

## 研究报告

## 硒对大球盖菇菌丝生长、子实体农艺性状和营养品质的影响

龚曦珊, 陈青君, 张国庆\*, 张佳艳, 赵亚京, 张娇, 赵敏睿

北京农学院植物科学技术学院, 北京 102206

龚曦珊, 陈青君, 张国庆, 张佳艳, 赵亚京, 张娇, 赵敏睿. 硒对大球盖菇菌丝生长、子实体农艺性状和营养品质的影响[J]. 微生物学通报, 2023, 50(10): 4522-4532.

GONG Xishan, CHEN Qingjun, ZHANG Guoqing, ZHANG Jiayan, ZHAO Yajing, ZHANG Jiao, ZHAO Minrui. Selenium affects the mycelial growth, agronomic traits, and nutritional quality of *Stropharia rugosoannulata*[J]. Microbiology China, 2023, 50(10): 4522-4532.

**摘要:**【背景】大球盖菇是我国新兴的食用菌栽培品种, 其栽培技术简单、产量高、效益高, 在农业废弃物高效转化和农民增收方面发挥重要作用。【目的】探究硒对大球盖菇菌丝生长、子实体农艺性状和营养品质的影响, 为富硒大球盖菇的实践生产提供依据。【方法】通过平板试验, 测定添加不同质量浓度的  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  对菌丝生长速度和干重的影响。以木屑、稻壳、玉米芯为主要原料, 添加 0–10 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ , 进行大球盖菇生料栽培试验, 测定一潮菇农艺性状、营养品质和抗氧化活性。【结果】 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  浓度为 0–10 mg/L 时, 对大球盖菇菌丝生长速度与干重无显著影响, 分别为 3.74–3.76 mm/d 和 40.67–41.33 mg; 当浓度达到 15 mg/L 及以上时, 显著抑制菌丝生长。栽培试验结果表明, 添加 0–10 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  对一潮菇生物学效率无显著影响, 7.5 mg/kg 剂量组表现出最佳的菌盖直径、菌柄直径和单菇鲜重。子实体营养分析显示, 7.5 mg/kg 剂量组表现出最高的粗蛋白、粗多糖、总氨基酸、必需氨基酸、非必需氨基酸、鲜味氨基酸和谷氨酸含量。7.5–10.0 mg/kg 剂量组子实体粗多糖对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)和羟基(hydroxy, OH)自由基清除率显著高于空白对照组。【结论】添加低剂量  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  能够显著改善大球盖菇子实体农艺性状和营养品质, 生料栽培的最适添加剂量为 7.5 mg/kg。本研究为富硒大球盖菇的实践生产提供了可靠的试验依据。

**关键词:** 大球盖菇; 硒; 菌丝生长; 农艺性状; 营养品质

资助项目: 北京市自然科学基金面上项目(6232003); 现代农业产业技术体系北京市食用菌创新团队项目(BAIC03-05)  
This work was supported by the Beijing Natural Science Foundation (6232003) and the Project of Beijing Innovation Consortium of Agriculture Research System (BAIC03-05).

\*Corresponding author. E-mail: zhangqibua@163.com

Received: 2023-02-02; Accepted: 2023-04-09; Published online: 2023-05-16

## Selenium affects the mycelial growth, agronomic traits, and nutritional quality of *Stropharia rugosoannulata*

GONG Xishan, CHEN Qingjun, ZHANG Guoqing<sup>\*</sup>, ZHANG Jiayan, ZHAO Yajing, ZHANG Jiao, ZHAO Minrui

College of Plant Science and Technology, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China

**Abstract:** [Background] *Stropharia rugosoannulata* is a new edible mushroom species in China. With simple cultivation methods and high yield and benefits, it plays a key role in the efficient transformation of agricultural wastes and the increase in farmers' income. [Objective] To explore the effects of selenium on the mycelial growth, agronomic traits, and nutritional quality of *S. rugosoannulata* and provide a basis for the production of selenium-enriched *S. rugosoannulata*. [Methods] The mycelial growth rate and dry weight of *S. rugosoannulata* treated with different concentrations of sodium selenite ( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ) were determined by the plate culture method. The cultivation matrix composed of sawdust, rice husk, and corncob was supplemented with 0–10 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  for the cultivation test. The agronomic traits, nutritional quality, and antioxidant activity of the first batch of fruiting bodies were evaluated. [Results] The treatments with 0–10 mg/L  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  had no significant effects on the mycelial growth rate and dry weight, which were 3.74–3.76 mm/d and 40.67–41.33 mg, respectively. However, when the concentration of  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  reached 15 mg/L or above, the mycelial growth was significantly inhibited. The cultivation tests showed that the addition of 0–10 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  had no significant effects on the biological efficiency of the mushroom. The 7.5 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  group showed the best cap diameter, stipe diameter, and fresh weight of single mushroom. Moreover, this group demonstrated the highest content of crude protein, crude polysaccharides, total amino acids, essential amino acids, non-essential amino acids, delicious amino acids, and glutamate. The crude polysaccharides from fruiting bodies in the 7.5–10.0 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  groups demonstrated significantly higher DPPH and  $\cdot\text{OH}$  free radical scavenging activities than the blank control group. [Conclusion] The addition of low-dose  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  could significantly improve the agronomic traits and nutritional quality of the fruiting bodies of *S. rugosoannulata*, and the optimum dose was 7.5 mg/kg. The findings provide a reliable experimental basis for the production of selenium-enriched *S. rugosoannulata*.

