

# 硒酸精氨酸对富硒平菇子实体品质的影响

祝传望, 刘安军, 郑捷, 滕安国, 朱红, 刘晨, 李素  
(天津科技大学食品工程与生物技术学院, 天津 300457)

**摘要:** 通过向栽培料中添加硒酸精氨酸培育富硒平菇, 研究硒酸精氨酸对平菇子实体富硒能力、谷胱甘肽过氧化物酶活性、挥发性物质组成、蛋白含量和蛋白分布等的影响。研究表明: 平菇子实体中的硒含量与栽培料中的硒浓度线性正相关 ( $R=0.9967$ ), 同一栽培料中子实体硒分布为: 菌盖>菌柄; 硒在多糖中的含量较低, 在蛋白质中大量积累, 但富硒平菇子实体的蛋白含量和谷胱甘肽过氧化物酶活性没有显著变化; 气相色谱结合质谱 (GC-MS) 分析表明, 富硒平菇子实体与普通平菇子实体的挥发性物质组成简单, 都以醇类为主, 但是富硒平菇子实体中 1-辛烯-3-醇相对含量较高, 蘑菇风味更加浓郁; 十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳 (SDS-PAGE) 分析表明, 平菇子实体中蛋白质分布广泛, 但硒对蛋白质的合成代谢途径没有影响, 不改变平菇子实体蛋白的分布。

**关键词:** 平菇子实体; 硒酸精氨酸; 硒分布; 挥发性物质; 蛋白质

文章编号: 1673-9078(2015)6-67-72

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.6.011

## Effect of Selenoarginine on the Quality of Selenium-enriched *Pleurotus ostreatus* Fruiting Body

ZHU Chuan-wang, LIU An-jun, ZHENG Jie, TENG An-guo, ZHU Hong, LIU Chen, LI Su

(College of Food Science and Biotechnology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** Selenoarginine was added to the cultivation material to produce selenium-enriched *Pleurotus ostreatus* and the effects on the quality of its fruiting body were investigated, in terms of selenium-accumulation ability, glutathione peroxidase (GSH-PX) activity, volatile compound content, protein content, and protein distribution. The results showed that selenium concentration in the fruiting bodies had a significantly positive correlation ( $R=0.9967$ ) with that in the cultivation material. Within the same cultivation material, selenium concentration in the cap was higher than that in the fruiting body. A larger amount of selenium was accumulated in proteins than in the polysaccharides. However, there were no significant changes in protein content and glutathione peroxidase activity. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) analysis indicated that selenium-enriched *Pleurotus ostreatus* had a simple composition of volatile compounds, with a relatively high alcohol content, than that of the non-enriched *Pleurotus ostreatus*. However, the relative content of 1-octen-3-ol in selenium-enriched *Pleurotus ostreatus* was higher than that of the non-enriched *Pleurotus ostreatus*. Sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) analysis indicated that selenium did not change the distribution of proteins in the fruiting bodies of *Pleurotus ostreatus*.

**Key words:** *Pleurotus ostreatus*; selenoarginine; selenium distribution; volatile compounds; protein

硒与人体健康密切相关, 是人体必需的微量元素<sup>[1]</sup>。硒是硒蛋白的重要组成部分, 硒蛋白在抗氧化防御系统、甲状腺激素的形成、DNA 合成以及生育和繁殖等方面发挥着重要的生物学功能: 硒还可以转化为各种代谢产物, 对预防癌症、提高肌肉耐力、延缓衰老等有重要作用<sup>[2]</sup>。硒摄入量不足, 将导致各种疾病

收稿日期: 2014-09-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31271975); 横向项目 (2013120024000733); 天津市科技支撑项目 (14ZCZDNC00015)

作者简介: 祝传望 (1989-), 男, 硕士, 主要从事富硒食用菌栽培与功能食品研究

通讯作者: 刘安军 (1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事天然产物提取与作用机理研究

的发生, 不利于人体健康。从天然食物中补充硒要比直接补充无机硒安全, 因此寻找膳食来源的硒对人类健康十分重要<sup>[3]</sup>。

平菇是世界第二大食用菌栽培品种, 适应性强、生长周期短、生物转化率高, 具有重要的经济、生态和药用价值<sup>[4]</sup>。平菇在世界各地的需求量都很高, 以它为载体富硒, 具有重要意义<sup>[5]</sup>。将含硒化合物添加到培养基中或者喷洒在平菇子实体表面上, 通过平菇在生长过程中对硒的吸收、富集, 普通平菇子实体转化为富含有机硒的富硒平菇子实体。与亚硒酸钠相比, 富硒平菇中的硒具有更高的生物利用率<sup>[6]</sup>且安全性高、毒性小, 营养价值和保健作用更加广泛。

