

贮藏温度对新鲜乌天麻品质及真菌多样性的影响

张楠欣¹, 王瑞^{1*}, 孙海燕², 吉宁¹, 马超¹, 雷霁卿¹, 李灿³, 龙超¹

(1. 贵阳学院食品与制药工程学院, 贵州贵阳 550000) (2. 陕西理工大学生物科学与工程学院, 陕西汉中 723000) (3. 贵阳学院, 山地珍稀动物与经济昆虫重点实验室, 贵州贵阳 550000)

摘要: 为研究贮藏温度对新鲜乌天麻品质和真菌群落结构的影响, 将新鲜乌天麻块茎置于不同温度(1~3、3~5和5~7 °C, 相对湿度85%~95%)条件下贮藏30 d, 分别对其品质、功效成分以及真菌多样性变化进行分析。对采后品质的分析结果表明, 相较于1~3 °C和5~7 °C处理组, 3~5 °C处理组能够维持样品子实体内较高的能量电荷(1~3 °C: 0.26; 3~5 °C: 0.40; 5~7 °C: 0.32); 抑制样品中丙二醛和脯氨酸含量(1~3 °C: 12.04 mmol/g和19.56 μg/g; 3~5 °C: 9.61 mmol/g和16.44 μg/g; 5~7 °C: 10.79 mmol/g和17.79 μg/g)的积累, 减缓腐烂率的上升(1~3 °C: 96.67%; 3~5 °C: 8.33%; 5~7 °C: 63.66%); 3~5 °C处理组样品的硬度(11.84 N)与5~7 °C处理组(11.67 N)无明显差异, 而显著低于1~3 °C处理组(19.86 N)。对功效成分的分析结果表明, 3~5 °C处理组能够有效延缓天麻素、对羟基苯甲醛、对羟基苯甲醇、腺苷以及总氨基酸含量下降。对真菌多样性变化的分析结果表明, 3~5 °C处理组较其他两个条件更能有效抑制新鲜乌天麻表面枝孢霉属(*Cladosporium*)、青霉属(*Penicillium*)和土赤壳属(*Ilyonectria*)相对丰度上升和整体真菌多样性的变化。综上, 3~5 °C是新鲜乌天麻适宜的贮藏温度, 该研究可为新鲜乌天麻贮藏品质的保持提供理论依据。

关键词: 鲜乌天麻; 温度; 品质; 真菌多样性

文章编号: 1673-9078(2025)03-164-174

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.3.0022

Effect of Storage Temperature on the Quality and Fungal Diversity of Fresh *Gastrodia elata*

ZHANG Nanxin¹, WANG Rui^{1*}, SUN Haiyan², JI Ning¹, MA Chao¹, LEI Jiqing¹, LI Can³, LONG Chao¹

(1. College of Food and Pharmaceutical Engineering, Guiyang University, Guiyang 550000, China)

(2. School of Biological Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

(3. Key Laboratory of Mountain Rare Animals & Economic Insects, Guiyang University, Guiyang 550000, China)

Abstract: To investigate the effect of storage temperature on the quality and fungal community structure of fresh black *Gastrodia elata*, fresh *Gastrodia elata* tubers were stored at different temperatures (1~3 °C, 3~5 °C, and 5~7 °C; relative humidity: 85%~95%) for 30 days. The changes in quality, functional components, and fungal diversity were analyzed. The results of post-harvest quality analysis revealed that, compared with the treatments at 1~3 °C and 5~7 °C, the treatment at 3~5 °C

引文格式:

张楠欣,王瑞,孙海燕,等.贮藏温度对新鲜乌天麻品质及真菌多样性的影响[J].现代食品科技,2025,41(3):164-174.

ZHANG Nanxin, WANG Rui, SUN Haiyan, et al. Effect of storage temperature on the quality and fungal diversity of fresh *Gastrodia elata* [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(3): 164-174.

收稿日期: 2024-01-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1601001-4-4); 黔科合成果[2022]一般070; 贵州省高等学校大学生创新创业项目(2023); 贵阳学院研究生基金(GYU-YJSL2022J-48)

作者简介: 张楠欣(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品贮藏与保鲜, E-mail: zhangnanxin2022@126.com

通讯作者: 王瑞(1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品的贮藏, E-mail: wangrui060729@126.com

maintained a higher energy charge in the fruiting body of the sample (1~3 °C : 0.26; 3~5 °C : 0.40; 5~7 °C : 0.32); inhibited the accumulation of malondialdehyde and proline contents (1~3 °C : 12.04 mmol/g and 19.56 µg/g; 3~5 °C : 9.61 mmol/g and 16.44 µg/g; 5~7 °C : 10.79 mmol/g and 17.79 µg/g), and slowed down the increase of rot rate (1~3 °C : 96.67%; 3~5 °C : 8.33%; 5~7 °C : 63.66%). The hardness of the samples at 3~5 °C (11.84 N) was insignificantly different from that of the group at 5~7 °C (11.67 N), but significantly lower than that of the group at 1~3 °C (19.86 N). The analysis results of functional components indicated that the treatment at 3~5 °C effectively delayed the decline of gastrodin, p-hydroxybenzaldehyde, p-hydroxybenzyl alcohol, adenosine, and total amino acids content. The results of fungal diversity analysis showed that the treatment at 3~5 °C inhibited more effectively the increase in relative abundance of *Cladosporium*, *Penicillium* and *Ilyonectria* as well as the overall change in fungal diversity on the surface of fresh black *Gastrodia elata*. In conclusion, 3~5 °C was the suitable storage temperature for fresh black *Gastrodia elata*, and this study provides a theoretical basis for maintaining the storage quality of fresh black *Gastrodia elata*.

Key words: fresh *Gastrodia elata*; temperature; quality; fungal diversity

天麻 (*Gastrodia elata* Bl.) 作为传统中药材, 属于兰科天麻属 (*Gastrodia*), 历史悠久。其富含活性成分如天麻素、天麻多糖、巴利森苷等。截至 2023 年 11 月, 国家卫生健康委员会、国家市场监督管理总局将天麻列入传统食药两用物质目录。药理研究表明, 天麻具有降低血压、减少血脂、镇痛、镇静以及缓解帕金森综合症等效果^[1,2]。近年来, 新鲜乌天麻在餐桌上备受消费者关注, 尤其在云南、贵州和四川等省份, 销售量显著增长。然而, 采后腐烂问题严重影响了商品价值和产业效益^[2], 为维持其品质、最大化市场潜力, 解决采后贮运技术成为亟待解决的问题。

温度是农产品贮藏保鲜过程中的关键因素。不同农产品根据其特性有着各自最佳贮藏温度, 例如苹果^[3]、香蕉^[4]、亚洲梨^[3]和辣椒^[5]分别适宜于 0~1、14、0~0.25 和 2 °C 的温度条件下贮藏, 不恰当的温度可能导致农产品出现冷害或冻害现象。Prange^[3]研究表明, 苹果和亚洲梨在高于或低于其理想贮藏温度的环境中贮藏, 会加速衰老过程或引起冻结和冷害。He 等^[4]通过对香蕉在不同温度 (7、14 和 25 °C) 下贮藏研究发现, 14 °C 条件能够维持香蕉较高的三磷酸腺苷 (Adenosine Triphosphate, ATP)、二磷酸腺苷 (Adenosine Diphosphate, ADP) 含量和能量电荷 (Energy Charge, EC) 水平, 同时降低单磷酸腺苷 (Adenosine Monophosphate, AMP) 含量, 从而延缓其衰老。相反, 7 °C 低温胁迫会降低 ATP、ADP 含量和 EC 值, 导致能量供应不足, 加剧果实衰老和腐烂。Li 等^[6]研究表明, 在 0 °C 下贮藏香梨 15 d 后, 果实中的丙二醛 (Malonaldehyde, MDA) 含量虽有上升趋势, 但仍显著低于对照组。

