

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240313006

不同菌材栽培糙皮侧耳营养品质综合评价

张时馨^{1,2}, 陈 荟^{2,3*}, 耿阳阳^{1,2}

(1. 贵州省核桃研究所, 贵阳 550005; 2. 贵州省林业科学研究院, 西南喀斯特山地生物多样性保护国家林业和草原局重点实验室, 贵阳 550005; 3. 贵州省云关山国有林场, 贵阳 550005)

摘 要: **目的** 分析不同菌材栽培糙皮侧耳(*Pleurotus ostreatus*)生长及营养品质差异, 并对其营养品质进行综合评价。**方法** 以贵州 5 种常见菌材锥栗(*Castanea henryi*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、光皮桦(*Betula luminifera*)、青冈(*Quercus glauca*)为主要培养料栽培糙皮侧耳, 对糙皮侧耳菌丝生长、子实体主要农艺性状及营养品质进行分析。**结果** 糙皮侧耳在光皮桦培养基上菌丝生长速率更快, 在锥栗和刺槐栽培基质中子实体主要农艺性状更好。刺槐栽培基质中糙皮侧耳子实体粗蛋白、Cu、Zn、K 元素含量最高, 锥栗栽培基质中糙皮侧耳子实体多糖、Na、Mg、Fe、Ca 元素含量最高。以 5 种菌材栽培的糙皮侧耳子实体总氨基酸、必需氨基酸含量为刺槐>青冈>光皮桦>构树>锥栗, 总药用氨基酸含量为青冈>刺槐>光皮桦>构树>锥栗。5 种菌材栽培的糙皮侧耳子实体呈味氨基酸主要为甜味和苦味氨基酸, 其中光皮桦栽培的糙皮侧耳子实体鲜甜味更佳。必需氨基酸营养品质评价及营养品质综合评价结果表明刺槐栽培糙皮侧耳子实体综合营养品质更好。Fe、苏氨酸、丙氨酸、谷氨酸、精氨酸、天冬氨酸、组氨酸、Zn 和多糖是 5 种菌材栽培的糙皮侧耳子实体主要差异营养成分。相关性分析结果显示菌材营养成分主要与糙皮侧耳菌丝生长、子实体主要农艺性状和矿物质元素含量显著相关。**结论** 不同营养成分的菌材对糙皮侧耳子实体生长和营养品质的影响不同, 刺槐更适合作为生产糙皮侧耳主栽菌材。

关键词: 糙皮侧耳; 菌材; 营养品质; 氨基酸; 相关性

Comprehensive evaluation of the nutritional quality of *Pleurotus ostreatus* cultivated in different fungus-growing materials substrate

ZHANG Shi-Xin^{1,2}, CHEN Hui^{2,3*}, GENG Yang-Yang^{1,2}

(1. Guizhou Institute of Walnut, Guiyang 550005, China; 2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Biodiversity Conservation in Karst Mountainous Areas of Southwestern China Guizhou Academy of Forestry, Guiyang 550005, China; 3. Guizhou Yunguanshan National Forest Farm, Guiyang 550005, China)

ABSTRACT: Objective To analyze the differences in growth and nutritional quality of *Pleurotus ostreatus* cultivated in different fungus-growing materials substrate and to evaluate their nutritional quality. **Methods** Five kinds of local fungus-growing materials in Guizhou, including *Castanea henryi*, *Broussonetia papyrifera*, *Robinia pseudoacacia*, *Betula luminifera*, and *Quercus glauca*, were used as the main sawdust cultivation substrates to cultivate *Pleurotus ostreatus*. The mycelial growth, main agronomic traits of fruiting bodies, nutritional quality of

基金项目: 贵州省林业科研项目(黔林科合 J 字[2022]09 号)、贵州省科技重大专项(黔科合重大专项字[2019]3006)

Fund: Supported by the Forest Scientific and Research Project of Guizhou Province (Grant No.[2022]09), and the Major Technology Project of Guizhou Province (Grant No.[2019]3006)

***通信作者:** 陈荟, 工程师, 主要研究方向为林菌培育。E-mail: 781763976@qq.com

***Corresponding author:** CHEN Hui, Engineer, Guizhou Yunguanshan National Forest Farm, No.382, Fuyuan South Road, Nanming District, Guiyang 550005, China. E-mail: 781763976@qq.com

Pleurotus ostreatus were studied. **Results** The mycelial growth rate of *Pleurotus ostreatus* were faster on the medium of *Betula luminifera*, while the main agronomic traits of fruiting bodies were better in *Castanea henryi* and *Robinia pseudoacacia* sawdust cultivation substrates. The content of crude protein, Cu, Zn, and K elements of *Pleurotus ostreatus* fruiting bodies in *Robinia pseudoacacia* sawdust cultivation substrates were the highest, while the content of polysaccharide content, Na, Mg, Fe, and Ca elements of *Pleurotus ostreatus* fruiting bodies in *Castanea henryi* sawdust cultivation substrates had the highest. The total amino acids and indispensable amino acids of the 5 kinds of *Pleurotus ostreatus* fruiting bodies were in the order of *Robinia pseudoacacia*>*Quercus glauca*>*Betula luminifera*>*Broussonetia papyrifera*>*Castanea henryi*. The total medicinal amino acids were in the order of *Quercus glauca*>*Robinia pseudoacacia*>*Betula luminifera*>*Broussonetia papyrifera*>*Castanea henryi*. The main flavor amino acids of *Pleurotus ostreatus* fruiting bodies cultivated in 5 kinds of fungus-growing materials were mainly sweet and bitter amino acids, among which the umami and sweet taste of the *Pleurotus ostreatus* fruiting bodies cultivated in *Betula luminifera* cultivation substrate was better. The evaluation of indispensable amino acid nutritional quality and the comprehensive evaluation of nutritional quality indicated that the comprehensive nutritional quality of *Pleurotus ostreatus* fruiting bodies in *Robinia pseudoacacia* sawdust cultivation substrates was better. Fe, threonine, alanine, glutamic, arginine, aspartic acid, histidine, Zn, and polysaccharides were the main differential nutritional components of *Pleurotus ostreatus* fruiting bodies cultivated with 5 kinds of fungus-growing materials sawdust cultivation substrate. The correlation analysis results showed that the nutritional components of the fungus-growing materials were significantly correlated with the mycelial growth rate of *Pleurotus ostreatus*, the agronomic traits of *Pleurotus ostreatus* fruiting bodies, and mineral element content. **Conclusion** The effects of different nutritional quality of fungus-growing materials on the growth and nutritional quality of the *Pleurotus ostreatus* fruiting body are different, while using *Robinia pseudoacacia* as the main sawdust cultivation substrates for cultivating *Pleurotus ostreatus* is the optimal.

KEY WORDS: *Pleurotus ostreatus*; fungus-growing materials; nutritional quality; amino acids; correlation

0 引言

糙皮侧耳(*Pleurotus ostreatus*)是继香菇(*Lentinus edodes*)、双孢菇(*Agaricus bisporus*)后,产量位居中国第三位的食用菌^[1]。因其肉肥质嫩,味道鲜美,富含膳食纤维、矿物质、蛋白质和丰富的氨基酸而深受消费者喜爱^[2]。糙皮侧耳属于木腐菌类^[3],适应性强,可降解利用多种大分子物质,被广泛用于食用菌产业化栽培示范中。糙皮侧耳栽培基质主要为阔叶木屑,随着产业不断发展,菌材需求增加,北方地区开始以本地适生杨树^[4]、桑枝^[5]、梨树^[6]等为主要栽培菌材,以寻求快速有效的菌材资源化利用方法,缓解“菌林矛盾”,但大多属于实验阶段,难以进行大面积推广,传统的糙皮侧耳栽培基质仍以常见阔叶菌材为主。

锥栗(*Castanea henryi*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、光皮桦(*Betula luminifera*)、青冈(*Quercus glauca*)具有速生、耐旱、耐盐碱等特点,是西南地区优势阔叶树种,也是食用菌生产中常用的优质菌材树种。不同菌材的理化性质是影响食用菌农艺性状和产量的重要因素。丰富的碳素营养会促进食用菌中多糖的积累,降低脂肪含量^[7],不同碳素营养和矿物质元素含量也会影响栽培食用菌的产量和农艺性状^[8-9]。此外,栽培基质也会显著影响食用菌营养品质和风味^[10-11]。ZIED 等^[12]利用茅

