

# 紫陀螺菌营养品质及非靶代谢产物剖析

刘亚娜<sup>1,2</sup>, 耿阳阳<sup>1,2\*</sup>, 张时馨<sup>1,2</sup>, 胡伯凯<sup>1,2</sup>, 王纪辉<sup>1,2</sup>

(1. 贵州省核桃研究所, 贵阳 550005; 2. 贵州省林业科学研究院, 贵阳 550005)

**摘要: 目的** 深入了解紫陀螺菌的营养品质和次级代谢产物, 以评估其食药应用价值。**方法** 以不同生长期紫陀螺菌为研究对象, 测定分析其蛋白质、脂肪、灰分、水分、矿物质和氨基酸含量, 并采用液相色谱-四极杆-飞行时间质谱平台对代谢物进行测定, 基于正交偏最小二乘判别分析筛选差异代谢物, 通过京都基因组百科全书对组间差异代谢物进行通路富集分析。**结果** 紫陀螺菌含有丰富的蛋白质、矿物质、氨基酸, 其中包括 6 种人体必需氨基酸及婴幼儿必需的组氨酸。苏氨酸、缬氨酸、赖氨酸的营养价值接近或超过标准鸡蛋蛋白, 且漏斗期的紫陀螺菌蛋白质营养价值最高。通过非靶代谢组学分析, 共获得 2450 个非靶代谢产物, 经过数据库注释发现紫陀螺菌次级代谢产物丰富, 包括脂肪酰类、羧酸及其衍生物、有机氧化物、异戊二醇脂类、类固醇及其衍生物、类黄酮类、酚类和生物碱类等。经差异代谢统计分析发现, 不同生长期紫陀螺菌代谢物种类和数量均存在差异, 并随着子实体的成熟整体呈下调趋势。**结论** 紫陀螺菌营养成分丰富, 且含有多种具有生理活性的次生代谢产物, 本研究为紫陀螺菌食用与药用提供科学依据。

**关键词:** 紫陀螺菌; 营养品质; 非靶代谢组; 差异代谢物; 代谢途径

## Analysis of nutritional quality and non-targeted metabolites of *Gomphus purpuraceus*

LIU Ya-Na<sup>1,2</sup>, GENG Yang-Yang<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Shi-Xin<sup>1,2</sup>, HU Bo-Kai<sup>1,2</sup>, WANG Ji-Hui<sup>1,2</sup>

(1. Guizhou Institute of Walnut, Guiyang 550005, China; 2. Guizhou Academy of Forestry, Guiyang 550005, China)

**ABSTRACT: Objective** To further understand the nutritional quality and secondary metabolites of *Gomphus purpuraceus* and evaluate its value in food and medicine applications. **Methods** Research on *Gomphus purpuraceus* at different growth stages, the protein, fat, ash, moisture, minerals and amino acid content were measured and analyzed. Metabolites were determined using a liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry platform. Differential metabolites were screened based on orthogonal partial least squares discriminant analysis, and pathway enrichment analysis was performed on inter group differential metabolites using the Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes. **Results** *Gomphus purpuraceus* contained rich protein, mineral elements and amino acids, including 6 kinds of essential amino acid for the human body and the infant essential histidine. Among them, the nutritional value of threonine, valine and lysine was close to or more than that of standard egg protein, and the nutritional value of the protein of *Gomphus purpuraceus* in the funnel stage was the highest. Through non-targeted

基金项目: 贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2022]一般 112)、贵州省科技重大专项(黔科合重大专项字[2019]3006)

Fund: Supported by the Science and Technology Support of Guizhou Province (Grant No.[2022] general 112), and the Major Technology Project of Guizhou Province (Grant No.[2019]3006)

\*通信作者: 耿阳阳, 博士, 副研究员, 主要研究方向为森林食品资源开发与应用。E-mail: yygengfood@sina.cn

\*Corresponding author: GENG Yang-Yang, Ph.D, Associate Professor, Guizhou Institute of Walnut, No.382, Fuyuan South Road, Nanming District, Guiyang 550005, China. E-mail: yygengfood@sina.cn

metabolomics analysis, a total of 2450 non-targeted metabolites were obtained. Database annotation suggested the abundance of the secondary metabolites of *Gomphus purpuraceus*, which included fatty acyls, carboxylic acids and their derivatives, organic oxides, isopentyl glycol lipids, steroids and their derivatives, flavonoids, phenols and alkaloids. Differential metabolic statistical analysis revealed differences in the types and quantities of metabolites obtained from *Gomphus purpuraceus* at different growth periods. And as the fruiting body matures, it showed an overall downward trend. **Conclusion** *Gomphus purpuraceus* has rich nutritional components and contains various secondary metabolites with physiological activity. This study provides scientific basis for the food and medicine use of *Gomphus purpuraceus*.

**KEY WORDS:** *Gomphus purpuraceus*; nutritional quality; non-targeted metabolomics; differential metabolites; metabolic pathways

## 0 引言

紫陀螺菌[*Gomphus purpuraceus* (Iwade) Yokoyama], 又名“马蹄菌”, 属于担子菌亚门(Basidiomycotina)、非褶菌目(Aphyllorphorales)、陀螺菌科(Gomphaceae)、陀螺菌属(*Gomphus*), 是一种区域性珍稀野生食用菌, 其肉质脆嫩、滋味鲜美、不易腐烂, 备受消费者喜爱<sup>[1]</sup>, 其子实体为单生、丛生或者群生于青冈栎、黄栌树或马尾松为主的阔叶混交林中<sup>[2]</sup>, 零星分布于湖北、云南、贵州、四川等省份的部分地区<sup>[3]</sup>。紫陀螺菌于 1999 年被谭爱华等<sup>[4]</sup>在三峡地区西陵峡河谷发现, 并将其生长过程划分为 3 个时期: 锥形期、柱形期、漏斗期。目前国内外对紫陀螺菌的研究和报道较少, JIANG 等<sup>[5]</sup>从紫陀螺菌中分离出一种能够有效抑制艾氏癌细胞 DNA 合成的倍半萜烯类化合物, 认为紫陀螺菌是一种兼具药用价值的野生食用菌。现有文献关于紫陀螺菌营养成分分析主要集中在成熟的子实体及液体培养的菌丝体方面<sup>[6-7]</sup>, 至于其生长过程中营养物质如何变化并未有报道。

食用菌含有丰富的次级代谢产物, 如类黄酮、类固醇及其衍生物、酚类和生物碱类等, 这些次级代谢产物赋予了食用菌多样的生物功能, 如提高免疫力、抗氧化、抑菌、降脂、抗癌等<sup>[8-9]</sup>。非靶代谢组学利用液相色谱-质谱法等技术对样本内相对分子量较小的化合物进行检测, 筛选差异代谢物进行代谢通路的富集分析<sup>[10]</sup>, 常用于研究生物样品中的差异代谢物。已有学者利用非靶代谢组学分析乳杆菌发酵方竹笋超细全浆的差异代谢物及代谢通路<sup>[11]</sup>, 以及副干酪乳杆菌发酵枸杞汁各阶段代谢差异及相关代谢通路<sup>[12]</sup>。尽管紫陀螺菌食用历史悠久, 但对紫陀螺菌代谢物的研究较少, 关于紫陀螺菌代谢通路的系统研究更鲜有报道。

本研究对不同生长时期的黔产紫陀螺菌开展了营养成分测定与分析, 并利用液相色谱-四极杆-飞行时间质谱(liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry, LC-Q-TOF-MS)平台进行非靶代谢组定性和

定量分析, 以期进一步深入了解紫陀螺菌的营养品质及次级代谢产物, 对紫陀螺菌的食药应用评价奠定坚实的理论基础; 同时, 通过紫陀螺菌次级代谢产物的剖析, 为紫陀螺菌的菌种扩培、人工驯化和产品开发提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

紫陀螺菌(*Gomphus purpuraceus*)子实体采自贵州省龙里县谷脚镇下寨村(25.5690°N, 106.8556°E, 海拔 1149 m)的马尾松混交林中。冷链运输至实验室, 挑选外观干净、无破损、无虫蛀子实体, 根据外观形态特征, 将子实体分为锥形期、柱形期和漏斗期 3 种类别, 转移至-80℃超低温冰箱冻藏备用。

乙腈、甲醇、甲酸(色谱纯, 美国 Sigma-Aldrich 公司); 冰乙酸、盐酸、硫酸、氢氧化钠、过氧化氢、硼酸、葡萄糖、氯化铵、磷酸二氢钾、七水硫酸镁、氯化钠溶液、氯化钙溶液、三氯化铁、盐酸硫胺素(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 琼脂粉、蛋白胨(生化试剂, 杭州莱贝特生物科技有限公司)。

