

短菌龄香菇菌棒生长过程中养分及理化性质的动态变化

刘丽娜, 李顺峰, 王安建, 崔国梅, 许方方, 田广瑞

(河南省农业科学院农产品加工研究中心 郑州 450002)

摘要:短菌龄香菇是工厂化栽培的发展方向,为探究其菌棒生长过程中养分及理化性质的动态变化趋势,选取3个短菌龄品种 X2、Q2、F6,对其不同生长期(空白菌棒、菌丝满棒、菌棒转色、菌棒成熟)的营养成分、游离氨基酸及理化性质进行测定,并进行相关性和主成分分析。结果表明,随着生长进程的推进,各品种香菇菌棒粗纤维含量不断降低,粗蛋白、游离氨基酸含量在菌棒转色期达到峰值,到菌棒成熟期显著下降;有机质含量先降低后升高,粗脂肪、粗灰分、钙、总磷含量及电导率、持水力、容重呈上升趋势,pH、比孔隙率呈下降趋势。养分的积累和利用阶段性明显,且品种间差异大。与空白菌棒相比,Q2 菌棒成熟期粗纤维含量、比孔隙率降低了 40.502%、52.823%,粗灰分、钙、总磷含量及电导率、持水力、容重分别增加到 2.013、2.692、1.809、1.934、1.543、1.410 倍,显著高于同期 X2 和 F6。香菇菌棒共检出 16 种游离氨基酸,其中丝氨酸、亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸为接种后新增氨基酸;整个生长期精氨酸、苏氨酸占主导地位,二者之和占比为 34.347%~66.369%;苯丙氨酸品种间差异大;呈味特性表现以甜味和苦味氨基酸为主,芳香族氨基酸最少。相关性和主成分分析表明,各指标间存在较强相关性,前 3 个主成分累计贡献率达到 91.681%,各品种菌棒得到较好区分,Q2 菌棒表现出更大的差异性。综上,3 个品种香菇菌棒生长过程中养分及理化性质整体变化趋势基本一致,但存在一定差异,Q2 相对表现较好。研究结果为香菇高效栽培及菌棒多样化利用提供了理论依据。

关键词:香菇菌棒;生长期;营养成分;游离氨基酸;主成分分析

中图分类号:S646.1*2 文献标志码:A 文章编号:1673-2871(2026)01-116-10

Dynamic changes of nutrients and physicochemical properties in short-growth-period *Lentinula edodes* stick during growth process

LIU Lina, LI Shunfeng, WANG Anjian, CUI Guomei, XU Fangfang, TIAN Guangrui

(Research Center of Agricultural Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract: Short-growth-period *L. edodes* is the development direction of industrial cultivation. In order to explore the dynamic changes of nutrients and physicochemical properties during its growth process, this study focused on three short-growth-period varieties X2, Q2 and F6 at different growth periods (blank stick, mycelium full stick, color conversion stick, and mature stick), and the nutritional components, free amino acids and physicochemical properties were detected. Then its correlation and principal component analysis (PCA) were performed. The results showed that with the growth process, the crude fiber content in the *L. edodes* stick decreased continuously, the crude protein content and free amino acid content reached the peak at the color conversion stage, and decreased significantly at the mature stage. The organic matter content decreased first and then increased. The crude fat content, crude ash content, calcium content, total phosphorus content, EC, water holding capacity, bulk density all showed an upward trend, while the pH and specific porosity showed a downward trend. The nutrient accumulation and utilization had obvious stages, and there were great differences among varieties. Compared with the blank stick, the crude fiber content and specific porosity of Q2 stick at the mature stage decreased by 40.502% and 52.823%, and the crude ash, calcium, total phosphorus, EC, water holding capacity, and bulk density increased to 2.013, 2.692, 1.809, 1.934, 1.543 and 1.410 times, respectively, which were significantly higher than those of X2 and F6 in the same period. There were 16 kinds of free amino acids in *L. edodes* sticks. Serine, leucine,

收稿日期:2025-08-29;修回日期:2025-11-19

基金项目:河南省重点研发专项(231111112500);河南省农业科学院自主创新项目(2025ZC86);河南省中央引导地方科技发展资金项目(Z20241471135, 2025ZYD03);河南省农业科学院科技创新团队专项(2024TD35)

作者简介:刘丽娜,女,助理研究员,研究方向为食用菌加工。E-mail:83231174@qq.com

通信作者:王安建,男,研究员,研究方向为食用菌加工。E-mail:jgs1419@163.com

tyrosine, and phenylalanine were newly added amino acids after inoculation. Arginine and threonine dominated the whole growth period, and the sum accounted for 34.347%-66.369%. Phenylalanine varied greatly among varieties. The taste characteristics were mainly sweet and bitter amino acids, and aromatic amino acids were the least. The correlation and principal component analysis revealed that there was a strong correlation between the indicators, and the cumulative contribution rate of the first three principal components reached 91.681%. The stick samples of each variety were well distinguished, and Q2 sticks showed greater difference. In summary, The change trend was basically the same in the growth process of the three varieties, but there were some differences, and Q2 is relatively better. The results provide a theoretical basis for efficient cultivation and stick diversified utilization of *L. edodes*.

Key words: *L. edodes* stick; Growth period; Nutritional components; Free amino acid; Principal component analysis(PCA)

香菇(*L. edodes*)隶属于担子菌纲伞菌目口蘑科香菇属,是食用菌中最具有代表性的品种之一,也是我国人工栽培最广泛、产量最多的大宗食用菌。菌棒是香菇栽培的物质基础和菌丝生长的载体,其养分的积累和利用是香菇菌丝生长特性的最直观表现^[1],直接关系到香菇的品质和产量。因此,深入解析菌棒动态变化规律成为研究香菇生长发育的重要途径,对香菇高效、循环生产具有重要指导意义。

菌龄是香菇栽培中最为重要的农艺性状之一,决定了在最合适季节出菇而安排制棒接种时间^[2],在生产中具有重要应用价值。按照从接种到出菇时间间隔划分,可分为 80 d 以下短菌龄菌株、80~110 d 中间菌龄菌株、110 d 以上长菌龄菌株^[3]。随着香菇栽培模式设施化和集约化转型,为了缩短栽培周期,降低能耗成本、提高库房周转率,短菌龄香菇已成为工厂化栽培的发展方向。目前,仅有少量有关香菇菌龄方面的研究报道,且主要集中在农艺性状的关联分析^[4]、栽培过程中外界环境影响^[5]、菌龄基因位点的控制^[2-6]、遗传多样性分析的分子标记技术^[7]等方面。香菇菌棒不同生长阶段的养分组成有很大差异,而当前的研究主要侧重于不同灭菌工艺^[1]、新型栽培料筛选^[8]、木质纤维素降解酶学特性^[9]等方面,对香菇菌棒不同生长阶段养分动态的系统研究尚未见详细报道。因此,本研究以河南主栽短菌龄香菇为研究对象,对栽培过程中不同生长期菌棒开展营养成分、游离氨基酸及理化性质检测分析,旨在阐明短菌龄香菇菌棒生长过程中养分变化及理化性质的动态变化规律,并探究不同短菌龄品种在这些变化上的差异特性,从而为后续菌棒资源利用及香菇高效栽培提供数据支持和科学依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

