

硒营养强化对香菇营养品质影响研究

郭洁^{1,2}, 周晓华¹, 王炯³, 魏亮亮¹, 魏红¹, 张迪¹,
孙江南^{1,2}, 贾斌^{1,2}, 刘进玺^{1,2*}, 王铁良^{1,2*}

(1. 河南省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 郑州 450002; 2. 农业农村部农产品质量安全风险评估实验室, 郑州 450002; 3. 三门峡市农业科学研究院, 三门峡 472000)

摘要: **目的** 考察硒营养强化剂添加量与香菇营养品质之间的关系。**方法** 以‘向阳二号’和‘9608’品种香菇为研究对象, 向栽培基质添加不同浓度硒营养强化剂, 考查所得富硒香菇中总硒及铜、锌、铁、锰、钾、钠、钙、镁等元素含量和16种氨基酸、蛋白质、粗多糖、脂肪、粗纤维、灰分等含量。**结果** 两个品种香菇总硒含量均随硒添加量的增加而增加; 硒营养强化对香菇营养品质的影响与香菇的品种也有着很大关联, 硒添加量在0~40 mg/kg范围内, ‘向阳二号’大多数指标均呈先升高后降低的趋势, 天冬氨酸、甘氨酸、酪氨酸等含量在硒添加量2 mg/kg时达到最大值, 蛋白质、粗多糖、苏氨酸、缬氨酸等大部分氨基酸含量在硒添加量6 mg/kg时达到最大值; ‘9608’的天冬氨酸、苏氨酸、缬氨酸、蛋白质等大部分指标均在硒添加量40 mg/kg时达到最大值, 但大多都与未添加硒时差异性不显著。**结论** 对于不同品种的香菇, ‘向阳二号’添加2或6 mg/kg, ‘9608’添加40 mg/kg的硒营养强化剂时, 不仅可以提高香菇的富硒功效性, 还能在一定程度上对香菇品质起到提升作用, 本研究为富硒香菇品种的选择提供参考。

关键词: 富硒香菇; 氨基酸; 蛋白质; 矿质元素; 营养品质

Effects of selenium nutrition enhancement on the nutritional quality of *Lentinus edodes*

GUO Jie^{1,2}, ZHOU Xiao-Hua¹, WANG Jiong³, WEI Liang-Liang¹, WEI Hong¹,
ZHANG Di¹, SUN Jiang-Nan^{1,2}, JIA Bin^{1,2}, LIU Jin-Xi^{1,2*}, WANG Tie-Liang^{1,2*}

[1. Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Agro-products (Zhengzhou), Ministry of Agriculture, Zhengzhou 450002, China; 3. Sanmenxia Academy of Agricultural Sciences, Sanmenxia 472000, China]

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of selenium supplementation on the nutritional quality of *Lentinus edodes*. **Methods** The *Lentinus edodes* species ‘Xiangyang II’ and ‘9608’ were selected for the selenium supplement test. Through the supply mode of cultivation substrate. The content of total selenium, copper, zinc, iron, manganese, potassium, sodium, calcium, magnesium and 16 kinds of amino acids, protein, crude polysaccharide, fat, crude fiber and ash in *Lentinus edodes* was determined. **Results** The total selenium content of 2 kinds of *Lentinus*

基金项目: 河南省农业科学院自主创新基金项目(2022ZC58)

Fund: Supported by the Independent Innovation Fund Project of Henan Academy of Agricultural Sciences (2022ZC58)

*通信作者: 刘进玺, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全及农业标准化。E-mail: 1484931943@qq.com

王铁良, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品质量安全及农业标准化。E-mail: 30031409@qq.com

*Corresponding author: LIU Jin-Xi, Master, Associate Professor, Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology, Henan Academy of Agricultural Sciences, No.116, Huayuan Road, Zhengzhou 450002, China. E-mail: 1484931943@qq.com