**Keywords:** *Stropharia rugosoannulata*; selenium; mycelial growth; agronomic traits; nutritional quality

大球盖菇(*Stropharia rugosoannulata* Farl. ex Murrill)又名皱环球盖菇、酒红球盖菇, 商品名为赤松茸、红松茸, 是近年来我国新兴的食用菌栽培种类<sup>[1]</sup>。大球盖菇能够高效利用稻草、稻壳、麦秸、玉米秸、枝杈等农林废弃

物, 采用设施、林下、露天等多种栽培模式生产优质食用菌产品, 其栽培技术简单、产量高、效益高, 在我国脱贫攻坚和乡村振兴工作中发挥重要作用, 也是联合国粮农组织向发展中国家推荐栽培的食用菌种类之一<sup>[2-4]</sup>。大球盖

菇口感脆滑、味道鲜美、营养丰富,含有丰富的蛋白质、多糖、风味物质等,同时还具有抗氧化、抗菌、抗肿瘤、抗疲劳、降血糖等活性<sup>[5-7]</sup>。

硒(selenium, Se)是一种人体必需的非金属微量元素,参与体内一系列代谢过程,具有抗氧化、抗炎症、抗病毒等活性,缺乏时会导致克山病和大骨节病等疾病<sup>[8-9]</sup>。另一方面,高剂量硒对人体具有毒副作用,世界卫生组织推荐的日摄入量为 55–200  $\mu\text{g}$ <sup>[8]</sup>。食用菌生长周期短、栽培条件可控,是优质的硒生物转化载体,能够将环境中的无机硒(硒酸钠、亚硒酸钠等)高效转化为优质安全的有机硒(硒蛋白、硒多糖等)<sup>[10-11]</sup>。另外,相较于普通食用菌,富硒食用菌具有更好的抗肿瘤、抗氧化和抗炎作用<sup>[12-13]</sup>,添加适当低浓度的硒还能够提高食用菌的产量<sup>[9,14]</sup>。一些研究还表明,硒的添加能够显著降低食用菌对铅、镉、汞、砷等元素的吸收,从而降低食用菌的重金属风险<sup>[15-16]</sup>。

前人关于富硒食用菌的研究主要围绕常见大宗食用菌,如金针菇(*Flammulina velutipes*)<sup>[16]</sup>、香菇(*Lentinula edodes*)<sup>[17]</sup>、平菇(*Pleurotus spp.*)<sup>[18-19]</sup>、双孢蘑菇(*Agaricus bisporus*)<sup>[20]</sup>、黑木耳(*Auricularia auricular*)<sup>[21]</sup>等。作为近年来兴起的食用菌新秀,大球盖菇富硒的研究相对较少,且主要是液体发酵和菌丝培养方面的研究。Song 等<sup>[22]</sup>报道大球盖菇液体培养时,富硒菌丝总氨基酸和必需氨基酸含量较不添加硒组分别提高 13.5%和 12.8%;同时,动物试验表明,富硒大球盖菇菌丝能够有效提高小鼠谷胱甘肽过氧化物酶和超氧化物歧化酶活性,并能够降低体内丙二醛浓度。苗元振等<sup>[23]</sup>报道了大球盖菇菌丝硒多糖的提取及其抗氧化活性。另外,硒还能够缓解镉胁迫对大球盖菇菌丝生长的影响,提高抗氧化酶活性和清除活性氧能力<sup>[4]</sup>。本研究以大球盖菇为对象,测定不同浓度亚硒酸钠

( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ )对菌丝生长的影响,并进一步确定其对子实体农艺性状和营养品质的影响,以期为富硒大球盖菇生产实践提供试验依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 菌株

大球盖菇菌株由北京农学院食药菌资源利用实验室收集与保藏,菌株编号为 SR-21-01。

#### 1.1.2 培养基

菌株活化与保藏采用 PDA 固体培养基<sup>[4]</sup>。

木屑稻壳培养基(WR) (g/L): 木屑粉 10.0, 稻壳粉 10.0, 琼脂 20.0, 胰蛋白胨 2.0,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1.0,  $\text{MgSO}_4$  0.5, pH 自然。

栽培种配方(质量分数): 细木屑 75%, 稻壳 15%, 麦麸 9%, 碳酸钙 1%, 含水量 60%–65%。

生料栽培配方(质量分数): 木屑 33%, 稻壳 33%, 玉米芯 33%, 石灰 1%, 含水量至 60%–65%。

#### 1.1.3 主要试剂和仪器

$\text{Na}_2\text{SeO}_3$ , Sigma-Aldrich 公司。万分之一天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;恒温恒湿培养箱,宁波海曙赛福实验仪器有限公司;电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;氨基酸自动分析仪, HITACHI 公司。

### 1.2 硒对菌丝生长的影响

基于 WR 培养基分别添加不同剂量  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  至浓度分别为 5、10、15、20、25 和 30 mg/L, 分别记为 Se5、Se10、Se15、Se20、Se25 和 Se30, 以不添加  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  处理为空白对照组(CK), 每个处理 3 个重复。各处理灭菌后倒平板, 待冷却后铺无菌玻璃纸。目标菌株经 PDA 平板活化培养后, 以无菌打孔器(直径 5 mm)打孔, 选长势一致的菌饼接种于各处理平板中央, 置于 25  $^\circ\text{C}$  恒温培养箱中避光静置培养 9 d, 每天观察生长情况。菌丝生长速度采用“十字交叉”法<sup>[4]</sup>, 菌丝生

长速度(mm/d)=菌丝生长半径(mm)/培养天数(d)。菌丝生物量测定采用称重法,将玻璃纸上菌丝全部刮下,50℃烘箱中烘干至恒重。

### 1.3 出菇试验

大球盖菇的出菇试验采用生料栽培法,在日光温室内进行。在出菇配方的基础上分别添加不同剂量  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  溶液,至培养料(湿重)中  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  终浓度分别为 2.5、5.0、7.5 和 10 mg/kg,分别记为 Se2.5、Se5.0、Se7.5 和 Se10,以不添加  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  处理为空白对照组(CK),每个处理 3 个重复。混匀的培养料置于倒梯形塑料筐中并接种,每筐培养料湿重 25 kg,含水量 62%,接种量为 5%。接种完成后,培养料表面覆土 3–4 cm。发菌及出菇管理参照常规食用菌管理进行。

### 1.4 子实体农艺性状

大球盖菇子实体采收后,每处理随机选取子实体 50 个,利用游标卡尺测定子实体菌盖直径、菌盖厚度、菌柄直径、菌柄长度,利用称量法测定新鲜子实体单菇重。统计每筐第一潮菇产量,计算生物学效率<sup>[24]</sup>。