茅渣、甘蔗渣等作为主要栽培基质可提高糙皮侧耳纤维素和蛋白质含量;玉米芯基质栽培的平菇中灰分含量高于棉籽壳^[13-14];唐艳仪等^[15]用苎麻栽培平菇可提高子实体多糖和粗蛋白含量。殷朝敏等^[16]探究了不同栽培基质对侧耳属食用菌风味成分的影响,发现棉籽壳基质有利于侧耳属食用菌中酯类化合物的生成,而杂木屑基质有利于游离氨基酸的生成。虽然关于不同培养基质及复配基质对食用菌栽培研究较多,但现有的大宗食用菌种植仍以单一菌材和杂木屑为主,而关于单一菌材为主料栽培糙皮侧耳并对其营养品质进行分析和综合评价的研究较少,这严重影响了生产上定向精准取材和食用菌产业中特定营养学的研究深度。基于此,本研究以贵州 5 种速生阔叶菌材树种构树、光皮桦、刺槐、锥栗、青冈作为糙皮侧耳主要栽培基质,探究 5 种菌材培育的糙皮侧耳子实体生长和营养品质差异,并进行糙皮侧耳子实体营养品质评价,为完善糙皮侧耳企业化种植方案提供参考,同时为不同营养需求的食用菌加工产品生产和开发提供依据,促进食用菌产业高质量发展。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

糙皮侧耳购自贵州省龙里县谷脚镇观音村,菌种经组织分离连续培养 2 代后进行内转录间隔区(internal

transcribed spacer, ITS)鉴定为糙皮侧耳(*Pleurotus ostreatus*)。菌种现保存于贵州省核桃研究所微生物实验室。构树、光皮桦、刺槐、锥栗、青冈来源于贵州省云关山国有林场人工林,树龄10~15年。

麦麸、白砂糖、石膏粉、聚乙烯塑料袋(贵阳当地市场);马铃薯葡萄糖琼脂培养基(potato dextrose agar, PDA)、无水葡萄糖(优级纯)、甲醇(色谱级)、四硼酸钠、乙二胺四乙酸二钠、十二烷基硫酸钠、十六烷基三甲基溴化铵、硫代硫酸钠、氯化钡(分析纯)[阿拉丁(上海)生化科技股份有限公司]。

1.2 仪器与设备

LDZX-75KBS 立式压力蒸汽灭菌器(上海申安医疗器械厂); SW-CJ-2D 超净工作台(苏州净化设备有限公司); DHG-9145A 鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司); MS104TS 万分之一电子天平[梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]; 3-18R 台式高速冷冻离心机(四川蜀科仪器有限公司); GZX-9140MBE 鼓风干燥箱(上海博讯实业有限公司); MTN-5800 氮吹仪(天津奥特赛恩斯仪器有限公司); L-8900 氨基酸分析仪(日本日立公司); BJPX-B150 生化培养箱(山东博科科学仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 菌材主要营养成分测定

2023年7月对5种速生菌材树种进行采伐、机械粉碎后过10目筛,得粒径5~8 mm的木屑,曝晒30 d后,用于主要营养成分分析。采用GB/T 20806—2022《饲料中中性洗涤纤维(NDF)的测定》中范式洗涤法联合粗纤维测定仪测定植物纤维素、半纤维素、木质素含量,参考文献[17~18]方法测定菌材全氮、有机碳含量,根据GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》测定菌材矿物质元素含量。

1.3.2 菌丝生长速率测定

将木屑80℃烘干后粉碎,过60目筛,将PDA培养基中葡萄糖替换成2%木屑粉制成木屑培养基,于121℃,0.1 MPa灭菌20 min后,将直径5 mm活化后菌丝块接入培养基上,接种后放入生化培养箱中28℃避光培养,采用十字交叉法测量菌落直径,计算菌落直径(cm)与生长天数(d)的比值(菌丝生长速率),重复5次。

1.3.3 栽培方法

将5种木屑预湿、堆沤、发酵后制作菌包,每种60包。菌包配方:78%木屑(A:锥栗木屑基质,B:构树木屑基质,C:刺槐木屑基质,D:光皮桦木屑基质,E:青冈木屑基质)、20%麦麸、1%石膏粉、1%白砂糖,湿度65%。将各原料按照基质配方配料混合后装袋(15 cm×30 cm×0.025 mm聚乙烯塑料袋),装袋后约重1.5 kg,121℃,0.1 MPa灭菌4 h。菌袋冷却后在无菌条件下进行接种,每袋接种2块1 cm×1 cm菌块,放置在温度25℃、相对湿度60%的温室环境中

培育15 d,待菌丝长满菌包后开盖,进行15℃/28℃交替培养,保持85%培养湿度。记录不同菌包子实体数量、子实体长度、菌盖直径、菌柄长度、子实体鲜重、出菇时间。

1.3.4 子实体营养成分测定

出菇后10 d进行子实体采收,并用蒸馏水洗净表面杂质,粗蛋白质含量测定采用GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》凯氏定氮法,粗脂肪含量测定参照GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》进行,粗多糖含量测定参照NY/T1676—2023《食用菌中粗多糖含量的测定》进行,矿物质元素含量测定参照GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》进行,氨基酸含量测定参照GB 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》进行。

1.3.5 氨基酸评分和化学评分

参照朱圣陶和吴坤^[19]的评分方法,根据氨基酸平衡理论,依照世界卫生组织(World Health Organization, WHO)和联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization, FAO)提出的评价蛋白质营养价值的氨基酸模式(即以人体必需氨基酸模式为标准模式)进行氨基酸评分(amino acid score, AAS)和化学评分(chemical score, CS)^[20~21],具体公式见式(1)~(2):

$$AAS = \frac{A_1}{A_2} \times 100 \quad (1)$$

$$CS = \frac{A_1 \times E_1}{A_3 \times E_2} \times 100 \quad (2)$$

式中: A_1 为待测蛋白某一必需氨基酸的含量; A_2 为FAO/WHO评分模式中相应氨基酸含量; A_3 为待测蛋白中必需氨基酸的总含量; E_1 为标准鸡蛋蛋白模式中相应必需氨基酸的含量; E_2 为标准鸡蛋蛋白模式中必需氨基酸的总含量。

1.4 数据处理

采用SPSS 19.0软件对数据进行Duncan多重比较、主成分分析和相关性分析, $P < 0.05$ 为组间差异具有统计学意义;采用SIMCA14.1软件进行正交偏最小二乘判别分析(partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA),根据变量重要性投影(variable importance in the projection, VIP)大于1筛选差异组分;采用Origin 2020进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同菌材主要营养成分含量分析

表1中显示了5种菌材的主要营养成分,从结果看出,5种菌材主要营养成分整体上差异显著($P < 0.05$)。其中锥栗纤维素和有机碳含量最高,半纤维素和全钾含量最低;构树半纤维素、木质素、全磷和全钾含量最高,纤维素和有机碳含量最低;刺槐的全氮含量最高,全磷含量最低;光皮桦的全磷含量仅次于构树,全氮含量仅次于刺槐;青冈的木质素和全氮含量最低,纤维素含量仅次于锥栗。从5种菌材

表 1 不同菌材主要营养成分含量
Table 1 Main nutritional content of different tree species

成分	菌材种类				
	A	B	C	D	E
半纤维素/%	12.40±0.21 ^d	25.20±0.02 ^a	19.20±0.51 ^c	22.70±1.03 ^b	22.40±1.01 ^b
纤维素/%	55.10±3.02 ^a	43.50±2.01 ^d	49.70±0.41 ^b	48.70±0.02 ^c	52.30±0.11 ^b
木质素/%	19.80±1.09 ^c	22.70±0.03 ^a	20.50±0.81 ^b	18.80±0.15 ^c	18.60±0.05 ^c
有机碳/(g/kg)	463.96±2.10 ^a	428.95±2.10 ^c	463.08±0.70 ^a	443.61±5.57 ^b	462.04±2.50 ^a
全氮/(g/100 g)	0.58±0.10 ^c	0.66±0.05 ^b	0.85±0.03 ^a	0.81±0.11 ^a	0.56±0.06 ^c
全磷/(mg/100 g)	8.49±0.24 ^b	12.44±0.42 ^a	7.69±0.23 ^c	11.84±1.52 ^a	9.57±0.39 ^b
全钾/(g/100 g)	0.04±0.10 ^b	0.14±0.02 ^a	0.07±0.20 ^b	0.08±0.15 ^b	0.08±0.03 ^b
Ca/(mg/kg)	4.40±0.12 ^c	6.49±0.01 ^b	3.26±0.03 ^d	4.48±0.17 ^c	9.55±0.01 ^a
Na/(mg/kg)	51.10±0.89 ^b	21.63±1.07 ^d	29.37±0.89 ^c	57.01±0.24 ^a	11.32±0.40 ^c
Mg/(g/kg)	0.57±0.03 ^b	0.86±0.02 ^a	0.31±0.01 ^d	0.51±0.02 ^c	0.57±0.03 ^b
Zn/(mg/kg)	13.68±0.15 ^b	6.25±0.12 ^d	14.56±0.53 ^b	39.10±0.58 ^a	11.21±0.52 ^c
Cu/(mg/kg)	3.39±0.21 ^b	3.81±0.10 ^b	2.17±0.10 ^c	5.27±0.10 ^a	3.02±0.16 ^b
Fe/(mg/kg)	79.71±5.84 ^c	74.83±2.80 ^d	294.98±6.46 ^a	15.51±1.74 ^c	148.09±4.06 ^b