本文通过向栽培料中添加硒酸精氨酸来培育富硒

平菇, 利用原子荧光法测定富硒平菇子实体及子实体各部分的硒含量分析了平菇的富硒能力; 通过顶空固相微萃取结合气质联用技术分析了富硒平菇子实体的挥发性物质组成; 通过 SDS-PAGE 电泳法分析了富硒平菇子实体的蛋白分布, 并对富硒平菇子实体及子实体各部分的蛋白含量, 新鲜富硒平菇子实体的谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-PX) 活性等进行了研究, 揭示了硒酸精氨酸对平菇子实体各方面品质的影响, 旨在为富硒平菇的开发、利用和活性物质提取提供科学的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 菌种

平菇原种: 高产 2053 号, 山西紫团食用菌产业园提供。

#### 1.1.2 试剂

硒酸精氨酸由本实验室合成, 硒含量为 26%; 谷胱甘肽过氧化物酶试剂盒, 南京建成生物工程研究所; 聚乙烯吡咯烷酮 (PVP)、四甲基乙二胺 (TEMED)、丙烯酰胺、甘油、考马斯亮蓝 R250、 $\beta$ -巯基乙醇、N,N'-亚甲基双丙稀酰胺, Amresco 公司; 十二烷基硫酸钠 (SDS)、过硫酸铵、Tris 碱, Sigma 公司; 硫酸铜、硫酸钾、乙二胺四乙酸二钠 (EDTA)、十二水合磷酸氢二钠、溴酚蓝、氢氧化钠、硼酸, 均为国产分析纯; 高氯酸、硝酸、盐酸均为优级纯。

#### 1.1.3 主要实验仪器

AFS-830 双道原子荧光分光光度计, 北京小天鹅仪器公司; MS4000 气质联用仪, 美国 VARIAN; 手动固相微萃取 (SPME) 进样器, 美国 Supelco 公司; 65  $\mu$ m PDMS/DVB 萃取头, 美国 Supelco 公司; FE20 实验室 pH 计, 梅特勒-托利多仪器有限公司; 酶标仪, Thermo Scientific; 超低温冰箱, Thermo Scientific; SE260 电泳槽, GE 公司; 凝胶成像系统, Bio-Rad; K9840 自动凯氏定氮仪, 济南海能仪器有限公司; RE-52A 旋转蒸发器, 上海亚荣生化仪器厂; ESJ205-4 电子天平, 沈阳龙腾电子称量仪器有限公司; XHF-D 高速分散器, 宁波新芝生物科技股份有限公司; G10 型医用高速离心机, 安新县白洋离心机厂; DZF-6020 型真空干燥箱, 上海博讯实业有限公司医疗设备厂; XM-80A 微型涡旋混合仪, 上海沪西分析仪器厂; TS.B-108 往复复脱色摇床, 海门市其林贝尔仪器制造有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 富硒平菇的栽培

称取一定量的玉米芯在硒酸精氨酸水溶液中过夜浸泡后, 与棉籽壳、麸皮、玉米粉、石灰等主辅料混合, 使栽培料中的硒浓度分别为 11.07、22.13、44.26 mg/kg, 并做空白对照。

采用规格为 18 cm $\times$ 36 cm $\times$ 0.05 mm 的线性低密度聚乙烯树脂 (LLDPE) 塑料袋栽培, 每袋装干料 540 g, 每个实验 28 个重复。采用常压灭菌、单端定量接种, 在 0~15  $^{\circ}$ C 的自然条件下发菌, 适当的通风换气和保温; 当菌丝成熟后, 人工喷水, 增加湿度, 保持湿度在 90% 以上, 当平菇长至三分熟, 菌盖未充分展开, 颜色较深, 菌盖边缘内卷紧收, 及时采收。