生物学效率(%)=子实体总鲜重(g)/相应培养料干重(g)×100。

### 1.5 子实体营养品质

含水量采用干燥法,子实体切片后 50℃烘箱中烘干至恒重,测定烘干前后质量,计算含水量。烘干的子实体以破碎机破碎,过 100 目筛,用于粗蛋白、粗纤维、粗多糖、粗脂肪和氨基酸测定。粗蛋白测定参照《GB/T 6432—2018》<sup>[25]</sup>,粗纤维测定参照《GB/T 5009.10—2003》<sup>[26]</sup>,粗脂肪参照《GB/T 14772—2008》<sup>[27]</sup>,粗多糖采用热水浸提法。子实体粉利用 6 mol/L HCl (含 5 mg/mL 苯酚) 110℃真空抽提 24 h,产物经定性滤纸过滤后利用氨基酸自动分析仪分析氨基酸组分<sup>[28]</sup>。每个处理 3 个重复。

### 1.6 体外抗氧化活性

大球盖菇子实体粗多糖研磨过 100 目筛,以蒸馏水配制 20 mg/mL 粗多糖母液,稀释为 1、2、5 和 10 mg/mL 工作液,用于 DPPH 和·OH 自由基清除活性测定<sup>[28–29]</sup>。每个处理 3 个重复。

### 1.7 统计学分析

采用 Excel 2016 进行数据分析,利用 SPSS 18.0 单因素进行显著性差异分析,采用 GraphPad Prism 8.2.0 作图。试验数据以“平均值±标准差”表示, $P<0.05$  代表数据存在显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 硒对菌丝生长的影响

大球盖菇在固体平板上培养 9 d 后,  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  对大球盖菇菌丝生长的影响如图 1 所示。大球盖菇菌丝在添加 0–30 mg/L 的  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  平板上均能生长,各处理大球盖菇菌丝生长速度大小为  $\text{CK}\approx\text{Se5}\approx\text{Se10}>\text{Se15}>\text{Se20}>\text{Se25}>\text{Se30}$ ,而干重大小为  $\text{CK}\approx\text{Se5}\approx\text{Se10}>\text{Se15}>\text{Se20}\approx\text{Se25}\approx\text{Se30}$ 。不添加  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  的 CK 组菌丝生长速度与干重分别为 3.63 mm/d 和 40.33 mg;  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  浓度为 5 mg/L 和 10 mg/L 时, Se5 和 Se10 组菌丝生长速度分别为 3.74 mm/d 和 3.76 mm/d,干重分别为 40.67 mg 和 41.33 mg,与 CK 组均无显著差异。当  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  浓度进一步升高时,菌丝生长速度与干重下降。 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  浓度为 15 mg/L 时, Se15 组菌丝生长速度和干重分别为 3.58 mm/d 和 34.67 mg,干重显著低于 CK 组,降低 14.03%。 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  浓度为 20–30 mg/L 时,菌丝生长速度与干重进一步下降,分别为 3.10–3.33 mm/d 和 21.00–28.33 mg,分别较对照组下降 8.26%–14.60% 和 29.75%–47.93%。结果表明,低浓度  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  对大球盖菇菌丝生长无显著影响,而高浓度时具有显著抑制作用。

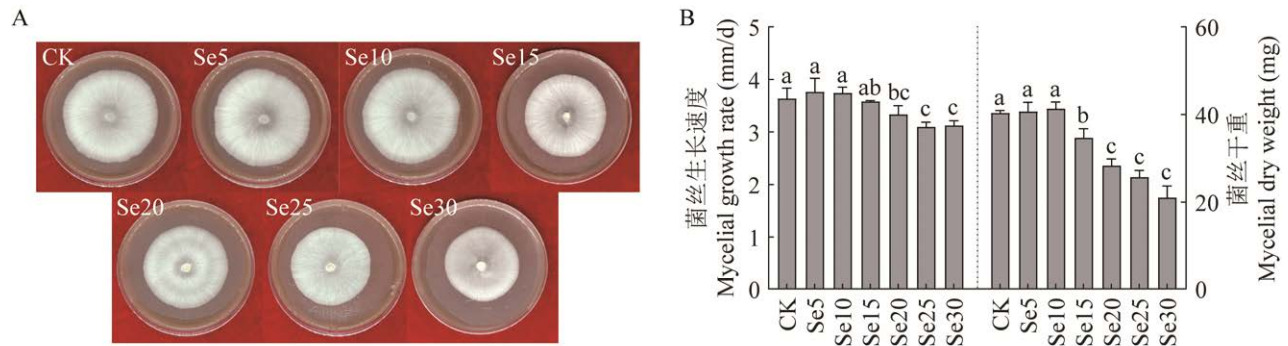


图1 硒对大球盖菇菌丝生长的影响 A: 菌落形态. B: 菌丝生长速度与干重. 不同小写字母表示差异显著

Figure 1 Effects of selenium on mycelial growth of *Stropharia rugosoannulata*. A: Colony morphology. B: Mycelial growth rate and dry weight. Different lowercase letters indicate significant differences.

## 2.2 硒对大球盖菇农艺性状的影响

根据  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  对大球盖菇菌丝生长影响的结果, 选择对菌丝生长影响不显著的 0–10 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  浓度范围的 5 个添加浓度进行生料栽培出菇试验, 收集第一潮菇测定不同浓度  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  对大球盖菇农艺性状的影响, 结果如表 1 所示. 各处理子实体菌盖直径为 39.16–43.27 mm, 菌盖厚度为 25.77–28.44 mm, 菌柄直径为 24.80–28.42 mm, 菌柄长度为 50.93–63.85 mm, 单菇鲜重为 39.51–52.98 g, 一潮菇生物学效率为 52.51%–57.23%. Se7.5 处理表现出最佳的菌盖直径、菌柄直径和单菇鲜重, Se10 处理表现出最低的菌盖直径和单菇鲜

重, 各处理在菌盖厚度和生物学效率方面无显著差异. 结果表明, 在试验浓度范围内, 硒浓度的增加对大球盖菇子实体生物学效率无显著性影响, 而添加浓度为 7.5 mg/kg 时表现出相对较好的农艺性状.