### 1.2 仪器与设备

MS104TS 电子天平(精度 0.1 mg, 美国梅特勒-托利多仪器有限公司); DW-86L578J 超低温冰箱(青岛海尔生物医疗股份有限公司); BRPX-500 气候培养箱(山东博科科学仪器有限公司); BPD-10A 拍打式均质器(常德比克曼生物科技有限公司); Ultimate3000 高效液相色谱仪(美国赛默飞公司); Agilent1290 高效液相色谱仪(美国 Agilent 公司); LA8080 氨基酸分析仪(日本日立公司); Kromasil C<sub>18</sub> 色谱柱(60 mm×4.6 mm, 5 μm)(瑞典 Akzo Nobel 公司); Waters UPLC Acquity I-Class PLUS 超高效液相色谱仪、Waters UPLC Xevo G2-XS QTOF 高分辨质谱仪、Acquity UPLC HSS T3 色谱柱(100 mm×2.1 mm, 1.8 μm)(美国 Waters 公司); L5S 紫外可见分光光度计(上海仪电分析仪器有限公司)。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 菌丝体样品制备

菌丝分离: 选用锥形期紫陀螺菌子实体, 采用 75%酒精擦拭表面进行消毒, 将去皮子实体切成 0.3 cm×0.3 cm 大小的组织块, 放于 70 mm 培养皿中, 采用改良 MMN (modified melin-norkrans)培养基配方, 封口膜封口, 转移至 23.5℃恒温培养箱内避光培养。

改良 MMN 培养基配方: 葡萄糖 2.5 g、氯化铵 0.2 g、磷酸二氢钾 0.5 g、七水硫酸镁 0.15 g、1%氯化钠溶液 2.5 mL、1%氯化钙溶液 5.0 mL、1%三氯化铁溶液 1.5 mL、1 mg 盐酸硫酸素、琼脂粉 20 g, 用蒸馏水补足至 1 L, 使用 1%氢氧化钠溶液调 pH 至约 6.5。

菌丝扩培: 将分离的紫陀螺菌菌丝切成菌丝块, 并转移至马铃薯葡萄糖琼脂(potato dextrose agar, PDA)+MMN 综合固体培养基中, 置于 23.5℃恒温培养箱内避光培养。

PDA+MMN 综合固体培养基配方: 去皮鲜马铃薯 15.0 g、葡萄糖 25.0 g、蛋白胨 2.0 g、磷酸二氢钾 0.5 g、七水硫酸镁 0.15 g、1%氯化钠溶液 2.5 mL、1%氯化钙溶液 5.0 mL、1%三氯化铁溶液 1.5 mL、盐酸硫酸素 1.0 mg、琼脂粉 25.0 g, 用蒸馏水补足至 1 L, 使用 1%氢氧化钠溶液调 pH 至 6.5。

菌种纯化: 将扩培菌丝切下来, 与 20 mL 0.85%的无菌生理盐水混合, 移入 12 cm×18 cm 无菌均质袋中, 使用速率为 12.0次/s 的拍打式均质器均质 15 min, 获得菌悬液。将菌悬液无菌条件下接入改良 PDA+MMN 综合液体培养基中, 以温度 23.5℃、振荡速率 165 r/min 的条件振荡培养 20 d, 获得纯种紫陀螺菌菌丝球。

改良 PDA+MMN 综合液体培养基配方: 去皮鲜马铃薯 15.0 g、葡萄糖 25.0 g、蛋白胨 2.0 g、磷酸二氢钾 0.5 g、七水硫酸镁 0.15 g、1%氯化钠溶液 2.5 mL、1%氯化钙溶液 5.0 mL、1%三氯化铁溶液 1.5 mL、1.0 mg 盐酸硫酸素, 用蒸馏水补足至 1 L, 使用 1%氢氧化钠溶液调 pH 至约 6.5。

纯种菌丝扩培: 将紫陀螺菌菌丝球移入上述步骤中的 PDA+MMN 综合固体培养基中再次进行菌种扩培。

采用改良 PDA+MMN 综合液体培养基对纯化后的菌种再进行液体发酵, 发酵条件与菌种纯化条件一致, 发酵完毕后, 在 0.5 μm 水系滤膜的加持下, 真空抽滤获取紫陀螺菌菌丝体, 于-80℃超低温冰箱冻藏备用。

#### 1.3.2 营养成分指标分析

##### (1) 常规营养指标测定

蛋白质依据 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中第一法“凯氏定氮法”进行测定; 脂肪依据 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中第一法“索式抽提法”进行测定; 灰分依据 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》中第一法“食品中总灰分的测定”进行测定; 水分依据 GB

5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》进行测定。除水分外, 蛋白质、脂肪、灰分均以紫陀螺菌干样(水分含量小于 5%)进行测定。

##### (2) 总氮、总磷测定

总氮参考 HJ 636—2012《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》进行测定; 总磷依据 GB 5009.87—2016《食品安全国家标准 食品中磷的测定》中第一法“钼蓝分光光度法”进行测定。

##### (3) 矿物质元素测定

矿物质元素依据 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》中第二法“电感耦合等离子体发射光谱法”进行测定。

##### (4) 氨基酸测定

试液制备: 精确称取 0.05 g 鲜样于水解管中, 加入 6 mol/L 盐酸溶液 10 mL, 将水解管冷冻, 抽真空后 110℃恒温干燥, 水解 22 h 后冷却至室温。用中性滤纸过滤水解液, 取 1 mL 滤液至坩锅中, 60℃蒸干。用 1 mL 氨基酸缓冲液复溶, 摇匀, 过 0.22 μm 滤膜, 上机待测。

检测条件: Kromasil C<sub>18</sub> 色谱柱(60 mm×4.6 mm, 5 μm), 进样量 20 μL, 茚三酮流速为 0.35 mL/min, 流动相流速为 0.45 mL/min, 反应器温度为 135℃, 柱温为 57~74℃, 检测波长为 570 nm、440 nm。

##### (5) 氨基酸评价方法

###### 1) 氨基酸比值系数法

根据联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)和世界卫生组织(World Health Organization, WHO)提出的必需氨基酸模式<sup>[13]</sup>, 计算样品中必需氨基酸(essential amino acid, EAA)的氨基酸比值(ratio value of amino acids, RAA)、氨基酸比值系数(ratio coefficient, RC)和比值系数分(score of ratio coefficient, SRC), 计算如公式(1)~(3):

$$RAA = \frac{\text{待测样品中某种 EAA 含量}}{\text{FAO/WHO 模式中相对应 EAA 含量}} \quad (1)$$

$$RC = RAA \text{ 比值} / RAA \text{ 比值之均值} \quad (2)$$

$$SRC = 100 - CV \times 100 \quad (3)$$

式中, CV 是 RC 的变异系数(coefficient of variation), CV = 标准差/均值。

###### 2) 化学评分法

化学评分(chemical score, CS)亦称氨基酸分或蛋白质分<sup>[14]</sup>。具体计算如公式(4)。

$$CS = \frac{\text{待测样品中某种 EAA 含量}}{\text{标准鸡蛋模式中相对应 EAA 含量}} \quad (4)$$

#### 1.3.3 非靶代谢产物分析

##### (1) 样品提取

称取样品 50 mg, 加入 1000 μL 提取液(甲醇:乙腈:水 = 2:2:1, V:V:V, 内标质量浓度 20 mg/L), 涡旋 30 s。45 Hz 冷

冻研磨仪处理 10 min, 冰水浴超声 10 min,  $-20^{\circ}\text{C}$  静置 1 h, 离心 15 min ( $4^{\circ}\text{C}$ 、12000 r/min), 取 500  $\mu\text{L}$  上清液真空浓缩干燥, 加入 160  $\mu\text{L}$  提取液(乙腈:水=1:1,  $V:V$ )复溶, 涡旋 30 s, 冰水浴超声 10 min, 离心 15 min。取 120  $\mu\text{L}$  上清液于 2 mL 进样瓶中, 每个样本各取 10  $\mu\text{L}$  混合成质量控制(quality control, QC)样本备用。

#### (2) 上机检测

正离子模式流动相 A: 0.1%甲酸水溶液, 流动相 B: 0.1%甲酸乙腈溶液; 负离子模式流动相 A: 0.1%甲酸水溶液, 流动相 B: 0.1%甲酸乙腈溶液。进样体积 1  $\mu\text{L}$ , 流速 400  $\mu\text{L}/\text{min}$ , 采用梯度洗脱方式进行洗脱, 具体如表 1。