WANG Tie-Liang, Master, Assistant Professor, Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology, Henan Academy of Agricultural Sciences, No.116, Huayuan Road, Zhengzhou 450002, China. E-mail: 30031409@qq.com

edodes varieties increased with the increase of selenium supplemental level. In addition, the effects of selenium supplementation on the nutritional quality of *Lentinus edodes* were also closely related to the varieties of *Lentinus edodes*. For 'Xiangyang II', the selenium supplemental level was in the range of 0-40 mg/kg, and most indexes showed a trend of first increasing and then decreasing. The content of aspartic acid, glycine, tyrosine, etc. reached the maximum when the selenium supplemental level was 2 mg/kg, while the content of protein, crude polysaccharide, threonine, valine, etc. reached the maximum when the selenium supplemental level was 6 mg/kg. For '9608', most of the indexes, such as aspartic acid, threonine, valine, protein, etc. reached the maximum value when the selenium supplemental level was 40 mg/kg, but most of them had no significant difference from that when no selenium was added. **Conclusion** For different varieties of *Lentinus edodes*, adding 2 or 6 mg/kg of selenium nutrient fortifier to 'Xiangyang II' and 40 mg/kg of selenium nutrient fortifier to '9608' can not only improve the selenium enriched efficacy of *Lentinus edodes*, but also improve the quality of *Lentinus edodes* to a certain extent, this study provides a reference for the the selection of selenium-rich *Lentinus edodes* varieties.

KEY WORDS: selenium-rich *Lentinus edodes*; amino acid; protein; mineral element; nutritional quality

0 引言

硒是人体重要的含硒酶和硒蛋白的必需组成部分, 缺硒会引起甲状腺代谢异常^[1]、免疫功能障碍^[2]、糖尿病^[3]、心血管疾病及大骨节病^[4-5]等一系列疾病。人体不能自己合成硒, 只能通过外界摄入。香菇可以把无机硒转化成有机硒而更利于人体吸收, 因此富硒香菇的研究与生产应运而生^[6-10]。

目前关于富硒香菇的研究报道中, 其营养评价研究较少。宋文俊等^[11]对不同栽培基质配方下富硒香菇的氨基酸与蛋白质营养进行了评价, 主要考察油茶壳添加比例的影响, 而未研究不同硒浓度添加对香菇的营养品质变化规律; 刘文玲等^[12]对不同硒浓度下栽培的富硒香菇进行了氨基酸评分及蛋白质营养评价, 但其最小硒添加浓度为 20 mg/kg, 未进行更低浓度添加影响研究, 而 GH/T 1135—2017《富硒农产品》中规定食用菌总硒含量在 0.10~5.00 mg/kg, 可见, 除了研究高含量功能性富硒香菇外, 作为富硒农产品的低含量富硒香菇也应得到重视; 梁英等^[13]同样未研究低浓度富硒栽培条件, 且均未讨论硒添加对微量元素等的影响; 而吴丹^[14]的研究只涉及富硒香菇多糖的抗氧化性, 而未提及不同硒添加对富硒香菇营养的影响。综上, 未见系统介绍栽培基质施不同浓度硒所培育富硒香菇的营养品质变化规律的研究。基于此, 本研究以'向阳二号'和'9608'两个品种香菇为对象, 向香菇栽培基质添加不同浓度硒营养强化剂, 考查富硒香菇中微量元素、氨基酸、蛋白质、粗多糖、脂肪、粗纤维等随硒浓度的变化规律, 为富硒香菇产业的发展提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

'向阳二号'和'9608'品种香菇均由三门峡市农业科学研究院食用菌所提供。

17 种氨基酸混合标准液(1 mmol/L, 中国计量科学研究院); 铜、锌、铁、锰、钾、钠、钙、镁、硒的标准溶液(1000 mg/L, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 硝酸、盐酸、高氯酸、过氧化氢(优级纯, 苏州晶瑞化学股份有限公司); 硼氢化钾、氢氧化钾、柠檬酸钠、氢氧化钠(优级纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司); 亚硒酸钠(食品营养强化剂, 纯度 99.7%, 成都万象宏润生物科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

L-8900 全自动氨基酸分析仪(日本 HITACHI 公司); Prodigy 电感耦合等离子体发射光谱仪(美国利曼-徕伯斯公司); Kylin S12 原子荧光光谱仪(北京吉天仪器有限公司); 2300 全自动凯氏定氮仪(丹麦 FOSS 公司); SOX606 脂肪测定仪(山东海能科学仪器有限公司); Lambda 35 紫外分光光度计(美国 Perkin Elmer 公司); Mettler-Toledo 万分之一电子天平(瑞士 Mettler Toledo 公司); ZXFD-B5250 鼓风干燥箱(上海智诚分析仪器制造有限公司); JK-APG-50 高速粉碎机(上海精学科学仪器有限公司); EG35A plus 电热板(北京莱伯泰科仪器股份有限公司)。