香菇菌种 X2 由汝州市联迪农业科技有限公司提供;香菇菌种 Q2 由山东七河生物科技股份有限

公司提供;香菇菌种 F6 由河南金海生物科技有限公司提供;培养料配方为木屑 78%、麸皮 20%、石膏 1%、石灰 1%,含水量 50%。氢氧化钠、苯酚、硫酸、硼酸、盐酸、柠檬酸钠等(分析纯)均购自国药集团化学试剂有限公司,氨基酸混合标准品购自美国 Sigma 公司。

1.2 仪器与设备

K1100F 型全自动定氮仪(济南海能仪器股份有限公司);S433D 氨基酸分析仪(德国赛卡姆公司);Lambda35 分光光度计(美国 PERKIN ELMER 公司);Kylin S12 原子荧光光谱仪(北京吉天仪器有限公司);FA2004C 分析天平(上海越平科学仪器有限公司);XM 120-HR 快速水分测定仪(Precisa Gravimetrics AG 公司);FE20 pH 计(梅特勒-托利多仪器上海有限公司);FE30 电导率仪(梅特勒-托利多仪器上海有限公司);H2050R 台式高速冷冻离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司)。

1.3 方法

栽培试验于 2024 年 10 月至 2025 年 4 月在河南省农业科学院河南现代农业研究开发基地进行,将培养料按相同配方拌匀装袋,根据以往的报道进行挤压灭菌后装袋^[10],菌袋规格为 18 cm×60 cm×0.008 cm,装料质量为(2900±100) g。按照河南省地方标准(DB41/T 1769—2019)《代料香菇秋栽生产技术规程》^[11]进行香菇的栽培管理。分别在香菇接种前空白菌棒(S0)、菌丝满棒(X2-1、Q2-1、F6-1)、菌棒转色(X2-2、Q2-2、F6-2)、菌棒成熟(X2-3、Q2-3、F6-3)4 个时期进行取样。取样时每个时期随机选取 10 个菌棒,对每个菌棒上、中、下取样,揉碎混匀成 1 个复合样品作为该时期代表样品进行测定。每个样品一部分采用热泵 50 °C 烘干后用于营养成分、游离氨基酸指标的测定,一部分直接用于电导率、pH、物理性质测定。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 养分测定 粗纤维含量测定采用 GB/T

6434-2022《饲料中粗纤维的含量测定》滤坩法^[12];粗脂肪含量测定按照 GB/T 6433—2025《饲料中粗脂肪的测定》^[13];粗蛋白含量测定按照 GB/T 6432—2018《饲料中粗蛋白的测定》凯氏定氮法^[14];钙含量测定按照 GB/T 13885—2017《饲料中钙、铜、铁、镁、锰、钾、钠和锌含量的测定》^[15];粗灰分含量测定按照 GB/T 6438—2007《饲料中粗灰分的测定》^[16];总磷含量测定按照 GB/T 6437—2018《饲料中总磷的测定》^[17];有机质含量的测定按照 NY/T 525—2021《有机肥料》^[18];游离氨基酸含量测定按照 GB/T 30987—2020《植物中游离氨基酸的测定》^[19]。

1.4.2 EC值和pH值测定 参照陈亮等^[20]的方法测定菌棒样品的EC(电导率, electrical conductivity)和pH,取培养料与去离子水按体积比1:5进行混合,振荡后静置10 min,取上清液用pH计和电导率仪分别测定pH值和EC值。

1.4.3 物理性质测定 采用王佳堃^[21]的方法测定菌棒样品持水力、容重和比孔隙率。

1.5 数据处理

采用SPSS Statistics24.0进行差异显著性分析、皮尔逊相关性分析和主成分分析,使用Origin 2021进行数据统计分析与作图。

2 结果与分析

2.1 香菇菌棒营养成分分析

由表1可以看出,各营养成分指标含量差异大,由高到低依次是有机质>粗纤维>粗蛋白>粗灰分>钙>总磷、粗脂肪。在粗纤维指标方面,从同一品种来看,S0粗纤维含量(w,后同)最高,达到38.342%;随着香菇生长进程的推进,X2、Q2、F6粗纤维含量均显著下降;X2不同生长期粗纤维含量存在显著差异,各生长期X2-1、X2-2、X2-3对粗纤维含量的降解率依次为5.511%、7.758%、15.461%,前期降解速度慢,进入菌棒成熟期后降解速度加快;Q2与X2情况类似;而F6情况则明显不同,F6-1和F6-2粗纤维含量无显著差异,F6-1、F6-2、F6-3对粗纤维含量的降解率依次为18.014%、1.884%、11.248%,菌丝满棒期降解速度最快;这表明各品种对粗纤维含量降解具有明显的阶段性。在相同生长期,F6-1粗纤维含量显著低于X2-1、Q2-1,而X2-3、F6-3粗纤维含量无显著差异,均显著高于Q2-3,说明品种间粗纤维含量降解阶段有差异。所有样品中Q2-3粗纤维含量最低,仅有22.813%;与S0相比,X2、Q2、F6粗纤维最高降解率

分别为28.730%、40.502%、31.146%,表现出不同香菇品种对粗纤维的降解优势和品种差异性,这与品种遗传特性及栽培料密切相关。

在粗蛋白指标方面,从同一品种来看,X2、Q2、F6各自不同生长期粗蛋白含量存在显著差异,X2-1与X2-2粗蛋白含量增幅分别为27.784%、26.751%,数值相当;而F6粗蛋白含量增加集中在F6-2,Q2粗蛋白含量增加以Q2-1为主,各品种各有侧重时期。X2-3、Q2-3、F6-3粗蛋白含量分别降至S0的1.149倍、1.380倍、1.354倍。相同生长期比较,Q2-1、Q2-2的粗蛋白含量均显著高于X2、F6,所有样品中Q2-2粗蛋白含量最高,达到7.615%;这表明Q2菌株蛋白质合成积累能力更强;X2-3粗蛋白含量显著低于Q2-3、F6-3,说明X2-3粗蛋白含量降幅最大,即X2菌棒中粗蛋白转移到子实体中最多。

在有机质指标方面,S0有机质含量最高,达72.030%;之后菌丝满棒期与菌棒转色期均显著降低,X2-1与X2-2有机质含量降低幅度相当;而Q2有机质含量降低集中在Q2-2,F6有机质含量降低以F6-1为主,各品种间存在较大差异;由于菌丝不断吸收利用,使得有机质含量持续降低,至菌棒转色期降至最低,而菌棒成熟期则有小幅增加。相同生长期比较,F6-1有机质含量比S0降低了5.132%,显著低于X2-1、Q2-1;Q2-2有机质含量最低,降到66.355%,显著低于X2-2、F6-2;说明Q2菌株吸收利用有机质的能力最强。值得注意的是,F6-3有机质含量显著低于X2-3、Q2-3,这可能是菌株F6生理代谢、呼吸作用等多方面因素共同作用的结果。

