其余配方差异显著 ($P < 0.05$)。总孔隙度以配方 11 最大, 为 79.02% , 与配方 12 差异不显著 ($P > 0.05$), 与其余配方均差异显著 ($P < 0.05$); 配方 12 次之, 为 77.47% , 与配方 3、5、15 均差异显著 ($P < 0.05$), 与其余配方均差异不显著 ($P > 0.05$)。通气孔隙度

以配方 11 最大, 为 24.19% , 与配方 1、2、5、6、7、8、10、12、13 均差异不显著 ($P > 0.05$), 与其余配方均差异显著 ($P < 0.05$); 配方 2 次之, 为 23.69% , 与配方 3、4、9、14、15 均差异显著 ($P < 0.05$), 与其余配方均差异不显著 ($P > 0.05$)。持水孔隙度以配方 4 最大, 为 60.05% , 均显著高于其他配方 ($P < 0.05$); 配方 9 次之, 为 55.68% , 与配方 5、6 均差异显著 ($P < 0.05$), 与其余配方均差异不显著 ($P > 0.05$); 配方 5 的持水孔隙度最小, 为 48.46% , 与配方 1、2、3、6、7、8 均差异不显著 ($P > 0.05$), 与其余配方均差异显著 ($P < 0.05$)。

表 4 不同原种混料组合配方基质的理化性质

配方	容重 (g/cm^3)	总孔隙度 (%)	通气孔隙度 (%)	持水孔隙度 (%)	pH	含水量 (g/kg)	含氮量 (g/kg)
1	0.290±0.020 b	56.60±2.66 cde	12.1±2.64 def	44.41±0.10 f	7.46±0.16 b	496.8±6.1 a	8.2±1.1 cd
2	0.270±0.003 d	59.38±1.56 c	10.71±1.73 ef	48.66±0.21 c	7.71±0.12 a	475.7±13.9 ab	3.7±0.6 e
3	0.310±0.020 a	53.90±2.27 de	16.77±2.45 bc	37.13±0.24 h	6.73±0.18 e	484.8±25.9 ab	11.4±4.2 ab
4	0.290±0.010 b	56.55±1.50 cde	12.01±1.55 def	44.54±0.07 f	7.44±0.20 b	483.2±11.6 ab	9.6±0.9 bc
5	0.260±0.003 d	56.09±0.93 cde	9.36±0.92 f	46.72±0.07 d	6.72±0.13 e	478.5±6.0 ab	3.6±0.6 e
6	0.290±0.010 b	55.35±2.13 cde	15.90±2.33 bcd	39.45±0.31 g	7.07±0.06 cd	489.1±13.9 ab	9.8±1.0 bc
7	0.290±0.010 b	57.33±1.37 cd	12.36±0.92 def	44.97±0.65 e	6.94±0.07 d	484.0±16.7 ab	9.6±1.5 bc
8	0.310±0.010 a	53.77±2.53 de	22.33±2.55 a	31.44±0.12 j	6.73±0.16 e	490.4±18.1 ab	13.1±1.6 a
9	0.290±0.010 b	52.77±2.06 e	17.11±2.00 bc	35.66±0.20 i	7.57±0.09 ab	488.2±13.7 ab	13.3±0.7 a
10	0.280±0.010 bc	75.01±4.09 a	14.57±4.33 bcde	60.43±0.27 a	7.45±0.10 b	472.7±4.0 ab	3.7±0.6 e
11	0.270±0.010 cd	71.91±2.18 a	14.18±2.37 cde	57.72±0.47 b	7.15±0.08 cd	473.5±6.0 ab	5.7±0.3 de
12	0.290±0.010 b	74.23±6.46 a	16.77±3.63 bc	57.46±0.22 b	6.48±0.03 f	465.3±14.6 b	7.0±0.7 d
13	0.280±0.010 bc	67.33±2.85 b	18.78±2.81 ab	48.54±0.07 c	7.19±0.04 c	494.8±4.9 a	13.6±0.5 a