表 1 流动相梯度洗脱程序  
Table 1 Mobile phase gradient elution program

时间/min	流动相 A/%	流动相 B/%
0.00	98	2
0.25	98	2
10.00	2	98
13.00	2	98
13.10	98	2
15.00	98	2

每个样品均采用正离子和负离子全质谱扫描模式, 在采集软件(MassLynx V4.2, Waters)控制下的 MSe 模式进行一级、二级质谱数据采集。数据采集循环中, 对低碰撞能量及高碰撞能量进行双通道数据采集, 低碰撞能量为 2 V, 高碰撞能量为 10~40 V, 扫描频率为 0.2 s。

电喷雾离子源(electron spray ionization, ESI)参数: 正离子模式毛细管电压为 2500 V, 负离子模式毛细管电压为 2000 V, 锥孔电压为 30 V, 离子源温度为  $100^{\circ}\text{C}$ , 脱溶剂气温度为  $500^{\circ}\text{C}$ , 反吹气流速为 50 L/h, 脱溶剂气流速为 800 L/h, 质核比( $m/z$ )采集范围为 50~1200。

#### (3) 代谢物定量及注释

采集的原始数据通过 Progenesis QI 软件做峰提取、峰对齐等数据处理操作, 基于在线代谢组学数据库(metabolite link, Metlin)、公共数据库以及百迈客自建库进行鉴定, 同时对理论碎片进行识别。借助京都基因组百科全书(Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes, KEGG)、人类代谢数据库(Human Metabolome Database, HMDB)以及脂质代谢途径研究计划(Lipid Metabolites and Pathways Strategy, Lipidmaps)数据库进行代谢物注释。

#### (4) 差异代谢物筛选

基于正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discrimination analysis, OPLS-DA)结果, 获得多变量分析 OPLS-DA 模型的变量重要性投影(variable importance in projection, VIP), 初步筛选样品间的差异代谢物, 再结合差异代谢物筛选条件( $|\log_2 \text{fold change}| > 1$ ,  $P < 0.05$  和 VIP

$\geq 1$ )作进一步筛选<sup>[15-16]</sup>。

## 1.4 数据处理

实验平行测定 3 次, 数据采用平均值 $\pm$ 标准偏差形式表示, 利用 SPSS (IBM SPSS statistics 26)对数据进行方差分析, 以  $P < 0.05$  作为数据差异显著性判断依据, 通过 Excel 2016 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 紫陀螺菌中常规营养指标分析

整体而言, 不同生长时期紫陀螺菌的营养组成变化趋势不明显(表 2)。其中, 紫陀螺菌的蛋白质含量相对较高, 如明显高于木腐菌茶树菇(*Agrocybe aegerita*)和松口磨(*Tricholoma matsutake*)<sup>[17]</sup>, 但 4 个生长阶段紫陀螺菌蛋白质含量无显著差异( $P > 0.05$ )。黔产紫陀螺菌的脂肪含量较三峡地区西陵峡河谷区紫陀螺菌菌丝体低<sup>[2]</sup>, 这可能与地域环境不同有关。紫陀螺菌的灰分含量在常见食用菌中属于较高水平, 达到 6.34%~6.57%, 且不同生长阶段紫陀螺菌灰分含量差异不显著( $P > 0.05$ )。紫陀螺菌中水分含量在 89.78%~91.28%之间, 换算成干物质含量即为 8.72%~10.22%。

表 2 不同生长时期紫陀螺菌常规营养指标  
Table 2 Conventional nutritional indicators of *Gomphus purpuraceus* at different growth stages

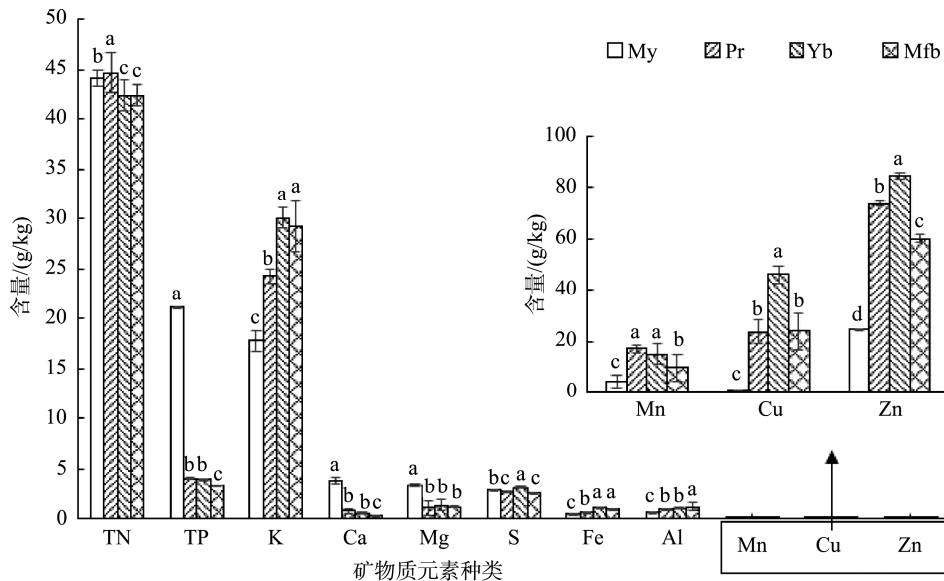
生长时期	蛋白质/%	脂肪/%	灰分/%	水分/%
菌丝体	23.65 $\pm$ 0.15 <sup>a</sup>	0.44 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>	6.57 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	91.28 $\pm$ 1.24 <sup>a</sup>
锥形期	22.36 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	0.57 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	6.47 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	89.89 $\pm$ 1.17 <sup>a</sup>
柱形期	23.74 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>	0.54 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	6.34 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	89.78 $\pm$ 0.83 <sup>a</sup>
漏斗期	24.06 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	0.67 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	6.38 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	90.03 $\pm$ 1.15 <sup>a</sup>

注: 同一列中不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

### 2.2 紫陀螺菌中矿物质元素分析

不同生长时期紫陀螺菌的矿物质元素测定结果见图 1。本研究共检测了 11 种矿物质元素, 包括总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)、硫(S)、铁(Fe)、铝(Al)、锰(Mn)、铜(Cu)和锌(Zn)。

从图 1 可知, 紫陀螺菌中总氮含量最高, 达到了 42.40~44.68 g/kg。紫陀螺菌含有丰富的 P (TP)、K、Ca、Mg、S、Fe 和 Al 元素, 但不同生长时期紫陀螺菌的矿物质元素含量各有差异, P (TP)、Ca 和 Mg 元素在紫陀螺菌菌丝体中显著富集, 说明紫陀螺菌对这 3 种元素具有良好的吸收能力。Mn、Cu、Zn 是生物体内一些关键酶的组成元素, 在采集的紫陀螺菌子实体中这 3 种元素含量比菌丝体高, 这可能与紫陀螺菌在自然环境中的生理活动相关, 也说明紫陀螺菌的菌种扩培或人工驯化基质中需要较高含量的 Mn、Cu、Zn 元素以满足其生命活动。总体而言, 紫陀螺菌含有丰富的矿物质元素, 营养成分丰富。



注: My 代表菌丝体; Pr 代表锥形期; Yb 代表柱形期; Mfb 代表漏斗期。组内不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

图 1 不同生长时期紫陀螺菌矿物质元素含量

Fig.1 Content of mineral elements of *Gomphus purpuraceus* at different growth stages

### 2.3 紫陀螺菌中氨基酸成分分析

不同生长时期紫陀螺菌的水解氨基酸含量见表 3。本次共检测 17 种氨基酸, 但未能检测到甲硫氨酸(Met), 这与谭爱华等<sup>[18]</sup>的研究结果一致。由表 3 可知, 不同生长时期紫陀螺菌的氨基酸含量各不相同, 但每种氨基酸含量的总体占比趋势基本一致。由于采用鲜样品, 各种氨基酸含量相对较低。从具体种类分析, 紫陀螺菌中谷氨酸(Glu)、天冬氨酸(Asp)、丙氨酸(Ala)、苏氨酸(Thr)和亮氨酸(Leu)等含量相对较高。漏斗期的紫陀螺菌中出现了半胱氨酸(Cys), 且酪氨酸(Tyr)含量大幅度攀升, 具体原因仍需进一步研究。总氨基酸含量方面, 柱形期含量最高, 菌丝体含量最低, 这说明随着菌丝体的生长成熟, 营养价值更高。