脯氨酸含量在贮藏初期显著增加, 之后逐渐下降并趋近于对照组水平。

近年来, 鲜天麻块茎的采后保鲜得到了一定关注。陈琛等^[7]报道了 6 种保鲜剂 (茶多酚、溶菌酶、夏枯草提取物、壳聚糖、异抗坏血酸钠、柠檬酸) 对鲜天麻保鲜效果的影响。研究结果表明, 6 种保鲜剂均能够有效维持贮藏期间鲜天麻品质。其中异抗坏血酸钠保鲜效果最好, 最能有效减缓 MDA 的积累, 保持细胞膜完整性, 起到维持硬度的作用, 延缓鲜天麻子实体内营养成分的转化速率, 抑制腐烂率 (异抗坏血酸钠组: 27.80%; 对照组: 42.85%) 的上升。马骏等^[8]报道了 3 袋 1-MCP 熏蒸鲜天麻能够显著抑制腐烂指数的上升 (3 袋 (0.3 g/袋) 1-MCP 熏蒸处理组: 2.51%, 对照组: 4.98%), 延缓鲜天麻的呼吸速率, 减缓失重的增加, 并保持多糖、蛋白质和 VC 含量的相对稳定。曹森等^[9]研究表明, 经 25 mg/mL 二氧化氯处理后的鲜天麻块茎低温贮藏 180 d 后腐烂率仅为 18.78%, 而对照组为 48.62%。曹艺颖等^[10]报道了独脚金内酯类似物 (7FGR24) 在贮藏期间可显著抑制天麻的失重、维持较高的过氧化氢酶活性, 提高鲜天麻抗氧化能力, 降低 MDA 含量, 发挥保鲜作用。

果蔬在采后贮藏过程中会由真菌引起侵染病害, 导致果蔬在贮藏期间品质下降和腐烂^[11]。近几年天麻致病菌相关研究中, 主要集中在表面致病真菌的相关研究。因此经过系统查阅文献, 确定引起天麻病害的病原真菌分别为是枝孢霉属 *Cladosporium*、木霉属 *Trichoderma*、青霉属 *Penicillium*、枝穗霉属 *Clonostachys*、土赤壳属真菌 *I. cyclaminicola*、*I. robusta* 和镰刀菌属

Fusarium^[12,13]。

经系统检索,未见贮藏温度对新鲜乌天麻块茎品质、功效成分以及微生物多样性的影响研究。本研究通过将新鲜乌天麻块茎置于不同温度条件下(1~3、3~5和5~7℃,相对湿度:85%~95%)贮藏30 d,考察贮藏温度对新鲜乌天麻块茎生理品质、功效成分及表面真菌群落变化的影响,为后续开发有效的新鲜乌天麻保鲜技术提供基础数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

2022年11月13日,新鲜乌天麻块茎采挖于贵州省毕节市百里杜鹃管理区普底乡红丰村(27°12'57"N, 105°54'33"E)。挑选新鲜,大小均一,无明显机械损伤的乌天麻块茎。采挖结束后在4 h内运回实验室。

三氯乙酸、2-硫代巴比妥酸、氢氧化钠、浓盐酸、硼酸、二水合磷酸二氢钠、十二水合磷酸氢二钠(纯度>90%)、无水乙醇、甲醇、乙腈(色谱级),国药集团药业股份有限公司;天麻素标准品、腺苷标准品、对羟基苯甲醇标准品和对羟基苯甲醛标准品(纯度≥99%),国药集团药业股份有限公司;邻苯二甲醛、FMOC-Cl乙腈溶液、3-巯基丙酸、17种氨基酸混合标准品(纯度>90%),Sigma公司;AxyPrepDNA凝胶回收试剂盒,Axygen公司。

1.2 仪器与设备

EZ~SX型质构仪、LC-16液相色谱仪,日本岛津公司;Cary60紫外-可见分光光度计,Agilent公司;RIGOL L-3000高效液相色谱仪,北京普源精仪科技有限公司;医药冷藏柜,澳柯玛公司;台式冷冻高速离心机MTX-150、PCR仪SBT9610-230V, Thermo Fisher公司。

1.3 新鲜乌天麻块茎贮藏前处理

采挖后的鲜乌天麻块茎至阴凉环境(温度:10~16℃,相对湿度:40%~45%)愈伤48 h,愈伤结束后选择60个天麻置于10~16℃8 h后进行初始样品相关指标测定。随后将剩余天麻随机分为3组并放入周转筐(每组3个平行,每平行1框,每框20个),将分装好的天麻分别放置于1~3、3~5和5~7℃环境中预冷24 h。预冷结束后,将周转筐用厚度为20 μm的PE保鲜膜密封,并在保鲜膜上打孔(使用直径为0.5 mm打孔器均匀打18个

孔)。置于不同温度(1~3、3~5、5~7℃,相对湿度:85%~95%)的医药冷藏柜中贮藏30 d。30 d后进行相关指标测定。测定相关指标前,所有温度处理组需在10~16℃进行回温8 h。

1.4 新鲜乌天麻相关指标测定

1.4.1 腐烂率

采用计数法测定新鲜乌天麻的腐烂率,将新鲜乌天麻表面发生霉变或出现黑斑的块茎记作腐烂,按照(1)计算。

$$D = \frac{D_1}{D_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

D ——新鲜乌天麻腐烂率, %;

D_1 ——新鲜乌天麻腐烂个数, 个;

D_2 ——新鲜乌天麻总个数, 个。

1.4.2 硬度

使用日本岛津EZ~SX型质构仪进行新鲜乌天麻块茎硬度的测定。使用探头直径为2 mm的P/2探头,对鲜天麻块茎进行穿刺测试。穿刺测定前、中、后速度均为30 mm/s,穿刺深度为15 mm($n=24$),单位为N。

1.4.3 MDA含量

参考Gao等^[14]方法测定样品MDA含量。取0.5 g鲜天麻样品中加入5 mL 100 g/L三氯乙酸(TCA)冰浴环境均质。匀浆离心10 min(3 000 r/min, 4℃),取2 mL上清液加入等量6.7 g/L硫代巴比妥酸(TBA),放进沸水中水浴30 min,空白对照以添加TCA代替提取液。水浴结束后快速冷却,再次进行离心10 min(3 000 r/min, 4℃)。取上清液测定OD₄₅₀、OD₅₃₂、OD₆₀₀值。MDA含量以mmol/g表示,MDA值按公式(2)计算:

$$B = \frac{c \times V \times V_1}{V_s \times m \times 1000} \quad (2)$$

式中:

B ——丙二醛(MDA)含量, mmol/g;

c ——反应液中MDA的浓度, $c = 6.45 \times (OD_{532} - OD_{600}) - 0.56 \times OD_{450}$, mmol/g;

OD₄₅₀、OD₅₃₂、OD₆₀₀——450、532、600 nm波长下样品的吸光值;

V_1 ——反应液总体积, mL;

V ——提取液总体积, mL;

V_s ——测定时所取样品体积, mL;

m —样品质量, g.