#### 1.2.2 样品处理

采集栽培的第一潮期富硒平菇子实体和普通平菇子实体, 用自来水洗净, 蒸馏水冲淋, 晾至表面无水迹后, 一部分装入样品袋中-20  $^{\circ}$ C 冷冻保存用于挥发性物质和谷胱甘肽过氧化物酶活性分析; 其他的样品-20  $^{\circ}$ C 冷冻 24 h 后, 移入真空冷冻干燥系统中, 连续冷冻干燥 48 h, 然后一部分将菌盖和菌柄分开粉碎过 200 目筛, 另一部分不分开直接粉碎过 200 目筛, 完成后装入样品袋中-20  $^{\circ}$ C 冰箱保存。

#### 1.2.3 硒含量的测定

采用原子荧光法<sup>[7]</sup>分别测定富硒平菇和普通平菇的子实体及子实体各部分 (菌盖和菌柄) 冻干样品中的硒含量。

#### 1.2.4 挥发性物质分析

##### 1.2.4.1 顶空固相微萃取

取大小一致的-20  $^{\circ}$ C 冷冻保存的新鲜富硒平菇子实体和普通平菇子实体, 切碎后放入 15 mL 样品瓶中, 样品量不超过总体积的 2/3, 拧紧样品盖, 60  $^{\circ}$ C 下水浴 30 min; 插入已在气相色谱进样口 250  $^{\circ}$ C 下老化 30 min 的 65  $\mu$ m PDMS/DVB 萃取头, 60  $^{\circ}$ C 顶空静态吸附 30 min 后, 取出插入到气相色谱进样口, 250  $^{\circ}$ C 解析 15 min, 所解析下来的挥发性组分通过气质联用仪进行分析鉴定。

##### 1.2.4.2 GC-MS 分析

气相色谱条件: VF-5MS 毛细管柱 30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25  $\mu$ m; 进样口温度 250  $^{\circ}$ C; 载气流量(He)1.0 mL/min; 程序升温: 初始温度 40  $^{\circ}$ C, 保持 3 min, 以 4  $^{\circ}$ C/min 升到 150  $^{\circ}$ C, 保持 1 min, 再以 60  $^{\circ}$ C/min 升到 250  $^{\circ}$ C, 保持 6 min。

质谱条件: 质量分离器: 离子阱, EI 离子源; 离

子源温度 220 °C, 传输线温度 280 °C, 容积延迟时间 1.5 min; 离子化模式: 电子板, 能量 70 eV; 数据采集: 全谱扫描, 质量扫描范围 43 到 500 m/z。

通过 NIST 谱图库进行检索, 与质谱图库中的标准谱图进行对照、复合, 并结合有关文献进行人工谱图解析来确认样品中的挥发性物质, 采用峰面积归一化法计算各化学成分占总挥发性物质的相对百分含量。

### 1.2.5 谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-PX) 活性测定

取大小一致的-20 °C 冷冻保存的新鲜富硒平菇子实体和普通平菇子实体 5.0 g, 切片后加入 1.2 倍的 0.2 mol/L 磷酸缓冲液 (pH 6.2, 含 1 mmol/L 的 EDTA, 4% PVP), 冰浴中高速组织捣碎成匀浆, 12000 r/min 冷冻离心 10 min, 取上清液用南京建成生物工程研究所的谷胱甘肽过氧化物酶试剂盒测定 GSH-PX 活性。

### 1.2.6 粗蛋白含量测定

参照 GB/T 15673-2009 中的方法分别测定富硒平菇和普通平菇的子实体及子实体各部分(菌盖和菌柄)冻干样品中的粗蛋白含量。

### 1.2.7 多糖硒的提取与测定

称取 5.0 g 平菇子实体冻干样品, 加入 1 mol/L NaOH 溶液 100 mL, 90 °C 水浴提取 2 h 后, 4000 r/min 离心 10 min, 取上清, 沉淀加入 50 mL 1 mol/L NaOH 溶液, 重复提取一次, 合并上清。用 Sevag 法<sup>[8]</sup>除蛋白, 再加入无水乙醇至 80% 饱和度, 4 °C 静置过夜, 4000 r/min 冷冻离心 10 min, 弃上清, 沉淀 50 °C 真空干燥, 测定多糖中的硒含量<sup>[3]</sup>。

### 1.2.8 蛋白硒的提取与测定

称取 5.0 g 平菇子实体冻干样品, 加入 0.1 mol/L NaOH 溶液 100 mL, 60 °C 水浴搅拌提取 4 h 后, 4000 r/min 离心 10 min, 取上清, 沉淀加入 50 mL 0.1 mol/L NaOH 溶液, 重复提取一次, 合并上清。用醋酸调节上清的 pH 至 3.5, 4 °C 静置过夜, 4000 r/min 冷冻离心 20 min, 弃上清, 沉淀 50 °C 真空干燥, 测定蛋白中的硒含量<sup>[3,9]</sup>。