注：数据为平均值±标准偏差(n=3)，采用 Duncan 法进行多重比较。同一行不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

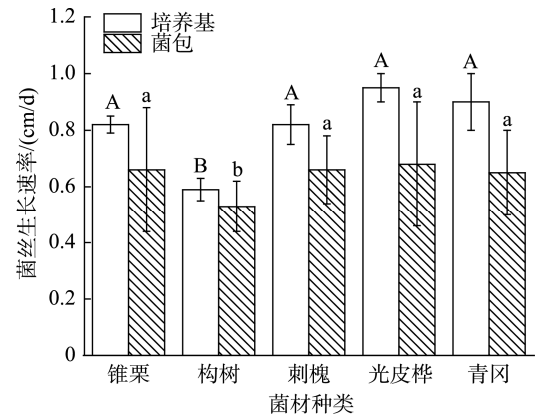
矿物质元素含量结果看出，在 6 种矿物质元素中 Mg 含量均最高，Ca 和 Cu 含量最低，5 种菌材中矿物质元素含量具有明显差异。构树的 Mg 含量最高，Zn 含量最低；刺槐的 Fe 含量最高，Ca、Mg、Cu 含量最低；光皮桦的 Na、Zn、Cu 含量最高，Fe 含量最低；青冈的 Ca 含量最高，Na 含量最低，Fe 含量仅次于刺槐。

2.2 不同菌材对糙皮侧耳菌丝生长及农艺性状的影响

5 种菌材栽培菌包和木屑培养基上菌丝生长速率如图 1 所示。在菌包和培养基上，糙皮侧耳菌丝生长速率在光皮桦中最高，构树中最低。从菌落形态来看(图 2)，锥栗和刺槐培养基上的糙皮侧耳菌丝粗壮密实，长势旺盛；光皮桦培养基菌丝生长速率快，但菌丝较细长，长势一般；构树和青冈培养基上菌丝稀疏，生长缓慢，长势较弱，这可能与菌材纤维素和半纤维素含量有关^[22]。栽培基质为食用菌生长提供营养物质，并显著影响其菌丝生长发育、子实体农艺性状、产量收益及营养价值^[23-25]。在本研究中，糙皮侧耳在 5 种菌材中均能生长，表明其均可作为糙皮侧耳栽培基质，但菌丝长势和子实体农艺性状受菌材营养成分含量影响。刺槐的全氮含量最高，其栽培的糙皮侧耳菌丝生长和子实体农艺性状最佳，这与利用核桃壳和核桃木屑基质栽培提高平菇子实体蛋白质、粗多糖、脂肪、Ca 等含量的研究结果一致^[26]。

由表 2 可知，5 种菌材培育糙皮侧耳子实体农艺性状均存在显著差异(P<0.05)。子实体数量表现为刺槐>锥栗>光皮桦>构树>青冈，子实体长度表现为锥栗>光皮桦>刺槐>青冈>构树，其中刺槐和锥栗培养料中子实体数量显著高于其他 3 种。菌盖直径表现为锥栗>光皮桦>刺槐>构树>青冈，锥栗培养料中子实体长度和菌盖直径最大。菌柄长度表现为刺槐>光皮桦>锥栗>构树>青冈，子实体鲜重表现均为刺槐>光皮桦>构树>锥栗>青冈，构树和锥栗子实体数量相差 2 倍，但子实体鲜重差异不显著，表明锥栗栽培糙皮侧耳出菇量

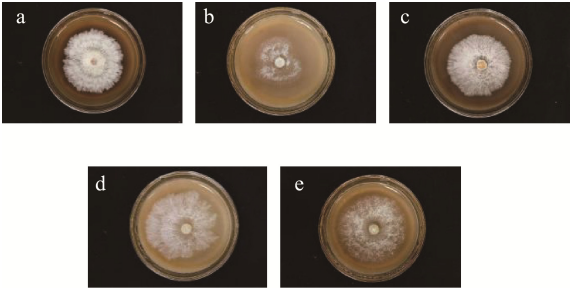
大，更高产。从出菇时间来看，刺槐和锥栗栽培基质中糙皮侧耳出菇时间短，结合菌丝生长速率判断可知，锥栗和刺槐培养糙皮侧耳子实体农艺性状更佳。



注：不同大写字母表示不同菌材培养基中菌丝生长速率具有显著性差异(P<0.05)，不同小写字母表示不同菌材菌包中菌丝生长速率具有显著性差异(P<0.05)。

图1 不同菌材对糙皮侧耳菌丝生长速率的影响

Fig.1 Effects of different fungus-growing materials on the mycelial growth rate of *Pleurotus ostreatus*



注：a~e：锥栗、构树、刺槐、光皮桦、青冈培养基中菌落形态。

图2 不同菌材对糙皮侧耳菌落形态的影响

Fig.2 Effects of different fungus-growing materials on the colony morphology of *Pleurotus ostreatus*

表 2 不同菌材对糙皮侧耳子实体主要农艺性状的影响						
Table 2 Effects of different fungus-growing materials on the main agronomic characteristics of <i>Pleurotus ostreatus</i> fruiting bodies						
菌材种类	子实体数量/个	子实体长度/cm	菌盖直径/cm	菌柄长度/cm	子实体鲜重/g	出菇时间/d
A	14.00±0.07 ^b	8.20±1.68 ^a	8.05±1.46 ^a	9.47±6.07 ^c	44.97±17.61 ^c	20
B	7.25±4.79 ^d	4.38±4.73 ^d	4.88±5.78 ^d	7.96±5.41 ^d	45.22±16.88 ^c	24
C	15.25±6.90 ^a	7.50±4.92 ^b	5.90±5.05 ^c	11.85±5.15 ^a	61.17±11.96 ^a	22
D	8.00±0.00 ^c	7.78±3.43 ^b	6.73±2.80 ^b	10.09±6.65 ^b	57.10±18.56 ^b	24
E	5.75±2.06 ^c	5.52±4.82 ^c	3.93±4.46 ^c	7.32±6.12 ^c	39.87±18.96 ^c	24

注: 数据均为平均值±标准偏差(n=3), 同一列不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05), 表 2~4 同。

2.3 不同菌材对糙皮侧耳子实体营养成分的影响

糙皮侧耳子实体基础营养成分含量见表 3, 5 种菌材基质栽培的糙皮侧耳子实体都呈现出高蛋白、低脂肪的特点, 同时多糖含量都很丰富。5 种菌材栽培糙皮侧耳子实体粗蛋白含量存在显著差异(P<0.05), 其中刺槐栽培基质中子实体粗蛋白含量最高, 构树中含量最低; 光皮桦中粗脂肪含量最高, 是含量最低的刺槐的 1.6 倍; 锥栗中多糖含量最高, 其次是构树。姬钰粮等^[27]研究发现, 与纯木屑栽培的平菇子实体相比, 芦苇替代 50%木屑栽培平菇子实体粗蛋白、药用氨基酸、必需氨基酸和总氨基酸提高 10.5% 以上, 药用价值更高, 食用风味更佳。结合本研究结果建议生产时可将刺槐和锥栗混合配料栽培糙皮侧耳, 以提高糙皮侧耳子实体营养品质。

表 3 不同菌材对糙皮侧耳子实体营养成分的影响			
Table 3 Effects of different fungus-growing materials on nutrient components of <i>Pleurotus ostreatus</i> fruiting bodies			
菌材种类	粗蛋白/%	粗脂肪/%	多糖/(mg/g)
A	33.61±0.79 ^c	0.82±0.03 ^b	118.44±0.03 ^a
B	31.13±0.12 ^d	0.73±0.03 ^c	106.94±0.02 ^b
C	38.04±0.07 ^a	0.62±0.01 ^d	90.63±0.33 ^d
D	33.08±0.12 ^c	0.97±0.02 ^a	97.75±0.05 ^c
E	37.76±0.18 ^b	0.72±0.01 ^c	96.10±0.06 ^c