1.4.4 ATP、ADP、AMP含量及能荷

参考 Lin 等^[15]的方法略微修改测定 ATP、ADP 和 AMP 含量。称取 5.0 g 冷冻天麻样品, 加入 3 mL 0.6 mol/L 高氯酸溶液。样品在冰浴中均质, 匀浆在 4 °C 下以 12 000 r/min 离心 15 min, 取上清液 3 mL 用 1 mol/L 氢氧化钾调 pH 值至 6.5~6.8。在冰浴条件下沉淀 30 min, 随后 4 °C, 12 000 r/min 条件下离心 10 min。取上清液通过 0.45 μm 膜过滤, 上机待测。

能量电荷计算公式:

$$E = \frac{C_1 + \frac{1}{2} C_2}{C_1 + C_2 + C_3} \quad (3)$$

式中:

E —所测样品中能量电荷 (EC);

C_1 —所测样品中 ATP 含量, μg/g;

C_2 —所测样品中 ADP 含量, μg/g;

C_3 —所测样品中 AMP 含量, μg/g。

1.4.5 天麻素、对羟基苯甲醇、腺苷、对羟基苯甲醛含量

参考李莹等^[16]方法略微修改测定天麻素、对羟基苯甲醇、腺苷、对羟基苯甲醛含量。精密称取 0.5 g 鲜品粉碎, 加入一定量 80% (V/V) 甲醇, 转移至具塞锥形瓶中, 再加入 80% (V/V) 甲醇至 20 mL, 称定质量, 超声 (200 W、40 kHz) 45 min 后放冷至室温, 用 80% (V/V) 甲醇补足缺失的质量。精密量取 5 mL 上清液于具塞试管中, 加入 10 mL 甲醇并振摇 5 min, 白色絮状沉淀产生完全后离心 10 min (4 000 r/min, 4 °C), 浓缩上清液残渣用 80% 甲醇溶解后转移至 5 mL 量瓶中, 定容后摇匀, 0.45 μm 微孔滤膜进行滤过, 取过滤液, 上机待测。结果以 μg/g 表示。

1.4.6 游离氨基酸含量

参考 Reis 等^[17]方法略微修改测定游离氨基酸含量。精密称取 0.1 g 样品与 6 mol/L 的 HCl 完全混合, 再向瓶中充入氮气 1 min 后封闭瓶口, 并在 110 °C 下水解 22 h。水解完成后, 进行离心 10 min (4 °C, 5 000 r/min), 收集上清液, 随后将上清液与 H₂SO₄ 混合。在 25 °C 黑暗条件下静置 30 min, 再次进行离心 10 min (4 °C, 5 000 r/min)。过滤后, 上机检测。游离氨基酸含量以 μg/g 表示。

1.4.7 真菌群落分析

DNA 提取、扩增和测序建库: 样品总 DNA 采用十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 方法提取, 使用 NanoDrop 2000 检测总 DNA 的数量和浓度。通用引物为 ITS1F (5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3') 和 ITS2 (5'-GCTGCGTTCTTCATCGATGC-3'), 以基因组 DNA 为模板, 根据测序区域的选择, 使用带 barcode 的特异引物, 进行 PCR, 确保扩增效率和准确性。PCR 扩增物从琼脂糖凝胶电泳中提取, 并使用 Axyprep DNA 凝胶提取试剂盒进行纯化。随后进行测序。

生物信息学分析: Illumina MiSeq 测序生成原始双端序列。预处理, 剪切掉原始测序序列中的引物序列后, 使用 FLASH 软件将 Pairedend 读取进行合并, 剪接序列形成原始 reads。随后, 对数据进行降噪, 获得准确的 reads。最后进行比较、识别、过滤。然后, 使用 Uparse 软件将相似度在 97% 以上的有效 read 生成操作分类单元 (OTUs)。使用 QIIME 软件包选择每个 OTU 的代表性读取。对测序后得到的 OTU 表进行抽平处理, 过滤一些低丰度的 OTU。采用 Chao1 指数和 Shannon 指数的 α 多样性估算样品的微生物多样性根据分类学水平属类水平下, 进行真菌群落结构分析。

1.5 数据处理与分析

采用 SPSS 26.0 软件进行数据分析, Origin 2021 进行绘图, 采用 Cytoscape 和 Centiscape 2.2 插件进行真菌属级网络关系分析。

2 结果与分析

2.1 贮藏温度对新鲜乌天麻块茎外观和腐烂率的影响

各处理组固定选取 6 颗新鲜乌天麻块茎在贮藏 0 d 和 30 d 进行外观拍照。由图 1 可见, 贮藏 30 d, 温度直接影响新鲜乌天麻块茎外观, 1~3 °C 和 5~7 °C 处理组鲜天麻块茎发生腐烂, 其表面生长出白色菌丝, 而 3~5 °C 处理组新鲜乌天麻块茎与贮藏前无明显差别。

腐烂是评价农产品贮藏效果的最直观指标。通过统计各处理组样品的腐烂情况, 由图 2 可知, 1~3 °C 处理组的新鲜乌天麻子实体腐烂率 (96.67%) 最高, 其次 5~7 °C 处理组的腐烂率为 63.66%。而贮藏于 3~5 °C 的新鲜乌天麻腐烂率仅为 8.33%。

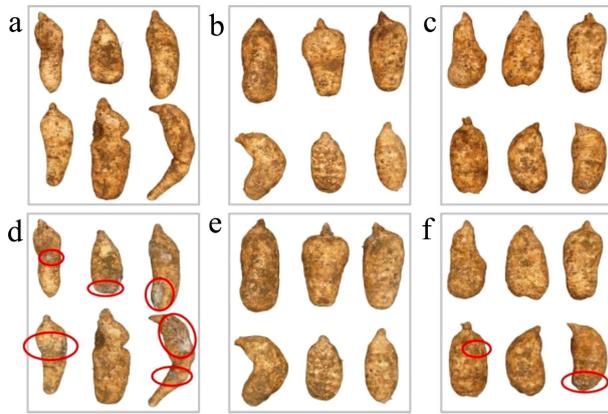


图 1 不同贮藏温度对新鲜乌天麻块茎外观的影响

Fig.1 Effect of storage temperatures on the appearance of fresh *Gastrodia elata* tubers

注：图中字母 a、b 和 c 分别表示初始组中新鲜乌天麻块茎的外观照；d、e 和 f 分别表示贮藏 30 d，1~3 °C 处理组、3~5 °C 处理组和 5~7 °C 处理组的新鲜乌天麻块茎外观照。

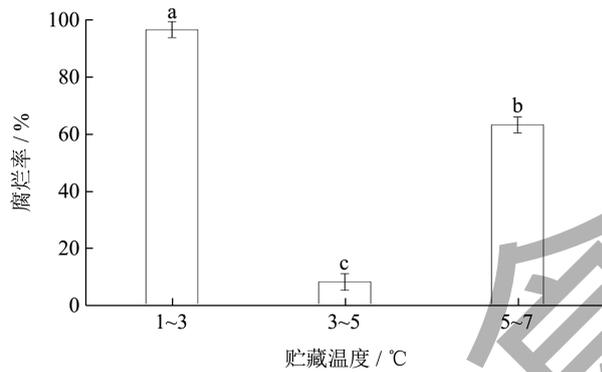


图 2 不同温度条件对新鲜乌天麻块茎腐烂率的影响

Fig.2 Effect of temperature conditions on the rotting rate of fresh *Gastrodia elata* tubers

注：图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 贮藏温度对新鲜乌天麻块茎硬度的影响

农产品的质地变化是其采后成熟和新陈代谢过程中的关键指标之一，它直接关联到产品的采后品质和贮藏寿命^[18]。由图 3 可见，新鲜乌天麻块茎初始硬度为 11.30 N。经过 30 d 贮藏，1~3 °C 处理组新鲜乌天麻块茎硬度值 (19.86 N) 显著高于初始块茎 ($P < 0.05$)，3~5 °C (11.84 N) 和 5~7 °C (11.67 N) 处理组与初始块茎硬度值无显著差异 (图 3, $P > 0.05$)。推测新鲜乌天麻块茎在 1~3 °C 下可能发生冷害，导致块茎内部组织产生木质化，从而使新鲜乌天麻块茎硬度升高。同样的结果在 Cai 等^[19]的枇杷低温贮藏研究中有报道。