## 2.3 硒对大球盖菇营养品质的影响

不同浓度  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  对大球盖菇子实体营养品质的影响如图 2 所示. 各处理组的含水量为 92.66%–93.36%, 粗蛋白含量为 32.55%–36.60%, 粗纤维含量为 10.14%–10.69%、粗多糖含量为 6.35%–7.14%, 粗脂肪含量为 6.38%–7.18%. 各处理组的含水量、粗纤维和粗脂肪含量无显著

表 1 硒对大球盖菇农艺性状的影响

Table 1 Effects of selenium on agronomic characters of *Stropharia rugosoannulata*

处理 Treatment	菌盖 Pileus		菌柄 Stipe		单菇鲜重 Fresh weight of single mushroom (g)	生物学效率 Biological efficiency (%)
	直径 Diameter (mm)	厚度 Thickness (mm)	直径 Diameter (mm)	长度 Length (mm)		
	CK	40.70±6.43ab	27.48±4.31a	25.73±5.23ab		
Se2.5	41.66±9.10ab	28.32±7.01a	24.80±5.19b	62.61±13.88a	40.42±15.18b	55.33±9.14a
Se5.0	40.92±6.92ab	25.77±4.17a	28.33±5.72a	50.93±15.99b	40.56±12.38b	53.69±18.70a
Se7.5	43.27±7.99a	28.44±5.35a	28.42±9.37a	57.21±17.89ab	52.98±22.45a	52.87±11.23a
Se10	39.16±9.89b	26.75±6.25a	25.30±4.89b	63.85±13.45a	39.51±17.21b	52.51±11.65a

表中数字表示平均值±标准差( $n=50$ ). 同列数据后不同小写字母表示处理组间差异达到显著水平( $P<0.05$ ). 下同  
Figures in the table represent average±standard deviation ( $n=50$ ). Different lowercase letters after the same column of data indicated that the difference between treatment groups reached a significant level ( $P<0.05$ ). The same below.

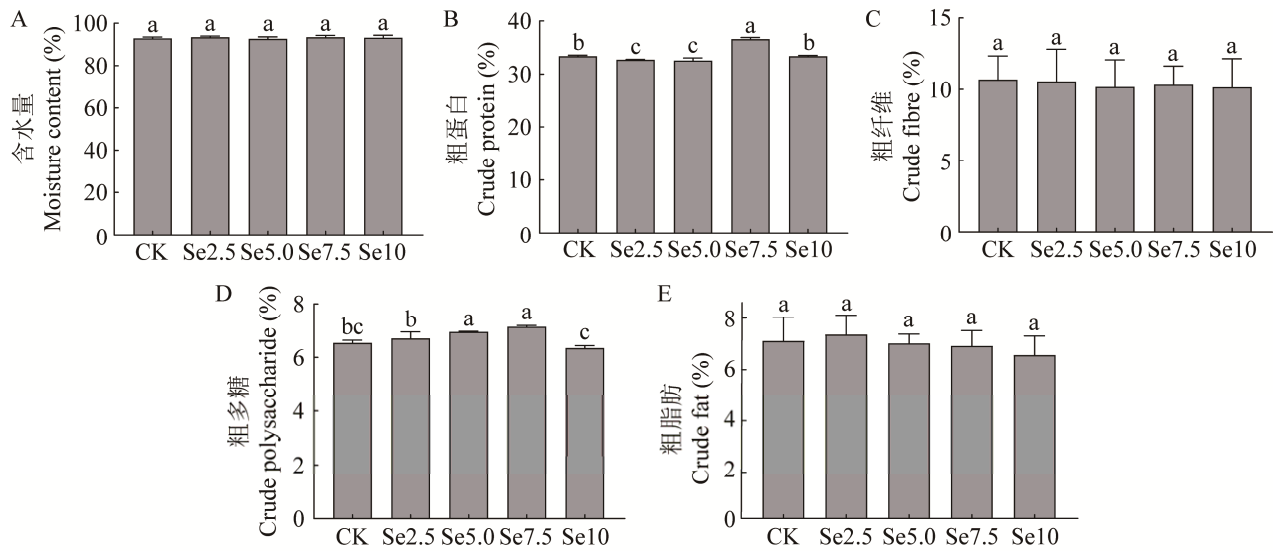


图 2 硒对大球盖菇子实体营养品质的影响 A: 含水量. B: 粗蛋白. C: 粗纤维. D: 粗多糖. E: 粗脂肪

Figure 2 Effect of selenium on nutrient characters of *Stropharia rugosoannulata*. A: Moisture content. B: Crude protein. C: Crude fibre. D: Crude polysaccharides. E: Crude fat.

差异。粗蛋白和粗多糖含量表现出先升高后下降的趋势, Se7.5 组表现出最高的粗蛋白和粗多糖含量, 分别为 36.60%和 7.14%, 显著高于对照组, 表明 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 浓度为 7.5 mg/kg 时能够显著提高大球盖菇子实体的营养品质。

#### 2.4 硒对子实体氨基酸组成的影响

由于氨基酸测定采用酸水解法, 无法测定色氨酸(Trp)、谷氨酰胺(Gln)和天冬氨酰(Asn), 各组分 17 种氨基酸含量如表 2 所示。添加 2.5–10 mg/kg Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 能够显著提高子实体总氨基酸含量(total amino acids, TAA), 并表现出先升高后降低的趋势, Se5.0、Se7.5 组 TAA 含量最高, 分别为 28.79、29.18 g/100 g-dw。Se2.5、Se5.0 和 Se7.5 组甘氨酸(Gly)、丙氨酸(Ala)、缬氨酸(Val)、亮氨酸(Leu)、异亮氨酸(Ile)、脯氨酸(Pro)、苯丙氨酸(Phe)、苏氨酸(Thr)、半胱氨酸(Cys)、酪氨酸(Tyr)、赖氨酸(Lys)、精氨酸(Arg)、组氨酸(His)、谷氨酸(Glu)和天冬氨酸(Asp)等 15 种氨基酸含量均显著高于对照组。

Se10 组氨基酸含量呈下降趋势, Ala、Val 和 Leu 等氨基酸含量显著高于 CK 组, 而 Gly、Ser 和 Cys 等氨基酸含量与 CK 组无显著差异。Glu 不仅是重要鲜味氨基酸, 也是体内氨基酸代谢的重要中间产物, Se5.0 和 Se7.5 组 Glu 含量较 CK 组分别提高了 33.11%和 35.09%, 表明添加 5.0–7.5 mg/kg Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 不仅能够提高大球盖菇子实体风味, 同时有利于非必需氨基酸的合成。