紫陀螺菌含有苯丙氨酸(Phe)、亮氨酸(Leu)、异亮氨酸(Ile)、缬氨酸(Val)、赖氨酸(Lys)、苏氨酸(Thr) 6 种人体必需氨基酸及婴幼儿必需的组氨酸(His)。

食用菌因含有丰富的呈味氨基酸而被大众所喜爱。呈味氨基酸分鲜味(Asp、Glu)、甜味(Thr、Ser、Gly、Ala、Arg)、苦味(Val、Met、Ile、Leu、Tyr、Phe、His)和无味(Cys、Lys、Pro)等, 这些氨基酸的含量和比例会直接影响食用菌的鲜美程度<sup>[19]</sup>。从表 3 可知, 紫陀螺菌中鲜味、甜味和苦味氨基酸含量较高, 无味氨基酸含量相对较低, 这与其特殊的风味有着紧密联系。

由表 4 可知, 紫陀螺菌菌丝体中除异亮氨酸(Ile)、半胱氨酸(Cys)和甲硫氨酸(Met)组合外, 各氨基酸质量分数均高于 FAO/WHO 模式值; 除赖氨酸(Lys)质量分数高于标准鸡蛋模式外, 其他氨基酸种类均低于标准鸡蛋模式值;

菌丝体的总氨基酸质量分数为 4 个阶段中最低。紫陀螺菌锥形期和柱形期的苏氨酸(Thr)和缬氨酸(Val)远超标准鸡蛋模式值, 柱形期的总氨基酸质量分数为 4 个阶段中最高。半胱氨酸(Cys)和甲硫氨酸(Met)组合仅在紫陀螺菌漏斗期出现, 但质量分数仍未达到 FAO/WHO 模式要求。由此可知, 不同生长时期紫陀螺菌的氨基酸组成大部分优于 FAO/WHO 模式, 但均不及标准鸡蛋模式。

RC 用于判定和计算限制氨基酸的强化量; SRC 用于评价蛋白质营养价值<sup>[20]</sup>; CS 是评价样品蛋白质中某一必需氨基酸的相对含量与标准鸡蛋蛋白中相应必需氨基酸相对含量的接近程度, CS 越接近或超过 1, 说明营养价值就越高<sup>[14]</sup>。由表 5 可知, 不同生长时期紫陀螺菌的限制氨基酸均为 Cys+Met 组。漏斗期的紫陀螺菌蛋白质营养价值最高, SRC 值为 66.49; 锥形期的紫陀螺菌蛋白质营养价值最低, SRC 值为 35.89。不同生长时期紫陀螺菌的每种氨基酸 CS 值各有差异。4 个不同生长时期紫陀螺菌的苏氨酸(Thr)、缬氨酸(Val) CS 值均接近或超过 1; 除柱形期, 赖氨酸(Lys)在其他 3 个生长时期的 CS 值均接近或超过 1, 说明紫陀螺菌中苏氨酸(Thr)、缬氨酸(Val)、赖氨酸(Lys)丰富, 营养价值较高。

### 2.4 紫陀螺菌的非靶代谢产物分析

利用 LC-Q-TOF-MS 平台, 对不同生长时期紫陀螺菌进行非靶代谢组定性和定量分析, 共检测到 13426 个峰, 其中正离子模式下 7436 个峰, 负离子模式下 5990 个峰。主成分分析(principal component analysis, PCA)结果见图 2。

表 3 不同生长时期紫陀螺菌氨基酸组成及其含量(g/100 g 鲜重)  
Table 3 Amino acid composition and content of *Gomphus purpuraceus* at different growth stages (g/100 g fresh weight)

氨基酸种类	菌丝体	锥形期	柱形期	漏斗期	
EAA	苏氨酸(Thr) <sup>△</sup>	0.100±0.069 <sup>d</sup>	0.218±0.059 <sup>b</sup>	0.222±0.031 <sup>a</sup>	0.166±0.061 <sup>c</sup>
	缬氨酸(Val) <sup>#</sup>	0.095±0.015 <sup>d</sup>	0.118±0.012 <sup>b</sup>	0.125±0.006 <sup>a</sup>	0.112±0.015 <sup>c</sup>
	异亮氨酸(Ile) <sup>#</sup>	0.083±0.027 <sup>c</sup>	0.066±0.021 <sup>d</sup>	0.119±0.028 <sup>a</sup>	0.107±0.018 <sup>b</sup>
	亮氨酸(Leu) <sup>#</sup>	0.149±0.029 <sup>d</sup>	0.177±0.021 <sup>c</sup>	0.207±0.015 <sup>a</sup>	0.190±0.030 <sup>b</sup>
	苯丙氨酸(Phe) <sup>#</sup>	0.103±0.025 <sup>c</sup>	0.102±0.021 <sup>c</sup>	0.145±0.023 <sup>a</sup>	0.138±0.023 <sup>b</sup>
	赖氨酸(Lys) <sup>*</sup>	0.164±0.009 <sup>b</sup>	0.179±0.018 <sup>a</sup>	0.130±0.021 <sup>d</sup>	0.144±0.018 <sup>c</sup>
NEAA	天冬氨酸(Asp) <sup>*</sup>	0.207±0.109 <sup>c</sup>	0.238±0.087 <sup>b</sup>	0.205±0.088 <sup>c</sup>	0.270±0.095 <sup>a</sup>
	谷氨酸(Glu) <sup>*</sup>	0.222±0.038 <sup>d</sup>	0.380±0.014 <sup>c</sup>	0.453±0.030 <sup>b</sup>	0.494±0.037 <sup>a</sup>
	甘氨酸(Gly) <sup>△</sup>	0.173±0.037 <sup>a</sup>	0.114±0.030 <sup>c</sup>	0.106±0.024 <sup>d</sup>	0.151±0.034 <sup>b</sup>
	丙氨酸(Ala) <sup>△</sup>	0.149±0.065 <sup>d</sup>	0.191±0.021 <sup>b</sup>	0.276±0.055 <sup>a</sup>	0.173±0.067 <sup>c</sup>
	脯氨酸(Pro) <sup>*</sup>	0.217±0.018 <sup>a</sup>	0.185±0.075 <sup>b</sup>	0.188±0.065 <sup>b</sup>	0.074±0.075 <sup>c</sup>
	丝氨酸(Ser) <sup>△</sup>	0.124±0.044 <sup>c</sup>	0.120±0.029 <sup>d</sup>	0.198±0.040 <sup>a</sup>	0.171±0.038 <sup>b</sup>
	精氨酸(Arg) <sup>△</sup>	0.190±0.005 <sup>b</sup>	0.198±0.035 <sup>a</sup>	0.168±0.035 <sup>c</sup>	0.134±0.032 <sup>d</sup>
	酪氨酸(Tyr) <sup>#</sup>	0.025±0.017 <sup>b</sup>	0.027±0.024 <sup>b</sup>	0.025±0.024 <sup>b</sup>	0.059±0.020 <sup>a</sup>
	半胱氨酸(Cys) <sup>*</sup>	-	-	-	0.038±0.064
组氨酸(His) <sup>#</sup>	0.078±0.018 <sup>b</sup>	0.061±0.011 <sup>c</sup>	0.097±0.022 <sup>a</sup>	0.058±0.019 <sup>c</sup>	
呈味氨基酸	鲜味氨基酸	0.429	0.618	0.658	0.764
	甜味氨基酸	0.736	0.841	0.970	0.795
	苦味氨基酸	0.533	0.551	0.718	0.664
	无味氨基酸	0.381	0.364	0.318	0.256
总 EAA	0.694	0.860	0.948	0.857	
总 NEAA	1.385	1.514	1.716	1.622	
总氨基酸	2.079	2.374	2.664	2.479	

注: \*表示鲜味氨基酸, #表示苦味氨基酸, △表示甜味氨基酸, \*表示无味氨基酸; 同行不同字母表示差异显著(P<0.05); 非必需氨基酸(non essential amino acid, NEAA); -表示无此项。