①表中数据为平均值±标准差, 相同指标同列数据不同小写字母表示差异在 0.05 水平显著 ($P < 0.05$), 下同。

表 5 不同栽培种混料组合配方基质的理化性质

配方	容重 (g/cm^3)	总孔隙度 (%)	通气孔隙度 (%)	持水孔隙度 (%)	pH	含水量 (g/kg)	含氮量 (g/kg)
1	0.26±0.01 cd	71.84±2.06 bcd	19.40±1.98 abcde	52.44±1.13 bcd	7.37±0.14 abcd	458.2±4.7 bc	6.2±0.6 c
2	0.25±0.01 e	74.52±6.17 bcd	23.69±1.13 ab	50.83±6.33 bed	6.71±0.20 j	395.7±7.6 h	14.3±0.2 a
3	0.25±0.01 e	68.79±9.44 cd	18.09±2.52 cdef	50.69±9.41 bed	7.27±0.08 bcde	404.3±9.4 jh	4.8±1.1 cd
4	0.30±0.01 b	73.93±6.28 bcd	13.89±1.64 f	60.05±6.41 a	7.43±0.10 ab	451.5±7.4 bcde	10.0±2.9 b
5	0.26±0.01 c	67.64±4.77 d	19.18±3.04 abcde	48.46±2.78 d	7.11±0.19 e	464.3±5.1 ab	3.7±0.2 d
6	0.27±0.01 c	73.50±2.77 bcd	22.97±2.84 abc	50.53±7.06 cd	7.12±0.12 e	434.3±0.8 f	3.7±0.6 d
7	0.27±0.01 c	70.89±2.37 bcd	20.23±2.68 abcd	50.66±3.71 bed	6.80±0.07 fj	475.6±7.3 a	3.5±0.6 d
8	0.26±0.01 cd	70.73±2.30 bcd	19.99±2.57 abcde	50.73±3.87 bed	7.39±0.04 abc	439.7±3.5 def	9.2±0.3 b
9	0.26±0.01 cd	73.20±2.32 bcd	17.51±2.20 def	55.68±1.80 b	7.53±0.06 a	447.6±5.5 cdef	10.2±0.7 b
10	0.32±0.01 a	75.01±2.20 bc	19.49±2.00 abcde	55.52±4.80 bc	7.19±0.05 de	459.2±15.0 bc	13.0±2.2 a
11	0.30±0.01 b	79.02±3.52 a	24.19±3.67 a	54.83±1.57 bc	7.35±0.08 abcd	437.1±8.8 ef	15.0±2.0 a
12	0.27±0.01 c	77.47±4.81 ab	22.98±5.12 abc	54.50±4.10 bc	6.90±0.08 f	416.1±2.7 j	8.8±1.1 b
13	0.27±0.01 c	74.23±4.12 bcd	19.70±4.14 abcde	54.53±1.82 bc	7.19±0.06 de	438.3±11.9 def	8.4±2.1 b
14	0.29±0.01 b	72.64±5.64 bcd	17.87±5.32 cdef	54.77±4.70 bc	7.22±0.02 cde	451.2±6.0 bcde	9.5±1.3 b
15	0.27±0.02 c	69.58±4.71 cd	14.97±4.48 ef	54.62±2.70 bc	7.24±0.08 bcde	431.9±15.8 f	10.6±0.5 b
16	0.29±0.01 b	73.08±5.98 bcd	18.68±6.05 bcdef	54.40±3.75 bc	7.22±0.07 cde	454.4±11.0 bcd	14.3±0.9 a

pH 以配方 9 最高, 为 7.53, 与配方 1、4、8、11 均差异不显著($P>0.05$), 与其余配方均差异显著($P<0.05$); 配方 2 最低, 为 6.71, 与配方 7 差异不显著($P>0.05$), 与其余配方均差异显著($P<0.05$)。含水量以配方 7 最高, 为 475.6 g/kg, 与配方 5 差异不显著($P>0.05$), 与其余配方均差异显著($P<0.05$); 配方 5 次之, 为 464.3 g/kg, 与配方 1、4、10、14、16 均差异不显著($P>0.05$), 与其余配方均差异显著($P<0.05$); 配方 2 最小, 为 395.7 g/kg, 与配方 3 差异不显著($P>0.05$), 与其余配方均差异显著($P<0.05$)。含氮量以配方 11 最高, 为 15.0 g/kg, 与配方 2、16、10 均差异不显著($P>0.05$), 与其余配方均差异显著($P<0.05$); 配方 2、16、10 较高, 分别为 14.3、14.3、13.0 g/kg, 均与配方 11 差异不显著($P>0.05$), 但均与其余配方差异显著($P<0.05$); 配方 7 最低, 为 3.5 g/kg, 与配方 3、5、6 均差异不显著, 与其余配方均差异显著($P<0.05$)。

2.2 预测模型及回归方程的建立

2.2.1 原种配方的预测模型及回归方程的建立

原种混料各配方基质香菇生长情况见表 6, 采用 Design-Expert 软件分别对香菇萌发期、菌丝长速、满袋期各指标进行回归拟合分析。根据 Design-Expert 建议原种的萌发期、菌丝长速、满袋期选用线性分析模型, 得到的预测方程如表 7 所示。

根据表 7 可知, 对于香菇原种的萌发期指标而言, 预测方程的 $P<0.01$, 表示选用的模型高度显著; 回归系数 $R^2=0.9863$, 说明香菇原种萌发期的变异中有 98.63%是由变量(A麦粒、B木屑)引起的, 即表明该模型与试验数据有 98.63%的符合度; 校正相关系数 $R^2_{Adj}=0.9851$ 、失拟项(0.5223) >0.05 不显著, 说明该模型与实际拟合较好, 具有较高的可信度。回归方程的自变量系数 K , 反应各自变量对方程的贡献程度, 由原种萌发期方程可知, $K_B(6.00)>K_A(2.46)$, 表明 2 种培养料对萌发期的贡献程度为木屑优于麦粒($B>A$)。