粗灰分、粗脂肪、钙、总磷整体呈一直增加的趋势,说明随着香菇的生长发育,菌棒养分不仅可以合成菌体,提供菌体营养,还可以合成其他物质。X2、Q2、F6各生长期的粗灰分和钙含量存在显著差异,菌棒成熟期粗灰分、钙、总磷含量达到峰值,其中Q2-3粗灰分、钙、总磷含量均最高,分别是S0的2.013、2.692、1.809倍,这进一步说明Q2菌株养分利用合成能力更强。同一品种中X2-3、F6-3粗脂肪含量最高,分别是S0的3.209倍、4.156倍;Q2-3粗脂肪含量与X2-3、F6-3无显著差异,是S0的3.981倍。

2.2 香菇菌棒游离氨基酸分析

2.2.1 游离氨基酸构成 各品种菌棒样品的游离氨基酸构成堆积图见图1。S0共检出12种游离氨基酸,蛋氨酸、脯氨酸仅在空白菌棒中检出。经过香菇生长,菌棒最多检出14种游离氨基酸,新生成

表1 香菇菌棒营养成分含量
Table 1 Nutrient content of *L. edodes* stick during growth process

品种 Variety	生长期 Growth period	w(粗纤维) Crude fiber content	w(粗蛋白) Crude protein content	w(有机质) Organic matter content	w(粗灰分) Crude ash content	w(粗脂肪) Crude fat content	w(钙) Calcium content	w(总磷) Total phosphorus content
X2	S0	38.342±0.153 a	4.355±0.021 d	72.030±0.026 a	3.460±0.001 d	0.106±0.004 c	0.770±0.005 d	0.264±0.001 c
	X2-1	36.229±0.455 bA	5.565±0.021 bB	70.852±0.261 bA	3.896±0.049 cAB	0.215±0.013 bB	0.943±0.004 cB	0.334±0.001 bA
	X2-2	33.254±0.065 cA	6.730±0.156 aB	69.162±0.168 cA	4.084±0.021 bB	0.223±0.038 bC	1.025±0.011 bC	0.338±0.002 bB
	X2-3	27.326±0.225 dA	5.005±0.035 cB	69.658±0.178 cB	4.596±0.001 aB	0.339±0.012 aB	1.295±0.012 aB	0.345±0.001 aB
Q2	S0	38.342±0.153 a	4.355±0.021 c	72.030±0.026 a	3.460±0.001 d	0.106±0.004 c	0.770±0.005 d	0.264±0.001 d
	Q2-1	37.652±0.892 bA	6.170±0.127 bA	71.342±0.048 bA	4.035±0.020 cA	0.344±0.059 bA	1.188±0.006 cA	0.347±0.012 cA
	Q2-2	33.105±0.639 cA	7.615±0.092 aA	66.355±0.171 dC	4.992±0.066 bA	0.531±0.017 aA	1.426±0.003 bA	0.411±0.010 bA
	Q2-3	22.813±0.353 dB	6.010±0.127 bA	70.205±0.174 cA	6.966±0.086 aA	0.420±0.024 bAB	2.072±0.043 aA	0.478±0.008 aA
F6	S0	38.342±0.153 a	4.355±0.021 d	72.030±0.026 a	3.460±0.001 d	0.106±0.004 d	0.770±0.005 d	0.264±0.001 b
	F6-1	31.435±0.329 bB	4.830±0.141 cC	68.333±0.074 cB	3.757±0.084 cB	0.267±0.014 cAB	0.863±0.006 cC	0.275±0.008 bB
	F6-2	30.712±0.267 bB	6.910±0.014 aB	68.181±0.165 cB	4.244±0.062 bB	0.380±0.013 bB	1.087±0.003 bB	0.349±0.002 aB
	F6-3	26.400±0.329 cA	5.895±0.064 bA	68.623±0.069 bC	4.736±0.059 aB	0.439±0.036 aA	1.256±0.007 aB	0.356±0.001 aB

注:不同小写字母表示同一品种不同生长期期间在 0.05 水平存在显著差异;不同大写字母表示不同品种相同生长期期间在 0.05 水平存在显著差异。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference between different growth periods of the same variety at 0.05 level, different capital letters indicate significant difference between different varieties of the same growth period at 0.05 level. The same below.

的氨基酸有丝氨酸、亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸。所有样品均未检出异亮氨酸,占主导地位的氨基酸为精氨酸、苏氨酸,二者之和占比在 34.347%~66.369%;其最大值分别为 184.78、101.72 mg·100 g⁻¹,均出现在 Q2-2 中。同一品种中苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸、赖氨酸、组氨酸、精氨酸含量的变化趋势均为先升高后降低,且最大值均出现在菌棒转色期。对于 X2 和 Q2,苯丙氨酸仅出现在 X2-3、Q2-2,与 F6 各生长期均有苯丙氨酸的表现明显不同,品种间差异较大。与 S0 相比,胱氨酸在各生长期均明显减

少且在 F6-3 中未检测到;X2、F6 中丙氨酸含量均先降后升,与 Q2 中情况正好相反;X2 中缬氨酸含量不断增加,不同于 F6 中先升后降。各品种间游离氨基酸的区别是由不同代谢途径和代谢产物所致,既存在一定的规律性,又存在品种差异性。

2.2.2 游离氨基酸组成 对游离氨基酸进一步归类分析如图 2 所示。由图 2-A 可知,S0 总游离氨基酸(total free amino acid, TAA)含量为 139.77 mg·100 g⁻¹,其中必需氨基酸(essential amino acid, EAA)和非必需氨基酸(nonessential amino acid, NEAA)含量分别

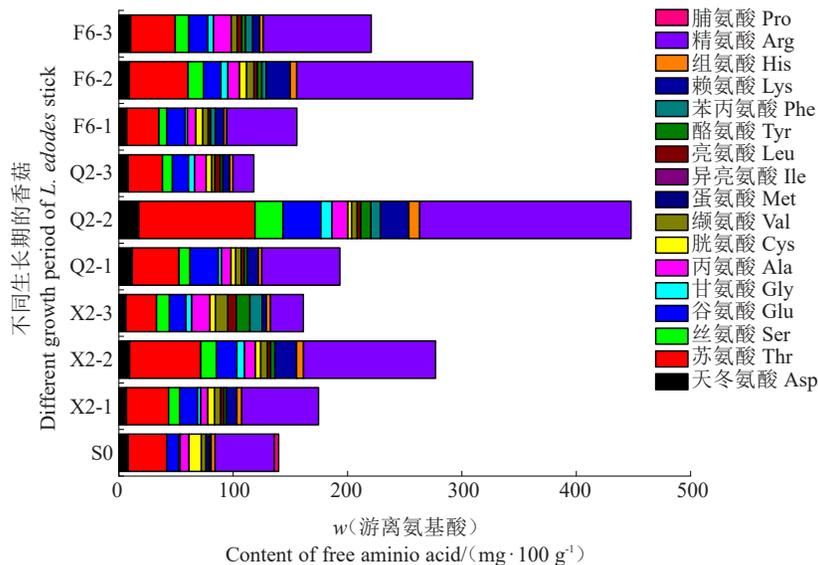


图1 香菇菌棒游离氨基酸构成堆积图

Fig. 1 Accumulation chart of free amino acid composition in *L. edodes* stick during growth process