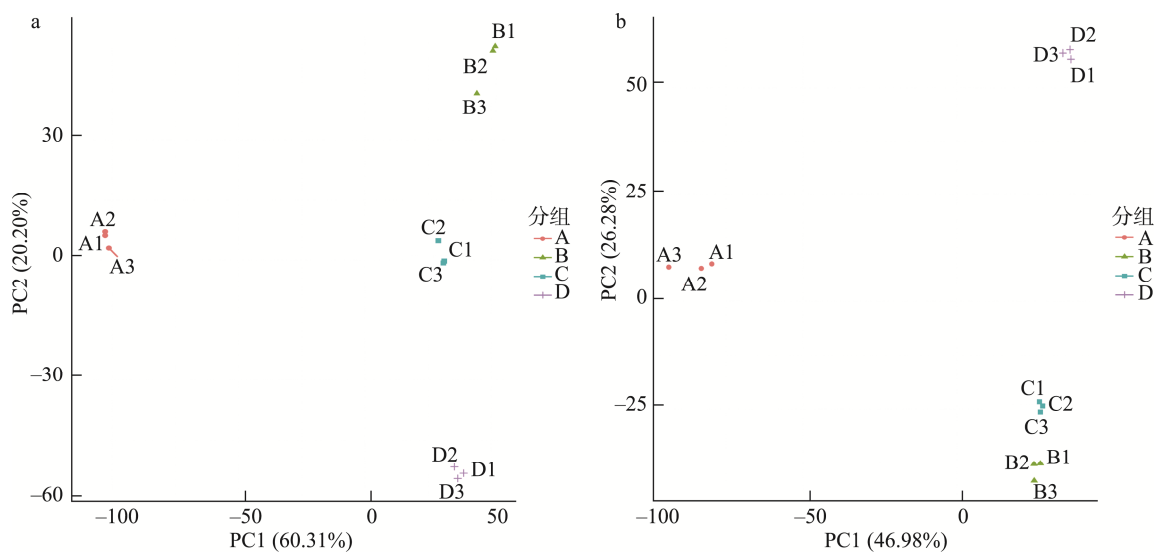
表 4 不同生长时期紫陀螺菌必需氨基酸占总氨基酸的质量分数与模式谱比较(%)  
Table 4 Comparison of the mass fraction of essential amino acid in total amino acids of *Gomphus purpuraceus* at different growth stages with the model spectrum (%)

氨基酸种类	菌丝体	锥形期	柱形期	漏斗期	FAO/WHO 模式	标准鸡蛋模式
苏氨酸(Thr)	4.81	9.19	8.34	6.70	4.0	5.1
缬氨酸(Val)	7.16	8.06	10.35	6.99	5.0	7.3
半胱氨酸+甲硫氨酸(Cys+Met)	0.00	0.00	0.00	1.52	3.5	5.5
异亮氨酸(Ile)	3.98	2.77	4.46	4.33	4.0	6.6
亮氨酸(Leu)	7.18	7.44	7.78	7.68	7.0	8.8
苯丙氨酸+酪氨酸(Phe+Tyr)	6.16	5.43	6.38	7.95	6.0	10.0
赖氨酸(Lys)	7.89	7.56	4.90	5.80	5.5	6.4
总氨基酸质量分数	37.18	40.45	42.20	40.98	35.0	49.7

表 5 不同生长时期紫陀螺菌必需氨基酸占总氨基酸的营养价值  
Table 5 Nutrition value of essential amino acid of *Gomphus purpuraceus* at different growth stages

氨基酸种类	RC				CS			
	菌丝体	锥形期	柱形期	漏斗期	菌丝体	锥形期	柱形期	漏斗期
苏氨酸(Thr)	1.18	2.03	1.75	1.46	0.94	1.80	1.63	1.31
缬氨酸(Val)	1.40	1.43	1.74	1.22	0.98	1.10	1.42	0.96
半胱氨酸+甲硫氨酸(Cys+Met)	0.00	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00	0.00	0.28
异亮氨酸(Ile)	0.98	0.61	0.94	0.94	0.60	0.42	0.68	0.66
亮氨酸(Leu)	1.01	0.94	0.93	0.95	0.82	0.85	0.88	0.87
苯丙氨酸+酪氨酸(Phe+Tyr)	1.01	0.80	0.89	1.15	0.62	0.54	0.64	0.79
赖氨酸(Lys)	1.41	1.22	0.75	0.92	1.23	1.18	0.77	0.91
SRC	52.20	35.89	39.55	66.49	-	-	-	-

注: -表示无此项。



注: A 代表菌丝体; B 代表锥形期; C 代表柱形期; D 代表漏斗期; 下同。

图 2 不同生长时期紫陀螺菌样品质控的正离子模式(a)和负离子模式(b) PCA 图

Fig.2 PCA results of samples and quality control in positive ion mode (a) and negative ion mode (b) at different growth stages of *Gomphus purpuraceus*

PCA 图可反映样本中代谢物丰度情况, 样本之间位置越近则越相似, 越远则反之<sup>[21]</sup>。从图 2 可知, 正离子模式下, 主成分 1 贡献率为 60.31%, 主成分 2 贡献率为 20.20%, 二者和为 80.51%。负离子模式下, 主成分 1 贡献率为 46.98%, 主成分 2 贡献率 26.28%, 二者和为 73.26%。紫陀螺菌样本在正、负离子模式下均表现出明显的分离趋势, 表明不同生长时期紫陀螺菌之间代谢物差异较大, 组内重复样本成分接近, 说明本次检测方法良好, 数据质量稳定, 可用于非靶代谢组学分析。

借助 KEGG、HMDB 和 Lipidmaps 3 个数据库, 共注释代谢物有 2450 个, 其中正离子模式下 1519 个, 负离子模式下 931 个。在 KEGG 数据库中, 所有生长时期紫陀

螺菌中代谢物质共注释到 677 种代谢物, 其中 465 种代谢物注释到具体的 KEGG 通路中。经过统计, 涉及代谢物最多的前 20 位代谢路径被展示在图 3a 中, 其中植物次级代谢生物合成(ko01060)有 30 种代谢物, 其次为精氨酸和脯氨酸代谢(ko00330, 22 种)、花生四烯酸代谢(ko00590, 21 种)、嘌呤代谢(ko00230, 21 种)、大环内酯生物合成(ko00522, 20 种)。值得注意的是, 外源性物质的生物降解和代谢中有 61 种代谢物被注释, 特别是药物代谢(ko00983, 18 种), 且甲苯、二甲苯、苯甲酸、氯苯、氯烯烃、糠醛、乙苯、苯乙烯等物质的降解途径也有代谢物被注释, 这说明紫陀螺菌可能具有降解外源性化学物质的能力。