### 1.2.9 SDS-PAGE 电泳分析蛋白分布

采用垂直电泳进行试验。称取富硒平菇子实体和普通平菇子实体冻干样品 20 mg, 加入 500 μL 的蒸馏水, 然后加入 500 μL 上样缓冲液, 最后补加 50 μL β-巯基乙醇; 涡旋混匀后, 沸水浴加热 5 min, 12000 r/min 离心 10 min, 上清即为电泳样品<sup>[3]</sup>。采用 5% 的浓缩胶, 12% 的分离胶对富硒平菇子实体和普通平菇子实体的蛋白质进行电泳分析。考马斯亮蓝 R250 染色, 甲醇-乙酸脱色液进行脱色。

### 1.2.10 数据分析

采用 Excel 软件进行方差分析和显著性分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 平菇的富硒能力

硒对平菇子实体及子实体各部位富硒能力的影响见图 1。从图 1 可以看出, 普通平菇子实体的硒含量仅为 0.34 μg/g, 而富硒平菇子实体的硒含量分别为 14.80 μg/g、34.21 μg/g、77.45 μg/g, 平菇子实体的硒含量随着栽培料中硒浓度的增加而线性增加 ( $R=0.9967$ ), 硒含量最多可提高约 220 倍。从图 1 可以看出, 菌盖中的硒含量要大于菌柄中的硒含量, 菌盖的硒含量随着栽培料中硒浓度的增加而线性增加 ( $R=0.9987$ ), 菌柄的硒含量也随着栽培料中硒浓度的增加而线性增加 ( $R=0.9919$ ), 且菌盖中硒含量增加的速度要大于菌柄中硒含量增加的速度。

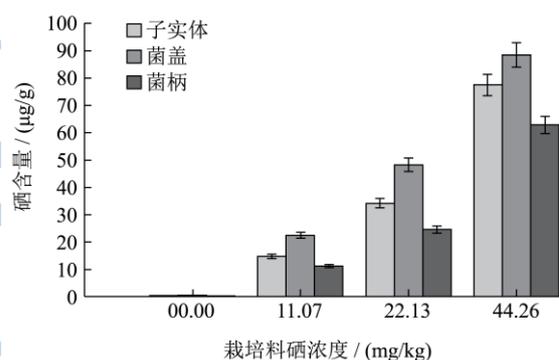


图 1 硒对平菇子实体及子实体各部位富硒能力的影响

Fig.1 Effect of selenium on the combining ability of *Pleurotus ostreatus* with Se

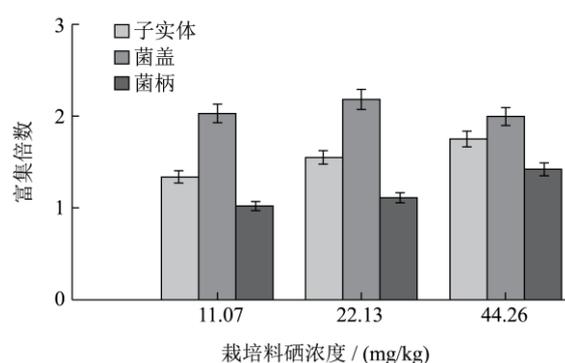


图 2 平菇各部位的富集倍数 (相对于栽培料中硒浓度)

Fig.2 The accumulation of selenium in different parts of *Pleurotus ostreatus* (relative to selenium concentration in the medium)

平菇各部位相对于栽培料中硒浓度的富集倍数见图 2。从图 2 可以看出, 平菇子实体和菌柄对硒的富集能力随着栽培料中硒浓度的增加而增强, 菌盖对硒

的富集能力随着栽培料中硒浓度的增加先增加后下降,栽培料中的硒浓度为 22.13 mg/kg 时,菌盖对硒的富集能力最强。在同一栽培料生长的平菇子实体,菌盖对硒的富集能力要大于菌柄对硒的富集能力,这说明平菇对硒的富集具有顶端优势。

## 2.2 硒对平菇子实体挥发性物质的影响

采用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱(GC-MS) 联用技术分析鉴定出的挥发性物质如表 1 所示,挥发性物质的总离子色谱图如图 3 所示。由图 3 可以看出,普通平菇和富硒平菇中的挥发性物质实现了有效分离,色谱峰出峰时间集中在 10~25 min 之间;富硒平菇中的挥发性物质响应值高于普通平菇。