氨基酸的含量与类型是衡量子实体营养性质的重要指标。添加不同浓度 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 处理组的子实体总氨基酸、必需氨基酸(essential amino acids, EAA)、非必需氨基酸(non-essential amino acids, NEAA)、鲜味氨基酸(delicious amino acids, DAA)含量及 EAA/TAA (essential amino acids/total amino acids, E/T)如图 3 所示。Se2.5、Se5.0 和 Se7.5 组 TAA、EAA、NEAA 和 DAA 均显著高于 CK 组, 表明添加 2.5–7.5 mg/kg Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 能够显著提高大球盖菇子实体各类型氨基酸含量, 含有更多的 EAA 和 DAA, 具有更好的营养成分和

表 2 硒对大球盖菇子实体氨基酸含量的影响

Table 2 Effects of selenium on amino acid contents in the fruiting bodies of *Stropharia rugosoannulata*

氨基酸 Amino acid	含量 Content (g/100 g-dw)				
	CK	Se2.5	Se5.0	Se7.5	Se10
Gly <sup>A</sup>	1.10±0.04c	1.17±0.01b	1.29±0.05a	1.31±0.02a	1.10±0.03c
Ala <sup>A</sup>	1.29±0.03c	1.41±0.01b	1.57±0.05a	1.59±0.03a	1.39±0.03b
Val <sup>B</sup>	2.62±0.10c	2.83±0.03b	3.17±0.11a	3.23±0.05a	2.77±0.06b
Leu <sup>B</sup>	1.58±0.04c	1.71±0.02b	1.89±0.07a	1.94±0.03a	1.67±0.04b
Ile <sup>B</sup>	0.96±0.04c	1.06±0.01b	1.17±0.04a	1.19±0.02a	1.02±0.02b
Pro	0.78±0.08c	0.93±0.07b	1.06±0.03a	1.09±0.02a	0.90±0.08b
Phe <sup>AB</sup>	1.03±0.03d	1.11±0.01c	1.22±0.04b	1.26±0.02a	1.09±0.03c
Met <sup>B</sup>	0.90±0.14ab	0.80±0.05b	0.87±0.05ab	0.92±0.09ab	0.95±0.07a
Ser	1.50±0.03b	1.53±0.03b	1.72±0.05a	1.75±0.04a	1.53±0.03b
Thr <sup>B</sup>	1.13±0.01d	1.17±0.02c	1.34±0.04b	1.37±0.02a	1.20±0.02c
Cys	0.12±0.00c	0.13±0.00b	0.14±0.00ab	0.14±0.00a	0.12±0.00c
Tyr <sup>A</sup>	0.86±0.03c	0.91±0.01b	0.99±0.03a	1.02±0.02a	0.93±0.02b
Lys <sup>A</sup>	1.32±0.02c	1.40±0.01b	1.56±0.05a	1.60±0.02a	1.38±0.04b
Arg	1.24±0.03d	1.35±0.02c	1.64±0.06a	1.50±0.02b	1.16±0.02e
His <sup>B</sup>	0.58±0.02c	0.62±0.01b	0.68±0.02a	0.70±0.01a	0.60±0.02bc
Glu <sup>A</sup>	4.56±0.10c	4.83±0.05b	6.07±0.18a	6.16±0.09a	4.59±0.11c
Asp <sup>A</sup>	2.02±0.02c	2.14±0.03b	2.41±0.08a	2.40±0.03a	2.08±0.04bc
Total	23.59±0.39c	25.10±0.27b	28.79±0.89a	29.18±0.45a	24.47±0.58b

<sup>A</sup>: 鲜味氨基酸; <sup>B</sup>: 必需氨基酸

<sup>A</sup>: Delicious amino acids; <sup>B</sup>: Essential amino acids.

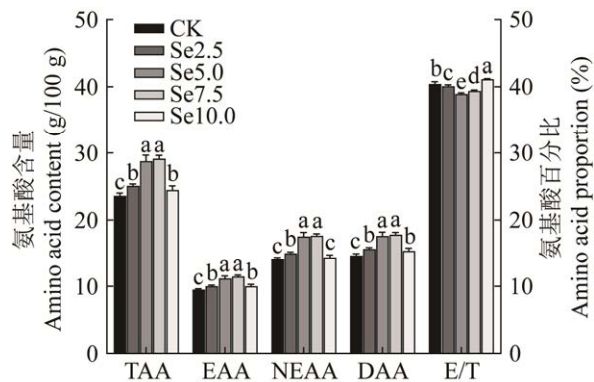


图 3 硒对大球盖菇子实体氨基酸组成的影响

TAA: 总氨基酸; EAA: 必需氨基酸; NEAA: 非必需氨基酸; DAA: 呈味氨基酸; E/T: EAA/TAA  
Figure 3 Effects of selenium on amino acids composition in the fruiting bodies of *Stropharia rugosoannulata*. TAA: Total amino acids; EAA: Essential amino acids; NEAA: Non-essential amino acids; DAA: Delicious amino acids; E/T: EAA/TAA.

口感。另外,随着  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  浓度增加,子实体氨基酸 E/T 呈现先降低后升高的趋势,这可能是由于添加  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  提高了 Glu 的含量,促进了大球盖菇中 NEAA 的生物合成。

## 2.5 硒对子实体粗多糖抗氧化活性的影响

大球盖菇粗多糖对 DPPH 自由基和  $\cdot\text{OH}$  自由基的清除率如图 4 所示。随着浓度升高,大球盖菇粗多糖对两种自由基的清除率逐渐升高。Se7.5 和 Se10 组粗多糖浓度为 1–10 mg/mL 时,对两种自由基的清除率均显著高于 CK 组;10 mg/mL 时活性最高,对 DPPH 自由基清除率分别为 78.98% 和 79.49%,对  $\cdot\text{OH}$  自由基清除率分别为 94.66% 和 97.52%。综合子实体营养性状的结果,培养料中添加适量的  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  不仅能够提高大球盖菇子实体粗多糖含量,还能够提