表 6 原种混料配方菌丝生长情况

配方	萌发期 /d	菌丝长速 / (cm/d)	满袋期 /d
1	4.58±0.49 de	0.42±0.06 de	45.50±0.45 e
2	6.75±0.42 a	0.19±0.07 f	53.33±0.75 c
3	2.50±0.55 h	0.64±0.09 b	35.75±0.42 hi
4	4.08±0.20 ef	0.47±0.16 d	41.67±1.75 f
5	6.00±0.55 b	0.19±0.08 f	54.50±0.45 b
6	3.25±0.42 g	0.53±0.17 c	40.08±0.66 g
7	4.25±0.27 ef	0.45±0.14 d	42.33±0.88 f
8	2.50±0.45 h	0.67±0.13 a	35.58±0.49 i
9	3.92±0.20 f	0.57±0.13 c	40.50±0.77 g
10	5.42±0.58 c	0.17±0.06 f	55.67±1.37 a
11	4.58±0.49 de	0.38±0.04 e	49.33±1.03 d
12	5.00±0.32 cd	0.40±0.05 de	48.33±1.03 d
13	2.17±0.26 h	0.63±0.07 b	36.80±0.52 h

对于香菇原种的菌丝长速指标而言(表 7), 预测方程的 $P<0.01$, 表示选用的模型高度显著; 回归系数 $R^2=0.9688$, 说明香菇原种菌丝长速的变异中有 96.88%是由变量(A麦粒、B木屑)引起的, 即表明该模型与试验数据有 96.88%的符合度; 校正相关系数 $R^2_{Adj}=0.9659$, 失拟项(0.0515) >0.05 不显著, 说明该模型与实际拟合较好, 具有较高的可信度。回归方程的自变量系数 K , 反应各自变量对方程的贡献程度, 由原种菌丝长速方程可知, $K_A(0.67)>K_B(0.21)$, 表明 2 种培养料对菌丝长速的贡献程度为麦粒优于木屑 ($A>B$)。说明就菌丝长速而言麦粒的贡献程度高于木屑, 即可以使用麦粒代替木屑作为培养香菇原种的培养料。

对于香菇原种的满袋期指标而言(表 7), 预测方程的 $P<0.01$, 表示选用的模型高度显著; 回归系数 $R^2=0.9609$, 说明香菇原种满袋期的变异中有 96.09%是由变量(A麦粒、B木屑)引起的, 即表明该模型与试验数据有 96.09%的符合度; 校正相关系数 $R^2_{Adj}=0.9574$, 失拟项(0.4213) >0.05 不显著, 说明该模型与实际拟合较好, 具有较高的可信度。回归方程的自变量系数 K , 反应各自变量对方程的贡献程度, 由原种满袋期方程可知, $K_B(53.87)>$

表 7 原种各指标的回归模型

指标	模型类型	预测方程	P	R^2	R^2_{Adj}	失拟项
萌发期	线性函数	$Y_1=2.46A+6.00B$	<0.0001	0.9863	0.9851	0.5223
菌丝长速	线性函数	$Y_2=0.67A+0.21B$	<0.0001	0.9688	0.9659	0.0515
满袋期	线性函数	$Y_3=35.26A+53.87B$	<0.0001	0.9609	0.9574	0.4213

K_A (35.26), 表明 2 种培养料对满袋期的贡献程度为木屑优于麦粒($B>A$)。

2.2.2 栽培种配方的预测模型及回归方程的建立
栽培种混料各配方基质的香菇生长情况见表 8, 采用 Design-Expert 软件分别对香菇萌发期、菌丝长速、满袋期进行回归拟合分析。根据 Design-Expert 建议原种的萌发期、菌丝长速、满袋期选用线性分析模型, 得到的预测方程如表 9 所示。

根据表 9 可知, 对于香菇栽培种的萌发期指标而言, 预测方程的 $P<0.01$, 表示选用的模型高度显著; 回归系数 $R^2=0.9515$, 说明香菇栽培种萌发期的变异中有 95.15% 是由变量 (A 玉米芯、B 麸皮、C 木屑) 引起的, 即表明该模型与试验数据有 95.15% 的符合度; 校正相关系数 $R^2_{Adj}=0.9273$ 、失拟项 (0.4968) >0.05 不显著, 说明该模型与实际拟合较好, 具有较高的可信度。回归方程的自变量系数 K , 反应各自变量对方程的贡献程度, 由栽培种萌发期方程可知, $K_B(5.89)>K_C(5.84)>K_A(2.94)$, 表明 3 种培养料对萌发期的贡献程度由高到低依次为麸皮、木屑、玉米芯($B>C>A$)。二次项系数 $K_{AB}(-4.08)>K_{AC}(-4.68)>K_{BC}(-5.50)$, 说明玉米芯(A)和麸皮(B)搭配对栽培种萌发期的贡献最大。

