

基于皱环球盖菇栽培的沙柳生物质资源化利用

齐伟^{1,3}, 李鸣雷^{1,2,3}, 周书博⁴, 黄凯^{1,3}, 蒲昆仑^{1,3}, 李玲^{1,3}

(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学

食用菌中心, 陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学 葡萄酒学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 探究含有不同比例沙柳的培养基质对皱环球盖菇品质的影响, 为陕西省榆林沙区生态产品沙柳的资源化利用提供科学依据。[方法] 采用沙柳枝条和小麦秸秆为主要原料, 设置了4个不同沙柳含量的栽培料配方, 研究不同沙柳比例的栽培基质对皱环球盖菇产量、形态特征、营养成分、矿物质和重金属含量的影响, 并利用灰色关联度对试验结果进行综合性分析。[结果] ①利用沙柳枝条和小麦秸秆栽培皱环球盖菇时, 皱环球盖菇的产量随着沙柳含量的增加而增加, 以纯沙柳木屑+生石灰配方表现最佳, 产量为7.42 kg/m², 比对照组高出了4.33 kg/m², 生物转化率为49.5%, 同时纯沙柳+生石灰配方中的蛋白质含量(41.5%)、菇形指数(0.81)值最高, 分别比对照组高出了4.06%和0.14。②利用灰色关联度方法综合产量、营养价值、矿物质含量和重金属含量分析发现, 纯沙柳木屑与理想数列的加权关联度最高, 为0.818。[结论] 经发酵后的沙柳可用作皱环球盖菇的栽培原料, 即通过栽培皱环球盖菇来实现沙柳枝条的生物质资源化利用具有可行性。

关键词: 皱环球盖菇; 灰色关联度分析; 栽培料配方; 沙柳

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0177-07

中图分类号: S646.9, X705

文献参数: 齐伟, 李鸣雷, 周书博, 等. 基于皱环球盖菇栽培的沙柳生物质资源化利用[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 177-183. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.019; Qi Wei, Li Minglei, Zhou Shubo, et al. Utilization of *Salix psammophila* biomass resources based on cultivation of *Stropharia rugosoannulata* [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 177-183.

Utilization of *Salix Psammophila* Biomass Resources Based on Cultivation of *Stropharia Rugosoannulata*

Qi Wei^{1,3}, Li Minglei^{1,2,3}, Zhou Shubo⁴, Huang Kai^{1,3}, Pu Kunlun^{1,3}, Li Ling^{1,3}

(1.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 3.Center of Edible Fungi, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100, China; 4.College of Enology, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The effects of culture media containing different contents of *Salix psammophila*, a kind of ecological products, on the quality of *Stropharia rugosoannulata* were explored to provide a scientific basis for the cultivation of *S. psammophila* at Yulin sand area in Shaanxi Province. [Methods] Using *S. psammophila* branches and wheat straw as the main raw materials, four cultivation material formulas with varying *S. psammophila* contents were set up. The effects of different *S. psammophila* cultivation substrate ratios on the yield, morphological characteristics, nutritional components, and mineral and heavy metal contents of *S. rugosoannulata* were studied, and the experimental results were comprehensively analyzed using gray relational analysis. [Results] ① When using *S. psammophila* branches and wheat straw to cultivate *S. rugosoannulata*, the yield of *S. rugosoannulata* increased with increasing *S. psammophila*

收稿日期: 2024-04-08

修回日期: 2024-07-26

资助项目: 国家重点研发计划项目“秦巴山区黑木耳等食用菌菌种及先进培植技术研究与应用示范”(2021YFD1600401); 陕西省农业关键核心技术攻关(2023NYGG010)

第一作者: 齐伟(1999—), 男(汉族), 辽宁省台安县人, 硕士研究生, 研究方向为食用菌栽培基质的筛选。Email: 1641388185@qq.com。

通信作者: 李鸣雷(1968—), 男(汉族), 陕西省靖边县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事食用菌技术推广研究。Email: mlli@nwsuaf.edu.cn。

content. The pure *S. psammophila* sawdust added quicklime (X_1) formula performed the best, with a yield of 7.42 kg/m^2 , which was 4.33 kg/m^2 higher than that of the control (CK) group, and a biotransformation rate of 49.5%. Simultaneously, the protein content (41.5%) and mushroom shape index (0.81) in the X_1 formula were 4.06% and 0.14% higher, respectively, than those in the CK group. ② Using the gray correlation method to comprehensively analyze the yield, nutritional value, mineral content, and heavy metal content, the weighted correlation between pure *S. psammophila* shavings and the ideal sequence was determined to be the highest at 0.818. [Conclusion] The fermented *S. psammophila* could be used as a cultivation material for *S. rugosoannulata*, that is, the problem of *S. psammophila* branches can be solved by cultivating *S. rugosoannulata*, providing new ideas for the utilization of *S. psammophila* resources in sandy areas.