1.3 方 法

1.3.1 富硒香菇制备

栽培试验在三门峡市农业科学研究院食用菌所进行, 基质配方为: 木屑 90%、麦麸 9%、石膏石灰 1%、硒营养强化剂水溶液 2 L, 菌包含水量约 65%。硒营养强化剂添加浓度(以 Se 计, 基质以风干含量计)分别为 0、2、6、10、40 mg/kg, '向阳二号'样品编号分别为 S1-0、S1-1、S1-2、S1-3、S1-4, '9608'样品编号分别为 S2-0、S2-1、S2-2、S2-3、S2-4, 每组栽种 3 个平行, 每个平行 500 袋。

风干后的香菇试样先 60℃烘干 5 h, 再按四分法缩分, 经高速粉碎机粉碎, 过 100 目筛, 储存于干净的密封袋中, 备用。

1.3.2 指标测定

香菇样品总硒参照 GB 5009.93—2017《食品安全国家标准 食品中硒的测定》第一法, 采用湿法消解和原子荧光光谱法测定; 16 种氨基酸含量参照 GB 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》进行测定; 蛋白质含量的测定采用凯氏定氮法, 蛋白质换算系数为 6.25。参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》第一法; 铜、锌、铁、锰、钾、钠、钙、镁的测定参照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》第二法, 采用湿法消解, 用电感耦合等离子体发射光谱法测定; 粗多糖含量参照 NY/T 1676—2008《食用菌中粗多糖含量的测定》, 采用紫外分光光度法进行测定; 脂肪含量参照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》第一法进行测定; 灰分参照 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》第一法测定; 粗纤维参照 GB/T 5009.10—2003《植物类食品中粗纤维的测定》进行测定。

1.4 数据处理

使用 Microsoft Office Excel 2003 进行数据整理, SPSS 22.0 进行邓肯氏单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 富硒香菇中氨基酸及蛋白质含量分析

不同硒营养强化剂添加浓度下, ‘向阳二号’和‘9608’香菇总硒含量见表 1, 两个香菇品种的总硒变化趋势相似, 均随着硒营养强化剂添加浓度的增加而增加, 硒的添加量在 0~10 mg/kg 的范围内, 总硒含量是硒营养强化剂添加量的 5 倍左右, 呈现一定线性关系, 硒添加量超过 10 mg/kg 后, 香菇总硒增长渐缓, 但未见下降趋势, 可见香菇有很强的富硒能力和耐硒能力。

从表 1 可知, 对于‘向阳二号’, 随着硒添加量的增加, 除了丙氨酸和苯丙氨酸在未添加硒的时候含量最高, 天冬氨酸、谷氨酸等其他氨基酸含量整体均随着硒添加量的增加先升高后降低, 在硒添加量为 2 或 6 mg/kg 时达到最高值, 这可能是因为硒在香菇菌丝体内富集转化的同时, 参与合成代谢, 促进了氨基酸的合成, 提高了香菇中氨基酸的含量, 但硒浓度过高时反而起到一定抑制作用^[15]。其 16 种氨基酸含量总和同样在硒添加量为 6 mg/kg 时达到最高值, 这与其蛋白质结果相吻合, 另外, 必需氨基酸占氨基酸总含量的百分比均不小于 33.45%, 硒添加量 0、6、40 mg/kg 时, 各比值差异性不显著, 硒添加量为 6 mg/kg 时, 比值最高为 37.84%, 接近联合国粮食和农业组织/世界卫生组织 (Food and Agriculture Organization/World Health Organization, FAO/WHO) 提出的理想蛋白质条件, 即组成蛋白质的每种必需氨基酸与总氨基酸含量比值(E/T)为 40%左右^[16-18]; 对于‘9608’, 随着硒添加量的增加, 除了酪氨酸、脯氨酸外,