对于香菇栽培种的菌丝长速指标而言, 预测方程的 $P<0.01$, 表示选用的模型高度显著; 回归系数 $R^2=0.9887$, 说明香菇栽培种菌丝长速的变异中有 98.87% 是由变量 (A 玉米芯、B 麸皮、C 木屑) 引起的, 即表明该模型与试验数据有 98.87% 的符合度; 校正相关系数 $R^2_{Adj}=0.9717$ 、失拟项 (0.8694) >0.05 不显著, 说明该模型与实际拟合较好, 具有较高的可信度。回归方程的自变量系数 K , 反应各自变量对方程的贡献程度, 由栽培种菌丝长速方程可知, $K_B(2.73)>K_A(0.85)>K_C(0.18)$, 表明 3 种

表 8 栽培种混料配方菌丝生长情况

配方	萌发期 /d	菌丝长速 / (cm/d)	满袋期 /d
1	4.92±0.86 b	0.36±0.09 f	46.17±0.98 b
2	3.50±0.77 ef	0.57±0.09 a	44.00±1.41 cd
3	3.25±0.61 fg	0.39±0.06 e	41.33±1.21 e
4	4.75±0.42 bc	0.31±0.05 f	37.67±2.42 g
5	5.75±0.69 a	0.17±0.06 g	55.17±1.17 a
6	4.08±0.66 cde	0.34±0.04 f	42.50±1.38 de
7	5.75±0.42 a	0.18±0.08	54.50±1.64 a
8	3.42±0.38 ef	0.39±0.09 e	37.67±1.03 g
9	4.08±0.38 cde	0.40±0.11 e	39.00±1.26 fg
10	4.42±0.74 bcd	0.38±0.09 ef	45.33±1.03 bc
11	3.67±0.41 ef	0.49±0.09 cd	43.83±1.17 cd
12	2.67±0.52 g	0.51±0.05 bc	40.67±1.37 ef
13	3.75±0.27 def	0.43±0.07 de	38.00±2.53 g
14	4.92±0.86 b	0.36±0.09 f	46.17±0.98 b
15	3.50±0.77 ef	0.57±0.09 a	44.00±1.41 cd
16	3.25±0.61 fg	0.39±0.06 e	41.33±1.21 e

培养料对萌发期的贡献程度由大到小依次为麸皮、玉米芯、木屑($B>A>C$)。二次项系数 $K_{AC}(-0.52)>K_{BC}(-4.29)>K_{AB}(-4.84)$, 说明玉米芯和木屑搭配对栽培种菌丝长速的贡献最大(表 9)。

对于香菇栽培种的满袋期指标而言, 预测方程的 $P<0.01$, 表示选用的模型高度显著; 回归系数 $R^2=0.9912$, 说明香菇栽培种满袋期的变异中有 99.12% 是由变量 (A 玉米芯、B 麸皮、C 木屑) 引起的, 即表明该模型与试验数据有 99.12% 的符合度; 校正相关系数 $R^2_{Adj}=0.9779$ 、失拟项 (0.3665) >0.05 不显著, 说明该模型与实际拟合较好, 具有较高的可信度。回归方程的自变量系数 K , 反应各自变量对方程的贡献程度, 由栽培种满袋期方程可知, $K_B(256.00)>K_A(158.13)>K_C(54.91)$, 表明 3 种培养料对萌发期的贡献程度由大到小依次为麸皮、玉米芯、木屑($B>A>C$)。二次项系数 $K_{AC}(-260.$

表 9 栽培种各指标的回归模型

指标	模型类型	预测方程	P	R^2	R^2_{Adj}	失拟项
萌发期	二次多项式	$Y_1=2.94A+5.89B+5.84C-4.08AB-4.68AC-5.50BC$	<0.0001	0.9515	0.9273	0.4968
菌丝长速	三次多项式	$Y_2=0.85A+2.73B+0.18C-4.84AB-0.52AC-4.29BC+7.25ABC+3.34AB(A-B)-0.84AC(A-C)-3.22BC(B-C)$	<0.0001	0.9887	0.9717	0.8694
满袋期	三次多项式	$Y_3=158.13A+256.00B+54.91C-663.17AB-260.19AC-457.81BC+796.83ABC+118.29AB(A-B)-131.60AC(A-C)-191.70BC(B-C)$	<0.0001	0.9912	0.9779	0.3665