为 42.17、97.60 mg · 100 g⁻¹。同一品种的 TAA、EAA、NEAA 均呈现先增加后降低的趋势,最大值出现在菌棒转色期,这与表 1 中粗蛋白含量的变化趋势类似。X2-2、Q2-2、F6-2 的 TAA 分别是 S0 的 1.981、3.204、2.216 倍,其中 Q2-2 的 TAA 高达 447.87 mg · 100 g⁻¹,是所有样品中最高的;而 X2-3、F6-3 的 TAA 分别是 Q2-3 的 1.367、1.870 倍。所有菌棒样品 EAA/TAA 值在 27.293%~36.692%,EAA/NEAA 值为 37.538%~57.957%,EAA/TAA 值在 X2、Q2 中不断增大,与在 F6 中不断减小的变化情况完全相反。这进一步反映出不同品种间游离氨基酸代谢上的差异。

游离氨基酸是基础呈味物质之一,呈味氨基酸

的组成与风味密切相关。根据游离氨基酸的呈味特性,大体可将菌棒检测到的 16 种游离氨基酸分为鲜味氨基酸(Glu、Asp、Lys)、甜味氨基酸(Ala、Thr、Ser、Gly、Pro、His)、苦味氨基酸(Arg、Val、Met、Leu)和芳香族氨基酸(Phe、Tyr、Cys)。由图 2-B 可知,所有菌棒样品呈味氨基酸组成模式一致,甜味和苦味氨基酸含量较高,鲜味氨基酸含量次之,芳香族氨基酸含量最低。同一品种的鲜味、甜味、苦味氨基酸含量的变化趋势与 TAA 相同,均先升后降,最大值出现在菌棒转色期。Q2-2 在所有样品中鲜味、甜味、苦味氨基酸含量最高,分别为 75.39、159.30、192.78 mg · 100 g⁻¹,分别是 S0 的 3.758、3.208、3.248 倍,说明香菇菌丝生长在一定程度能

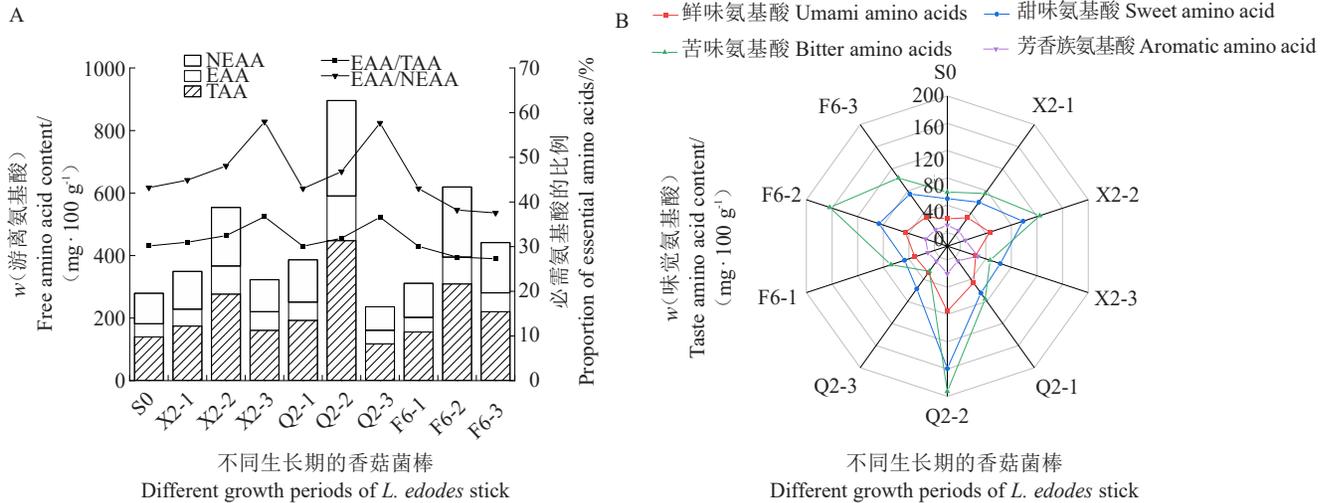


图 2 香菇菌棒游离氨基酸组成

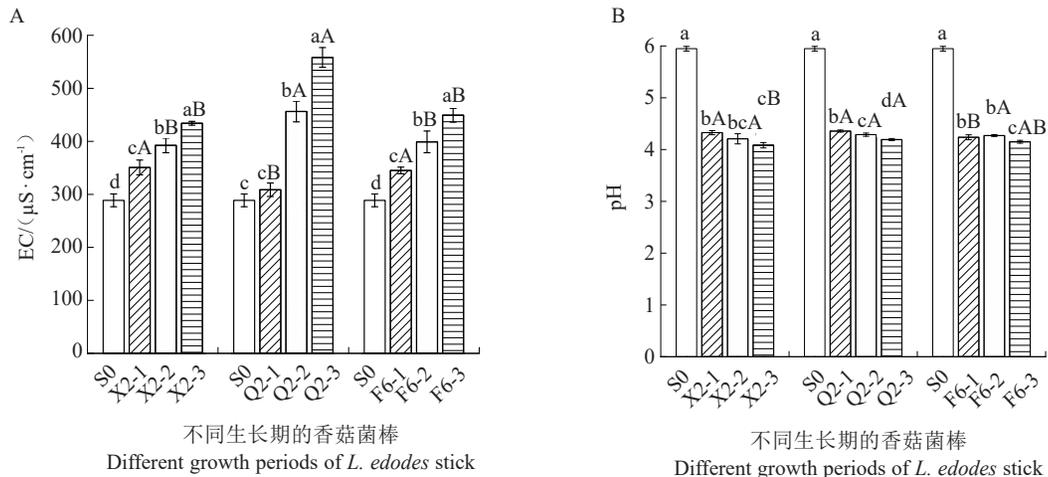
Fig. 2 Free amino acid composition of *L. edodes* stick during growth process