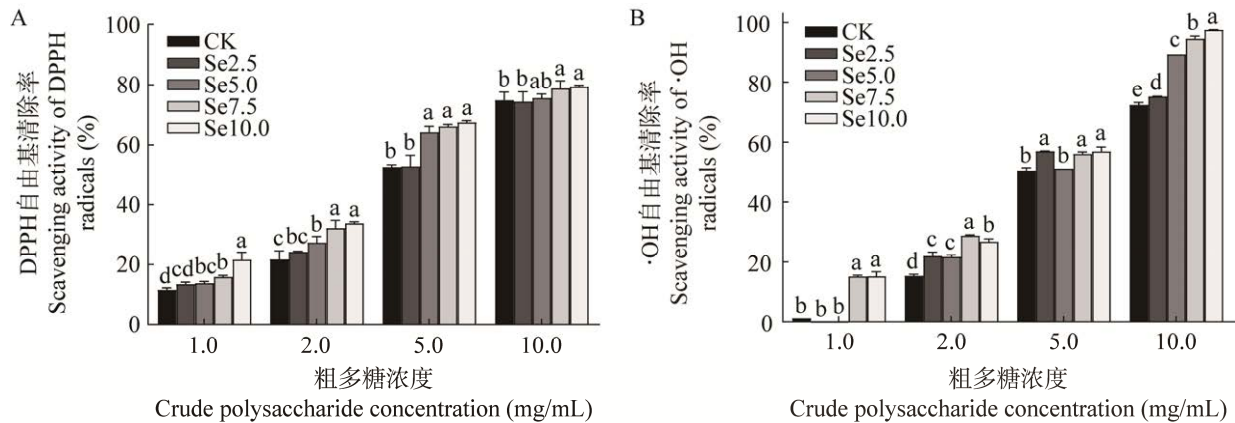


图 4 硒对大球盖菇粗多糖抗氧化能力的影响 A: DPPH 自由基清除率. B: ·OH 自由基清除率

Figure 4 Effects of selenium on antioxidative activities of crude polysaccharides from the fruiting bodies of *Stropharia rugosoannulata*. A: Scavenging ability toward DPPH. B: Scavenging ability toward ·OH.

高粗多糖的抗氧化能力, Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 最适添加浓度为 7.5 mg/kg。

### 3 讨论与结论

食用菌作为硒的良好转化载体, 能够将无机硒转化为安全有效的有机硒, 因此富硒食用菌在天然富硒农产品中占据重要地位。前人对富硒食用菌的研究主要集中在香菇、平菇等大宗食用菌上<sup>[16-21]</sup>, 而对富硒大球盖菇研究较少。随着近年来大球盖菇栽培面积的迅速增加, 开展富硒大球盖菇研究与实践, 能够提高其商品价值、营养价值和生物活性, 提升产品的市场竞争力, 从而促进农民增收。前人研究还表明, 富硒不仅能够使食用菌子实体硒元素含量增加, 还能够提高产量、氨基酸含量、抗肿瘤、抗氧化活性等<sup>[9,13,16]</sup>。因此, 开展大球盖菇富硒研究, 确定外源添加硒对菌丝生长和子实体性状的影响, 不仅能够开发富硒大球盖菇, 还能够提高其产量和营养品质。

前人的研究综述表明, Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 是富硒食用菌栽培主要使用的硒源, 在香菇、平菇、金针菇等食用菌栽培基质中添加量为 5-100 mg/kg<sup>[9]</sup>。

另一方面, Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 是有毒无机硒化合物, 高剂量时具有毒副作用, 也抑制食用菌菌丝生长, 导致子实体减产<sup>[8-9]</sup>。本研究中, 向木屑稻壳固体培养基中加入浓度为 2.5-10.0 mg/L 的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 时, 大球盖菇菌丝生长速度和生物量均比对照组略高, 分别增加了 3.03%-3.58%、0.84%-2.48%, 但无显著影响; 而高于 10 mg/L 时, 菌丝生长速度和生物量均显著低于 CK 对照组, 说明该浓度 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 对大球盖菇菌丝的生长有显著的抑制作用。这与前人报道低浓度硒促进食用菌生长、高浓度硒抑制食用菌生长的特征基本一致<sup>[9]</sup>。魏志毅<sup>[30]</sup>报道, 1.0-5.0 mg/L Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 对平菇菌落直径无显著影响, 而 0.5 mg/L Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 对平菇菌丝生物量无显著影响, 但高于 1 mg/L 时生物量显著下降。Hu 等<sup>[21]</sup>报道, 0.5-40.0 mg/L Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 对黑木耳菌丝生长无显著影响。相关研究结果表明, 不同食用菌对硒的耐受程度不同。另外, Song 等<sup>[22]</sup>报道, 液体发酵条件下, 富硒大球盖菇的 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 最适添加量为 150 mg/L。这可能是由于菌株差异、培养基配方和培养方式不同等导致。

在子实体农艺性状方面, 培养料中添加 2.5-10.0 mg/kg Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 对菌盖直径、菌盖厚



度、菌柄直径和一潮菇生物学效率,与空白对照组相比无显著性差异,主要是由于选择了平板试验推荐的 0–10 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ,这样可以更好地规避高浓度硒导致大球盖菇商品性和产量的降低,因此本试验子实体农艺性状和产量间无显著差异,这与 Solovyev 等<sup>[31]</sup>在富硒水稻、小麦秸秆上栽培双孢菇和平菇研究一致。另外,添加 7.5 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  时,单菇鲜重显著高于其他组,使其具有更好的商品性。Zou 等<sup>[18]</sup>报道,培养料中添加 10 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  能够提高白灵菇 (*Pleurotus tuoliensis*) 产量和品质,并降低子实体畸形率。Zhou 等<sup>[12]</sup>报道,培养料中添加 0–5 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  对杏鲍菇产量均无显著影响。有研究发现培养料中添加 0.5–5.0 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  能够显著提高金针菇子实体产量,添加 10–20 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  时产量与空白对照组无显著差异,当  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  浓度达到 50 mg/kg 时产量显著下降<sup>[16]</sup>。此外,0.5–40.0 mg/L  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  对黑木耳产量无显著影响<sup>[21]</sup>。不同食用菌的最适富硒浓度不同,从子实体农艺性状角度而言,大球盖菇培养料中  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  的建议添加剂量为 7.5–10.0 mg/kg。