19)>K_{BC}(-457.81)>K_{AB}(-663.17), 说明玉米芯和木屑搭配对栽培种满袋期的贡献最大(表 9)。

2.3 不同原料对比对香菇原种和栽培种的影响

2.3.1 不同原料对比对香菇原种的影响 原种混合料为麦粒和木屑 2 种, 其不同配比与原种萌发期、菌丝长速、满袋期的影响曲线见图 1、图 2、图 3。根据图 1 可知, 随着麦粒含量的增加, 随之木屑含量越小, 菌丝的萌发期逐渐变短, 配方 3、8、13 的试验基质均为麦粒 50%和木屑 50%, 其萌发期分别为 2.50、2.50、2.17 d, 均短于其他配方(表 6); 由图 2 可知, 随着麦粒含量的增加, 原种菌丝长速越快, 配方 3、8、13 的菌丝长速分别为 0.64、0.67、0.63 cm/d, 均高于其他配方(表 6)。由图 3 可知随着麦粒含量的增加, 香菇原种的满袋期越短, 配方 3、8、13 的满袋期分别为 35.75、35.58、36.80 d, 均短于其他配方(表 6)。根据建立的回归方程及响应图最终预测认为香菇原种栽培基质的最佳优化配方为 50%麦粒 +50%木屑。

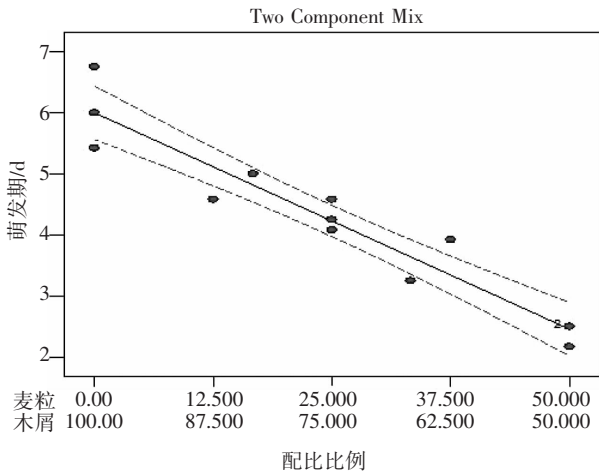


图 1 麦粒和木屑不同配比与原种菌丝萌发期的影响

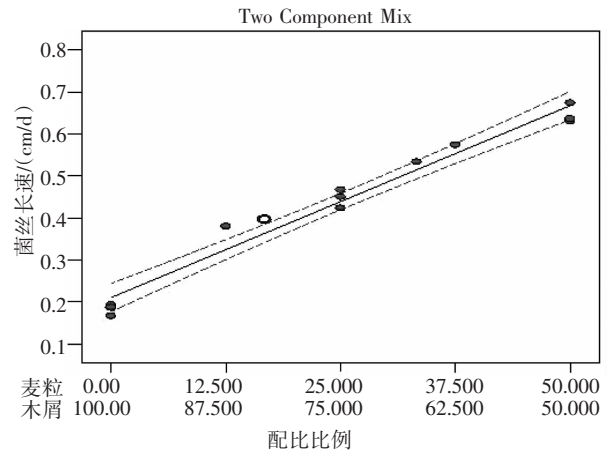


图 2 麦粒和木屑不同配比与原种菌丝长速的影响

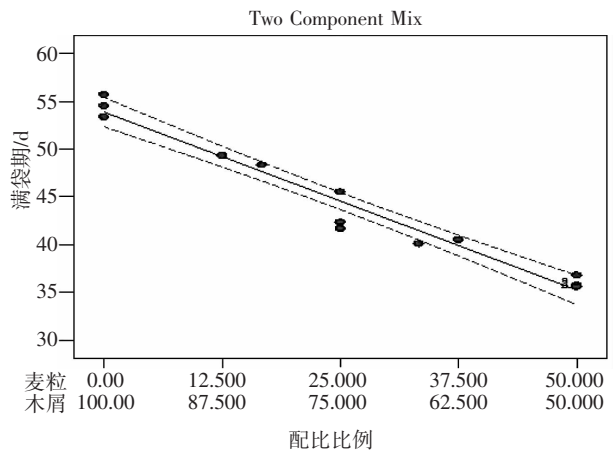


图 3 麦粒和木屑不同配比与原种满袋期的影响

2.3.2 不同原料对比对香菇栽培种的影响 栽培种混合原料为玉米芯、麸皮、木屑, 其不同配比与香菇栽培种菌丝萌发期、菌丝长速、满袋期的影响曲线见图 4、图 5、图 6。由图 4 可知不同原料配比与栽培种萌发期的响应面图为曲面, 故三者之间存在交互作用。配方 12 的萌发期最短, 为 2.67 d; 而配方 5、7 的萌发期最长, 为 5.75 d (表