Keywords: *Stropharia rugosoannulata*; gray correlation analysis; cultivation material formula; *Salix psammophila*

皱环球盖菇 (*Stropharia rugosoannulata*) 学名皱环球盖菇, 又名酒红皱环球盖菇、赤松茸等^[1], 隶属于担子菌门 (*Basidiomycota*), 层菌纲 (*Hymenomycetes*), 伞菌目 (*Agaricaies*), 球盖菇科 (*Strophariaceae*), 球盖菇属 (*Stropharia*)^[2]。皱环球盖菇子实体内富含蛋白质、氨基酸等很多食品中常见的营养物质, 可以被人体吸收利用, 还含有食用菌特有的食用菌多糖^[3]、黄酮、甾醇^[4]、酚类等营养物质, 具有提高免疫力^[5]、抗氧化^[6]、降血糖^[7]、抗菌、清除自由基等功能^[8-9], 是国际粮农组织向发展中国家推荐栽培的菇种之一^[10]。

沙柳 (*Salix psammophila*), 又名北沙柳、蒙古柳、筐柳, 属杨柳科落叶丛生直立灌木或小乔木, 在中国水土保持工作中做出了重要贡献^[11-12], 作为一种沙区植物, 沙柳具有生长速度快、耐干旱^[13]、抗逆性强等优点^[12, 14], 利用沙柳形成的方格式沙柳屏障也是比较常见的防风固沙的措施^[15], 沙柳沙障不仅可以改善下垫面性质以及地表局部小气候环境, 还能增加沙区地表的粗糙程度^[16], 从而改变沙区表面的风沙流的流速、方向等物理特性, 进而起到防风固沙、保持水分的效果^[17-18], 所以沙柳是沙区栽培的重要植物之一。沙柳在生长过程中需要人为地对其平茬更新, 平茬后的沙柳会更具有活力, 否则会逐渐枯萎死亡, 过往对于沙柳资源的利用, 主要是将其用作工业生产的原材料, 如刨花板^[19]、瓦楞原纸^[15]等, 存在利用门槛高, 难以带动当地群众的问题。食用菌产业作为我们乡村振兴中的重要产业, 其原料主要来源于农林废弃物, 沙柳中含有丰富的木质素、纤维素, 是食用菌良好的栽培原料。近年来, 有学者对将沙柳用作食用菌栽培的原材料进行研究, 发现利用沙柳栽培食用菌具有一定的可行性, 不仅能解决沙柳资源的利用问题, 还能为当地农民带来收入。

本次试验利用沙柳栽培皱环球盖菇, 对沙柳栽培皱环球盖菇的产量、安全性、营养成分和矿物质含量

进行综合分析, 探究基于皱环球盖菇栽培的沙柳生物质资源化利用的可行性, 为沙区沙柳资源的利用和促进沙区资源可持续发展提供新思路。

1 材料与方法

1.1 供试材料

(1) 试验地点。陕西省咸阳市杨陵区西北农林科技大学食用菌中心。

(2) 菌株。来自陕西省宝鸡市华星菌丰农业有限公司, 该菌株适应当地的气候条件, 为陕西地区栽培的常见菌株。

(3) 试验原料。①麦秸: 采自陕西省咸阳市杨陵区, 选用当年新鲜小麦秸秆, 采收后堆放在阳光棚下, 自然风干后粉碎到 3~5 cm, 备用。②沙柳木屑: 采自陕西省榆林市神木市尔林兔镇 3 a 生沙柳, 在当地采收、风干、粉碎到 1 cm 后寄回, 备用。

(4) 试验时间。2022 年 8 月 23 日至 2023 年 9 月 10 日。2022 年 8 月 23 日至 9 月 5 日为母种扩繁阶段, 2022 年 9 月 6 日至 2022 年 10 月 5 日为原种制备阶段, 2022 年 10 月 6 日至 11 月 17 日为栽培种制备和栽培料发酵阶段, 2022 年 11 月 17 日至 2023 年 3 月 23 日为养菌阶段, 2023 年 3 月 24 日至 5 月 10 日为采收期。

1.2 试验方法

本次试验采用的是发酵料工艺, 按照如表 1 所示的配方进行发酵。发酵过程: 将沙柳麦秸加入辅料搅拌均匀, 然后铺成高 1 m, 宽 2 m, 长不限的料堆, 利用木棍在料堆中打孔, 进行有氧发酵, 使料堆中心的温度保持在 50~60 °C, 每隔 3 d 对其进行翻堆, 翻堆过程中对料堆补水, 翻堆 3 次后使用^[16]。每个配方按照 1 m×1 m 的栽培面积, 起垄, 随后进行播种, 每平方米用干料 15 kg, 撒菌种 100 g, 每个配方重复 3 次, 各配方随机分布, 取各配方一潮菇中的 20 个新鲜的子实体对其形态特征进行测定, 然后对其进行烘