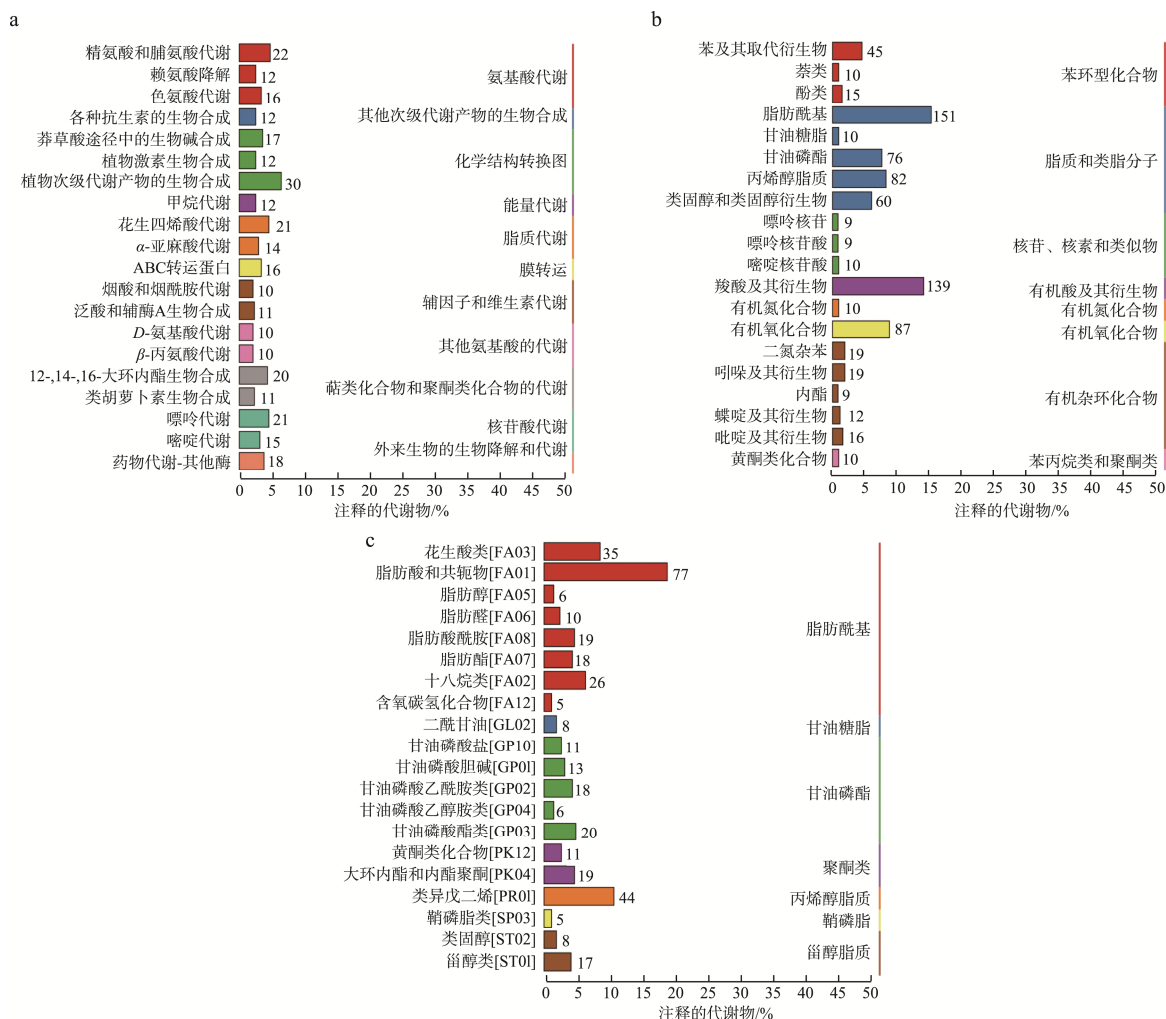


图 3 3 个数据库中紫陀螺菌代谢产物的主要注释结果

Fig.3 Major annotated results of metabolites of *Gomphus purpuraceus* in 3 databases

在 HMDB 数据库中, 总共有 996 种代谢物被注释。在 HMDB 具体分类中, 涉及代谢物前 20 位的如图 3b 所示, 代谢物主要集中在脂肪酰类(151 种)、羧酸及其衍生物(139 种)、有机氧化物(87 种)、丙烯醇脂质(82 种)、类固醇及其衍生物(60 种)、黄酮类化合物(10 种)、酚类(15 种)等类别中。

在 Lipidmaps 数据库中发现了 410 种脂类化合物, 主要包括脂肪酰类化合物、甘油糖脂类、甘油磷脂类、聚酮化合物、丙烯醇脂质类、鞘脂类以及甾醇脂质类, 其中脂肪酸及其共轭物涉及的代谢物最多, 达到 77 种(图 3c)。

通过计算不同生长时期紫陀螺菌中代谢物的差异倍数(fold change, FC)和显著性(P-value), 以  $FC \geq 2$  且  $P < 0.05$  为标准, 同时设定阈值  $VIP \geq 1$ , 筛选显著差异代谢物。通过组合差异代谢物并集层级聚类, 发现菌丝体与子实体中的代谢物差异较大, 不同发育阶段的子实体代谢物也存在一定差异(图 4a)。同时, 不同比较组也有其独有

的差异代谢物(图 4b)。

由表 6 可以看出, 锥形期、柱形期和漏斗期紫陀螺菌子实体中的代谢物相比菌丝体, 大部分差异代谢物都表现出上调, 这可能与紫陀螺菌子实体的形成和发育有关。然而随着子实体成熟, 上调差异代谢物数量逐渐下降, 而下调差异代谢物数量却逐渐上升, 尤其子实体比较组中, 上调差异代谢物数量呈断崖式下降, 这可能是由于菌丝体液体发酵环境和子实体生长环境不同所导致。

通过对差异代谢物进行 KEGG 富集分析, 主要代谢通路网络见图 5。在 A vs B 比较组中(图 5a), 差异代谢物主要集中在花生四烯酸代谢、大环内酯生物合成、二萜类生物合成、5-羟色胺神经突触和亚麻酸代谢; 精氨酸和脯氨酸代谢, 新霉素、卡那霉素和庆大霉素生物合成, 5-羟色胺神经突触, 色氨酸代谢以及  $\alpha$ -亚麻酸代谢通路是 A vs C 比较组中差异代谢物的富集通路(图 5b)。在 A vs D 中(图 5c), 差异代谢物除了主要富集在精氨酸和脯氨酸代谢, 新



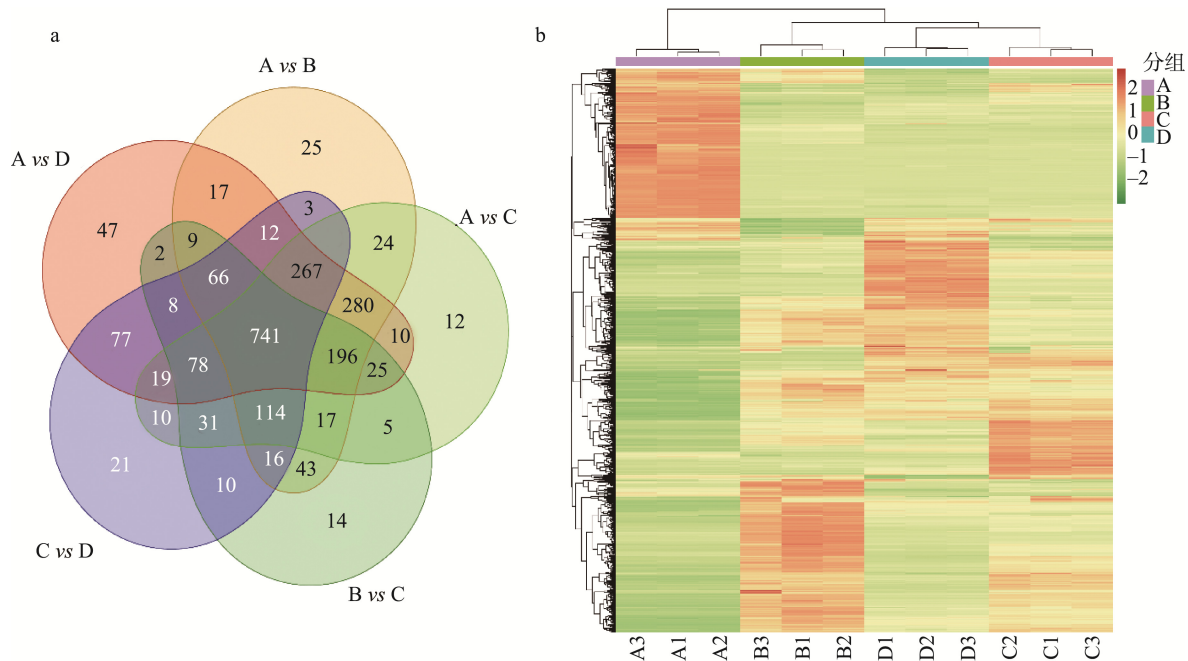


图 4 不同生长时期紫陀螺菌差异代谢物的韦恩图(a)和聚类热图(b)

Fig.4 Venn (a) and heatmap (b) of differential metabolites from *Gomphus purpuraceus* at different growth stages表 6 差异代谢物统计分析结果  
Table 6 Statistical results of different metabolites

比较组	总数量	总差异数	上调差异数	下调差异数
A vs B	2450	1870	1207	663
A vs C	2450	1869	1241	628
A vs D	2450	1854	1186	668
B vs C	2450	1375	628	747
C vs D	2450	1513	608	905

霉素、卡那霉素和庆大霉素生物合成,  $\alpha$ -亚麻酸代谢 3 个通路外, 还富集在了叶酸生物合成和核黄素代谢中。由 B vs C 可知(图 5d), 差异代谢物主要集中在 II 型聚酮类物质的生物合成、生物素代谢、柠檬烯和蒽烯降解、长寿调节通路(蠕虫)和维生素的消化吸收。而柱形期和漏斗期差异代谢物却主要富集在 ABC 转运蛋白、精氨酸生物合成、植物次级代谢物质合成、半胱氨酸和甲硫氨酸代谢以及类固醇生物合成等通路上(图 5e)。