改善菌棒的风味。

2.3 香菇菌棒化学性质分析

EC 和 pH 是评价培养料化学性质的重要指标,EC 主要代表培养料所含带电粒子的多寡,pH 反映了培养料的缓冲能力。香菇菌棒的 EC 和 pH 如图 3 所示。由图 3-A 可知,从同一品种来看,空白菌棒的 EC 为 288.67 μS · cm⁻¹,随着香菇生长进程的推进,X2、Q2、F6 的 EC 整体呈持续增加的趋势,说明在香菇栽培过程中不溶性盐类慢慢转化为可溶性盐类。X2、F6 不同生长期的 EC 存在显著差异,F6-1、F6-2、F6-3 的 EC 增长率依次为 19.515%、18.707%、17.436%,菌丝满棒期增长速度最快;X2 与 F6 情况类似,X2-1 的 EC 增长率最高,达到 21.478%;这表明 F6 和 X2 在生长初期 EC 增加较快。而 Q2 情况则明显不同,Q2-1 和 S0 的 EC 无显著差异,Q2-2、Q2-3 的 EC 增长率分别是 51.155%、

35.335%,菌棒转色期增长速度最快;Q2-3 的 EC 为 558.33 μS · cm⁻¹,是所有样品中最大的。相同生长期比较,Q2-1 的 EC 显著低于 X2-1、F6-1,而 Q2-2、Q2-3 的 EC 均显著高于同期的 X2 和 F6,这进一步表明 Q2 的 EC 增加集中在中后期。X2-3、Q2-3、F6-3 的 EC 均达到最大值,依次为 S0 的 1.503、1.934、1.557 倍,说明香菇菌棒的 EC 兼具品种和生长期差异性。由图 3-B 可知,从同一品种来看,接种前空白菌棒的 pH 为 5.95,符合香菇菌丝对酸碱环境的适应性要求。X2、Q2、F6 在生长过程中菌棒的 pH 值变化趋势基本一致,整体呈现持续降低趋势;这主要是由于菌棒不断被香菇菌丝分解成小分子酸、醇所导致。各品种菌棒 pH 在菌丝满棒期的下降幅度最大;X2-3 的 pH 为 4.08,是所有样品中最低的。F6-1 的 pH 显著低于 X2-1、Q2-1,F6-2、F6-3 的 pH 与同生长期的 X2 和 Q2 无显著差异。说明随着菌丝的生长,不同



注:不同小写字母表示同一品种不同生长期期间在0.05水平存在显著差异;不同大写字母表示不同品种相同生长期期间在0.05水平存在显著差异。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference between different growth periods of the same variety at 0.05 level, different capital letters indicate significant difference between different varieties of the same growth period at 0.05 level. The same below.

图3 香菇菌棒 EC 和 pH

Fig. 3 EC and pH of *L. edodes* stick during growth process

品种香菇菌棒的差异不断缩小,最终渐趋一致。

2.4 香菇菌棒物理性质分析

菌丝生长在引起养分变化的同时,基质结构也

会得到改善,持水力、容重、比孔隙率是菌棒重要的物理性质评价指标。香菇菌棒物理性质如图4所示。由图4-A可知,S0的持水力为 $1.441\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$,随

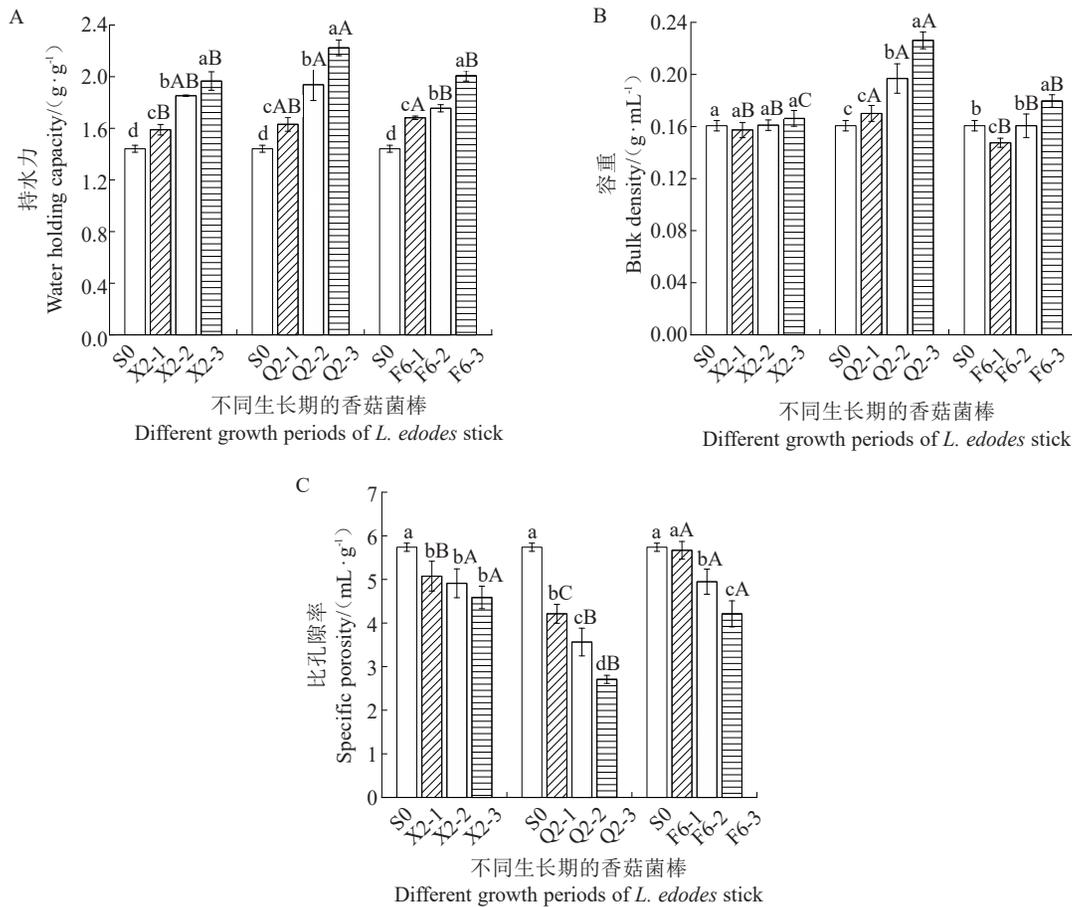


图4 香菇菌棒物理性质

Fig. 4 The physical properties of *L. edodes* stick during growth process

着香菇生长进程的推进,X2、Q2、F6 的持水力均呈线性增加,各品种不同生长期的持水力存在显著差异,各品种的持水力最大值均在菌棒成熟期,X2-3、Q2-3、F6-3 的持水力依次为 S0 的 1.364、1.543、1.392 倍。X2、Q2 持水力在菌棒转色期增长最快,而 F6 持水力则在菌棒成熟期增加幅度最大。F6-1 高于 X2-1、Q2-1,而 F6-2 低于 X2-2、Q2-2,这表明在生长初期 F6 比 X2、Q2 持水力增加更快。Q2-3 的持水力为 2.224 g·g⁻¹,是所有样品中最大的。