干,将烘干后的皱环球盖菇子实体用粉碎机粉碎后过 0.5 mm 的筛网,混匀后用于营养成分、矿物质含量、重金属含量等指标的测定。

表 1 不同沙柳含量的栽培料配方

Table 1 Formula of cultivation materials with different *Salix psammophila* contents

配方编号	基质配比/%		
	沙柳	麦秸	生石灰
X ₁	99.00	0.00	1.00
X ₂	74.25	24.75	1.00
X ₃	49.5	49.5	1.00
X ₄	24.75	74.25	1.00
CK	0.00	99.00	1.00

1.3 测定方法

① 菇体硬度:利用质构仪进行测定。② 菇形指数:菇形指数=鲜菇菌盖直径/鲜菇菌柄长度。③ 氨基酸:采用氨基酸自动分析仪测定氨基酸。

采用国家标准对原料中的木质素、纤维素、半纤维素、全氮、有机碳和皱环球盖菇子实体中的灰分、粗纤维、粗蛋白、粗多糖、粗脂肪含量以及 Cu, Zn, Ca, Fe, Cr, Pb, As, Hg 含量进行测定

1.4 数据处理

1.4.1 利用灰色关联度法对各配方各个指标进行综合性分析。

(1) 确定参考数列。将不同工艺不同配方中的各指标最优值作为参考数列值。如产量、菇形指数、蛋白质含量、粗纤维含量、人体内必需氨基酸含量、多糖含量、灰分含量、矿物质含量(Fe, Zn, Cu, Ca)为正向指标(参考值为不同工艺不同配方中的最大值),粗脂肪、重金属(Cr, Hg, As, Pb)为逆向指标(参考值为不同工艺不同配方中的最小值)。根据实际数据,构建初始矩阵 Y。

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{X_1 K_1} & \cdots & Y_{X_1 K_{15}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{CK K_1} & \cdots & Y_{CK K_{15}} \end{pmatrix} \quad (1)$$

参考序列为:

$$F_0(k) = \{f_0(k_1), f_0(k_2) \cdots f_0(k_{15})\} \quad (2)$$

将参考序列和初始矩阵构成决策矩阵 F。

$$F = \begin{pmatrix} f_{0(K_1)} & \cdots & f_{0(K_{15})} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{CK K_1} & \cdots & f_{CK K_{15}} \end{pmatrix} \quad (3)$$

(2) 数据无量纲化处理。对参决策矩阵中的每个数据进行无量纲化处理,本次试验采用均值法,数据无量纲化公式为:

$$X'_i(k) = \frac{X_i(k)}{\bar{x}(k)} \quad (4)$$

式中: $X'_i(k)$ 为数据 X_i 无量纲化后的值; \bar{x} 为 k 指标的平均值, k 为单项指标的序号, $k = k_1, k_2 \cdots k_{15}$; i 为不同工艺不同配方; $i = X_1, X_2, X_3, X_4, CK$ 。

(3) 计算关联系数。根据公式(5)计算得到不同处理的不同指标与参考序列的关联系数。得到灰色关联度系数矩阵 F。

$$\xi_i(k) = \frac{\min |X'_0(k) - X'_i(k)| + \rho \max |X'_0(k) - X'_i(k)|}{|X'_0(k) - X'_i(k)| + \rho \max |X'_0(k) - X'_i(k)|} \quad (5)$$

式中: $\xi_i(k)$ 为关联度系数, k 为单项指标的序号, $k = k_1, k_2 \cdots k_{15}$; i 为不同工艺不同配方; $i = X_1, X_2, X_3, X_4, CK$, ρ 为分辨系数, $\rho = 0.5$ 。

$$F = \begin{pmatrix} r_{X_1 K_1} & \cdots & r_{X_1 K_{15}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{CK K_1} & \cdots & r_{CK K_{15}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

(4) 灰色综合评价。皱环球盖菇产量、形态特征、营养成分、矿物质含量和重金属含量等指标在配方中的重要程度并不一致,相对权重存在差异,各指标权重如表 2 所示。本次试验按照公式(7)分别计算各配方的加权关联度。

$$R_i = \sum W_k \xi_i(k) \quad (7)$$

式中: W_k 表示第 k 个元素的权重; $\xi_i(k)$ 表示 X_i 的 k 指标的灰色关联度系数。

根据加权关联度对参试配方进行评价排序,加权关联度越大,表明供试配方与参考配方越接近,其综合表现越优。

1.4.2 采用 SPSS.24 对数据进行相关处理和分析

用 Duncan 多重比较检验各处理平均值之间的差异显著性,以 $p < 0.05$ 为差异有统计学意义,用 Origin 2022 软件进行图表制作。

表 2 皱环球盖菇不同指标的权重值

Table 2 Weight values of different indexes of *Stropharia rugosoannulata*

指标	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈
权重	0.30	0.20	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03
指标	K ₉	K ₁₀	K ₁₁	K ₁₂	K ₁₃	K ₁₄	K ₁₅	
权重	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	