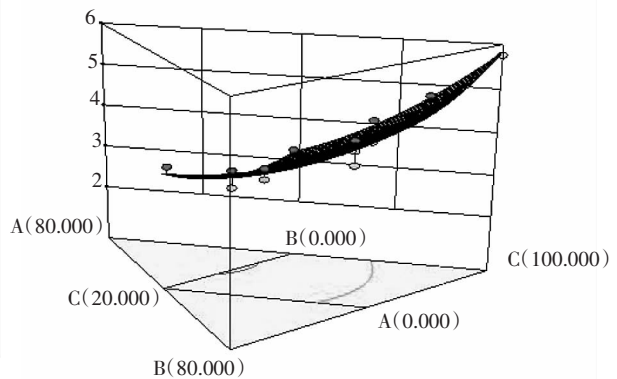
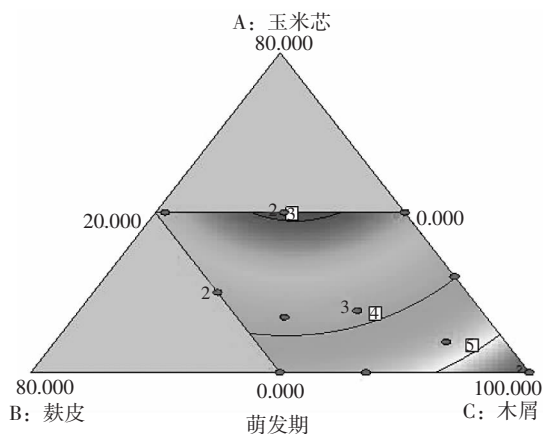


图 4 不同原料对比与香菇栽培种菌丝萌发期影响的等高线图及响应面图

8)。曲面波动较小, 但受木屑的影响较大, 木屑添加量越少, 栽培种的萌发期就越短。由图 5 可知不同原料配比与栽培种菌丝长速的响应面图为曲面, 故三者之间存在交互作用。配方 2 号的菌丝长速最快为 0.57 cm/d, 而配方 5 的栽培种的菌丝长速最慢, 为 0.17 cm/d (表 8)。受玉米芯的影响曲面波动较大, 玉米芯添加量越多, 栽培种的菌丝长速越快。由图 6 可知不同原料配比与栽培种满袋的响应面图为曲面, 故三者之间存在交互作用。配方 4、8 的满袋期最短, 均为 37.67 d; 而配方 5 的栽满袋期最长, 为 55.17 d (表 8)。受木屑的影响曲面波动较大, 木屑添加量越少, 栽培种的满袋期越短。根据建立的回归方程及响应面

图最终预测认为香菇栽培种栽培基质的最佳优化配方为 37.69%玉米芯 +23.33%麸皮 +38.98%木屑。

2.4 验证实验

为了让香菇原种和栽培种建立模型中的预测值, 更加拟合实际, 故再次通过优化的配方进行验证, 验证实验结果表明, 香菇原种的萌发期、菌丝长速、满袋期的实际值与预测值均差异较小, 误差率分别为 1.60%、1.49%、0.74%; 香菇栽培种的萌发期、菌丝长速、满袋期的实际值与预测值差异较小, 误差率分别为 0.67%、2.00%、4.64%。