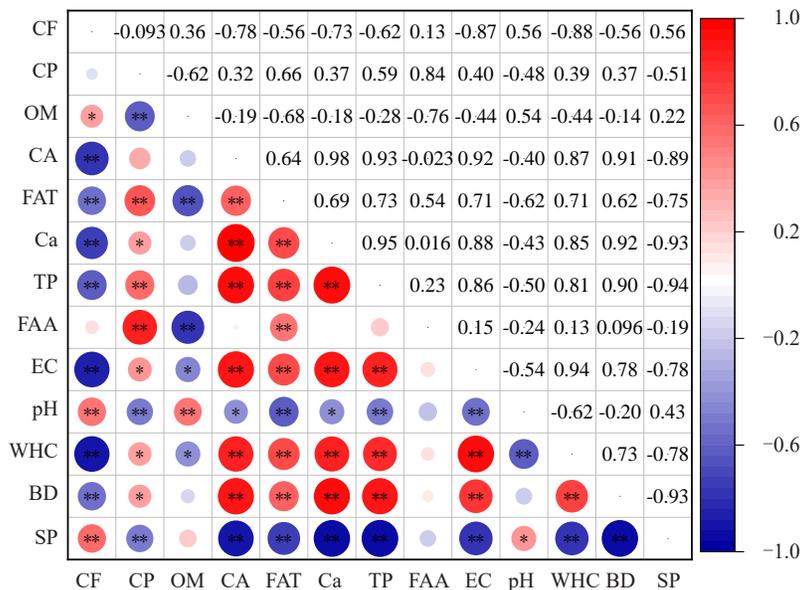
容重反映的是基质疏松紧实程度,比孔隙率反映了基质内部的空间大小。由图 4-B 可知,S0 的容重为 0.160 g·mL⁻¹,X2-1、Q2-1 与 S0 无显著差异,而 F6-1 比 S0 显著下降,这可能与菌丝满棒期 F6 对菌棒营养成分的消耗更多有关,与表 1 中粗纤维、有机质含量的变化相一致。菌丝满棒期后各品种香菇的容重均呈现出上升趋势,在菌棒成熟期达到最大,此时,X2-3、Q2-3、F6-3 的容重依次为 S0 的 1.035、1.410、1.119 倍。相同生长期比较,Q2-1、Q2-2、Q2-3 的容重均显著高于同期的 X2 和 F6,Q2-3 的容重为 0.226 g·mL⁻¹,是所有样品中最大的。

由图 4-C 可知,S0 的比孔隙率为 5.738 mL·g⁻¹,X2、Q2、F6 的比孔隙率随生长进程呈下降趋势,说

明菌丝的不断生长占据了一定的空间;各品种香菇比孔隙率最小值均在菌棒成熟期,此时,X2-3、Q2-3、F6-3 比孔隙率比 S0 分别降低了 20.065%、52.823%、26.629%。Q2 不同生长期之间的比孔隙率存在显著差异;X2 仅 X2-1 与 S0 存在显著差异,其他生长期之间无显著差异,而 F6 与之情况正好相反,F6-1、F6-2 与 F6-3 之间均存在显著差异;X2、Q2 的比孔隙率均在菌丝满棒时下降速度最快,而 F6 的比孔隙率则在菌棒成熟期下降幅度最大。相同生长期比较,Q2-1、Q2-2、Q2-3 的比孔隙率均显著低于同期的 X2 和 F6,Q2-3 的比孔隙率为 2.707 mL·g⁻¹,是所有样品中最低的。

2.5 指标相关性分析

对 3 个品种不同生长期菌棒样品的 13 个指标进行相关性分析,结果见图 5。各个指标之间存在正相关也存在负相关,粗纤维含量与有机质含量呈显著正相关,但与粗灰分、粗脂肪、钙、总磷含量存在极显著负相关;有机质含量与粗蛋白、粗脂肪、游离氨基酸含量则呈极显著负相关;说明粗纤维、有机质被香菇菌丝吸收利用并转化成了其他物质。粗蛋白含量与粗脂肪、总磷、游离氨基酸含量呈极显著正相关,与钙含量呈显著正相关;粗灰分、粗脂肪、钙、总磷含量两两间均呈极显著正相关,表明这



注: CF 粗纤维含量;CP 粗蛋白质含量;OM 有机质含量;CA 粗灰分含量;FAT 粗脂肪含量;Ca 钙含量;TP 总磷含量;FAA 游离氨基酸含量;WHC 持水力;BD 容重;SP 比孔隙率,* P≤0.05;**P≤0.01。

Note: CF refers to crude fiber content; CP refers to crude protein content; OM refers to organic matter content; CA refers to crude ash content; FAT refers to crude fat content; Ca refers to calcium content; TP refers to total phosphorus content; FAA refers to free amino acid content; WHC refers to water holding capacity; BD refers to bulk density; SP refers to specific porosity,* P≤0.05;**P≤0.01.

图 5 各指标皮尔逊相关性分析结果

Fig. 5 Pearson correlation analysis results of each index

些指标间关系密切。EC、持水力与除游离氨基酸含量外的所有指标间存在极显著或显著相关性,容重、比孔隙率与除游离氨基酸、有机质含量外的所有指标间存在极显著或显著相关性,体现出养分与理化性质间关系密切。EC、持水力、容重、比孔隙率两两间均呈极显著或显著相关性。这些都表明,菌棒养分、化学性质、物理性质相互间存在较强的联系,因此可以采用主成分分析法进行进一步分析。

2.6 各指标的主成分分析

主成分分析是通过数据降维用较少变量反映大量指标的多元统计方法,可根据主要成分因子的贡献率来评估样本间的差异性。针对3个品种不同生长期菌棒样品的13个指标进行主成分分析,结果见表2及图6。由表2可知,前3个主成分即PC1、PC2、PC3的对应特征值分别为8.260、2.483、1.175,均大于1,累计贡献率为91.681%,表明其可有效表征原始变量信息。从主成分载荷矩阵可以看出,PC1方差贡献率为63.537%,与粗蛋白质、粗灰分、粗脂肪、钙、总磷、游离氨基酸含量及EC、持水力、容重呈正相关;其中粗灰分、钙、总磷含量及EC、持水力载荷均大于0.9,贡献率较大,且与矿物质元素密切相关。PC2方差贡献率为19.103%,与游离氨基酸、粗蛋白质含量呈正相关,载荷分别为0.904、0.691;与有机质含量呈负相关,载荷为-0.740;说明三者对PC2影响较大。PC3方差贡献率为9.041%,粗纤维含量载荷较高(0.514),相关性较强。