注: K₁ 表示产量; K₂ 表示菇形指数; K₃ 表示蛋白质含量; K₄ 表示粗纤维含量; K₅ 表示多糖含量; K₆ 表示粗脂肪含量; K₇ 表示灰分含量; K₈ 表示 Fe 含量; K₉ 表示 Zn 含量; K₁₀ 表示 Cu 含量; K₁₁ 表示 Ga 含量; K₁₂ 表示 Cr 含量; K₁₃ 表示 Hg 含量; K₁₄ 表示 As 含量; K₁₅ 表示 Pb 含量。

2 结果与分析

2.1 栽培基质基本性质分析

栽培料的理化性质是衡量栽培原料是否科学的重要依据,通过对原材料的理化性质分析,可以初步判断原材料用于栽培皱环球盖菇的可行性。如表 3

表 3 皱环球盖菇栽培基质基本性质

Table 3 Basic properties of *Stropharia rugosoannulata*

原料 s	木质素/%	纤维素/%	半纤维素/%	含碳量/%	含氮量/%	碳氮比
麦秸	9.73±1.38	36.61±0.46	28.34±1.04	41.99±0.13	0.67±0.03	62.59±2.52
沙柳	19.97±1.09	37.71±2.58	14.59±1.22	46.77±2.58	0.70±0.07	67.40±7.43

2.2 皱环球盖菇产量与生物学效率分析

如表 4 所示,不同栽培料配方对皱环球盖菇的产量存在显著差异。结果表明,在利用发酵料工艺进行栽培时,随着沙柳含量的增加,皱环球盖菇的产量和生物学效率显著增长。在本次试验中纯沙柳木屑的产量最高为 7.42 kg/m²,生物转化率达到 49.5%,比 CK 对照组高出了 4.33 kg/m²。其他加入不同比例沙柳的 3 个配方(X₂, X₃, X₄)均比 CK 组产量要高,分别高 0.65, 1.06, 3.35 kg/m²,相对于发酵后的麦秸,将发酵后的沙柳作为原材料更有利于提高皱环球盖菇的产量和生物学效率。

2.3 不同配方中皱环球盖菇形态特征分析

在形态特征方面各个指标没有明显的规律。如表 5 所示,在单菇重方面, X₁ 配方值是最大的,为 78.31 g,比 CK 高出了 7.22 g,可能是 X₁ 配方产量高的一个原因。X₁ 配方子实体的菌盖直径显著高于其

所示,本试验沙柳中木质素为 19.97%,高于麦秸中 9.73%的木质素含量。沙柳中的含碳量为 46.77%,高于麦秸的 41.99%。综上所述,沙柳中的木质素、纤维素、含碳量和含氮量均高于麦秸,所以,利用沙柳栽培皱环球盖菇从栽培料理化性质角度上考虑具有一定的可行性。

他配方,为 56.60 mm,比 CK 高出了 8.16 mm。菌盖厚度和菌柄直径的样品均值也是高于其他 4 个配方,分别为 31.13 和 35.10 mm,分别比 CK 高出了 0.59 和 0.92 mm。同时, X₁ 配方的菇形指数为 0.81,具有较高的商品性。而菌柄长度和子实体高度指标中的最大值均为 X₄ 配方,分别为 81.46 和 110.66 mm。

表 4 各配方产量和生物学效率

Table 4 Production and biological efficiency of each formula

配方	实测值/(kg·m ⁻²)	生物学效率/%
X ₁	7.42±0.46 ^a	49.5±3.1 ^a
X ₂	6.44±0.07 ^b	42.9±0.5 ^b
X ₃	4.15±0.14 ^c	27.7±0.9 ^c
X ₄	3.74±0.10 ^{cd}	24.9±0.7 ^{cd}
CK	3.09±0.18 ^d	20.6±1.2 ^d

注:不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$); X₁₋₄, CK 所代表的配方含义见表 1。下同。

表 5 各配方皱环球盖菇的形态特征

Table 5 Morphological characteristics of *Stropharia rugosoannulata* in each formula