3 讨论与结论

优质的培养料及科学的配方是菌种生产中的关键, 培养料的多元化既能改善菌丝生长所需的

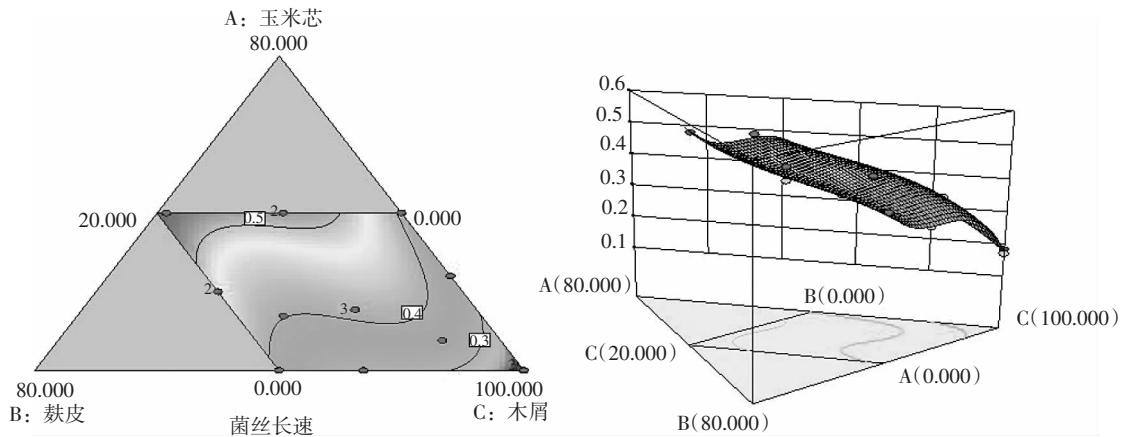


图 5 不同原料配比与香菇栽培种菌丝长速影响的等高线图及响应

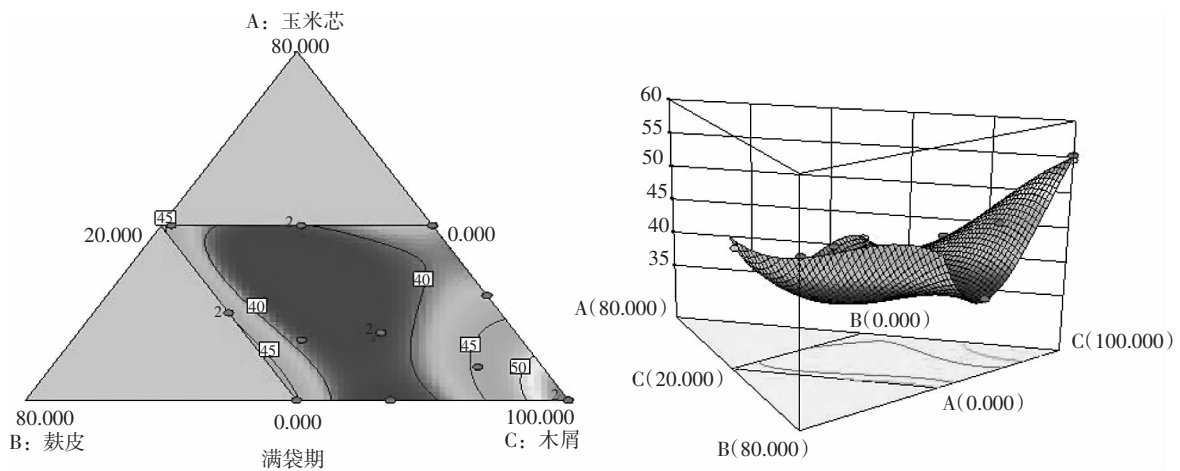


图 6 不同原料配比与香菇栽培种满袋期影响的等高线图及响应面

表 10 验证实验的验证值与模型预测值的对比

菌种	萌发期/d		菌丝长速/(cm/d)		满袋期/d	
	预测值	验证值	预测值	验证值	预测值	验证值
原种	2.46	2.50	0.66	0.67	35.26	35.00
栽培种	3.02	3.00	0.51	0.50	37.67	36.00

营养物质,又可以缓解原料单一造成的资源缺乏问题^[20-22]。香菇作为木腐菌,其菌丝生长过程中将分解木材中的木质素、半纤维素、纤维素以及有机氮提供其生长^[23],为了解决木材资源缺乏的问题,大量的研究学者将使用木质素及纤维素含量较高的玉米芯、秸秆等代替了木材^[24]。但很多研究人员在香菇种植过程中均凭借多年的经验来添加代替原料,未能科学客观的指出相关的原料配比,香菇培养料种类的不同,其中所含有的营养物质也会随之改变,进而导致菌种质量的优劣有所差别^[25-27]。杨建杰等^[28]采用单纯形格子试验设计方法,以木屑、棉籽壳、玉米芯和麦草为原料优化出平菇的优质栽培配方,改试验设计方法为最先出现的、最基本的一种混料回归设计,但是最后试验结果将需人工计算^[29]。而本试验中所采用的 D-optimal 最优混料设计试验则与其原理类似,优点在于除了数据的测量与录入以外,其他计算均可在计算机软件中完成,大大节省了工作效率以及提高了人工计算带来的误差,从而更科学的得出试验结果^[30-31]。

沈霞^[32]采用 D-optimal 最优混料设计法,以芦苇、五节芒、斑茅和芒萁为原料,代替全部木屑,经过不同的配比,优化出灰树花的栽培基质配方,得出最优的配方为 45%五节芒 +30%芒萁 +5%麦麸 +18%玉米粉 +2%石膏,但对不同配比的基质理化性质未作研究。本试验通过测定不同配比培养料的理化性质,更加详细深入地研究了香菇原种及栽培种的培养基质配方,经分析得出香菇原种和栽培种栽培基质的最优配方分别为 50%麦粒 +50%木屑和 37.69%玉米芯 +23.33%麸皮 +38.98%木屑,在以上 2 个配方的栽培基质接种后,香菇菌丝的生长旺盛,萌发期短、满袋期短,且理化性质优,说明优化得到的栽培基质配方具有较高的可行性,该设计方法也在优化培养料配比上是科学并且可行的。由于液体菌种的发展迅速,目前国内外学者通过 D-optimal 最优混料设计法对菌种培养料配方优化鲜有研究,关于适宜西北地区香菇菌棒混料培养基的筛选和优化也有待进一步研究。

参考文献:

[1] 汪文琦,冯继虎,段辉,等. 康县香菇产业现状及

发展建议[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(3): 208-211.