富硒不仅能够提高食用菌的硒含量,还能提高食用菌的营养品质和生物功能<sup>[9,11]</sup>。本研究中,添加 0–10 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  对子实体含水量、粗纤维和粗脂肪无显著影响,而添加 7.5 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  能够显著提高子实体粗蛋白和粗多糖含量;添加 2.5–10.0 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  能够显著提高子实体 TAA,添加 5.0–7.5 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  能够显著提高子实体 EAA、NEAA、DAA 和 Glu 含量。Dong 等<sup>[16]</sup>报道,添加 2.5–50 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  能够显著提高金针菇粗多糖、粗蛋白、EAA 和 TAA 含量,而对粗脂肪、粗纤维含量无显著影响,与本研究结果相近;另外,他们添加 5.0 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  也显著提高了金针菇子实体中 Glu 的含量,与本文结果一致。Glu 能够通过转氨基

作用、联合脱氨基作用等多种途径,参与体内氨基酸代谢,被称为体内氨基酸的“中转站”。添加硒提高了子实体 Glu 含量,表明子实体具有更高的氨基酸代谢水平,从而表现出子实体中各种氨基酸含量和粗蛋白含量的升高。另外,粗多糖作为大球盖菇的主要活性物质,对人类的健康具有重要意义,而粗多糖的抗氧化活性主要由供给氢离子和传递能力的强弱来决定<sup>[32]</sup>。本试验表明添加 7.5–10.0 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  能够显著提高大球盖菇粗多糖对 DPPH 自由基和  $\cdot\text{OH}$  自由基的清除率,这可能是由于硒被大球盖菇转化为硒多糖,参与体内抗氧化过程,提高菌丝体活性和子实体抗氧化应激水平,表明添加硒能够提高大球盖菇抗氧化能力,与富硒金针菇<sup>[16]</sup>、富硒香菇<sup>[33]</sup>、富硒蛹虫草<sup>[34]</sup>等报道一致。综合农艺性状、营养品质和抗氧化能力,大球盖菇栽培的最适  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  添加量为 7.5 mg/kg。

综上所述,添加低剂量  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  溶液对大球盖菇菌丝生长速度和生物量无显著影响,而高剂量时表现出显著抑制作用,最适添加浓度为 10 mg/L。以木屑、稻壳、玉米芯为主要原料进行大球盖菇生料栽培时,添加 0–10 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  对一潮菇生物学效率无显著影响,7.5 mg/kg  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  为最适添加剂量,能够显著提高子实体粗蛋白、粗多糖、TAA、EAA、NEAA、DAA 和 Glu 含量以及体外抗氧化活性。大球盖菇栽培中添加适量的硒,不仅能够提高农艺性状,还能提高营养品质。

## REFERENCES

- [1] YANG Y, MENG GL, NI SJ, ZHANG HF, DONG CH. Genomic analysis of *Stropharia rugosoannulata* reveals its nutritional strategy and application potential in bioremediation[J]. Journal of Fungi (Basel, Switzerland), 2022, 8(2): 162.
- [2] AMARESAN N, KUMAR MS, ANNAPURNA K, KUMAR K, SANKARANARAYANAN A. Beneficial

- Microbes in Agro-ecology[M]. Amsterdam: Academic Press, 2020.
- [3] 黄美仙, 岑燕霞, 孙朋, 粟晓微, 平静云, 杨楚楚, 韦杰玉, 戴航. 大球盖菇研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2021(12): 124-129.  
HUANG MX, CEN YX, SUN P, SU XW, PING JY, YANG CC, WEI JY, DAI H. Research progress of *Stropharia rugosoannulata*[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2021(12): 124-129 (in Chinese).
- [4] 宋盼盼, 赵妍, 李治平, 董沁, 杨焕玲, 陈明杰. 硒对镉胁迫下大球盖菇菌丝生长的影响[J]. 菌物学报, 2021, 40(9): 2402-2411.  
SONG PP, ZHAO Y, LI ZP, DONG Q, YANG HL, CHEN MJ. Effect of selenium on mycelium growth of *Pleurotus ostreatus* under cadmium stress[J]. Mycosystema, 2021, 40(9): 2402-2411 (in Chinese).
- [5] 汪虹, 陈辉, 张津京, 陈明杰. 大球盖菇生物活性成分及药理作用研究进展[J]. 食用菌学报, 2018, 25(4): 115-120.  
WANG H, CHEN H, ZHANG JJ, CHEN MJ. Research progresses on bioactive components in *Stropharia rugosoannulata* and their pharmacological effects[J]. Acta Edulis Fungi, 2018, 25(4): 115-120 (in Chinese).
- [6] WU F, ZHOU LW, YANG ZL, BAU T, LI TH, DAI YC. Resource diversity of Chinese macrofungi: edible, medicinal and poisonous species[J]. Fungal Diversity, 2019, 98(1): 1-76.
- [7] LI W, CHEN WC, WU D, ZHANG Z, YANG Y. Taste peptides derived from *Stropharia rugosoannulata* fermentation mycelium and molecular docking to the taste receptor T1R1/T1R3[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 960218.
- [8] HOSSAIN A, SKALICKY M, BRESTIC M, MAITRA S, SARKAR S, AHMAD Z, VEMURI H, GARAI S, MONDAL M, BHATT R, KUMAR P, BANERJEE P, SAHA S, ISLAM T, LAING AM. Selenium biofortification: roles, mechanisms, responses and prospects[J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2021, 26(4): 881.
- [9] XU MM, ZHU S, LI YR, XU S, SHI GY, DING ZY. Effect of selenium on mushroom growth and metabolism: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 328-340.
- [10] TSIVILEVA O, PERFILEVA A. Selenium compounds biotransformed by mushrooms: not only dietary sources, but also toxicity mediators[J]. Current Nutrition & Food Science, 2017, 13(2): 82-96.
- [11] 胡婷, 惠改芳, 赵桂慎, 郭岩彬. 富硒食用菌研究进展[J]. 食用菌学报, 2019, 26(1): 68-76.  
HU T, HUI GF, ZHAO GS, GUO YB. Advances in selenium-enriched edible fungi[J]. Acta Edulis Fungi, 2019, 26(1): 68-76 (in Chinese).
- [12] ZHOU F, PENG Q, WANG M, LIU NN, DINH QT, ZHAI H, XUE MY, LIANG DL. Influence of processing methods and exogenous selenium species on the content and *in vitro* bioaccessibility of selenium in *Pleurotus eryngii*[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 127661.
- [13] ZHOU N, LONG HR, WANG CH, YU L, ZHAO MM, LIU XL. Research progress on the biological activities of selenium polysaccharides[J]. Food & Function, 2020, 11(6): 4834-4852.
- [14] MILETIĆ D, PANTIĆ M, SKNEPNEK A, VASILJEVIĆ I, LAZOVIĆ M, NIKŠIĆ M. Influence of selenium yeast on the growth, selenium uptake and mineral composition of *Coriolus versicolor* mushroom[J]. Journal of Basic Microbiology, 2020, 60(4): 331-340.
- [15] HU T, HUI GF, LI HF, GUO YB. Selenium biofortification in *Herichium erinaceus* (lion's mane mushroom) and its *in vitro* bioaccessibility[J]. Food Chemistry, 2020, 331: 127287.
- [16] DONG Z, XIAO YQ, WU H. Selenium accumulation, speciation, and its effect on nutritive value of *Flammulina velutipes* (Golden needle mushroom)[J]. Food Chemistry, 2021, 350: 128667.
- [17] ZHOU F, YANG WX, WANG MK, MIAO YX, CUI ZW, LI Z, LIANG DL. Effects of selenium application on Se content and speciation in *Lentinula edodes*[J]. Food Chemistry, 2018, 265: 182-188.
- [18] ZOU YJ, DU F, ZHANG HJ, HU QX. Selenium speciation and biological characteristics of selenium-rich Bailing mushroom, *Pleurotus tuoliensis*[J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2018, 30(8): 704-708.
- [19] ZHOU F, DINH QT, YANG WX, WANG MK, XUE MY, BAÑUELOS GS, LIANG DL. Assessment of speciation and *in vitro* bioaccessibility of selenium in Se-enriched *Pleurotus ostreatus* and potential health risks[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 185: 109675.
- [20] PRANGE A, SARI M, von AMELN S, HAJDU C, HAMBITZER R, ELLINGER S, HORMES J. Characterization of selenium speciation in selenium-enriched button mushrooms (*Agaricus bisporus*) and selenized yeasts (dietary supplement)