配方	单菇重/g	菌盖直径/mm	菌盖厚度/mm	菌柄直径/mm	菌柄长度/mm	子实体高度/mm	菇体硬度	菇形指数	含水率/%
X ₁	78.31±1.88 ^a	56.60±1.33 ^a	31.13±3.27 ^a	35.10±1.24 ^a	70.44±4.42 ^{ab}	101.57±4.61 ^{ab}	+++	0.81±0.19 ^a	90.55±1.95 ^a
X ₂	48.76±2.14 ^d	42.54±1.07 ^c	27.31±1.21 ^a	28.99±1.32 ^{ab}	64.15±2.55 ^b	91.46±1.95 ^b	++	0.68±0.12 ^b	90.52±2.36 ^a
X ₃	63.46±2.07 ^c	46.72±0.78 ^{bc}	30.91±1.56 ^a	31.09±1.59 ^{ab}	77.95±3.77 ^a	108.86±4.38 ^a	+	0.63±0.17 ^b	90.92±3.02 ^a
X ₄	69.12±1.58 ^{bc}	48.46±1.72 ^b	29.20±1.29 ^a	32.23±1.47 ^{ab}	81.46±4.34 ^a	110.66±4.65 ^a	+	0.64±0.25 ^b	90.47±1.33 ^a
CK	71.09±2.39 ^b	48.44±2.30 ^b	30.54±1.85 ^a	34.18±1.89 ^a	76.22±4.95 ^a	106.77±6.34 ^a	+	0.67±0.23 ^b	90.33±0.50 ^a

注:菇体硬度以质构仪测试结果判定依据,结果范围在 2 000~2 500 g 为+, 2 500~3 000 g 为++, 3 000~3 500 g 为+++;不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

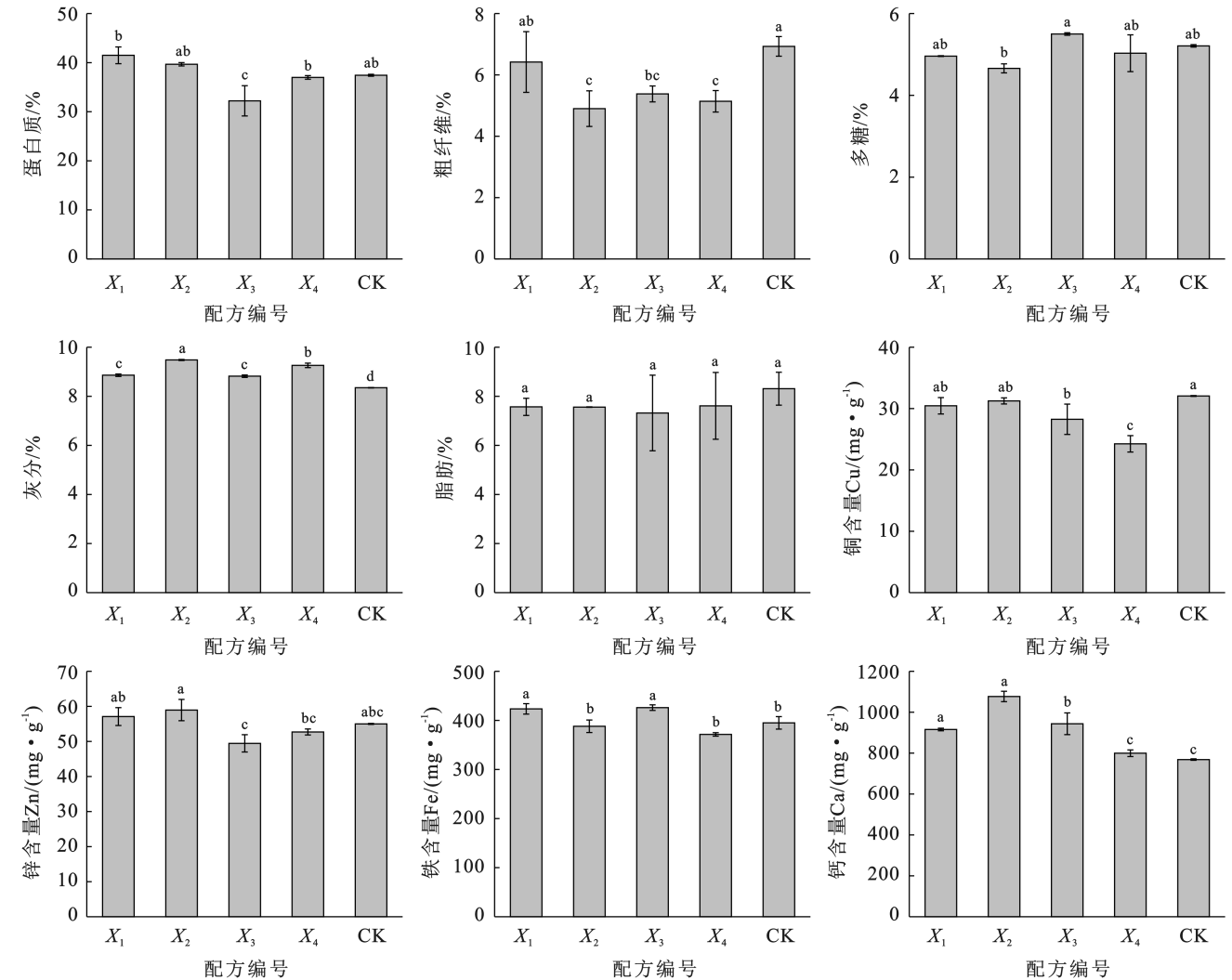
2.4 不同配方中皱环球盖菇矿物质含量和营养成分

如图 1 所示,在营养成分中的蛋白质指标中, X₁ 配方的含量最高,为 41.49%,比 CK 组高出了 4.05%。在粗纤维指标中,CK 对照组中的含量最高,本次试验的 4 个试验组分别比 CK 组低了 0.51%, 2.03%, 1.55%, 1.79%。多糖含量最高的为 X₃ 配方,比 CK