2.4 不同菌材对糙皮侧耳子实体矿物质元素含量的影响

由表 4 可知, 5 种菌材培育糙皮侧耳子实体 Mg、Ca、K 含量较高, Na、Cu、Fe、Zn 含量较低。青冈栽培基质中糙皮侧耳子实体 7 种矿物质元素含量均最低。锥栗培养基

质中糙皮侧耳子实体 Na、Mg、Fe、Ca 含量最高, 分别是青冈的 2.33、11.07、2.32 和 11.07 倍。刺槐培养基质中糙皮侧耳子实体 Cu、Zn、K 元素含量最高, 分别是青冈的 2.33、1.95、1.62 倍。5 中栽培基质中糙皮侧耳微量元素 Fe 含量高于利用矿质元素含量丰富的核桃壳栽培的平菇中的 Fe 含量^[26], 但 Cu、Zn、Mg 含量均低于核桃壳栽培的平菇, 表明糙皮侧耳对不同菌材栽培基质的矿物质元素利用和转化不同, 糙皮侧耳可更好地利用锥栗和刺槐中的 Fe。

2.5 不同菌材对糙皮侧耳子实体氨基酸组成和含量的影响

游离氨基酸是食用菌重要的风味物质, 本研究共测定了 5 种菌材栽培糙皮侧耳子实体的 17 种氨基酸, 5 种菌材培育的糙皮侧耳子实体游离氨基酸含量丰富, 但总氨基酸含量差异较大。糙皮侧耳子实体总氨基酸含量范围为 368.49~680.88 mg/100 g, 人体必需氨基酸含有 8 种, 糙皮侧耳子实体中含有 7 种。从表 5 结果可以看出, 总氨基酸、必需氨基酸含量均为刺槐>青冈>光皮桦>构树>锥栗, 总药用氨基酸含量为青冈>刺槐>光皮桦>构树>锥栗。刺槐栽培糙皮侧耳子实体中总氨基酸含量几乎是锥栗的 2 倍。5 种菌材基质栽培的糙皮侧耳子实体的谷氨酸含量都高于天冬氨酸含量, 这与 YIN 等^[28]的研究结果一致。刺槐栽培的糙皮侧耳子实体必需氨基酸占总氨基酸的 31.90%, 总氨基酸、必须氨基酸和总药用氨基酸含量最高, 分别比含量最低的锥栗栽培的糙皮侧耳子实体增加了 84.54%、106.14%、44.84%。相关研究也表明, 单一碳源木屑基质栽培杏鲍菇比棉籽壳与木屑混合基质栽培杏鲍菇蛋白质和游离氨基酸含量更高, 这可能与栽培基质碳氮比有关^[22]。

表 4 不同菌材对糙皮侧耳子实体矿物质元素含量的影响							
Table 4 Effects of different fungus-growing materials on the contents of mineral elements of <i>Pleurotus ostreatus</i> fruiting bodies							
菌材种类	Na/(mg/kg)	Mg/(g/kg)	Cu/(mg/kg)	Fe/(mg/kg)	Zn/(mg/kg)	Ca/(g/kg)	K/(g/kg)
A	0.42±0.02 ^a	1.55±0.05 ^a	7.83±0.19 ^b	121.89±0.04 ^a	38.26±0.25 ^c	1.55±0.05 ^a	13.53±0.25 ^a
B	0.25±0.03 ^c	0.89±0.01 ^c	6.36±0.12 ^c	83.47±0.37 ^c	42.56±0.06 ^b	0.83±0.05 ^c	13.53±0.02 ^a
C	0.30±0.01 ^b	1.02±0.01 ^b	8.41±0.21 ^a	115.55±0.31 ^b	51.35±0.18 ^a	1.09±0.12 ^b	13.82±0.01 ^a
D	0.31±0.01 ^b	0.53±0.02 ^d	5.84±0.18 ^d	63.31±0.22 ^d	43.20±0.18 ^b	0.54±0.03 ^d	13.76±0.02 ^a
E	0.18±0.01 ^d	0.14±0.02 ^c	3.61±0.09 ^c	52.52±0.08 ^c	26.36±0.03 ^d	0.14±0.01 ^c	8.53±0.03 ^b

表 5 不同菌材对糙皮侧耳子实体氨基酸含量的影响
Table 5 Effects of different fungus-growing materials on the contents of amino acids of *Pleurotus ostreatus* fruiting bodies

氨基酸种类	氨基酸含量/(mg/100 g)				
	A	B	C	D	E
天冬氨酸(aspartic acid, Asp)	35.38±0.23 ^c	9.60±0.05 ^d	5.32±0.09 ^d	36.54±0.18 ^b	52.67±0.31 ^a
谷氨酸(glutamic acid, Glu)	42.59±0.06 ^d	65.56±0.34 ^c	108.07±0.06 ^b	85.78±0.02 ^b	111.44±0.21 ^a
苏氨酸(threonine, Thr)*	53.35±0.24 ^d	57.55±0.27 ^d	143.69±0.20 ^b	91.48±0.14 ^c	112.44±0.15 ^a
丝氨酸(serine, Ser)	15.66±0.06 ^d	15.42±0.22 ^c	27.06±0.04 ^a	15.75±0.11 ^c	18.32±0.26 ^b
甘氨酸(glycine, Gly)	4.85±0.05 ^c	5.43±0.15 ^b	9.41±0.19 ^a	6.25±0.18 ^a	5.76±0.12 ^b
丙氨酸(alanine, Ala)	39.10±0.01 ^d	81.64±0.05 ^a	118.24±0.07 ^a	60.51±0.28 ^c	65.45±0.13 ^b
精氨酸(arginine, Arg)	78.54±0.03 ^c	91.51±0.16 ^c	117.18±0.21 ^b	82.55±0.02 ^d	118.56±0.13 ^a
组氨酸(histidine, His)	11.74±0.04 ^d	33.73±0.02 ^a	33.21±0.13 ^b	18.87±0.13 ^c	19.82±0.04 ^b
缬氨酸(valine, Val)*	2.57±0.01 ^c	3.06±0.06 ^b	8.15±0.03 ^a	4.69±0.07 ^b	6.43±0.03 ^b
甲硫氨酸(methionine, Met)*#	4.31±0.01 ^b	5.25±0.04 ^b	6.66±0.24 ^a	3.71±0.05 ^b	3.24±0.12 ^c
异亮氨酸(isoleucine, Ile)*	5.04±0.06 ^a	4.44±0.04 ^a	5.88±0.03 ^a	2.86±0.01 ^a	3.54±0.02 ^a
亮氨酸(leucine, Leu)*	11.93±0.06 ^b	10.41±0.05 ^b	12.45±0.18 ^a	7.23±0.03 ^d	8.48±0.11 ^c
酪氨酸(tryosine, Tyr)	15.80±0.05 ^c	17.74±0.16 ^b	22.62±0.21 ^a	14.42±0.07 ^d	22.14±0.19 ^b
苯丙氨酸(phenyalanine, Phe)*	12.63±0.06 ^b	11.86±0.01 ^b	15.07±0.01 ^a	9.64±0.12 ^c	11.72±0.05 ^b
赖氨酸(Lys)*#	15.53±0.18 ^b	18.93±0.06 ^a	25.29±0.07 ^a	14.33±0.04 ^c	15.40±0.07 ^c
胱氨酸(cystine, Cys)	18.35±0.18 ^b	17.46±0.03 ^c	22.31±0.03 ^a	13.75±0.01 ^c	15.11±0.11 ^d
脯氨酸(proline, Pro)	1.12±0.07 ^b	0.00±0.00 ^d	0.27±0.03 ^b	1.31±0.17 ^a	0.16±0.08 ^c
总氨基酸(total amino acids, TAA)	368.49	449.59	680.88	469.67	590.68
必需氨基酸(indispensable amino acids, IAA)	105.36	111.50	217.19	133.94	161.25
总药用氨基酸(total medicinal amino acids, TMAA)	210.80	222.99	305.33	248.89	330.81

注: *表示人体必需氨基酸, #表示限制性氨基酸。同一行不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。总药用氨基酸: 天冬氨酸+谷氨酸+甘氨酸+异亮氨酸+精氨酸+甲硫氨酸+亮氨酸+苯丙氨酸+赖氨酸。