由表 1 可知,普通平菇和富硒平菇子实体中共有 18 种挥发性成分,其中包括醇类 4 种、烃类 2 种、醛类 5 种、杂环类 5 种和其他化合物 2 种。其中普通平菇子实体中反式-2-辛烯-1-醇、1-辛烯-3-醇和 2, 4-二甲基-1-庚醇的相对含量较高;富硒平菇子实体中 1-辛烯-3-醇和 2, 4-二甲基-1-庚醇的相对含量较高。

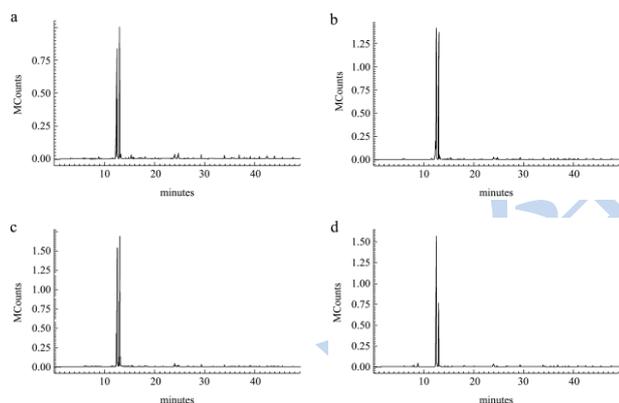


图 3 富硒平菇子实体挥发性风味物质的 GC-MS 总离子流色谱图

Fig.3 GC-MS total ion chromatogram of volatile components in fresh fruiting bodies of selenium-enriched *Pleurotus ostreatus*

注: a, b, c, d 分别为普通平菇子实体和栽培料中硒浓度为 11.07、22.13、44.26 mg/kg 的富硒平菇子实体的总离子流色谱图。

由表 1 可知,醇类是普通平菇和富硒平菇子实体的主要挥发性成分,相对含量在 90% 以上,但是一般饱和醇的阈值较高,对风味的影响较小。因此,普通平菇和富硒平菇子实体的气味主要由不饱和醇产生,属挥发性八碳化合物,这些物质往往是由亚油酸经脂肪氧化酶催化转变而成的,是食用菌最主要的风味物质<sup>[10]</sup>,尤其 1-辛烯-3-醇,具有浓烈的蘑菇味。当栽培料中的硒浓度为 44.26 mg/kg 时,平菇子实体的挥发性八碳化合物的相对含量高达 72.15%,其余富硒组平菇和普通平菇的挥发性八碳化合物的相对含量都在 50% 左右。但是,各组富硒平菇子实体的 1-辛烯-3-醇

的相对含量均高于普通平菇子实体,这是富硒组平菇比普通平菇蘑菇味更加浓郁的原因。其他醛类、酮类、酯类等相对含量较低的挥发性化合物对平菇气味,一般起调和、互补作用<sup>[11]</sup>。

表 1 富硒平菇子实体挥发性风味物质的 GC-MS 分析结果

Table 1 Volatile components in fresh fruiting bodies of selenium-enriched *Pleurotus ostreatus*

化合物名称	保留时间/min	栽培料硒浓度/(mg/kg)			
		0	11.07	22.13	44.26
苯乙烯	8.85	0.58	0.05	0.04	1.15
苯甲醛	11.64	0.25	0.27	0.32	0.05
反式-2-辛烯-1-醇	12.36	22.79	-	-	-
1-辛烯-3-醇	12.53	28.53	45.76	49.00	72.15
2-正戊基呋喃	12.67	-	-	0.08	-
2,4-二甲基-1-庚醇	13.01	42.79	51.71	48.41	24.65
顺式 5-辛烯-1-醇	13.24	-	0.50	-	-
反-6-壬烯醛	14.28	0.22	0.03	0.03	0.04
反-2-辛烯醛	15.36	0.74	0.31	0.07	0.03
反-2-甲基-4-辛烯醛	15.67	0.31	0.13	0.14	0.15
6-十二烯	15.83	0.11	-	-	-
甘菊蓝	20.12	0.33	0.17	0.18	0.11
反,反-2,4-壬二烯醛	21.32	-	0.10	-	-
2-十一酮	23.87	0.40	0.08	0.22	1.38
双环[4.4.1]1,3,5,7,9-十一烷五稀	24.60	0.53	0.19	0.19	0.10
α-甲基-α-乙烯基-2-乙醛呋喃	24.75	2.04	0.66	0.49	0.14
异长叶烯	26.66	-	-	0.03	-
癸酸丁酯	34.41	-	-	0.01	0.06