对照组高出了 0.29%。本次试验中的 4 个试验组中的灰分含量均比 CK 组要高,分别高出了 0.51%, 1.13%, 0.47%, 0.91%, 含量最高的为 X₂ 配方,灰分含量为 9.48%。各配方脂肪含量没有明显差别。各个配方间的营养成分差异,可能是培养基中的碳氮比不同的原因造成的。

各配方的皱环球盖菇子实体内的矿物质含量均存在显著性差异。本次试验中各个配方的 Cu 元素含量均小于 CK 组,这说明了在培养料中加入不同含量的沙柳会影响皱环球盖菇子实体对 Cu 元素的吸收。在 Zn 含量中,配方 X_2 中的 Zn 含量最高,为 58.95 mg/kg,其次是纯沙柳木屑配方 X_1 ,分别比 CK 对照组高出了 7.2% 和 3.8%。铁元素是人体必需的微量

元素, X_3 配方的铁元素含量最高为 426.00 mg/kg,其次是 X_1 配方,铁元素含量为 423.50 mg/kg,分别比对照组高了 7.8% 和 7.2%。关于 Ca 元素指标中,各个试验组 Ca 元素的含量均比 CK 中的配方高,分别高出了 19.1%,40.1%,22.8% 和 4.0%,这说明在麦秸培养基中加入不同含量的沙柳木屑可以促进皱环球盖菇子实体对 Ca 元素的吸收。



注:不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

图 1 各配方中皱环球盖菇矿物和营养成分含量

Fig.1 Mineral and nutrient contents of *Stropharia rugosoamulata* for different formulation

2.5 不同配方中皱环球盖菇重金属含量分析

本次试验所有配方中的重金属含量均符合国家和行业标准中的重金属含量要求。如表 6 所示,在 Cr 含量中, X_1 配方中的 Cr 含量最低,比 CK 低了 8 $\mu\text{g}/\text{kg}$,符合行业标准中 2 000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的要求。各配方在 Hg 含量指标中的差异并不显著,其中 X_2 中的 Hg 含量最低,为 7.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。各试验组中的 As 含量均高于 CK 组,但均符合国家标准和行业标准中 As 的含量要求。在 Pb 含量中呈现: $X_1 > X_2 > X_3 >$

$X_4 > \text{CK}$,各配方中的铅含量随着沙柳含量的增加而增加,这可能是由于沙柳木屑中的铅高于麦秸所造成的。

2.6 利用灰色关联度分析法进行综合分析

如表 7 所示,使用灰色关联度分析法对配方的产量、菇形指数、营养成分、矿物质含量和重金属含量进行综合分析得出,本次试验与参考数列加权关联度最高的配方的两个配方为 X_1 和 X_2 ,加权关联度为 0.818 和 0.618,分别比 CK 高出了 0.335 和 0.135, X_3 和 X_4 比 CK 组低 0.013 和 0.018。

表 6 各配方中皱环球盖菇重金属含量

Table 6 Heavy metal contents of *Stropharia rugosoannulata* for each formula $\mu\text{g}/\text{kg}$

配方	铬	汞	砷	铅
X_1	128±8 ^b	7.9±0.4 ^a	86±4 ^c	122±27 ^a
X_2	157±170 ^a	7.8±0.4 ^a	118±6 ^a	114±22 ^a
X_3	143±30 ^{ab}	8.7±0.1 ^a	102±7 ^b	107±16 ^a
X_4	144±7 ^{ab}	8.5±0.2 ^a	83±4 ^c	89±11 ^{ab}
CK	136±8 ^{ab}	8.3±0.5 ^a	70±2 ^d	66±37 ^b
GB 2762—2022	—	100	500	500
NY/T 749—2018	2 000	200	1 000	2 000

注:各指标含量为子实体鲜重状态下的重金属含量;不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

表 7 不同工艺不同配方的关联度

Table 7 Correlation degree of different processes and formulas

配方	加权关联度	排序
X_1	0.818	1
X_2	0.618	2
X_3	0.470	4
X_4	0.465	5
CK	0.483	3

3 讨论与结论

沙柳作为毛乌素沙区特有的植物,利用沙柳形成的方格式沙柳屏障沙区常见的防风固沙措施^[20-21],在毛乌素沙区水土保持与荒漠化防治工作中做出了重大贡献,沙柳在生长过程中需要人工进行平茬复壮从而使其生长得更加茂密。沙柳作为一种沙区灌木,含有丰富的粗纤维(63.09%~76.05%)、木质素(18.57%~25.03%)、粗蛋白(2.81%~4.17%)和粗脂肪(1.45%~3.37%),适合栽培食用菌。