天冬氨酸、谷氨酸等其余大部分氨基酸及蛋白质均随着硒添加量的增加先降低后升高, 在硒添加量为 40 mg/kg 时有最高值, 但大多与未添加硒时差异性不显著, 而在硒添加量为 2、6 mg/kg 时有最低值, 其机制有待进一步探讨。另外, 必需氨基酸占氨基酸总含量的百分比均不小于 33.62%, 同样也是在硒添加量为 6 mg/kg 时达到最高为 39.45%, 接近理想蛋白质条件, 但其 16 种氨基酸总量、必需氨基酸含量及蛋白质含量则整体低于‘向阳二号’。

由此可见, 硒营养强化剂的添加, 对香菇的氨基酸和蛋白质含量均有提高, 两个品种的香菇均在硒添加量为 6 mg/kg 时接近理想蛋白质条件。值得注意的是, 两个品种香菇的天冬氨酸和谷氨酸也在添加硒后有一定提高, 而这两种氨基酸呈鲜味^[19-21], 可见, 适当的添加硒后不仅能提高香菇的营养品质, 还能在一定程度上改善香菇的风味, 使香菇更加鲜美。此外, ‘向阳二号’的氨基酸、必需氨基酸及蛋白质含量均高于‘9608’, 这也为香菇品种的选择提供一个参考。

2.2 富硒香菇中各元素含量分析

铜和铁是人体必需微量元素。铁是血红蛋白的重要组成部分, 是许多酶和免疫系统化合物的成分。而铜对血红蛋白的形成起活化作用, 促进铁的吸收和利用, 在血红素形成过程中扮演催化的重要角色^[22]。由表 2 可知, 对于‘向阳二号’, 硒添加量在 0~40 mg/kg 范围时, 铁和铜含量虽分别在在硒营养强化剂浓度为 6 和 10 mg/kg 时有较低值, 但整体呈上升趋势, 在硒添加量为 40 mg/kg 时达到最大值, 且与低浓度硒添加量相比差异性显著 ($P < 0.05$), 其他元素中, 除了钠含量在未添加硒时为最大值外, 各元素含量整体来看均随硒的增加先升高后降低, 均在硒添加量为 6 mg/kg 时达到最大值。由此可见, 适当的添加硒可以促进‘向阳二号’香菇品种中锌、钙等元素含量的提高, 而当硒添加量超过 6 mg/kg 时又对其产生拮抗作用, 与李华等为^[23]研究结果类似, 添加适当浓度的硒对营养元素的吸收起到协同作用, 而过高的硒则又起到拮抗作用; 对于‘9608’香菇, 硒添加量在 0~40 mg/kg 范围时, 锌、铁、锰含量随硒的增加而有所降低, 可能是因为硒对该香菇品种中锌、铁、锰存在拮抗作用; 其余元素如铜、钾等整体来看均随着硒增加先升高后降低, 在硒添加量为 10 mg/kg 时达到最大值, 与‘向阳二号’香菇相似。另外, 两个香菇品种均存在着锌高铜低的现象, 而癌症患者血清中锌、硒往往较低, 铜及铜/锌比值则高于正常人或非肿瘤患者^[24], 故抗癌药物中微量元素含量表现为锌高铜低^[25-26], 而且硒也对肿瘤有较好的预防及抑制作用, 因此本研究所得富硒香菇在预防癌症方面有一定的积极意义。同时, 根据不同香菇品种添加相应浓度的硒营养强化剂可以提高香菇中相应元素的含量, 对香菇品质有一定的提升作用。

表 1 不同硒添加量下‘向阳二号’和‘9608’中硒、氨基酸和蛋白质含量(g/100 g, n=3)