- using X-ray absorption near-edge structure (XANES) spectroscopy[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology: Organ of the Society for Minerals and Trace Elements (GMS)*, 2019, 51: 164-168.
- [21] HU T, LI L, HUI GF, ZHANG JJ, LI HF, WU WL, WEI XH, GUO YB. Selenium biofortification and its effect on multi-element change in *Auricularia auricular*[J]. *Food Chemistry*, 2019, 295: 206-213.
- [22] SONG Z, JIA L, XU F, MENG FY, DENG P, FAN KM, LIU XN. Characteristics of Se-enriched mycelia by *Stropharia rugoso-annulata* and its antioxidant activities *in vivo*[J]. *Biological Trace Element Research*, 2009, 131(1): 81-89.
- [23] 苗元振, 马继波, 贾乐, 宋振. 大球盖菇硒多糖体内抗氧化能力检测[J]. *生物技术通报*, 2009(S1): 181-183.
- MIAO YZ, MA JB, JIA L, SONG Z. The antioxidant activity determination of Se-polysaccharide from *Stropharia rugoso-annulata* SQ-01 *in vivo*[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2009(S1): 181-183 (in Chinese).
- [24] YANG YR, GUO YX, WANG QY, HU BY, TIAN SY, YANG QZ, CHENG ZA, CHEN QJ, ZHANG GQ. Impacts of composting duration on physicochemical properties and microbial communities during short-term composting for the substrate for oyster mushrooms[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 847: 157673.
- [25] 中华人民共和国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.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of crude protein in feed-Kjeldahl method: GB/T 6432—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018 (in Chinese).
- [26] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 植物类食品中粗纤维的测定: GB/T 5009.10—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- Ministry of Health, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of crude fiber in plant food: GB/T 5009.10—2003[S]. Beijing: China Standards Press, 2003 (in Chinese).
- [27] 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. 食品中粗脂肪的测定: GB/T 14772—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of crude fat in food: GB/T 14772—2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008 (in Chinese).
- [28] GUO YX, YANG YR, QIN Y, GUAN TK, YANG QZ, WANG YX, TANG S, ZHANG GQ, CHEN QJ. Nutritional qualities and antioxidant activity of *Pleurotus floridanus* grown on composted peach sawdust substrate with different composting time[J]. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 2023, 70(1): 210-220.
- [29] 孙悦, 胡渤海, 徐鑫, 刘子璐, 李小凤, 张国庆. 二年残孔菌的培养条件优化及其液体发酵产物的抗氧化及漆酶活性[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(2): 306-311.
- SUN Y, HU BY, XU X, LIU ZL, LI XF, ZHANG GQ. Culture condition optimization, antioxidant capacity, and laccase production of *Abortiporus biennis*[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, 26(2): 306-311 (in Chinese).
- [30] 魏志毅. 平菇液体发酵富集硒和锌的研究[D]. 无锡: 江南大学硕士学位论文.
- WEI ZY. Study on enrichment of selenium and zinc by liquid fermentation of *Pleurotus ostreatus*[D]. Wuxi: Master's Thesis of Jiangnan University (in Chinese).
- [31] SOLOVYEV N, PRAKASH NT, BHATIA P, PRAKASH R, DROBYSHEV E, MICHALKE B. Selenium-rich mushrooms cultivation on a wheat straw substrate from seleniferous area in Punjab, India[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology: Organ of the Society for Minerals and Trace Elements (GMS)*, 2018, 50: 362-366.
- [32] CHEN ZQ, ZHOU XT, ZHANG J, ZHANG H, GENG L, WANG ZY, REGENSTEIN JM. Structure and radio-protective effects of sulfated *Auricularia auricula* polysaccharides[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2018, 42(6): e12666.
- [33] TURLO J, GUTKOWSKA B, HEROLD F. Effect of selenium enrichment on antioxidant activities and chemical composition of *Lentinula edodes (Berk.) Pegl.* mycelial extracts[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2010, 48(4): 1085-1091.
- [34] HU T, LIANG Y, ZHAO GS, WU WL, LI HF, GUO YB. Selenium biofortification and antioxidant activity in *Cordyceps militaris* supplied with selenate, selenite, or selenomethionine[J]. *Biological Trace Element Research*, 2019, 187(2): 553-561.