国内很多学者尝试利用沙柳栽培食用菌,如杏鲍菇^[22]、榆黄蘑^[23]、香菇^[24]等,都获得了成功。本次试验,从产量上和形态特征方面讲,利用沙柳栽培皱环球盖菇可以显著提高产量,达到 7.42 kg/m²,菇形指数也是本次试验表现最佳的。从营养角度讲,人体所需的蛋白质和钙的含量较高,本次试验的蛋白质含量在 32.22%~41.49%之间,纯沙柳木屑栽培出来的皱环球盖菇子实体的蛋白质含量为 41.49%,高于郝海波等利用水稻秸秆栽培皱环球盖菇的蛋白质含量(24.65%~38.08%)^[25],也高于柳丽萍等利用桑枝栽培出来的皱环球盖菇中的子实体蛋白质含量(25.09%)^[26],本次试验中的粗脂肪含量为 7.32%~8.31%,高于胡桂萍等人研究中的粗脂肪含量(0.11%~0.21%)^[27],这可能是采收时间不一致导致的,采收时间越晚,皱环球盖菇中的粗脂肪含量越高^[28]。从安全性角度讲,食用菌有富集重金属的特性,利用沙柳栽培皱环球盖菇,子实体中的 Cr, Hg 2 种重金属含量与

CK 组无显著差别,As 和 Pb 含量高于 CK,但均符合国家标。同时,本次试验选择发酵料工艺进行栽培,成本较低,一般农户均可满足,可以在沙区进行推广。

综合产量、形态特征、营养成分、矿物质含量和重金属含量,最终得出经发酵后的沙柳木屑,可以用作栽培皱环球盖菇的培养基,即通过栽培皱环球盖菇来解决沙柳枝条的利用问题是具有可行性的,为沙区沙柳枝条资源化提供了新的思路。

参考文献 (References)

- [1] Zhang Weiwei, Tian Guoting, Geng Xueran, et al. Isolation and characterization of a novel lectin from the edible mushroom *Stropharia rugosoannulata* [J]. *Molecules*, 2014,19(12):19880-19891.
- [2] Wu Fang, Zhou Liwei, Yang Zhuliang, et al. Resource diversity of Chinese macrofungi: Edible, medicinal and poisonous species [J]. *Fungal Diversity*, 2019,98:1-76.
- [3] Liu Ying, Hu Chaofan, Feng Xi, et al. Isolation, characterization and antioxidant of polysaccharides from *Stropharia rugosoannulata* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020,155:883-889.
- [4] Wu Jing, Suzuki T, Choi J H, et al. An unusual sterol from the mushroom *Stropharia rugosoannulata* [J]. *Tetrahedron Letters*, 2013,54(36):4900-4902.
- [5] Chen Wanchao, Li Wen, Wu Di, et al. Characterization of novel umami-active peptides from *Stropharia rugosoannulata* mushroom and in silico study on action mechanism [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022,110:104530.
- [6] Hao Hui, Cui Chun, Xing Yuqing, et al. Sulfation of the extracellular polysaccharide from the edible fungus *Stropharia rugosoannulata* with its antioxidant activity [J]. *Journal of Future Foods*, 2023,3(1):37-42.
- [7] Liu Yuntao, Sun Jun, Luo Zeyu, et al. Chemical composition of five wild edible mushrooms collected from Southwest China and their antihyperglycemic and antioxidant activity [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2012,50(5):1238-1244.
- [8] Li Wang, Ni Shujun, Li Shurong, et al. Analysis of the different parts of base nutrition of *Stropharia rugosoannulata* [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2016.
- [9] 焦潇颖,田景花,高亚洁等.皱环球盖菇菌丝体的耐热性及抗氧化酶对高温的响应[J]. *菌物学报*, 43(6):230279. Jiao Xiaoying, Tian Jinghua, Gao Yajie, et al. Heat resistance in the mycelial stage of *Stropharia rugosoannulata* and response of antioxidant enzymes to high temperature [J]. *Mycosystema*, 43(6):230279.
- [10] 黄年来.大球盖菇的分类地位和特征特性[J]. *食用菌*, 1995,17(6):11. Huang Nianlai. Taxonomic status and characteristics of *Pleurotus ostreatus* [J]. *Edible Fungi*, 1995,17(6):11.