2.6 不同菌材对糙皮侧耳子实体呈味氨基酸的影响

呈味氨基酸是食用菌主要非挥发性滋味物质, 根据DERMIKI等^[29]描述的分类, 将游离氨基酸根据其味道特征分为鲜味氨基酸(Asp+Glu)、甜味氨基酸(Ala+Gly+Pro+Ser+Thr)、苦味氨基酸(His+Ile+Leu+Met+Phe+Try+Val+Arg)和无味氨基酸(Lys+Tyr+Cys) 4类。由表6可知, 5种菌材基质培育的糙皮侧耳子实体中甜味和苦味氨基酸含量占总氨基酸含量的比重较大, 锥栗和构树栽培基质中糙皮侧耳甜味氨基酸占总氨基酸的比值小于苦味氨基酸, 而刺槐、光皮桦和青冈栽培基质中糙皮侧耳甜味氨基酸占总氨基酸的比值大于苦味氨基酸。制得注意的是, 青冈栽培基质中糙皮侧耳鲜味氨基酸含量远高于其他4种

菌材, 刺槐栽培基质中糙皮侧耳甜味氨基酸含量最高, 但其苦味氨基酸含量也最高。(UAA+SAA)/BAA 比值低于1代表苦味氨基酸占比高, 高于1代表鲜甜味氨基酸占比高。5种菌材基质培育的糙皮侧耳子实体(UAA+SAA)/BAA 比值在1.32~2.07, 表明5种菌材栽培的糙皮侧耳子实体主要以鲜甜味为主, 其中以光皮桦栽培基质中糙皮侧耳子实体(UAA+SAA)/BAA 最高, 鲜甜味更佳。

2.7 不同菌材培养糙皮侧耳氨基酸营养价值评价

表7结果显示5种菌材培育糙皮侧耳子实体必需氨基酸占总氨基酸的质量分数总量均低于FAO/WHO模式和全鸡蛋模式, 但5种糙皮侧耳子实体中必需氨基酸占总氨基酸的质量分数之和与FAO/WHO模式均更接近, 更符合人体

表 6 不同菌材对糙皮侧耳子实体呈味氨基酸的影响
Table 6 Effects of different fungus-growing materials on the flavor amino acids of *Pleurotus ostreatus* fruiting bodies

菌材种类	UAA/(mg/100 g)	SAA/(mg/100 g)	BAA/(mg/100 g)	无味氨基酸/(mg/100 g)	UAA/TAA	SAA/TAA	BAA/TAA	(UAA+SAA)/BAA
A	77.97	114.08	142.56	49.68	0.21	0.31	0.39	1.35
B	75.16	160.04	178.00	54.13	0.17	0.36	0.40	1.32
C	113.39	298.67	221.22	70.22	0.17	0.44	0.32	1.86
D	122.32	175.30	143.97	42.50	0.26	0.37	0.31	2.07
E	164.11	202.13	193.93	52.65	0.28	0.34	0.33	1.89

注: 鲜味氨基酸(umami amino acid, UAA); 甜味氨基酸(sweet amino acid, SAA); 苦味氨基酸(bitter amino acid, BAA)。

的营养需求比例, 因此选用 FAO/WHO 模式进行氨基酸营养评价。根据 FAO/WHO 模式下必需氨基酸含量评价, 刺槐栽培基质中糙皮侧耳必需氨基酸质量分数最高, 构树栽培基质中糙皮侧耳必需氨基酸质量分数最低, 说明刺槐栽培基质中糙皮侧耳比构树中糙皮侧耳营养价值更高。氨基酸评分和化学评分均以最低评分值的氨基酸作为第一限制性氨基酸。由表 8 可知, 5 种菌材培育糙皮侧耳子实体氨基酸评分顺序为刺槐>光皮桦>青冈>锥栗>构树, 化学评分顺序为构树>刺槐>光皮桦>锥栗>青冈。氨基酸评分和化学评分中锥栗和构树栽培基质中糙皮侧耳子实体第一限制性氨基酸均为缬氨酸, 刺槐、光皮桦和青冈栽培基质中糙皮侧耳子实体氨基酸评分第一限制性氨基酸均为异亮氨酸, 而化学评分中刺槐和青冈栽培基质中糙皮侧耳子实体第一限制性氨基酸为甲硫氨酸。全鸡蛋模式和 FAO/WHO 两种不同的参考模式下评分具有差异, 但第一限制性氨基酸相同。必须氨基酸含量较高的刺槐中糙皮侧耳子实体两种限制性氨基酸含量较高, 但青冈含量较低, 表明在必需氨基酸含量较高的 2 种糙皮侧耳中, 青冈作为单一栽培基质时会影响糙皮侧耳其他氨基酸营养价值^[30]。同样, 除栽培基质, 品种^[31]、遗传特性^[32-33]、生长阶段^[34]、产地^[35]等也会影响食用菌风味, 其相互作用关系还需进一步研究。

2.8 不同菌材培养糙皮侧耳营养品质的主成分和 OPLS-DA 分析

对 5 种菌材培育糙皮侧耳子实体营养品质进行 PCA

降维分析, 从图 2 主成分得分图看出, 主成分 1 和主成分 2 累积方差贡献率达到 81.00%, 说明提取的 2 个主成分可以解释营养品质指标的大部分信息, 且 5 组样品分离, 特别是刺槐组与其他 4 组分离度大, 说明刺槐栽培基质中糙皮侧耳营养品质与其他 4 组具有明显差异。由表 9 和表 10 可知, 主成分 1 的方差主要综合了游离氨基酸, 其中以 Lys、Ser、Ala、Gly、Phe 贡献率最大, 贡献率分别为 96.80%、95.60%、92.00%、90.00%和 87.30%; 主成分 2 主要综合了矿物质元素, 包括 Mg、Ca、Na、Fe、Cu 贡献率远大于其他指标, 贡献率占 97.00%、95.10%、85.00%、84.80%和 84.60%。通过将各指标原始数据进行标准化处理后的各指标与因子载荷矩阵计算各主成分得分, 并以每个主成分所对应的特征值占所提取主成分总的特征值之和的比例作为权重, 计算主成分综合评价模型 $F_{综合}=0.575F_1+0.425F_2$ 。根据营养成分的综合得分模型计算不同菌材培养糙皮侧耳营养品质的综合得分, 综合得分越高说明该菌材栽培基质中糙皮侧耳综合营养品质越好, 结果如表 10 所示, 刺槐、锥栗、构树分别排名前 3, 综合营养品质较高, 光皮桦和青冈栽培基质中糙皮侧耳综合营养品质较差。采用 OPLS-DA 分析中 VIP 值大于 1 筛选具有显著性差异的成分, 共筛选出 9 种差异成分, 包括 Fe 和 Zn 2 种矿物质元素, Thr、Ala、Glu、Arg、Asp 和 His 6 种游离氨基酸及多糖, 其中 Fe 和 6 种游离氨基酸是主要区分 5 种菌材培育糙皮侧耳营养品质的显著性差异成分。

表 7 不同菌材中糙皮侧耳子实体必须氨基酸占总氨基酸的质量分数与模式谱比较
Table 7 Comparison of the mass fraction of essential amino acids and pattern spectrum of *Pleurotus ostreatus* from different fungus-growing materials

氨基酸种类	必须氨基酸质量分数/%					FAO/WHO 模式	全鸡蛋模式
	A	B	C	D	E		
苏氨酸(Thr)	14.48	12.80	21.10	19.48	19.04	4	5.1
缬氨酸(Val)	0.70	0.68	1.20	1.00	1.09	5	7.3
甲硫氨酸(Met)	1.17	1.17	0.98	0.79	0.55	3.5	5.5
异亮氨酸(Ile)	1.37	0.99	0.86	0.61	0.60	4	6.5
亮氨酸(Leu)	3.24	2.32	1.83	1.54	1.44	7	8.8
苯丙氨酸(Phe)	3.43	2.64	2.21	2.05	1.98	6	10
赖氨酸(Lys)	4.21	4.21	3.71	3.05	2.61	5.5	6.4
合计	28.59	24.80	31.90	28.52	27.30	35	49.6

表 8 不同菌材中糙皮侧耳的氨基酸评分及化学评分结果
Table 8 Results of AAS and CS of *Pleurotus ostreatus* from different fungus-growing materials