项目	S1-0	S1-1	S1-2	S1-3	S1-4	S2-0	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4
天冬氨酸	1.37±0.02 ^b	1.49±0.04 ^a	1.39±0.02 ^b	1.37±0.01 ^b	1.29±0.02 ^c	1.30±0.02 ^a	1.22±0.02 ^b	1.12±0.02 ^c	1.26±0.03 ^{ab}	1.31±0.02 ^a
*苏氨酸	0.76±0.01 ^b	0.76±0.02 ^b	0.83±0.02 ^a	0.68±0.02 ^c	0.75±0.03 ^b	0.65±0.02 ^{ab}	0.60±0.02 ^b	0.63±0.02 ^b	0.64±0.01 ^b	0.70±0.02 ^a
丝氨酸	0.65±0.02 ^a	0.68±0.00 ^b	0.69±0.02 ^a	0.65±0.02 ^a	0.58±0.01 ^b	0.61±0.01 ^a	0.56±0.01 ^{bc}	0.55±0.01 ^c	0.59±0.02 ^{ab}	0.62±0.01 ^a
谷氨酸	4.01±0.06 ^{bc}	4.32±0.06 ^a	4.38±0.04 ^a	4.06±0.04 ^b	3.83±0.09 ^c	3.51±0.02 ^b	3.12±0.02 ^d	2.55±0.02 ^c	3.36±0.02 ^c	3.62±0.03 ^a
甘氨酸	0.68±0.01 ^b	0.74±0.02 ^a	0.70±0.01 ^b	0.69±0.01 ^b	0.63±0.01 ^c	0.63±0.01 ^a	0.60±0.01 ^{ab}	0.57±0.01 ^b	0.62±0.02 ^a	0.61±0.01 ^a
丙氨酸	0.97±0.01 ^a	0.74±0.01 ^d	0.80±0.02 ^c	0.66±0.02 ^c	0.88±0.01 ^b	0.66±0.01 ^c	0.63±0.01 ^c	0.74±0.02 ^b	0.65±0.01 ^c	0.84±0.01 ^a
*缬氨酸	0.76±0.01 ^b	0.68±0.01 ^c	0.86±0.01 ^a	0.71±0.01 ^c	0.75±0.02 ^b	0.68±0.01 ^a	0.55±0.02 ^c	0.60±0.01 ^b	0.68±0.02 ^a	0.69±0.01 ^a
*蛋氨酸	0.40±0.01 ^b	0.14±0.01 ^d	0.48±0.01 ^a	0.20±0.01 ^c	0.40±0.01 ^b	0.20±0.01 ^b	0.14±0.01 ^c	0.37±0.02 ^a	0.18±0.02 ^b	0.34±0.02 ^a
*异亮氨酸	0.60±0.01 ^{bc}	0.62±0.02 ^b	0.68±0.01 ^a	0.57±0.01 ^c	0.58±0.01 ^{bc}	0.53±0.02 ^a	0.46±0.01 ^b	0.48±0.01 ^b	0.52±0.01 ^a	0.52±0.01 ^a
*亮氨酸	1.07±0.02 ^b	1.07±0.01 ^b	1.14±0.01 ^a	0.97±0.01 ^c	0.98±0.01 ^c	0.91±0.01 ^a	0.78±0.01 ^b	0.92±0.01 ^a	0.89±0.01 ^a	0.92±0.02 ^a
酪氨酸	0.09±0.01 ^b	0.20±0.00 ^a	0.05±0.01 ^c	0.09±0.01 ^b	0.05±0.00 ^c	0.09±0.01 ^b	0.19±0.01 ^a	0.09±0.01 ^b	0.08±0.01 ^{bc}	0.06±0.01 ^c
*苯丙氨酸	0.95±0.02 ^a	0.76±0.02 ^b	0.91±0.01 ^a	0.69±0.01 ^c	0.93±0.02 ^a	0.67±0.01 ^{bc}	0.60±0.02 ^b	0.70±0.02 ^b	0.65±0.02 ^c	0.80±0.00 ^a
*赖氨酸	0.82±0.02 ^c	0.88±0.01 ^b	0.95±0.02 ^a	0.78±0.01 ^c	0.73±0.02 ^d	0.73±0.02 ^a	0.70±0.02 ^a	0.64±0.01 ^b	0.71±0.02 ^a	0.69±0.01 ^a
组氨酸	0.28±0.01 ^b	0.30±0.01 ^{ab}	0.31±0.01 ^a	0.29±0.01 ^{ab}	0.25±0.01 ^c	0.27±0.00 ^a	0.27±0.01 ^a	0.23±0.01 ^b	0.27±0.01 ^a	0.25±0.01 ^{ab}
精氨酸	0.80±0.02 ^b	0.78±0.01 ^{bc}	0.86±0.01 ^a	0.75±0.01 ^c	0.77±0.01 ^{bc}	0.64±0.01 ^{ab}	0.55±0.01 ^b	0.61±0.01 ^b	0.62±0.01 ^{ab}	0.65±0.02 ^a
脯氨酸	0.33±0.01 ^c	0.52±0.02 ^a	0.43±0.02 ^b	0.42±0.01 ^b	0.25±0.00 ^d	0.39±0.01 ^a	0.42±0.01 ^a	0.20±0.01 ^c	0.36±0.01 ^b	0.41±0.01 ^a
T	14.54±0.09 ^b	14.68±0.09 ^b	15.46±0.10 ^a	13.58±0.04 ^c	13.65±0.10 ^c	12.47±0.06 ^b	11.39±0.06 ^d	11.00±0.05 ^c	12.08±0.03 ^c	13.03±0.09 ^a
E	5.36±0.09 ^b	4.91±0.03 ^d	5.85±0.04 ^a	4.60±0.04 ^c	5.12±0.06 ^c	4.37±0.03 ^b	3.83±0.06 ^c	4.34±0.06 ^b	4.27±0.01 ^b	4.66±0.01 ^a
E/T/%	36.86±0.49 ^a	33.45±0.30 ^b	37.84±0.01 ^a	33.87±0.39 ^b	37.51±0.23 ^a	35.05±0.23 ^b	33.62±0.37 ^c	39.45±0.32 ^a	35.35±0.06 ^b	35.77±0.27 ^b
蛋白质	22.31±0.29 ^{bc}	23.13±0.21 ^b	24.02±0.25 ^a	21.10±0.26 ^d	21.60±0.29 ^{cd}	18.61±0.10 ^a	17.40±0.31 ^b	18.42±0.12 ^a	18.51±0.10 ^a	18.74±0.23 ^a
硒添加/(mg/kg)	0	2	6	10	40	0	2	6	10	40
总硒/(mg/kg)	0.32±0.01	10.51±0.04	32.80±0.02	44.54±0.20	147.4±1.2	0.30±0.02	9.53±0.06	27.31±0.12	46.46±0.15	124.2±1.3