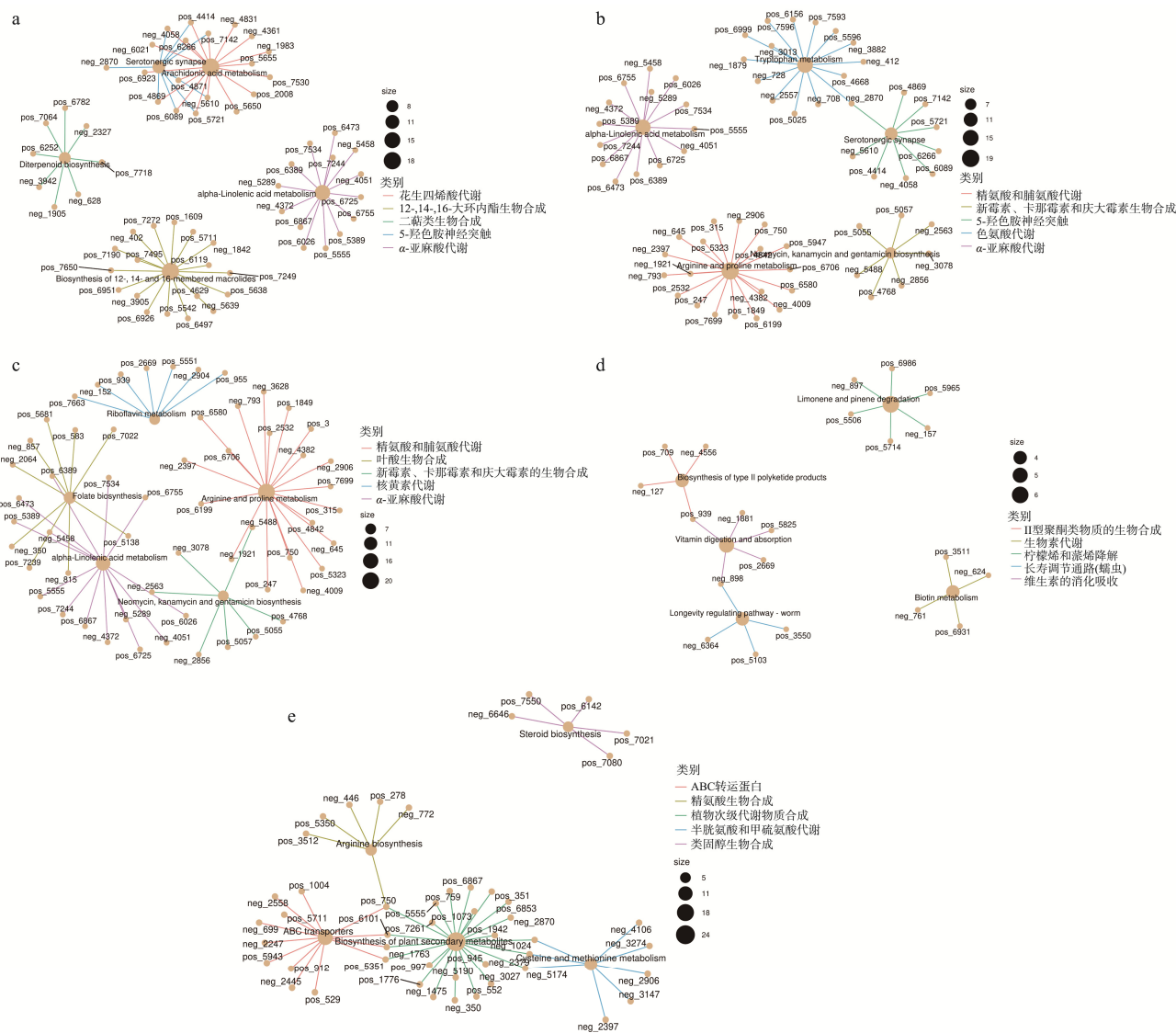
紫陀螺菌在菌丝体生长、子实体发育、成熟过程中, 不同组别的差异代谢物差异较大, A vs B 和 B vs C 的差异代谢物反映出紫陀螺菌子实体生长发育过程需要形成系列次级代谢物质, 同时需要一些维生素来调节其生理代谢, 而到了紫陀螺菌生长发育后期, ABC 转运蛋白、氨基酸的代谢以及次级代谢产物的生物合成可能暗示紫陀螺菌的能量生成途径转变以及生殖生长的开始。

### 3 讨论与结论

紫陀螺菌是食用历史较为悠久的野生食用菌。本研究对紫陀螺菌的常规理化指标、矿物质元素、氨基酸进行了深入分析。由分析结果可知, 紫陀螺菌蛋白质、脂肪、灰分及矿物质元素等指标都处于自然界中可食用大型真菌的正常范围内, 并无特殊异常。紫陀螺菌含有 6 种人体必需氨基酸以及婴幼儿必需的组氨酸; 苏氨酸、缬氨酸、赖氨酸的营养价值接近或超过标准鸡蛋蛋白; 漏斗期的紫陀螺菌蛋白质营养价值最高。

为更好地了解紫陀螺菌生长发育过程中的代谢产物, 本研究开展了不同生长时期紫陀螺菌非靶代谢产物分析。利用 KEGG、HMDB 和 Lipidmaps 3 个数据库, 共注释代谢物 2450 个, 说明紫陀螺菌代谢物十分丰富。通过对比代谢物发现, 紫陀螺菌不同生长时期代谢物种类和数量有一定差异, 并随着子实体的成熟整体呈下调趋势。

食用菌是多种独特的生物活性次生代谢产物的重要来源, 有些次生代谢产物表现出有益的生物活性, 但部分代谢产物也有一定生物毒性<sup>[22]</sup>。非靶代谢组在 HMDB 数据库中注释信息显示, 紫陀螺菌中含有丰富的脂肪酰类、羧酸及其衍生物、有机氧化物、丙烯醇脂类、类固醇及其衍生物、类黄酮类、酚类等物质, 其中黄酮类是一类重要的次生代谢产物, 也是许多食品和药品中的功能活性成分, 具有抗氧化、抗菌、抗癌等生理作用<sup>[23-24]</sup>。类黄酮物质的存在赋予了紫陀螺菌潜在的食药特性, 如槲皮素、柚皮素、水仙素、



注: a 代表 A vs B; b 代表 A vs C; c 代表 A vs D; d 代表 B vs C; e 代表 C vs D。“size”代表注释到 KEGG 数据库中相同通路的差异代谢物数量。

图 5 组间差异代谢物的 KEGG 富集网络  
Fig.5 KEGG enrichment network of different metabolites between group

芦丁等。生物碱是食用菌中另外一类重要的生物活性物质, 具有明显功能活性或毒性, 本研究共找出 39 种生物碱或与之相关的代谢物, 其中 KEGG 数据库中有 32 种、HMDB 数据库中有 36 种、Lipidmaps 数据库中有 3 种。通过 HMDB 进一步分类, 紫陀螺菌中生物碱主要包括石蒜科生物碱、托烷生物碱、麦角碱及其衍生物、吗啡类生物碱等。文献查阅发现, 托烷类、喜树碱类<sup>[25]</sup>、骆驼蓬总生物碱类<sup>[26]</sup>、异喹啉类<sup>[27]</sup>以及麦角碱类<sup>[28]</sup>是已被研究证实并应用于临床癌症治疗、止血、镇静止痛等方面的生物碱, 这说明紫陀螺菌具有潜在的药用价值, 但托烷类以及异喹啉类具有一定的神经毒性, 东莨菪碱<sup>[29]</sup>和罂粟碱<sup>[30]</sup>就属于上述两类。石蒜科生物碱的出现也暗示紫陀螺菌对部分食用

者具有一定的催吐作用<sup>[31]</sup>, 尽管这一作用尚未被消费者察觉。整体来讲, 紫陀螺菌含有丰富的代谢物质, 特别是具有生理活性的黄酮类和生物碱类。下一步将围绕紫陀螺菌的功效成分及功能验证进行研究, 以更好地将紫陀螺菌进行资源化利用。

参考文献

[1] 谭爱华, 张曙光, 刘发志. 紫陀螺菌营养成分分析[J]. 食用菌学报, 2001, 8(4): 15-18.

TAN AIH, ZHANG SG, LIU FZ. Analysis of nutrient components of *Gomphus purpuraceus* [J]. Acta Edulis Fungi, 2001, 8(4): 15-18.