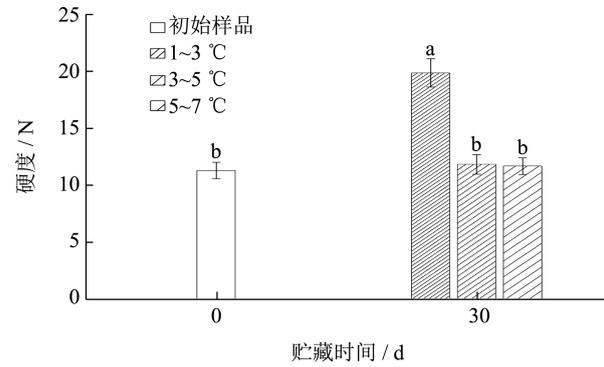


图 3 不同贮藏温度对新鲜乌天麻块茎硬度的影响

Fig.3 Effect of storage temperatures on the hardness of fresh *Gastrodia elata* tubers

2.3 贮藏温度对新鲜乌天麻块茎中丙二醛、脯氨酸含量的影响

丙二醛是一种细胞膜过氧化产物，其含量可反应细胞膜的损伤程度^[20]。如图 4a 所示，初始样品中 MDA 含量为 4.68 mmol/g；贮藏 30 d，不同温度处理组中样品 MDA 含量分别为 12.04 mmol/g (1~3 °C)、9.61 mmol/g (3~5 °C)、10.79 mmol/g (5~7 °C)。植物体中游离脯氨酸是重要的渗透调节因子，其含量的增加与植物细胞受到的损伤程度密切相关^[20]。如图 4b 所示，初始样品中脯氨酸含量为 13.95 μg/g；贮藏 30 d，3~5 °C 处理组新鲜乌天麻块茎中游离脯氨酸含量最低 (16.44 μg/g)，显著低于 1~3 °C (19.56 μg/g) 和 5~7 °C 处理组 (17.79 μg/g) ($P < 0.05$)。

一般来说，MDA 的含量越高，意味着植物细胞的损伤程度就越严重；当植物受到胁迫时，其脯氨酸含量增加，从而调节细胞内渗透压，维持水分平衡，维持细胞内相关代谢酶活性。因此，脯氨酸含量的增加与植物的损伤程度有关^[21,22]。随着贮藏时间的延长，所有处理组中样品的 MDA 和脯氨酸含量均有上升。贮藏 30 d，1~3 °C 和 5~7 °C 条件的块茎子实体内 MDA 和脯氨酸含量显著高于 3~5 °C 处理组，推测新鲜乌天麻块茎在 1~3 °C 条件下发生冷害，其子实体内细胞结构遭到破坏，导致脯氨酸含量显著升高；5~7 °C 处理组腐烂率显著高于 3~5 °C 处理组，推测原因是 5~7 °C 条件下新鲜乌天麻块茎内细胞的损伤程度较 3~5 °C 处理组更严重，加快新鲜乌天麻块茎的衰老，导致其丙二醛、脯氨酸含量高于 3~5 °C 处理组 (图 2、图 4, $P < 0.05$)。

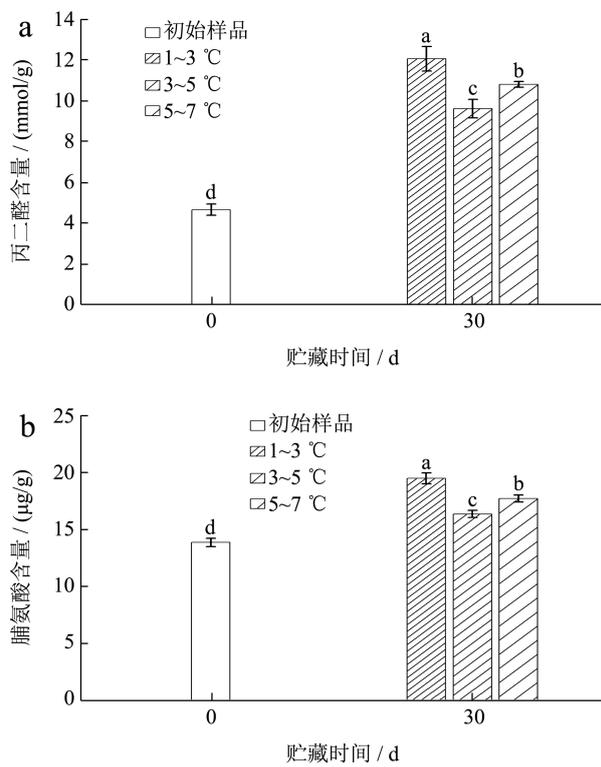


图4 不同贮藏温度对新鲜乌天麻块茎内丙二醛 (a) 和脯氨酸 (b) 含量的影响

Fig.4 Effect of storage temperatures on malondialdehyde (a) and proline (b) content in fresh *Gastrodia elata* tubers

2.4 贮藏温度对新鲜乌天麻块茎中ATP、ADP、AMP含量及能荷的影响

采后农产品的成熟、衰老、褐变和冷害与细胞能量水平不足密切相关, 可以用ATP、ADP、AMP含量和EC变化来阐述说明^[23]。图5可见, 初始样品块茎中ATP、ADP含量较高(ATP: 10.83 μg/g; ADP: 7.64 μg/g), 但AMP含量水平较低(7.11 μg/g)。新鲜乌天麻块茎贮藏30 d, 3种不同温度条件下贮藏的新鲜乌天麻块茎中ATP和ADP含量与初始块茎相比, 总体都有所下降(图5a和5b)。相反, 3种不同贮藏温度的新鲜乌天麻块茎中AMP含量较初始样品都有所上升(图5c)。贮藏30 d, 3~5 °C处理组中新鲜乌天麻的ATP和ADP含量分别为30.09 μg/g和10.13 μg/g, 其含量均显著高于1~3 °C和5~7 °C处理组中新鲜乌天麻的ATP(1~3 °C, 28.43 μg/g; 3~5 °C, 29.28 μg/g)和ADP含量(1~3 °C, 8.44 μg/g; 3~5 °C, 9.13 μg/g) ($P < 0.05$); 3~5 °C处理组新鲜乌天麻块茎AMP含量为30.95 μg/g, 显著低于1~3 °C(34.88 μg/g)和5~7 °C(34.76 μg/g)处理组新鲜乌天麻块茎中AMP含量($P < 0.05$)。

图5d可见, 3种温度处理组贮藏30 d, 所有处

理组中新鲜乌天麻块茎的EC值都有所下降, 然而3~5 °C处理组新鲜乌天麻块茎中EC值维持较高水平(0.40), 显著高于1~3 °C(0.26)和5~7 °C(0.32)处理组 ($P < 0.05$)。