注: *为必需氨基酸; E 为必需氨基酸含量; T 为 16 种氨基酸总含量; E/T 为必需氨基酸与氨基酸总含量的百分比; 同行不同字母表示各品种内差异具有显著性, P<0.05。

表 2 不同硒添加量下‘向阳二号’和‘9608’中各元素的含量(mg/kg, n=3)

样品编号	Cu	Zn	Fe	Mn	K	Na	Ca	Mg
S1-0	1.57±0.02 ^c	73.51±0.25 ^c	52.11±0.32 ^b	11.49±0.26 ^{ab}	(2.50±0.02)×10 ^{4b}	179.2±1.5 ^a	(0.98±0.01)×10 ^{3bc}	(1.22±0.03)×10 ^{3a}
S1-1	2.58±0.03 ^c	77.02±0.82 ^b	52.72±0.31 ^b	11.14±0.25 ^b	(2.50±0.04)×10 ^{4b}	126.2±2.6 ^c	(0.78±0.04)×10 ^{3d}	(1.16±0.03)×10 ^{3ab}
S1-2	3.01±0.02 ^b	79.92±0.51 ^a	48.64±0.20 ^a	12.02±0.20 ^a	(2.63±0.03)×10 ^{4a}	138.2±3.1 ^b	(1.28±0.06)×10 ^{3a}	(1.24±0.05)×10 ^{3a}
S1-3	2.14±0.14 ^d	64.84±0.65 ^c	51.12±0.31 ^c	10.31±0.23 ^c	(2.24±0.05)×10 ^{4c}	117.3±3.0 ^d	(0.93±0.02)×10 ^{3c}	(1.04±0.03)×10 ^{3c}
S1-4	4.26±0.11 ^a	69.20±0.30 ^d	61.30±0.36 ^a	9.61±0.07 ^d	(2.26±0.04)×10 ^{4c}	99.04±0.35 ^c	(1.06±0.04)×10 ^{3b}	(1.06±0.03)×10 ^{3bc}
S2-0	4.12±0.10 ^d	84.53±0.52 ^a	69.90±0.21 ^a	10.61±0.26 ^a	(2.15±0.05)×10 ^{4ab}	105.0±2.5 ^a	(0.61±0.01)×10 ^{3c}	(0.99±0.00)×10 ^{3b}
S2-1	4.88±0.07 ^c	72.81±0.35 ^d	66.91±0.55 ^b	8.82±0.17 ^c	(2.16±0.06)×10 ^{4ab}	91.48±1.55 ^b	(0.53±0.01)×10 ^{3d}	(0.99±0.00)×10 ^{3b}
S2-2	5.24±0.06 ^b	80.62±0.21 ^b	64.04±0.45 ^c	10.40±0.27 ^a	(2.20±0.05)×10 ^{4ab}	96.08±1.36 ^b	(0.71±0.01)×10 ^{3b}	(1.05±0.02)×10 ^{3a}
S2-3	5.54±0.08 ^a	75.61±0.26 ^c	58.83±0.32 ^d	9.48±0.06 ^{bc}	(2.27±0.05)×10 ^{4a}	110.2±2.5 ^a	(1.16±0.04)×10 ^{3a}	(1.05±0.02)×10 ^{3a}
S2-4	3.92±0.05 ^d	70.04±0.40 ^e	54.22±0.46 ^e	9.60±0.25 ^b	(2.04±0.06)×10 ^{4b}	95.74±0.67 ^b	(0.67±0.02)×10 ^{3bc}	(0.99±0.01)×10 ^{3b}