[2] 谭爱华, 李方桥, 邓梦匀, 等. 珍稀食用菌紫陀螺菌三峡区域资源调查

- 与化学成分分析[J]. 中国食用菌, 2022, 41(2): 43–47.
- TAN AIH, LI FQ, DENG MY, *et al.* Resource investigation and chemical components analysis of rare edible fungus *Gomphus purpuraceus* in Three Gorges Area [J]. Edible Fungi Chin, 2022, 41(2): 43–47.
- [3] 谭爱华, 陈新, 刘发志, 等. 紫陀螺菌的分离鉴定及其液体发酵条件的研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(22): 215–222.
- TAN AIH, CHEN X, LIU FZ, *et al.* Isolation, identification and liquid fermentation of *Gomphus purpuraceus* [J]. Food Ferment Ind, 2023, 49(22): 215–222.
- [4] 谭爱华, 刘发志. 紫陀螺菌的形态特征及生长环境初报[J]. 中国食用菌, 2002, 21(1): 6–7.
- TAN AIH, LIU FZ. First report of the characteristic form and growing up environment of *Gomphus purpuraceus* [J]. Edible Fungi Chin, 2002, 21(1): 6–7.
- [5] JIANG M, YANG X, FANG L, *et al.* Purpuracolide: A new alliacane sesquiterpene from the basidiomycete *Gomphus purpuraceus* [J]. Z Naturforsch B, 2014, 63(8): 1012–1014.
- [6] 宋锡全, 王素英, 陈娟. 黔产紫陀螺菌营养成分分析[J]. 价值工程, 2012, 31(22): 297–299.
- SONG XQ, WANG SY, CHEN J. Analysis of the nutritive components of *Gomphus purpuraceus* in Guizhou [J]. Value Eng, 2012, 31(22): 297–299.
- [7] 谭爱华, 刘发志, 卢君, 等. 野生紫陀螺菌及其液体培养基菌丝体营养成分分析比较[J]. 食用菌, 2016, 38(6): 61–62.
- TAN AIH, LIU FZ, LU J, *et al.* Analysis and comparison of nutritional components of wild *Gomphus purpuraceus* and its liquid culture mycelia [J]. Edible Fungi, 2016, 38(6): 61–62.
- [8] SHARMA D, SINGH VP, SINGH NK. A review on phytochemistry and pharmacology of medicinal as well as poisonous mushrooms [J]. Mini Rev Med Chem, 2018, 18(13): 1095–1109.
- [9] CHANG ST, WASSER SP. Current and future research trends in agricultural and biomedical applications of medicinal mushrooms and mushroom products (review) [J]. Int J Med Mushroom, 2018, 20(12): 1121–1133.
- [10] GUO P, FURNARY T, VASILIOU V, *et al.* Non-targeted metabolomics and associations with per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) exposure in humans: A scoping review [J]. Environ Int, 2022, 162: 107159.
- [11] 王磊, 贾玉龙, 罗彦玉, 等. 基于 UHPLC-MS 非靶向代谢组学分析乳酸菌发酵方竹笋超细全浆的代谢差异[J]. 食品科学, 2023, 44(18): 200–213.
- WANG L, JIA YL, LUO YY, *et al.* Untargeted metabolomics based on UHPLC-MS spectrometry for analysis of differential metabolites in *Lactobacillus*-fermented ultra-fine whole pulp of *Chimonobambusa quadrangularis* shoot [J]. Food Sci, 2023, 44(18): 200–213.
- [12] 胡明珍, 刘慧燕, 潘琳, 等. 基于非靶向代谢组学分析副干酪乳杆菌发酵枸杞汁各阶段代谢差异[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 142–149.
- HU MZ, LIU HY, PAN L, *et al.* Non-targeted metabolomics analysis of differential metabolite profiles of Goji juice fermented by *Lactobacillus paracasei* [J]. Food Sci, 2022, 43(8): 142–149.
- [13] 杨晓玲, 席斌, 李维红, 等. 八眉猪不同部位肌肉氨基酸组成分析及营养评价[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 232–236, 291.
- YANG XL, XI B, LI WH, *et al.* Analysis and nutritional evaluation of amino acid composition in different muscle parts of Bamei pig [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(24): 232–236, 291.
- [14] 曲明清, 杨双双, 余昌霞, 等. 野生与栽培猴头菌营养成分比较及氨基酸评价[J]. 食用菌学报, 2020, 27(4): 131–142.
- QU MQ, YANG SS, YU CX, *et al.* Comparison of nutritional components and amino acid evaluation between wild and cultivated *Hericium erinaceus* [J]. Acta Edulis Fungi, 2020, 27(4): 131–142.
- [15] CHEN J, WU FN, WANG HC, *et al.* Identification of key taste components in *Baccaurea ramiflora* Lour. fruit using non-targeted metabolomics [J]. Food Sci Hum Well, 2023, 12(1): 94–101.
- [16] GENG YY, QIN LK, LIU YN, *et al.* Ultrastructure observation and transcriptome analysis of Chinese chestnut (*Castanea mollissima* Blume) seeds in response to water loss [J]. Food Biosci, 2021, 42(38): 101095.
- [17] 谭爱华, 刘发志, 张曙光. 紫陀螺菌蛋白质的营养评价[J]. 食用菌学报, 2003, (4): 24–28.
- TAN AIH, LIU FZ, ZHANG SG. The nutritional assessment of *Gomphus purpuraceus* protein [J]. Acta Edulis Fungi, 2003, (4): 24–28.
- [18] 谭爱华, 刘发志. 紫陀螺菌蛋白质的氨基酸组成分析[J]. 长江大学学报(自科版), 2006, 3(3): 172–173, 8.
- TAN AIH, LIU FZ. Analysis of amino acid composition of *Gomphus purpuraceus* protein [J]. J Yangtze Univ (Nat Sci Ed), 2006, 3(3): 172–173, 8.
- [19] 梁佳明. 牛肝菌鲜味肽及呈味特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- LIANG JM. Study on the flavor peptides and tasting characteristics of *Boletus edulis* [D]. Kunming: Journal of Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [20] 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. Nutritional evaluation of protein—ratio coefficient of amino acid [J]. Acta Nutr Sinica, 1988, (2): 187–190.
- [21] 李鑫磊, 俞晓敏, 林军, 等. 基于非靶向代谢组学的白茶与绿茶、乌龙茶和红茶代谢产物特征比较[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 197–203.
- LI XL, YU XM, LIN J, *et al.* Comparative metabolite characteristics of white tea with green tea, oolong tea and black tea based on non-targeted

- metabolomics approach [J]. *Food Sci*, 2020, 41(12): 197–203.
- [22] SANDARGO B, CHEPKIRUI C, CHENG T, *et al.* Biological and chemical diversity go hand in hand: Basidiomycota as source of new pharmaceuticals and agrochemicals [J]. *Biotechnol Adv*, 2019, 37(6): 107344.
- [23] 生吉萍, 宿文凡, 石家豪, 等. 茶树花黄酮类化合物研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(4): 1019–1026.
- SHENG JP, SU WF, SHI JH, *et al.* Research progress of flavonoids in tea flower [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(4): 1019–1026.
- [24] SUNG J, SUH JH, WANG Y. Effects of heat treatment of mandarin peel on flavonoid profiles and lipid accumulation in 3T3-L1 adipocytes [J]. *J Food Drug Anal*, 2019, 27(3): 729–735.
- [25] ZUNINO F, PRATESI G. Camptothecins in clinical development [J]. *Expert Opin Inv Drug*, 2004, 13(3): 269–284.
- [26] JAVEED M, RASUL A, HUSSAIN G, *et al.* Harmine and its derivatives: Biological activities and therapeutic potential in human diseases [J]. *Bangl J Pharmacol*, 2018, 13(3): 203–213.
- [27] YUN D, YOON SY, PARK SJ, *et al.* The anticancer effect of natural plant alkaloid isoquinolines [J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(4): 1653.
- [28] 韩增飞. 麦角碱高产菌株的选育及发酵条件研究[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2009.
- HAN ZF. Breeding of high-producing ergot alkaloid strain and optimization of fermentation condition [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2009.
- [29] MUHAMMAD T, ALI T, IKRAM M, *et al.* Melatonin rescue oxidative stress-mediated neuroinflammation/neurodegeneration and memory impairment in scopolamine-induced amnesia mice model [J]. *J Neuroim Pharmacol*, 2019, 14(2): 278–294.
- [30] ZHOU X, ALAMBYAN V, OSTERGARD T, *et al.* Prolonged intracisternal papaverine toxicity: Index case description and proposed mechanism of action [J]. *World Neurosurg*, 2018, 109: 251–257.
- [31] 宋德芳, 石子琪, 辛贵忠, 等. 石蒜科生物碱的药理作用研究进展[J]. *中国新药杂志*, 2013, 22(13): 1519–1524.
- SONG DF, SHI ZQ, XIN GZ, *et al.* Research advances in pharmacological effects of amaryllidaceae alkaloids [J]. *Chin J New Drug*, 2013, 22(13): 1519–1524.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

### 作者简介



刘亚娜, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为森林食品资源开发与应用。  
E-mail: muxin5058@sina.com



耿阳阳, 博士, 副研究员, 主要研究方向为森林食品资源开发与应用。  
E-mail: yygengfood@sina.cn