氨基酸种类	氨基酸评分					化学评分				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
苏氨酸(Thr)	361.95	320.01	527.59	486.94	475.89	128.09	130.56	151.57	155.97	155.08
缬氨酸(Val)	14.00	13.61	23.94	19.97	21.77	5.28	9.94	12.31	11.45	12.69
甲硫氨酸(Met)	33.42	33.36	27.95	22.57	15.67	11.16	12.84	7.58	6.82	4.82
异亮氨酸(Ile)	34.19	24.69	21.59	15.22	14.98	15.42	12.84	7.91	6.21	6.22
亮氨酸(Leu)	46.25	33.08	26.12	21.99	20.51	49.42	40.75	22.66	21.27	20.18
苯丙氨酸(Phe)	57.13	43.97	36.89	34.21	33.07	59.46	52.76	31.17	32.23	31.70
赖氨酸(Lys)	76.63	76.55	67.53	55.47	47.40	46.79	53.89	33.48	30.66	26.65
第一限制性氨基酸	Val	Val	Ile	Ile	Ile	Val	Val	Met	Ile	Met

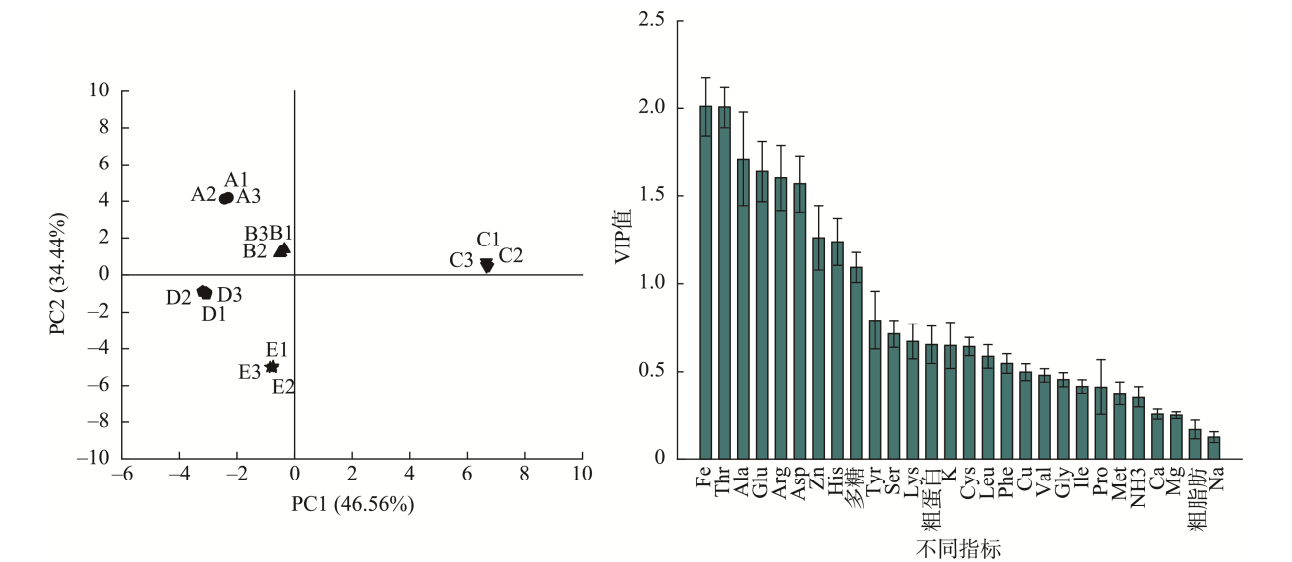


图2 营养品质主成分分析和OPLS-DA分析

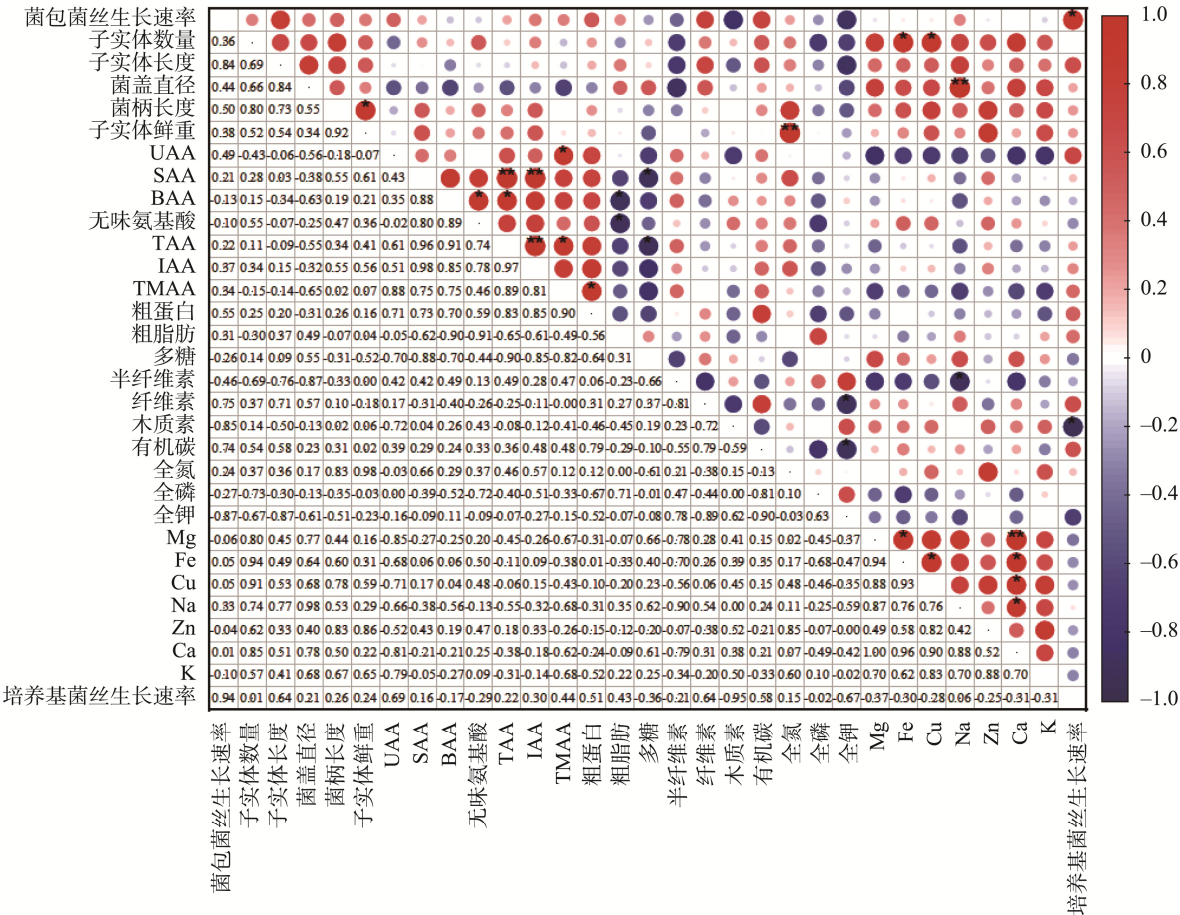
Fig.2 Principal component analysis and OPLS-DA Analysis of nutritional quality

表 9 主成分特征向量和载荷矩阵				
Table 9 Eigenvectors and loading matrices of principal component				
指标名称	主成分		主成分系数	
	1	2	1	2
粗蛋白	0.610	-0.512	0.047	-0.053
粗脂肪	-0.812	0.093	-0.062	0.010
多糖	-0.582	0.697	-0.045	0.072
Mg	0.125	0.970	0.010	0.101
Fe	0.440	0.848	0.034	0.088
Cu	0.477	0.846	0.037	0.088
Na	-0.119	0.850	-0.009	0.088
Zn	0.558	0.545	0.043	0.057
Ca	0.174	0.951	0.013	0.099
K	0.142	0.807	0.011	0.084
Asp	-0.665	-0.506	-0.051	-0.052
Thr	0.739	-0.547	0.057	-0.057
Ser	0.956	-0.116	0.073	-0.012
Glu	0.529	-0.824	0.041	-0.085
Gly	0.900	-0.112	0.069	-0.012
Ala	0.920	-0.144	0.071	-0.015
Cys	0.849	0.485	0.065	0.050
Val	0.757	-0.567	0.058	-0.059
Met	0.847	0.453	0.065	0.047
Ile	0.744	0.575	0.057	0.060
Leu	0.618	0.671	0.047	0.070
Tyr	0.764	-0.490	0.059	-0.051
Phe	0.873	0.293	0.067	0.030
Lys	0.968	0.186	0.074	0.019
His	0.700	-0.064	0.054	-0.007
Arg	0.704	-0.654	0.054	-0.068
Pro	-0.535	0.340	-0.041	0.035