由图6可知,根据样品在二维图形中的位置和相互间位置可知,PCA能较好地各品种香菇不同

表2 主成分载荷矩阵及方差贡献率

Table 2 Principal component load matrix and variance contribution rates

指标 Index	主成分载荷 Principal component loading		
	PC1	PC2	PC3
粗纤维含量 Crude fiber content	-0.773	0.282	0.514
粗蛋白质含量 Crude protein content	0.578	0.691	0.301
有机质含量 Organic matter content	-0.484	-0.740	0.312
粗灰分含量 Crude ash content	0.924	-0.344	0.072
粗脂肪含量 Crude fat content	0.846	0.352	-0.018
钙含量 Calcium content	0.933	-0.306	0.135
总磷含量 Total phosphorus content	0.946	-0.092	0.238
游离氨基酸含量 FAA content	0.288	0.904	0.247
EC	0.940	-0.127	-0.162
pH	-0.613	-0.297	0.512
持水力 Water holding capacity	0.924	-0.115	-0.244
容重 Bulk density	0.854	-0.282	0.378
比孔隙率 Specific porosity	-0.912	0.136	-0.298
特征值 Eigenvalue	8.260	2.483	1.175
方差贡献率 Variance contribution rate/%	63.537	19.103	9.041
累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	63.537	82.640	91.681

生长期的菌棒样品之间进行区分。同一品种相同生长期的样品聚集在一起,说明单个样品重复性好;不同品种不同生长期的样品之间隔开一定距离,说明样品间存在差异。S0单独聚集于PC2负半轴附近,香菇的所有菌棒样品均与S0隔开一定距离,说明菌丝的生长能够改变菌棒性质;X2-1、

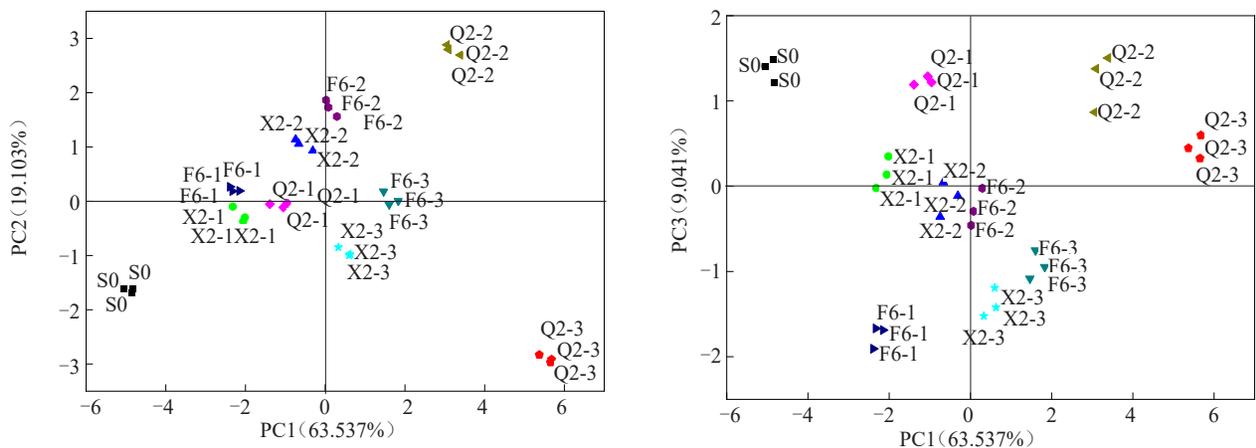


图6 香菇菌棒各指标的PCA得分图

Fig. 6 PCA score plots of each index in *L. edodes* stick during growth process

Q2-1、F6-1 邻近分布,表明菌丝满棒期 3 个品种样品差异较小;随着香菇生长进程的推进,菌棒转色期样品(X2-2、Q2-2、F6-2)、菌棒成熟期样品(X2-3、Q2-3、F6-3)相互间距离也越来越大,反映出香菇菌丝生长使得菌棒渐趋成熟,且品种间差异变大;Q2-2、Q2-3 与其他样品明显分离,说明香菇 Q2 比 X2、F6 菌棒间差异更大。这也与 Q2 多方面指标的表现相一致。

3 讨论与结论

目前香菇集约化、工厂化生产逐渐成为一种趋势,短菌龄香菇的生产应用价值越来越凸显^[22]。香菇菌棒是香菇与外界环境进行物质与能量交换的主要场所,其养分转化利用效率是决定香菇产量和品质的关键因素。本研究结果表明,3 个品种香菇菌棒生长过程中养分构成存在差异。粗纤维的降解阶段性明显,与李顺峰等^[23]对香菇降解木质纤维素的研究结果一致;Q2 粗纤维降解率最高,达到了 40.502%,品种优势显著,推测与该菌株有较高活力的纤维素类降解酶有关。已有研究结果证明,菌丝的不断生长会使菌丝蛋白得到不断积累,在菌棒转色期达到峰值,之后菌棒成熟期部分转移到子实体中致使含量下降^[24],本研究结果进一步验证了这一结论。由于香菇菌丝的不断生长,菌丝蛋白及游离氨基酸不断积累,各品种香菇菌棒均在转色期达到峰值,其中 Q2 的粗蛋白、游离氨基酸含量分别达到空白菌棒的 1.749、3.204 倍,显著高于 X2、F6;说明各品种香菇菌丝对氮源的吸收利用情况不同,Q2 菌株氮代谢效率更高,也证实了转色期是营养物质积累、合成及转化的重要阶段^[25];之后菌棒成熟期部分转移到子实体中导致营养物质含量下降,这与张锁峰等^[26]研究香菇菌棒中氮含量的变化结果类似。碳素在栽培过程中除了少量转移到子实体外,绝大部分由呼吸作用消耗掉了^[27];本试验中有机质含量的变化规律也佐证了这一点。各品种香菇菌棒的粗灰分、钙、总磷含量在菌棒成熟期达到最高,这一结果与王兆丰等^[28]关于香菇菌棒磷、钾含量持续增加的结果相一致。

游离氨基酸分析表明,各菌棒游离氨基酸含量和种类均存在差异,仅空白菌棒中检出蛋氨酸和脯氨酸,香菇生长后菌棒中新生成丝氨酸、亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸;精氨酸、苏氨酸含量最多,规律性明显。但能否作为衡量香菇菌棒生长的标志性氨基酸指标,尚需进一步验证。香菇菌棒是香菇生长

的物质基础,对香菇子实体风味具有重要作用^[29],各品种菌棒呈味氨基酸^[30]组成模式一致,以甜味和苦味氨基酸为主,芳香族氨基酸最少;这与香菇子实体中含有较少的芳香族氨基酸相对应^[31];刘芹等^[32]在不同品种香菇游离氨基酸的研究中亦发现类似现象。菌棒理化性质与其养分含量关系密切,相互影响。有研究报道,EC 升高证明栽培过程中有机质发生降解导致带电粒子释放,各品种香菇菌棒 EC 呈持续增大趋势,亦与有机质含量降低密切相关^[33]。香菇菌棒成熟期 pH 最低降到 4.08,略高于段应策等^[34]报道的香菇菌棒成熟衡量指标为 pH 4.0,这种差异可能与所用菌株和测定方法不同以及香菇调控环境 pH 能力有关。容重与比孔隙率密切相关,可在一定程度上反映基质的宏观结构和物理状态(如收缩、膨松等)的变化^[35];结合容重增加和比孔隙率下降的变化趋势,可推测出香菇的不断生长使得菌棒的结构逐渐收缩。Q2 在粗纤维、粗蛋白、粗灰分、钙、总磷含量及 EC、持水力、容重指标方面的表现优于 X2、F6,说明菌株 Q2 对菌棒中物质的分解、吸收、利用和转化能力比 X2、F6 更强。