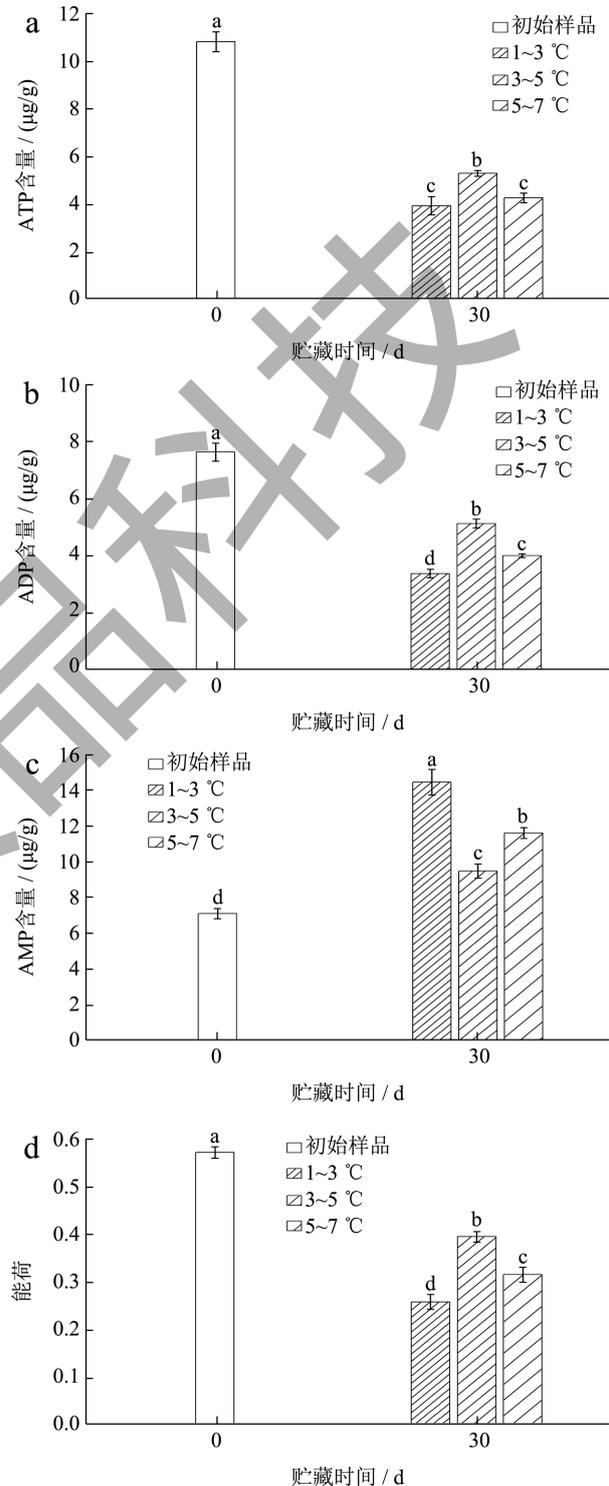


图5 不同贮藏温度对新鲜乌天麻块茎中ATP (a)、ADP (b)、AMP (c) 含量和能荷 (d) 的影响

Fig.5 Effect of storage temperatures on ATP (a), ADP (b), AMP (c) content and energy charge (d) in fresh *Gastrodia elata* tubers

2.5 贮藏温度对新鲜乌天麻块茎中天麻素、腺苷、对羟基苯甲醇、对羟基苯甲醛含量的影响

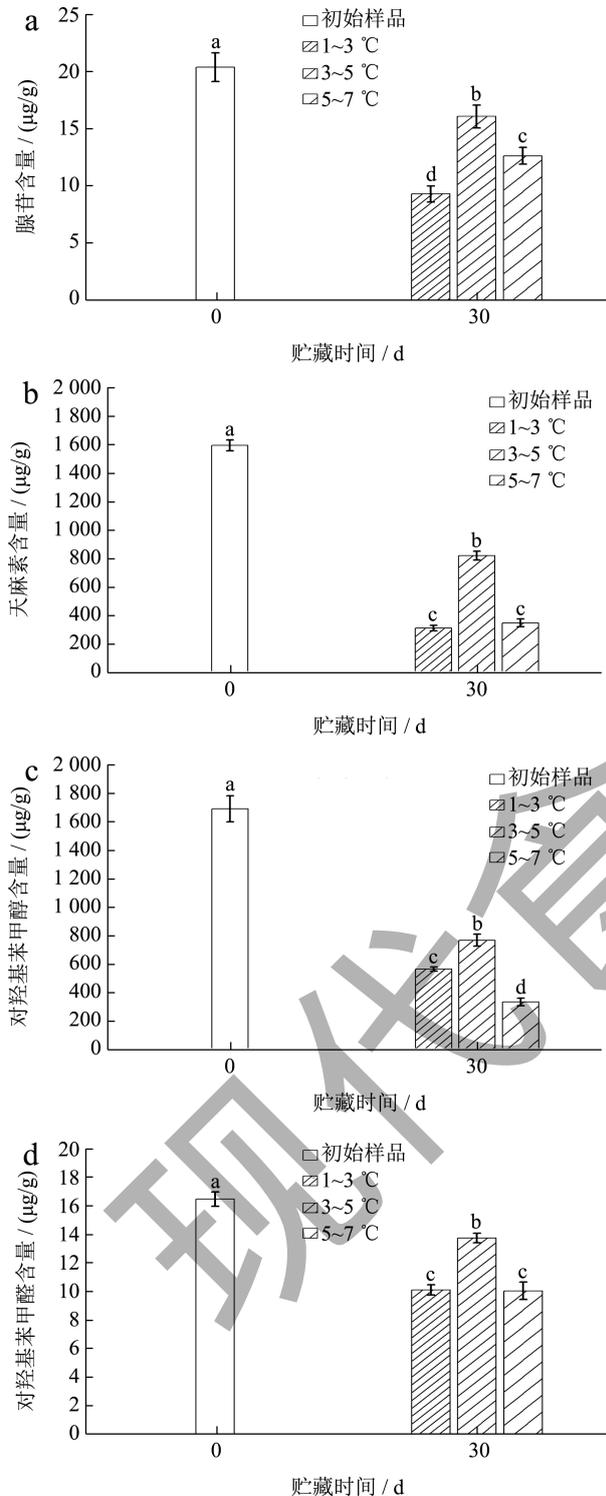


图6 不同贮藏温度对新鲜乌天麻块茎中腺苷(a)、天麻素(b)、对羟基苯甲醇(c)、对羟基苯甲醛(d)含量的影响

Fig.6 Effect of storage temperatures on the content of adenosine (a), gastrodin (b), p-hydroxybenzyl alcohol (c), and p-hydroxybenzaldehyde (d) in fresh *Gastrodia elata* tubers

腺苷、天麻素、对羟基苯甲醇、对羟基苯甲醛作为天麻块茎中的主要活性成分，具有增强记忆力、改善睡眠、抗癫痫、降血压等功效^[1,2]。不同温度条件下贮藏 30 d 的新鲜乌天麻块茎，腺苷、天麻素、对羟基苯甲醇和对羟基苯甲醛的含量较初始块茎相比都有所下降（图 6）。初始样品中腺苷含量为 81.85 µg/g，贮藏 30 d，腺苷含量分别降低至 37.45 µg/g（1~3 °C）、64.55 µg/g（3~5 °C）、50.80 µg/g（5~7 °C）（图 6a）；初始块茎中天麻素含量为 1 595.79 µg/g，不同贮藏温度条件下新鲜乌天麻中天麻素含量分别下降了 80.42%（1~3 °C）、48.54%（3~5 °C）、78.12%（5~7 °C）（图 6b）；3~5 °C 处理组新鲜乌天麻块茎中对羟基苯甲醇的含量为 772.4 µg/g，显著高于 1~3 °C（570.69 µg/g）和 5~7 °C（341.61 µg/g）处理组（图 6c， $P < 0.05$ ）；对羟基苯甲醛含量分别是 10.1 µg/g（1~3 °C）、13.73 µg/g（3~5 °C）和 10.04 µg/g（5~7 °C）（图 6d），分别损失 38.60%（1~3 °C）、16.53%（3~5 °C）和 38.97%（5~7 °C）。由此说明，3~5 °C 能够更好地维持新鲜乌天麻中 4 种有效成分的含量。

2.6 贮藏温度对新鲜乌天麻块茎中游离氨基酸含量的影响

由表 1 可见，新鲜乌天麻块茎贮藏至 30 d，3 个温度条件下样品与初始样品相比，总游离氨基酸含量均显著下降（ $P < 0.05$ ）。但相对于其他两个温度条件，3~5 °C 条件下贮藏新鲜乌天麻块茎能够显著延缓总游离氨基酸含量的降低（ $P < 0.05$ ）。Wang 等^[24]研究表明，天麻中含有人体必需的 8 种氨基酸（分别为：缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、蛋氨酸、色氨酸、苏氨酸、赖氨酸）。初始样品中 8 种人体必需氨基酸总含量为 303.27 µg/g，贮藏 30 d，3 种不同贮藏温度下新鲜乌天麻中含有的 8 种人体必需氨基酸总含量分别下降 40.10%（1~3 °C）、12.82%（3~5 °C）、31.52%（5~7 °C）。综上，与其他两组温度条件相比，3~5 °C 条件下贮藏新鲜乌天麻不仅能够延缓总游离氨基酸含量下降，还可维持 8 种人体必需氨基酸含量。