- [1] 戈永杰,尚晓冬,谭琦. 通过限制培养基中氮元素含量促进香菇分泌木质素过氧化物酶[J]. 食用菌学报, 2022, 29(6): 25-34.
- [2] 卓英,谭琦,陈明杰,等. 香菇主要栽培菌株遗传多样性的 AFLP 分析[J]. 菌物学报, 2006(2): 203-210.
- [3] 黄毅,郑永德,张长本. 菌林矛盾成为制约香菇、黑木耳产业发展的瓶颈[J]. 食药菌, 2018, 26(6): 333-337.
- [4] 李军,蔡婧,常堃,等. 玉米秆玉米芯和玉米粉反季节栽培香菇试验[J]. 食用菌, 2017, 39(6): 37-39.
- [5] 覃中凤,鄂肖勃,何志强,等. 香菇栽培料配方优选试验[J]. 现代农业科技, 2021, 787(5): 56-57; 62.
- [6] 王洪奇,陈顺,于广峰,等. 玉米秸秆代料栽培香菇菌种的筛选[J]. 微生物学杂志, 2016, 36(6): 73-75.
- [7] ANDRADE M, SILVA J, MINHONI M, et al. Mycelial growth of two *Lentinula edodes* strains in culture media prepared with sawdust extracts from seven eucalyptus species and three eucalyptus clones[J]. Acta Scientiarum Agronomy, 2008, 30(3): 333-337.
- [8] XU X F, LI A Z, CHENG S M, et al. Reappraisal of phylogenetic status and genetic diversity analysis of Asian population of *Lentinula edodes*[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2006(3): 274-280.
- [9] 杨建杰,张桂香,杨琴,等. 玉米芯栽培香菇的配方优化及胞外酶活性研究[J]. 中国食用菌, 2021, 40(4): 26-31.
- [10] 夏敏,余明玉,杜瑞卿,等. 配方均匀设计对玉米秸秆代料栽培香菇的配方优化[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(4): 138-142.
- [11] 周韬. 香菇液体菌种培养基优化及其菌种质量评价体系的建立[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [12] 王攀磊,潘艳华,郭玉蓉,等. 基于混料均匀设计的无土栽培基质研究与应用[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2018, 33(5): 797-803.
- [13] 王永洁,孙铭忆,邓莉莉,等. 基于 AHP-CRITIC 的 D-最优混料设计优化复方黄芪乳膏处方[J]. 中国实验方剂学杂志, 2020, 26(3): 110-116.
- [14] 张桂香,杨建杰,刘明军,等. 不同出菇温度下香菇各潮次菇产品的品质变化[J]. 甘肃农业科技, 2020(10): 28-31.
- [15] 曲扬. 不同菌株及栽培模式对香菇 CO₂ 释放量的

- 影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- [16] 张清风, 刘元剑, 杨静康, 等. 苹果枝木屑作栽培料生产香菇效果试验[J]. 上海蔬菜, 2022(5): 73-74.
- [17] 倪琳. 不同比例腐解秸秆及生物质炭代替泥炭用作番茄育苗基质研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2021.
- [18] 王涛, 雷锦桂, 黄语燕, 等. D-最优混料设计优化草菇渣复合基质的黄瓜栽培配方[J]. 土壤, 2022, 54(4): 723-732.
- [19] 常婷婷, 赵妍, 杨焕玲, 等. 香菇复配氨基酸培养基优化及其对香菇菌丝生长生理的影响[J]. 微生物学通报, 2022, 49(2): 545-555.
- [20] DELMAS J, MAMOUN M. Study of some growth and fruiting factors of *Pleurotus cornucopiae*[J]. Comptes Rendus Des Seances De Lacademie Dagriculture De France, 1980, 66(3): 294-301.
- [21] 段应策, 胡姿仪, 杨帆, 等. pH 和缓冲作用对香菇菌丝生长的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(22): 4683-4690.
- [22] 赵林超. 氮源浓度及乙酸钠对香菇生长的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- [23] 张金霞, 蔡为明, 黄晨阳, 等. 中国食用菌栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
- [24] 于惠. 玉米秸秆预处理及用作食用菌栽培基质的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [25] SILVA E, MACHUCA A, MILAGRES A. Effect of cereal brans on *Lentinula edodes* growth and enzyme activities during cultivation on forestry waste[J]. Letters in Applied Microbiology, 2005, 40(4): 283-288.
- [26] 季泽洋. 不同培养料对香菇菌丝生长、产量和营养成分的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- [27] POONAM B, RANJANA P, TEJO P. Enhanced antioxidant properties as a function of selenium uptake by edible mushrooms cultivated on selenium-accumulated waste post-harvest wheat and paddy residues[J]. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 2014, 3(4): 127-132.
- [28] 杨建杰, 张桂香, 杨琴, 等. 玉米芯栽培平菇培养料配方优化试验[J]. 甘肃农业科技, 2017, 504(12): 31-34.
- [29] 熊子康, 刘力惟, 宁建辉, 等. 混料切片试验设计[J]. 系统科学与数学, 2020, 40(2): 262-274.
- [30] 罗嘉成, 张崇岐. 混料试验渐近 D-最优设计的聚类算法[J]. 数理统计与管理, 2022, 41(3): 402-412.
- [31] 王浩宇, 张崇岐. 基于特殊混料模型 D-最优设计搜索的交换点式门限接受算法[J]. 系统科学与数学, 2020, 40(2): 210-224.
- [32] 沈霞. 灰树花菌草栽培基质配方优化[J]. 农学学报, 2021, 11(8): 64-69.