注:“-”表示未检测到该物质。

## 2.3 硒对平菇子实体谷胱甘肽过氧化物酶

(GSH-PX) 活性的影响

表 2 硒对平菇子实体谷胱甘肽过氧化物酶活性的影响

Table 2 Effect of selenium on GSH-PX activity of *Pleurotus ostreatus* fruiting bodies

栽培料中硒浓度/(mg/kg)	0	11.07	22.13	44.26
GSH-PX 活性	44.12 ± 4.33 <sup>a</sup>	46.19 ± 4.16 <sup>a</sup>	45.25 ± 5.16 <sup>a</sup>	42.77 ± 3.42 <sup>a</sup>

注:表中所示数值为三次试验的平均值±标准偏差,同一行相同字母代表在 p<0.05 水平上差异不显著。

硒对平菇子实体谷胱甘肽过氧化物酶活性的影响见表 2。由表 2 可以看出,平菇子实体的谷胱甘肽过氧化物酶的活性并没有随着栽培料中硒浓度的增加而

发生显著性变化, 硒酸精氨酸的添加对平菇子实体的 GSH-PX 的活性没有显著影响 ( $p < 0.05$ )。这表明, 平菇子实体吸收富集的硒主要是以非谷胱甘肽过氧化物酶的形式存在。

## 2.4 硒对平菇蛋白含量的影响

平菇子实体及平菇各部位蛋白含量见图 4。从图 4 可以看出, 各富硒组平菇子实体的蛋白含量与空白对照组差异不显著 ( $p < 0.05$ ), 蛋白含量稳定在 27.5%~28% 之间。当在栽培料中的硒浓度为 11.07 mg/kg 时, 平菇菌盖和菌柄的蛋白含量高于空白对照组差异极显著 ( $p < 0.01$ ); 当在栽培料中的硒浓度为 22.13 mg/kg 时, 平菇菌盖的蛋白含量高于空白对照组差异极显著 ( $p < 0.01$ ), 菌柄的蛋白含量与空白对照组差异不显著 ( $p < 0.05$ ); 当在栽培料中的硒浓度为 44.26 mg/kg 时, 平菇菌盖和菌柄的蛋白含量高于空白对照组差异显著 ( $p < 0.05$ )。平菇菌盖的蛋白含量随栽培中硒浓度的增加先增加后下降, 在栽培料中的硒浓度为 22.13 mg/kg 时蛋白含量最高, 达到了 36.51%。平菇菌柄的蛋白含量与栽培料中的硒浓度的变化无明显规律, 但是蛋白含量没有降低。总之, 各富硒组平菇子实体整体的蛋白含量未发生显著变化, 但各富硒组平菇菌盖的蛋白含量显著增加, 菌柄的蛋白含量也未降低, 这表明富硒组平菇子实体菌盖所占的重量比重降低了, 菌柄的重量比重增加了。这说明在平菇子实体生长发育的过程中, 硒酸精氨酸的加入抑制了菌盖的生长, 促进了菌柄的生长, 导致菌盖变小菌柄变大。