2.7 不同温度贮藏对新鲜乌天麻块茎表面真菌群落的影响

2.7.1 Alpha 多样性分析

本研究利用 Alpha 多样性指标中的 ACE、Chao1、Coverage、Shannon 和 Simpson 指数对新鲜乌天麻块茎微生物菌落丰富度和多样性进行评估（表 2）。

Chao1 指数能够评估不同温度下新鲜乌天麻块茎的微生物菌落丰度, Chao1 指数越高, 微生物菌落丰度越高; Shannon 和 Simpson 指数越高, 微生物群落的多样性越丰富^[25]。

表 1 不同贮藏温度对新鲜乌天麻块茎中游离氨基酸含量的影响 (μg/g)

Table 1 Effect of storage temperatures on the free amino acid content in fresh *Gastrodia elata* tubers

化合物名称	0 d	30 d		
		1~3 °C 处理组	3~5 °C 处理组	5~7 °C 处理组
天冬氨酸	459.26 ± 0.13 ^a	188.83 ± 0.29 ^d	294.83 ± 0.19 ^b	239.87 ± 0.28 ^c
谷氨酸	463.83 ± 0.28 ^a	443.32 ± 0.23 ^c	462.96 ± 0.19 ^b	335.91 ± 0.03 ^d
天冬酰胺	2 005.96 ± 0.15 ^a	96.37 ± 0.23 ^d	1 918.70 ± 0.31 ^b	926.74 ± 0.08 ^c
丝氨酸	338.74 ± 0.18 ^a	74.59 ± 0.35 ^d	285.41 ± 0.27 ^b	192.70 ± 0.10 ^c
谷氨酰胺	551.81 ± 0.36 ^a	90.66 ± 0.54 ^d	291.65 ± 0.27 ^c	292.85 ± 0.71 ^b
组氨酸	47.18 ± 0.53 ^a	13.11 ± 0.51 ^d	37.03 ± 0.43 ^b	18.27 ± 0.66 ^c
甘氨酸	313.76 ± 0.14 ^a	53.83 ± 0.34 ^d	272.33 ± 0.74 ^b	222.69 ± 0.40 ^c
苏氨酸	41.93 ± 0.46 ^b	34.15 ± 0.07 ^d	67.68 ± 0.63 ^a	38.90 ± 0.23 ^c
瓜氨酸	6.39 ± 0.24 ^c	0 ^d	21.36 ± 0.26 ^a	10.51 ± 0.17 ^b
精氨酸	225.63 ± 0.29 ^a	70.77 ± 0.74 ^d	215.11 ± 0.13 ^b	118.98 ± 0.35 ^c
丙氨酸	324.94 ± 0.64 ^a	61.79 ± 4.65 ^d	293.74 ± 0.42 ^b	156.53 ± 0.52 ^c
酪氨酸	100.93 ± 1.24 ^a	68.94 ± 1.24 ^c	72.80 ± 1.37 ^b	35.93 ± 0.41 ^d
半胱氨酸	51.80 ± 0.82 ^a	7.23 ± 0.59 ^c	41.14 ± 1.10 ^b	35.23 ± 0.82 ^c
缬氨酸	89.37 ± 1.15 ^a	50.11 ± 1.12 ^d	79.97 ± 1.34 ^b	63.15 ± 1.61 ^c
蛋氨酸	51.38 ± 0.95 ^a	37.89 ± 0.38 ^b	32.99 ± 2.02 ^c	32.12 ± 1.78 ^c
正缬氨酸	22.21 ± 2.60 ^a	12.42 ± 0.45 ^b	20.13 ± 0.50 ^a	14.10 ± 0.28 ^b
色氨酸	21.08 ± 0.63 ^a	12.41 ± 0.43 ^c	10.30 ± 0.87 ^d	13.86 ± 0.30 ^b
苯丙氨酸	26.91 ± 0.20 ^a	22.60 ± 0.23 ^b	21.61 ± 0.66 ^b	19.09 ± 0.83 ^c
异亮氨酸	25.39 ± 0.29 ^a	16.40 ± 0.67 ^c	19.68 ± 0.55 ^b	12.61 ± 1.39 ^d
亮氨酸	21.96 ± 0.65 ^a	13.20 ± 0.14 ^d	18.90 ± 0.75 ^b	14.59 ± 0.27 ^c
赖氨酸	76.02 ± 0.86 ^a	27.70 ± 0.59 ^a	53.62 ± 1.74 ^a	40.28 ± 0.31 ^a
羟脯氨酸	75.75 ± 2.24 ^a	19.85 ± 2.14 ^b	22.27 ± 0.44 ^b	21.65 ± 0.57 ^b
肌氨酸	191.94 ± 1.21 ^b	258.08 ± 1.53 ^a	155.79 ± 0.60 ^c	157.65 ± 1.29 ^c
脯氨酸	13.95 ± 0.36 ^d	19.56 ± 0.48 ^a	16.44 ± 0.32 ^c	17.79 ± 0.10 ^b
γ-氨基丁酸	25.00 ± 0.09 ^b	29.52 ± 0.43 ^a	24.01 ± 1.39 ^b	15.64 ± 0.82 ^c
总氨基酸	5 223.92 ± 4.35 ^a	1 723.33 ± 2.19 ^d	4 749.48 ± 5.05 ^b	3 045.61 ± 5.10 ^c
8 种人体必需氨基酸	303.27 ± 0.74 ^a	181.67 ± 1.29 ^c	264.40 ± 1.63 ^a	207.67 ± 5.27 ^b

注: 表中不同小写字母表示差异显著 (P<0.05)。下表同。

表 2 不同贮藏温度对新鲜乌天麻块茎中真菌的Alpha多样性变化的影响

Table 2 Effect of storage at temperatures for 30 days on the alpha diversity changes of fungi in fresh *Gastrodia elata* tubers

组别	ACE 指数	Chao1 指数	Coverage 指数/%	Shannon 指数	Simpson 指数
初始块茎	398.02 ± 36.46 ^a	410.45 ± 40.01 ^a	99.98 ± 0.000 17 ^a	3.12 ± 0.01 ^a	0.18 ± 0.01 ^a
1~3 °C	242.84 ± 7.92 ^b	352.71 ± 13.45 ^a	99.99 ± 0.000 03 ^a	3.46 ± 0.31 ^a	0.07 ± 0.35 ^b
3~5 °C	352.37 ± 17.05 ^a	238.58 ± 9.68 ^b	99.95 ± 0.000 09 ^a	2.62 ± 0.21 ^b	0.01 ± 0.01 ^c
5~7 °C	361.80 ± 3.04 ^a	354.38 ± 10.54 ^a	99.99 ± 0.000 03 ^a	3.61 ± 0.21 ^a	0.14 ± 0.01 ^a

根据样本的 Coverage 指数分析,所有样品的覆盖率相对较高 (>99%),表明测序结果能够有效反应新鲜乌天麻块茎微生物的多样性。1~3 °C 和 5~7 °C 处理组 Chao1 指数 (分别为 352.71 和 354.38) 显著大于 3~5 °C 处理组 (238.58) ($P < 0.05$); 1~3 °C 和 5~7 °C 处理组的 Shannon 指数分别为 3.46 和 3.61, Simpson 指数分别为 0.07 和 0.14, 而 3~5 °C 处理组的 Shannon 和 Simpson 指数较小,说明 1~3 °C 和 5~7 °C 处理组新鲜乌天麻块茎真菌丰富度和多样性整体较高。通过分析不同贮藏温度对新鲜乌天麻块茎的 Shannon 和 Simpson 指数的变化表明,不同贮藏温度的新鲜乌天麻块茎真菌多样性存在差异,3~5 °C 贮藏新鲜乌天麻能够抑制其表皮真菌多样性及丰度的变化。