- [11] Wang Ruidong, Gao Yong, Dang Xiaohong, et al. Microstructure and biodegradation of long-established *Salix psammophila* sand barriers on sand dunes [J]. Environmental Technology & Innovation, 2021,21:101366.
- [12] 刘涛,郭慧霞.神木风沙草滩区沙柳平茬复壮技术研究[J].现代园艺,2022(16):13-14.
Liu Tao, Guo Huixia. Study on rejuvenation technology of *Salix psammophila* in Shenmu sandy beach area [J]. Contemporary Horticulture, 2022(16):13-14.
- [13] Jia Huixia, Li Jianbo, Zhang Jin, et al. The *Salix psammophila* SpRLCK1 involved in drought and salt tolerance [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2019,144:222-233.
- [14] 马强.红柳生物学特性及其造林复壮技术要点[J].特种经济动植物,2023,26(6):163-165.
Ma Qiang. Biological characteristics of *Tamarix ramosissima* and its key points of afforestation and rejuvenation technology [J]. Special Economic Animals and Plants, 2023,26(6):163-165.
- [15] Liang Yumei, Gao Yong, Meng Zhongju, et al. Natural degradation process of *Salix psammophila* sand barriers regulates desert soil microbial biomass C:N:P stoichiometry and homeostasis [J]. CATENA, 2023, 222: 106880.
- [16] 周炎广,李红悦,武子丰,等.毛乌素沙地沙障固沙机制与效益评估[J].科学通报,2023,68(11):1312-1329.
Zhou Yanguang, Li Hongyue, Wu Zifeng, et al. Sand fixation mechanism and effect evaluation of sand barriers in Mu Us sandy land, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2023,68(11):1312-1329.
- [17] Hou Lizhu, Gao Jingdong, Hu B X, et al. Effects of *Salix psammophila* on groundwater recharge in a semiarid area of North China [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023,50:101556.
- [18] 陈曦,雷虹娟,汪季,等.不同铺设年限沙柳沙障的防风固沙效益研究[J].北方园艺,2014(8):51-53.
Chen Xi, Lei Hongjuan, Wang Ji, et al. Study on windproof effective of different laying age of *salix psammophila* sand barrier [J]. Northern Horticulture, 2014(8):51-53.
- [19] 龙超.提高沙柳石膏刨花板物理力学性能的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2004.
Long Chao. Study on the Improvement on the *Salix* Gypsum Particle Board's Property [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2004.
- [20] 赵天球.沙柳半化学浆抄造高强瓦楞原纸及箱纸板[J].中国造纸,2003,22(8):25-27.
Zhao Tianqiu. Commercial trial of manufacture of corrugating medium and liner board from the sulfate semichemical pulp of desert willow [J]. China Pulp & Paper, 2003,22(8):25-27.
- [21] Zhang Zaiyong, Wang Wenke, Gong Chengcheng, et al. *Salix psammophila* afforestations can cause a decline of the water table, prevent groundwater recharge and reduce effective infiltration [J]. Science of the Total Environment, 2021,780:146336.
- [22] 周锋利.沙柳木屑栽培杏鲍菇与菌糠利用技术研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.
Zhou Fengli. Research on *Salix psammophila* sawdust cultivation of *Pleurotus eryngii* and utilization of fungus chaff [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2013.
- [23] 姜佳岷.不同配比沙柳和柠条木屑对榆黄蘑生长的影响[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
Jiang jiamin. Effects of different proportion of *Salix psammophila* and *Caragana microphylla* on the growth of *Pleurotus citrinopileatus* [D]. Huhhot Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [24] 秦文龙.榆林沙区利用沙柳栽培香菇技术研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2023.
Qin Wenlong. Study on cultivation techniques of *Lentinus edodes* using *Salix psammophila* in Yulin sandy area [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [25] 郝海波,赵静,杨慧,等.不同大球盖菇菌株主要农艺性状和营养成分综合评价[J].食用菌学报,2022,29(3):41-49.
Hao Haibo, Zhao Jing, Yang Hui, et al. Comprehensive evaluation of main agronomic traits and nutritional components of different *Stropharia rugosoannulata* strains [J]. Acta Edulis Fungi, 2022,29(3):41-49.
- [26] 柳丽萍,钱文春,占鹏飞,等.不同基质和干燥方法对大球盖菇营养成分的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2018,40(2):8-13.
Liu Liping, Qian Wenchun, Zhan Pengfei, et al. Effect of different substrates and drying methods on the nutritional composition of *Stropharia rugosoannulata* [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2018,40(2):8-13.
- [27] 胡桂萍,胡丽春,曹红妹,等.桑枝屑代料栽培对大球盖菇生长及营养成分的影响[J].中国食用菌,2022,41(11):35-39.
Hu Guiping, Hu Lichun, Cao Hongmei, et al. Effect of substitute cultivation with mulberry sawdust on the growth and nutrient composition of *Stropharia rugosoannulata* [J]. Edible Fungi of China, 2022,41(11):35-39.
- [28] 陈怡彤.秸秆基质类型对大球盖菇农艺性状及营养品质的影响[D].湖北 武汉:华中农业大学,2023.
Chen Yitong. The impact of different straw substrate on the agronomic traits and nutritional quality in *Stropharia rugosoannulata* [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong Agricultural U, 2023.