各品种菌棒养分及理化性质间相关性较好,大部分指标间存在显著相关性,可以有效分析各品种菌棒养分与理化性质特征及差异性^[36]。PCA 结果显示,空白菌棒单独聚集,与其他样品间差异大,表明菌丝生长能显著改变菌棒性质;品种间菌丝满棒期差异较小,随着生长进程推进,差异变大;且 Q2 菌棒比 X2、F6 差异更大,这也与 Q2 多方面指标的表现相一致。

综上所述,短菌龄品种香菇菌棒生长过程中养分及理化性质是动态变化的,不同品种整体变化趋势基本一致,均有明显的生长阶段性,且品种间存在一定差异;总体来看,Q2 相对表现较好。本研究结果为后续菌棒资源利用及香菇高效栽培提供了科学依据,但关于不同品种代谢相关基因的差异表达,以及如何利用这些指标来监控菌棒成熟度、筛选高效品种或优化栽培管理,尚需进一步深入研究。

参考文献

- [1] 宋吉玲,陈星坤,陈青,等.不同灭菌工艺对香菇培养料理化特性与微生物菌群动态变化的影响[J].核农学报,2023,37(8):1523-1532.
- [2] 沈秀芬.香菇菌龄性状 BSA 定位及 InDel 标记开发研究[D].长春:吉林农业大学,2021.
- [3] 张金霞,黄晨阳,胡小军.中国食用菌品种[M].北京:中国农业出版社,2012.

- [4] 翟丹丹,尚怀国,章炉军,等.出菇温度对不同菌龄香菇群体主要农艺性状的影响[J].上海农业学报,2024,40(1):1-6.
- [5] 曲扬,章炉军,于海龙,等.不同栽培方式和菌株对香菇 CO₂ 释放量的影响[J].食用菌学报,2020,27(3):37-44.
- [6] BYEONGSUK H, SINIL K, MINSEEK K, et al. Diversity of A mating type in *Lentinula edodes* and mating type preference in the cultivated strains[J]. The Journal of Microbiology, 2018, 56(6):416-425.
- [7] BYEONGSUK H, JUNG M Y, YELIN S, et al. Molecular analysis of B mating type diversity in *Lentinula edodes*[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 243:55-63.
- [8] OSIBE D A, CHIEJINA N V. Assessment of palm press fibre and sawdust-based substrate formulas for efficient carpophore production of *Lentinus squarrosulus*(Mont.)Singer[J]. Mycobiology, 2015, 43(4):467-474.
- [9] CAI Y, GONG Y, LIU W, et al. Comparative secretomic analysis of lignocellulose degradation by *Lentinula edodes* grown on microcrystalline cellulose, lignosulfonate and glucose[J]. Journal of Proteomics, 2017, 163:92-101.
- [10] 魏书信,王安建,高帅平,等.香菇培养料的双螺杆挤压灭菌工艺优化[J].河南农业科学,2024,53(1):172-179.
- [11] 河南省市场监督管理局.代料香菇秋栽生产技术规程:DB41/T 1769—2019[S].郑州:河南省地方标准公共服务平台,2020.
- [12] 国家市场监督管理总局,国家标准化委员会.饲料中粗纤维的含量测定:GB/T 6434—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.饲料中粗脂肪的测定:GB/T 6433—2025[S].北京:中国标准出版社,2025.
- [14] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.饲料中粗蛋白的测定 凯氏定氮法:GB/T 6432—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.饲料中钙、铜、铁、镁、锰、钾、钠和锌含量的测定 原子吸收光谱法:GB/T 13885—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.饲料中粗灰分的测定:GB/T 6438—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [17] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.饲料中总磷的测定 分光光度法:GB/T 6437—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [18] 中华人民共和国农业农村部.有机肥料:NY/T 525—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [19] 国家市场监督管理总局,国家标准化委员会.植物中游游离氨基酸的测定:GB/T 30987—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [20] 陈亮,胡瑶,李宏告,等.平菇菌糠栽培基质对菜蕈生长与品质的影响[J].湖南农业科学,2019,(6):23-25.
- [21] 王佳堃.稻草预处理后超微结构及其理化特性变化规律研究[D].杭州:浙江大学,2006.
- [22] 孙波,赵会长,周洪英,等.香菇工厂化生产研究进展[J].北方园艺,2024(18):122-128.
- [23] 李顺峰,刘丽娜,许方方,等.不同生长阶段香菇栽培料木质纤维素降解利用研究[J].中国瓜菜,2024,37(9):102-108.
- [24] 张文升.杏鲍菇菌渣栽培香菇技术研究[D].南京:南京农业大学,2016.
- [25] 王伟科,陆娜,周祖法,等.8种胞外酶在香菇不同生长阶段的活性变化[J].浙江农业科学,2014(4):498-501.
- [26] 张锁峰,李青,韩鹏远,等.不同果木栽培基质对香菇产量及主要养分转化的影响[J].中国食用菌,2018,37(1):25-28,33.
- [27] 肖生美.食用菌栽培过程碳素物质转化及 CO₂ 排放规律的研究[D].福州:福建农林大学,2013.
- [28] 王兆丰,张瑞,杜石勇,等.以大樱桃木屑为基质的菌棒化学成分含量及酶活性与香菇品质的关系[J].中国瓜菜,2025,38(4):90-98.
- [29] LI W, CHEN W C, YANG Y, et al. Effects of culture substrates on taste component content and taste quality of *Lentinula edodes*[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2017, 52: 981-991.
- [30] HOU H, LIU C, LU X S, et al. Characterization of flavor frame in shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) detected by HS-GC-IMS coupled with electronic tongue and sensory analysis: Influence of drying techniques[J]. LWT- Food Science and Technology, 2021, 146:111402.
- [31] LIU Q, HU S J, SONG Z B, et al. Relationship between flavor and energy status in shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) harvested at different developmental stages[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(10):4288-4302.
- [32] 刘芹,特日根,师子文,等.不同品种香菇子实体游离氨基酸组成的主成分分析及综合评价[J].河南农业科学,2022,51(7):134-144.
- [33] 董沁,朱龙弟,郭倩,等.利用鹿茸菇菌渣和稻秸秆复配培养料栽培草菇初探[J].上海农业学报,2025,41(1):21-29.
- [34] 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.
- [35] 刘丽娜,李顺峰,崔国梅,等.两种灭菌方式对香菇培养料性质的影响[J].北方园艺,2024(3):112-118.
- [36] PANG T, ZHANG H, WEN L, et al. Quantitative analysis of a weak correlation between complicated data on the basis of principal component analysis[J]. Journal of Analytical Methods in Chemistry, 2021(1):8874827.