2.7.2 样品中物种注释及分布情况

图 7 所示,4 组样品中共鉴定得出真菌 372 个属。在属的分类水平上,初始样品中以鬼伞属 *Coprinellus*、拟无疣革菌属 *Athelopsis* 和支孢瓶霉属 *Cladophialophora* 为主,占比为 23.64%、16.99% 和 11.39%; 1~3 °C 处理组中以枝孢霉属 *Cladosporium*、亚隔孢壳属 *Didymella* 和 *Tausonia* 为主,占比约为 37.66%、11.35% 和 13.56%; 3~5 °C 处理组中以棉革菌属 *Tomentella*、红菇属 *Russula* 和鬼伞属 *Coprinellus* 为主,占比约为 32.45%、9.59% 和 8.78%; 5~7 °C 处理组中以棉革菌属 *Tomentella*、支孢瓶霉属 *Cladophialophora* 和蜡壳菌属 *Sebacina* 为主,占比依次为 28.81%、17.65% 和 10.89%。

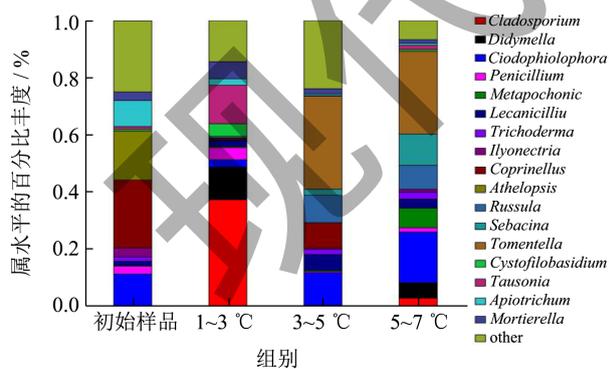


图 7 4 组样品属水平的相对丰度 (前 17)

Fig.7 Relative abundance at the genus level of four sample groups (top 17)

2.7.3 属水平致病菌相对丰度变化

课题组前期研究^[11]表明,新鲜乌天麻采后致腐菌主要为枝孢霉属 *Cladosporium*、青霉属 *Penicillium* 和土赤壳属 *Ilyonectria*。选取初始样

品和不同温度处理组中 3 种致病菌相对丰度变化进行分析,结果如图 8 所示,初始样品中均检测出 3 种致病菌,相对丰度分别为 0.34% (枝孢霉属 *Cladosporium*)、2.74% (青霉属 *Penicillium*) 和 3.13% (土赤壳属 *Ilyonectria*)。贮藏 30 d, 1~3 °C 处理组中枝孢霉属 *Cladosporium* 相对丰度升至 37.66%, 而 3~5 °C 和 5~7 °C 处理组中枝孢霉属 *Cladosporium* 相对丰度仅为 0.73% 和 3.37%; 贮藏 30 d, 3 组温度处理组中青霉属 *Penicillium* 占比分别为 4.14% (1~3 °C)、0.44% (3~5 °C) 和 1.48% (5~7 °C); 相同贮藏时间,土赤壳属 *Ilyonectria* 相对丰度随着温度升高而上升 (1~3 °C : 0.35%, 3~5 °C : 0.43%, 5~7 °C : 0.95%)。

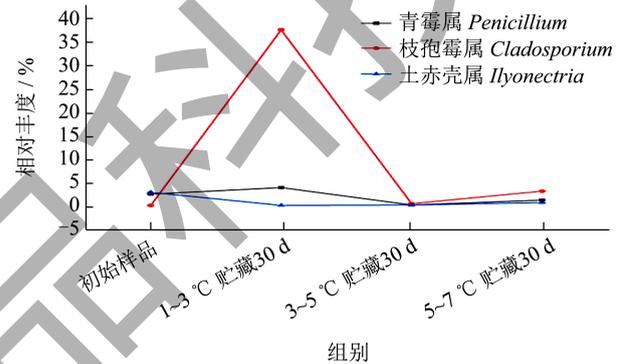


图 8 属水平 3 种致病菌的相对丰度

Fig.8 Relative abundance of three pathogenic bacteria at the genus level

2.7.4 不同温度贮藏与新鲜乌天麻块茎属水平真菌相关性

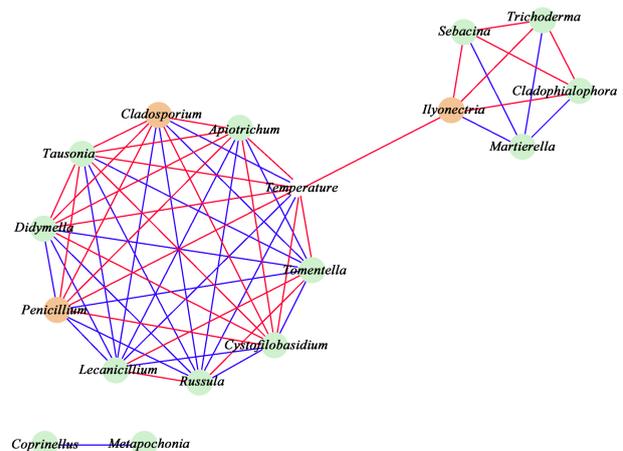


图 9 贮藏温度与属水平真菌和属水平真菌间相关性网络关系图

Fig.9 Network relationship diagram of storage temperature with fungal genera and among fungal genera at the genus level

注: 红线表示两个相关属之间的正相关, 蓝色表示负相关。

为了分析真菌属类之间与贮藏温度之间的相关性，选择有效关系对并绘制相对网络关系图，通过 Cytoscape 软件中 Centiscape2.2 插件分析得到图 9。新鲜乌天麻块茎属水平真菌与贮藏温度的网络关系图中有 17 个节点和 57 条边。温度节点共有 10 条边与其相连，其中致病菌枝孢霉属 *Cladosporium* 相对丰度与温度呈负相关；青霉属 *Penicillium* 和土赤壳属 *Ilyonectria* 相对丰度与温度呈正相关。此外温度与 *Apiotrichum*、棉革菌属 *Tomentella*、囊状担子菌属 *Cystofilobasidium*、*Tausonia*、亚隔孢壳属 *Didymella* 相对丰度呈正相关，与蜡蚧菌属 *Lecanicillium* 和红菇属 *Russula* 相对丰度呈负相关。

2.8 相关性分析

为进一步解释指标与指标和致病菌与各项指标之间关系，通过相关系数检验（图 10）结果显示，腐烂率与 MDA 含量呈显著正相关，与天麻素和腺苷含量及 EC 值呈显著负相关；腺苷含量与 MDA 含量呈显著负相关，与天麻素含量和 EC 值呈显著正相关；天麻素含量与 MDA 含量呈显著负相关，与 EC 值呈显著正相关；对羟基苯甲醛与人体必需氨基酸含量呈显著正相关；EC 值与 MDA 含量呈显著负相关 ($P < 0.05$)。

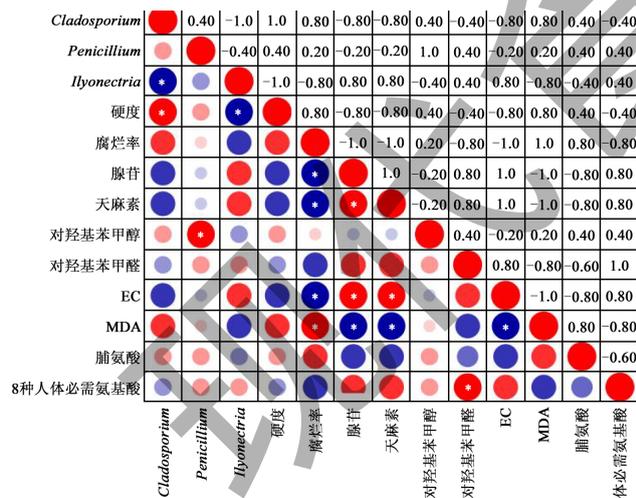


图 10 不同贮藏温度条件下 (1~3 °C、3~5 °C 和 5~7 °C) 贮藏 30 d 的新鲜乌天麻块茎致病菌相对丰富度与所测定指标之间的关系矩阵

Fig.10 Relationship matrix between the relative abundance of pathogens in fresh *Gastrodia elata* tubers stored for 30 days under different conditions (1~3 °C , 3~5 °C and 5~7 °C) and the measure d indicators