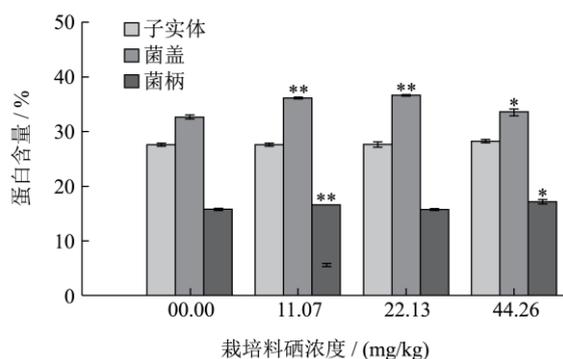


图 4 硒对平菇子实体及子实体各部位蛋白质含量的影响

Fig.4 Effect of selenium on proteins in different parts of *Pleurotus ostreatus*

注: \*表示与空白组差异显著 ( $p < 0.05$ ), \*\*表示与空白组差异极显著 ( $p < 0.01$ )。

## 2.5 硒对平菇子实体蛋白和多糖结合硒能力的影响

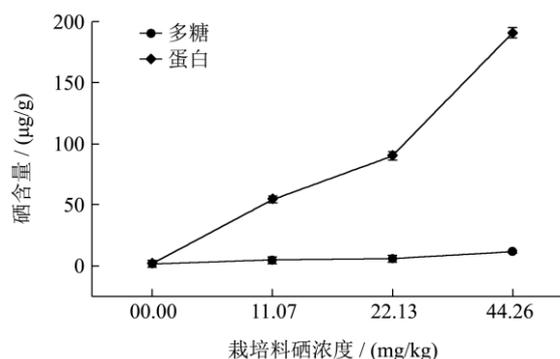


图 5 硒对平菇蛋白和多糖结合硒能力的影响

Fig.5 Effect of selenium on the combining ability of polysaccharides and proteins of *Pleurotus ostreatus*

平菇蛋白和多糖的硒含量随栽培料中硒浓度的变化见图 5。由图 5 可以看出, 随着栽培料中硒浓度的增加, 平菇蛋白中的硒含量呈线性增加 ( $R=0.9982$ ), 平菇蛋白中的硒含量分别是空白组的 39.2 倍、64.9 倍和 137.7 倍。随着栽培料中硒浓度的增加, 平菇多糖中的硒含量呈线性增加 ( $R=0.9922$ ), 平菇多糖中的硒含量分别是空白组的 3.9 倍、5.1 倍和 9.6 倍。由图 5 可以看出, 平菇蛋白中的硒含量远高于平菇多糖中的硒含量, 而且平菇蛋白中硒含量增加的速度要比平菇多糖快, 这说明蛋白质结合硒的能力强于多糖, 硒倾向于在蛋白中积累, 蛋白硒可能是平菇子实体中硒的主要赋形形态。从图 1 和图 5 可以看出, 平菇子实体蛋白分布与硒分布相关性很强: 富硒平菇菌盖中的蛋白含量和含硒量都约为菌柄的 2 倍, 这进一步说明硒更倾向在蛋白中积累。

## 2.6 硒对平菇蛋白分布的影响

普通平菇子实体和富硒平菇子实体中的蛋白采用 SDS-PAGE 电泳进行分离的结果, 见图 6。从图 6 可以看出, 平菇子实体中的蛋白质分布广泛, 在分子量 10 KD~120 KD 都有分布, 分离得到的蛋白质谱带多达 37 个。为了更好的分析差异, 使用 Quantity One 软件泳道分析功能, 分析各泳道光密度值随迁移率的变化, 每个突出的峰代表一个蛋白质谱带, 结果见图 7。从图 7 可以看出, 各泳道样品的光密度值随迁移率变化的曲线没有完全重合, 但是呈现的峰型是一致的, 这说明没有新蛋白谱带出现也没有蛋白谱带消失只是样品的蛋白含量稍有差异。这说明平菇生物富硒的过程中, 不影响子实体蛋白分布, 不改变蛋白质的合成代谢途径, 这可能是硒的代谢基本上沿着硫的代谢的途径进行, 涉及相同的酶系<sup>[13]</sup>, 常取代含硫氨基酸中的硫生成硒代氨基酸, 然后参与蛋白质的合成, 结合到蛋白质中, 不产生新的蛋白质合成代谢途径。

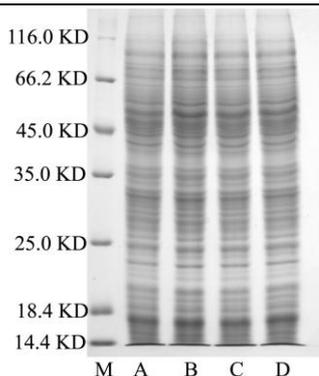


图6 普通平菇子实体和富硒平菇子实体蛋白的SDS-PAGE图谱

Fig.6 SDS-PAGE analysis of proteins in fruiting bodies of selenium-enriched *Pleurotus ostreatus*