表 10 主成分得分和排序				
Table 10 Principal component scores and ranking				
菌株种类	F_1	F_2	$F_{综合}$	排名
A	-0.651	1.341	0.196	2
B	-0.125	0.403	0.100	3
C	1.854	0.168	1.138	1
D	-0.861	-0.306	-0.625	4
E	-0.216	-1.606	-0.807	5

2.9 菌材营养成分与糙皮侧耳生长特性及营养品质的相关性分析

对 5 种菌材营养成分与糙皮侧耳生长和营养品质进行相关性分析,结果如图 3 所示。菌包和木屑培养基中菌丝生长速率均与菌材木质素和全钾含量呈负相关性,与纤维素和有机碳含量呈正相关性,其中培养基上菌丝生长速率与木质素含量呈显著负相关($P<0.05$),表明菌材木质素和全钾含量越高,纤维素和有机碳含量越低,菌丝生长越慢。子实体主要农艺性状和矿物质元素含量两两呈正相关性,其中子实体鲜重和菌柄长度、子实体数量与 Fe 和 Cu 含量、菌盖直径与 Na 含量、Ca 与 Na、Mg、Fe、Cu 含量均呈显著正相关性($P<0.05$),子实体鲜重还与全氮含量呈极显著正相关性($P<0.01$)。子实体矿物质元素含量与半纤维素含量呈负相关性,其中 Na 含量与半纤维素含量呈显著负相关性($P<0.05$)。各呈味氨基酸之间均存在不同程度的正相关性,与粗蛋白和多糖含量呈负相关性,但与纤维素、半纤维、木质素、有机碳、全氮、全磷和全钾无显著相关性($P>0.05$)。相关性分析结果表明,菌材营养成分主要与糙皮侧耳菌丝生长、子实体农艺性状和矿物质元素含量显著相关,说明栽培基质对糙皮侧耳营养成分的积累具有重要作用。



注: *表示在0.05水平上具有显著性差异,**表示在0.01水平上具有极显著性差异。

图3 菌材营养成分与糙皮侧耳生长特性及营养品质的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis between the main nutritional contents of fungus-growing materials with the growth characteristics and nutritional quality of *Pleurotus ostreatus*

3 讨论与结论

本研究比较了 5 种菌材作为主要栽培料对糙皮侧耳生长、子实体矿物质元素及氨基酸成分和含量的影响, 并利用氨基酸评分和化学评分方法对不同菌材栽培糙皮侧耳子实体进行营养价值评价。结果显示, 5 种菌材营养成分不同, 对糙皮侧耳生长和营养品质影响不同。菌材纤维素、半纤维、木质素、全钾、全钾、有机碳含量与糙皮侧耳子实体菌丝生长、农艺性状和矿物质元素含量显著相关, 这与杨木屑^[4]、桑枝^[5]、梨木屑等^[6,30]多种不同理化性质的栽培基质培育糙皮侧耳的结论保持一致。在本研究中, 构树半纤维素、木质素、全磷和全钾含量最高, 纤维素和有机碳含量最低, 对糙皮侧耳菌丝生长影响最大。锥栗和刺槐作为主要栽培基质时糙皮侧耳出菇量大, 子实体具有较高的蛋白质和多糖含量, 且微量元素 Cu、Fe、Zn 含量也较高。因此, 在进行糙皮侧耳多糖提取利用或人体必需微量元素摄取时, 锥栗可作为优势菌材。氨基酸种类和含量是食用菌主要营养品质的体现。与 FAO/WHO 模式和全鸡蛋

模式相比, 5 种菌材栽培糙皮侧耳的必需氨基酸评分更接近于 FAO/WHO 模式, 而氨基酸评分和化学评分中第一限制性氨基酸不同, 锥栗和构树中糙皮侧耳第一限制性氨基酸均为缬氨酸, 刺槐、光皮桦和青冈中糙皮侧耳第一限制性氨基酸在化学评分中分别为异亮氨酸和甲硫氨酸, 表示这几种氨基酸相对缺乏, 可与鸡蛋、牛奶等食物互为补充。从营养品质评价结果看出, 刺槐和青冈为主要栽培料时糙皮侧耳子实体总氨基酸含量较高, 光皮桦为主要栽培料时糙皮侧耳子实体鲜甜味更佳, 刺槐、锥栗和构树为主要栽培料时糙皮侧耳子实体综合营养品质较好, 青冈栽培糙皮侧耳综合营养品质最差。

目前关于不同基质栽培糙皮侧耳的研究较多, 主要集中于栽培基质的创新利用, 且难于应用推广, 对于传统栽培模式下糙皮侧耳的研究缺乏系统性的营养品质综合评价。本研究通过对传统模式下不同菌材培养的糙皮侧耳进行全方位的营养成分分析和营养品质评价, 有利于生产上糙皮侧耳质量评估和品质调控, 同时促进菌材精准资源化利用, 为以后食用菌加工产品开发提供参考。