注：图中红色圆点表示正相关，蓝色圆点表示负相关。圆圈中星号表示显著性差异 (*, $P < 0.05$)。

由图 10 还可看出，枝孢霉属 *Cladosporium* 相对丰度与硬度值呈显著正相关；青霉属 *Penicillium* 相对丰度与对羟基苯甲醇含量呈显著正相关；土赤壳属 *Ilyonectria* 相对丰度与硬度值呈显著负相关 ($P < 0.05$)。贮藏至 30 d，新鲜乌天麻块茎致病菌相对丰度增加，不同温度条件下 4 种天麻功效成分（腺苷、天麻素、对羟基苯甲醇和对羟基苯甲醛，图 6）和 8 种人体必需氨基酸含量下降（表 1），推测是致病菌生长繁殖过程中分泌代谢物，作用于新鲜乌天麻子实体内，与功效成分相反应，从而导致含量降低。

3 结论

本文重点研究贮藏温度对新鲜乌天麻贮藏品质和真菌多样性的影响，结果表明，相较于 1~3 °C、5~7 °C 处理组，3~5 °C 能够更有效延缓样品块茎 MDA 和脯氨酸含量的积累，维持其子实体内较高能量供应，从而抑制腐烂变质和硬度下降，并保持腺苷、天麻素、对羟基苯甲醇、对羟基苯甲醛和 8 种人体必需氨基酸的含量。结合 MDA 和脯氨酸含量的检测结果，推测 1~3 °C 条件造成新鲜乌天麻块茎发生冷害，而 5~7 °C 处理组对新鲜乌天麻的保鲜效果低于 3~5 °C 处理组。相类似，3~5 °C 条件对于新鲜乌天麻表面真菌多样性抑制效果更佳，有效抑制了致病菌（枝孢霉属 *Cladosporium*、青霉属 *Penicillium* 和土赤壳属 *Ilyonectria*）相对丰度的上升。相关性分析表明，新鲜乌天麻表面致病菌相对丰度越低，越能维持较好的品质。综合比较，新鲜乌天麻块茎的最佳贮藏温度为 3~5 °C。

参考文献

- [1] CHEN X Y, HE Y, CHEN J Y. Pharmacological effects and mechanisms of *Gastrodia elata* and its active ingredients in the treatment of cardiovascular diseases [J]. Traditional Medicine Research, 2023, 8(9): 34-48.
- [2] LU C C, QU S H, ZHONG Z F, et al. The effects of bioactive components from the rhizome of *Gastrodia elata* blume (Tianma) on the characteristics of Parkinson's disease [J]. Frontiers in Pharmacology, 2022, 13: 963327.
- [3] PRANGE R K, HARRISON A W. A review of storage temperature recommendations for apples and pears [J]. Foods, 2023, 12(3): 466.
- [4] HE X M, LI L, SUN J, et al. Adenylate quantitative method analyzing energy change in postharvest banana (*Musa acuminata* L.) fruits stored at different temperatures [J]. Scientia Horticulturae, 2017, 219: 118-124.

- [5] 肖佳颖.贮藏温度和处理方式对青椒采后理化品质的影响[D].长沙:湖南农业大学,2020.
- [6] LI D, CHENG Y D, DOUG Y, et al. Effects of low temperature conditioning on fruit quality and peel browning spot in 'Huangguan' pears during cold storage [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 131: 68-73.
- [7] 陈琛, 蔺蓓蓓, 吴伟, 等. 6种保鲜剂对天麻保鲜效果的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(9):112-119.
- [8] 马骏, 孙海燕, 钟爱民, 等. 不同1-MCP处理对汉中红天麻保鲜效果的研究[J]. *保鲜与加工*, 2016, 16(4):14-17, 22.
- [9] 曹森, 王瑞, 李莹, 等. 不同保鲜剂处理对鲜天麻贮藏品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(23):71-76.
- [10] 曹艺颖, 陈虞超, 刘天睿, 等. 独脚金内酯类似物在天麻贮藏保鲜中的应用研究[J]. *中国中药杂志*, 2023, 48(12): 3149-3155.
- [11] 张旭, 王瑞, 吉宁, 等. 两种食品添加剂对鲜天麻采后真菌多样性的影响[J]. *菌物学报*, 2023, 42(11):2203-2217.
- [12] 陈美航, 漆江, 鲁道旺, 等. 德江天麻腐烂病原菌分离鉴定及活性测试[J]. *农药*, 2023, 62(11):833-837.
- [13] 唐鑫, 张进强, 江维克, 等. 天麻褐腐病原菌的分离鉴定及致病性研究[J]. *中国中药杂志*, 2022, 47(9):2288-2295.
- [14] GAO H, LU Z M, YANG Y, et al. Melatonin treatment reduces chilling injury in peach fruit through its regulation of membrane fatty acid contents and phenolic metabolism [J]. *Food Chemistry*, 2017, 245: 659-666.
- [15] LIN Y F, LIN Y X, LIN H T, et al. Application of propyl gallate alleviates pericarp browning in harvested longan fruit by modulating metabolisms of respiration and energy [J]. *Food Chemistry*, 2017, 240(1): 863-869.
- [16] 李莹, 曹森, 刘志刚, 等. HPLC法同时测定鲜天麻中4种成分[J]. *中成药*, 2020, 42(1):230-232.
- [17] REIS G C L, GUIDI L R, FERNANDES C, et al. UPLC-UV method for the quantification of free amino acids, bioactive amines, and ammonia in fresh, cooked, and canned mushrooms [J]. *Food Analytical Methods*, 2020, 13(8): 1613-1626.
- [18] PAN Y W, CHENG J H, SUN D W. Inhibition of fruit softening by cold plasma treatments: affecting factors and applications [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(12): 1935-1946.
- [19] CAI C, XU C J, SHAN L L, et al. Low temperature conditioning reduces postharvest chilling injury in loquat fruit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2006, 41(3): 252-259.
- [20] TAN J P, ZHOU X, CHENG S Y, et al. Biocontrol of pear postharvest decay by Kombucha [J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2019, 47(3): 668-675.
- [21] CAO S F, CAI Y T, YANG Z F, et al. MeJA induces chilling tolerance in loquat fruit by regulating proline and γ -aminobutyric acid contents [J]. *Food Chemistry*, 2012, 133(4): 1466-1470.
- [22] WYLLIE S G, LEACH D N, WANG Y M. Development of flavor attributes in the fruit of C-melo during ripening and storage [C]// *Biotechnology for Improved Foods and Flavors*. Honolulu, HI, USA: ACS Div Agr Food Chem, 1996: 228-239.
- [23] ZHANG Z Y, ZHANG X Y, XIN G, et al. Umami taste and its association with energy status in harvested *Pleurotus geesteranus* stored at different temperatures [J]. *Food Chemistry*, 2019, 279(MAY 1): 179-186.
- [24] WANG Y S, SHAHID M Q. Insights into the nutritional properties and molecular basis of biosynthesis of amino acids and vitamins of *Gastrodia elata* offered by metabolomic and transcriptomic analysis [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14(6): 1183139.
- [25] HOU Y R, ZHANG X Y, GAO Z F, et al. Relationships between fungal diversity and fruit quality of Yuluxiang pear during low temperature storage [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14(4): 1132271.