注: M: 蛋白maker标准品, A: 普通平菇蛋白, B, C, D 分别为栽培料中硒浓度为11.07、22.13、44.26 mg/kg的富硒平菇蛋白。

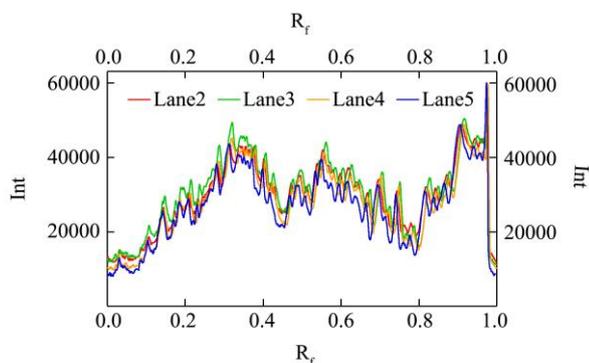


图7 平菇子实体蛋白 SDS-PAGE 电泳的泳道分析

Fig.7 Lane analysis of proteins in fruiting bodies of selenium-enriched *Pleurotus ostreatus*

注: 图中Lane2、Lane3、Lane4、Lane5分别为图6中的A、B、C、D泳道。

### 3 结论

平菇子实体的硒含量与栽培料中的硒浓度线性正相关, 菌盖的富硒能力强于菌柄; 硒在子实体各部位的分布与各部位蛋白含量的分布一致, 硒倾向于在蛋白质积累, 但对蛋白质的合成代谢途径没有影响, 不改变蛋白的分布; 富硒平菇子实体与普通平菇子实体的挥发性物质基本一致, 但 1-辛烯-3-醇的相对含量增加, 具有更浓郁的蘑菇味; 以硒酸精氨酸为有机硒源培育富硒平菇, 对子实体的谷胱甘肽过氧化物酶活性没有显著影响。

### 参考文献

[1] Navarro-Alarcon M, Cabrera-Vique C. Selenium in food and the human body: a review [J]. Science of the Total Environment, 2008, 400(1): 115-141

- [2] Mehdi Y, Hornick J L, Istasse L, et al. Selenium in the environment, metabolism and involvement in body functions [J]. Molecules, 2013, 18(3): 3292-3311
- [3] Zhao L, Zhao G, Zhao Z, et al. Selenium distribution in a Se-enriched mushroom species of the genus *Ganoderma* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(12): 3954-3959
- [4] Sánchez C. Cultivation of *Pleurotus ostreatus* and other edible mushrooms [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 85(5): 1321-1337
- [5] Silva M C S, Naozuka J, Luz J M R, et al. Enrichment of *Pleurotus ostreatus* mushrooms with selenium in coffee husks [J]. Food Chemistry, 2012, 131(2): 558-563
- [6] Silva M C S, Naozuka J, Oliveira, P V, et al. In vivo bioavailability of selenium in enriched *Pleurotus ostreatus* mushrooms [J]. Metabolomics, 2010, 2: 162-166
- [7] 张国蓉,王燕,刘安军. 硒酸精氨酸培养富硒酵母的条件优化 [J]. 现代食品科技, 2008, 24(10): 1006-1011
- [8] ZHANG Guo-rong, WANG Yan, LIU An-jun. Optimization of the culture conditions for selenium-enriched Yeast by selenoarginine [J]. Modern Food Science and Technology, 2008, 24(10): 1006-1011
- [9] Whistler L R. Removal of moteln: sevag medical in carbohydrate chemistry [J]. Academic, New York, 1965: 76-82
- [10] 王振,常鼎然,常明昌,等. 姬松茸蛋白制备及分析研究 [J]. 现代农业科技, 2011(3): 349-350
- [11] WANG Zhen, CHANG Ding-ran, CHANG Ming-chang, et al. Study on preparation and Analysis of *Agaricus blazei* Murill protein [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2011 (3): 349-350
- [12] Mau J, BEELMAN R O B, ZIEGLER G R R. 1-Octen-3-ol in the Cultivated Mushroom, *Agaricus bisporus* [J]. Journal of Food Science, 1992, 57(3): 704-706
- [13] 余雄涛,潘鸿辉,谢意珍. 食用菌风味物质的研究及应用进展 [J]. 中国食用菌, 2013, 32(3): 4-
- [14] YU Xiong-tong, PAN Hong-hui, XIE Yi-zhen. Research and application progress on flavor substances of edible mushrooms [J]. Edible Fungi of China, 2013, 32(3): 4-7
- [15] 黄开勋,徐辉碧. 硒的化学、生物化学及其在生命科学中的应用(第二版) [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009
- [16] HANG Kai-xun, XU Hui-bi. Selenium: Its Chemistry, Biochemistry and Application in Life Science (2th Edition) [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2009

现代食品科技