参考文献

- [1] 贺国强, 魏金康, 胡晓艳, 等. 我国食用菌产业发展现状及展望[J]. 蔬菜, 2022, (4): 40–46.
HE GQ, WEI JK, HU XY, *et al.* Present situation and prospect of edible fungi industry development in China [J]. Vegetables, 2022, (4): 40–46.
- [2] LIU Q, KONG W, HU S, *et al.* Effects of *Oudemansiella radicata* polysaccharide on postharvest quality of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) and its antifungal activity against *Penicillium digitatum* [J]. Postharvest Biol Technol, 2020, 166: 111207.
- [3] 龚明, 汪滢, 尚俊军, 等. 食药用菌系统演化及多组学研究进展[J]. 食用菌学报, 2018, 25(4): 85–96.
GONG M, WANG Y, SHANG JJ, *et al.* Advances in phylogeny and multi-omics of edible and medicinal fungi [J]. Acta Edulis Funji, 2018, 25(4): 85–96.
- [4] 张春艳, 魏雅冬, 胡畔. 杨木屑与玉米秸秆配方基质对平菇生长、营养价值及产量的影响[J]. 北方园艺, 2023, (20): 117–125.
ZHANG CY, WEI YD, HU P. Effects of compound substrates of poplar sawdust and corn straw on growth, nutritional value and yield of *Pleurotus ostreatus* [J]. Northern Hort, 2023, (20): 117–125.
- [5] 王亚威, 胡桂萍, 黄金枝, 等. 桑枝屑代料栽培香菇蛋白质营养价值评价[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(20): 225–231.
WANG YW, HU GP, HUANG JZ, *et al.* Evaluation of the protein nutritional value of *Lentinus edodes* which cultivated by substitute of mulberry sawdust [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(20): 225–231.
- [6] 尹淑丽, 梁然, 李书生, 等. 梨木屑基质对平菇子实体氨基酸组成及营养价值的影响[J]. 北方园艺, 2022, (11): 112–119.
YIN SL, LIANG R, LI SS, *et al.* Effects of pear sawdust cultivation substrate on amino acid composition and nutritional value in *Pleurotus ostreatus* fruit bodies [J]. Northern Hort, 2022, (11): 112–119.
- [7] 王楠. 油茶木屑栽培食用菌配方优化研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
WANG N. Study on the optimization of edible fungus formula of *Camellia oleifera* sawdust cultivation [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2022.
- [8] 厉月桥, 曾素平, 何平, 等. 九种壳斗科树种培育香菇产量与营养品质分析[J]. 菌物学报, 2023, 42(6): 1404–1412.
LI YQ, ZENG SP, HE P, *et al.* Yield and nutritional quality of *Lentinula edodes* cultivated by wood of nine species of *Fagaceae* [J]. Mycosystema, 2023, 42(6): 1404–1412.
- [9] MATJUŠKOVA N, OKMANE L, ZAĽĀ D, *et al.* Effect of lignin-containing media on growth of medicinal mushroom *Lentinula edodes* [J]. PANS, 2017, 71: 38–42.
- [10] SIWULSKI M, BUDKA A, BUDZYŃSKA S, *et al.* Mineral composition of traditional and organic-cultivated mushroom *Lentinula edodes* in europe and asia-similar or different? [J]. LWT, 2021, 147: 111570.
- [11] SARIKURKCUC, HALIL SOLAKM, TARKOWSKI P, *et al.* Minerals, phenolics, and biological activity of wild edible mushroom, *Morchella steppicola* Zerova [J]. Nat Prod Res, 2022, 36(23): 6101–6105.
- [12] ZIED DC, PARDO-GIMÉNEZ A, ARTURO G, *et al.* Study of waste products as supplements in the production and quality of *Pleurotus ostreatus* var. Florida [J]. Indian J Microbiol, 2019, 59(3): 328–339.
- [13] 赖姗姗, 陈玉青, 刘媛媛, 等. 平菇不同状态下营养成分分析比较与品质评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(7): 1619–1622.
LAI SS, CHEN YQ, LIU YY, *et al.* Analysis comparison and quality evaluation of nutritional components of *Pleurotus ostreatus* under different conditions [J]. J Food Saf Qual, 2018, 9(7): 1619–1622.
- [14] 胡素娟, 段亚魁, 康源春, 等. 2 种基质对平菇胞外酶活性、产量及品质的影响[J]. 河南农业科学, 2018, 47(3): 96–99.
HU SJ, DUAN YK, KANG YC, *et al.* Effect of two kinds of substrate on extracellular enzyme activity, yield and quality of *Pleurotus ostreatus* [J]. J Henan Agric Sci, 2018, 47(3): 96–99.
- [15] 唐艳仪, 周玥琳, 揭红东, 等. 不同培养料对平菇产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(8): 37–41.
TANG YY, ZHOU YL, JIE HD, *et al.* Effects of different cultures on the yield and quality of *Pleurotus ostreatus* [J]. J Anhui Agric Sci, 2023, 51(8): 37–41.
- [16] 殷朝敏, 李雨鸿, 范秀芝, 等. 不同栽培基质对 6 种侧耳属食用菌风味成分的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(10): 1984–1995.
YIN CM, LI YH, FAN XZ, *et al.* Effect of different culture substrates on flavor compounds in fruiting body of six *Pleurotus* edible mushrooms [J]. Acta Agric Nucl Sin, 2022, 36(10): 1984–1995.
- [17] 李朝英, 郑路, 卢立华, 等. 测定植物全氮的 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮法改进[J]. 中国农学通报, 2014, 30(6): 159–162.
LI CY, ZHEN L, LU LH, *et al.* Improvement in the $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ digestion method for determining plant total nitrogen [J]. Chin Agric Sci Bull, 2014, 30(6): 159–162.
- [18] DIALO AA, YANG Z, SHEN G, *et al.* Comparison and rapid prediction of lignocellulose and organic elements of a wide variety of rice straw based on near infrared spectroscopy [J]. Int J Agric Biol Eng, 2019, 12(2): 166–172.
- [19] 朱圣陶, 吴坤. 蛋白质营养价值评价——氨基酸比值系数法[J]. 营养学报, 1988, (2): 187–190.
ZHU ST, WU K. Evaluation for the nutritional value of proteins-amino acid ratio coefficient method [J]. Acta Nutr Sin, 1988, (2): 187–190.
- [20] FAO/WHO Expert Consultation. Protein quality evaluation report of the joint FAO/WHO expert consultation held in Bethesda [R]. Rome, 1989.
- [21] Energy and protein requirements: Report of a joint FAO-WHO ad hoc expert committee [Z]. 1973.
- [22] 苏世贤, 李婕, 徐彦军, 等. 食用菌菌丝对菌材分解利用的研究进展[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2023, 45(3): 760–767.
SU SX, LI J, XU YJ, *et al.* Advances in decomposition and utilization of fungus-growing materials by edible fungi mycelia [J]. J Yunnan Univ (Nat Sci Ed), 2023, 45(3): 760–767.
- [23] 杨建杰, 张桂香, 刘明军, 等. 玉米秸秆栽培平菇的配方筛选及其生物学研究[J]. 中国食用菌, 2023, 42(2): 74–81, 87.
YANG JJ, ZHANG GX, LIU MJ, *et al.* Formula screening and biological study of *Pleurotus ostreatus* cultivated by corn straw [J]. China Edible Fungi, 2023, 42(2): 74–81, 87.
- [24] 郭海增, 鲁欣欣, 刘元栋, 等. 不同麸皮含量对平菇生长和品质结构的影响[J]. 北方园艺, 2024, (2): 109–118.
GUO HZ, LU XX, LIU YD, *et al.* Effects of different bran content on the growth, quality and texture of *Pleurotus ostreatus* [J]. Northern Hort, 2024, (2): 109–118.
- [25] 尹淑丽, 李书生, 张根伟, 等. 四种木屑栽培糙皮侧耳子实体营养成分分析及氨基酸营养价值评价[J]. 食用菌学报, 2021, 28(5): 71–78.

- YIN SL, LI SS, ZAHNG GW, *et al.* Nutritional component analysis and amino acid nutritional value evaluation of *Pleurotus ostreatus* cultivated by four kinds of sawdust [J]. *Acta Edulis Funji*, 2021, 28(5): 71–78.
- [26] 朱晓琴, 熊智. 核桃壳与木屑栽培平菇的营养成分对比分析[J]. *中国食用菌*, 2007, (6): 38–39.
- ZHU XQ, XIONG Z. Comparison with nutritional components of *Pleurotus ostreatus* cultured by walnut shell and by sawdust [J]. *China Edible Fungi*, 2007, (6): 38–39.
- [27] 姬钰粮, 王艳杰, 李颖卓, 等. 芦苇替代木屑基料化栽培平菇子实体营养成分分析[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(34): 53–62.
- JI YL, WANG YJ, LI YZ, *et al.* Nutritional component analysis of *Pleurotus ostreatus* cultivated with reed instead of wood chip as substrate [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2023, 39(34): 53–62.
- [28] YIN CM, FAN XZ, FAN Z, *et al.* Comparison of non-volatile and volatile flavor compounds in six *Pleurotus* mushrooms [J]. *J Sci Food Agric*, 2019, 99(4): 1691–1699.
- [29] DERMIKI M, PHANPHENSOPHON N, MOTTRAM DS, *et al.* Contributions of non-volatile and volatile compounds to the umami taste and overall flavour of shiitake mushroom extracts and their application as flavour enhancers in cooked minced meat [J]. *Food Chem*, 2013, 141(1): 77–83.
- [30] 张时馨, 耿阳阳, 陈荟, 等. 不同菌材培养料对茶树菇生长特性及营养品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(1): 274–283.
- ZHANG SX, GENG YY, CHEN H, *et al.* Effects of different fungus-growing materials substrate on growth characteristics and nutritional quality of *Agrocybe chaxingu* [J]. *J Food Saf Qual*, 2024, 15(1): 274–283.
- [31] 陆欢, 尚晓冬, 刘建雨, 等. 不同种质金顶侧耳栽培特性及营养成分综合评价[J/OL]. *分子植物育种*: 1–17. [2024-04-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220609.1048.002.html>
- LU H, SHANG XD, LIU JY, *et al.* Comprehensive evaluation of cultivation characteristics and nutrient components of different germplasm of *Pleurotus citrinopileatus* [J/OL]. *Molecul Plant Breed*: 1–17. [2024-04-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220609.1048.002.html>
- [32] 王祥锋, 赵威, 汪乔, 等. 10个肺形侧耳菌株的营养成分及呈味物质分析[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(18): 352–360.
- WANG XF, ZHAO W, WANG Q, *et al.* Analysis of nutritional and flavor components of ten strains of *Pleurotus pulmonarius* [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2023, 44(18): 352–360.
- [33] 刘芹, 师子文, 吴杰, 等. 基于非靶代谢组学的糙皮侧耳子实体发育的关联物质及主要代谢通路分析[J]. *菌物学报*, 2024, 43(2): 59–73.
- LIU Q, SHI ZW, WU J, *et al.* Analysis of components and main pathways involved in fruiting body development of *Pleurotus ostreatus* based on untargeted metabolomics [J]. *Mycosystema*, 2024, 43(2): 59–73.
- [34] 刘芹, 崔筱, 宋志波, 等. 不同成熟度平菇新鲜子实体中风味物质的比较分析[J]. *中国瓜菜*, 2022, 3(59): 38–47.
- LIU Q, CUI X, SONG ZB, *et al.* Comparative analysis of flavor component in fresh fruiting body of *Pleurotus ostreatus* harvested at different stages of maturity [J]. *China Fruit Veget*, 2022, 3(59): 38–47.
- [35] 李东梅, 张思维, 孙建云, 等. 不同产地金耳中氨基酸含量分析及营养价值评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(1): 237–244.
- LI DM, ZHANG SJ, SUN JY, *et al.* Content analysis and nutritional value evaluation of amino acid in *Tremella aurantialba* from different origins [J]. *J Food Saf Qual*, 2024, 15(1): 237–244.

(责任编辑: 张晓寒 韩晓红)

作者简介

张时馨, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品贮藏加工。
E-mail: 1510208632@qq.com

陈荟, 工程师, 主要研究方向为林菌培育。
E-mail: 781763976@qq.com