注: 同列不同小写字母表示各品种内差异具有显著性, P<0.05, 下同。

2.3 富硒香菇中其他营养成分分析

香菇多糖是一种免疫增强剂, 可以通过增强机体的免疫功能而发挥抗肿瘤活性, 具有免疫调节、抗菌、抗癌、抗氧化等生物特性^[27-28], 香菇灰分中含有大量钾盐及矿物质, 被视为防止酸性食物中毒的理想食品, 对食品行业来说灰分是一项重要的质量指标, 对保证食品质量是十分重要的。从表 3 可知, 两个品种香菇在硒营养强化剂添加量为 0~40 mg/kg 范围内, 随着硒含量的增高, 粗多糖、脂肪、灰分整体均呈现出先升高后降低的趋势, 可见添加适当浓度的硒营养强化剂对这些营养指标有一定协同作用, 而过高的硒则会产生拮抗作用, 对于‘向阳二号’, 粗纤维含量随硒含量的增高先降低后升高, 而‘9608’则随硒含量的增高先升高后降低再升高, 但两种香菇粗纤维含量均在硒添加量为 6 mg/kg 时有最低值, 可见硒添加量为 6 mg/kg 时, 粗纤维含量低, 口感较为细腻。张小爽等^[29]在不同潮期香菇营养成分研究中测得香菇脂肪和粗纤维含量分别为 2.48%~3.82%和 4.37%~5.80%, 黄坚雄等^[30]研究得出的香菇菌盖、菌柄中脂肪和粗纤维含量分别为 2.90%~3.11%和 7.35%~8.60%。对比发现, ‘向阳二号’与‘9608’两个香菇品种脂肪和粗纤维含量整体较低。而靳荣线等^[31]在 14 个不同等级香菇品质研究中得到的香菇粗多糖和粗纤维含量分别为 0.48%~1.01%和 4.6%~5.5%, 其粗多糖含量明显低于‘向阳二号’与‘9608’。因此, 香菇‘向阳二号’与‘9608’添加一定浓度硒后可以得到一种富含多糖、低脂肪、口感细腻的富硒香菇。

表 3 不同硒添加量下‘向阳二号’和‘9608’中粗多糖、脂肪、粗纤维、灰分的含量(n=3)

Table 3 Content of crude polysaccharide, fat, crude fiber and ash in ‘Xiangyang II’ and ‘9608’ under different selenium supplemental levels (n=3)

样品编号	粗多糖 (g/100 g)	脂肪 (g/100 g)	粗纤维 (%)	灰分 (g/100 g)
S1-0	6.61±0.10 ^b	1.83±0.06 ^a	3.31±0.06 ^a	6.22±0.06 ^{bc}
S1-1	7.14±0.06 ^a	1.90±0.00 ^a	2.61±0.06 ^b	6.51±0.06 ^a
S1-2	7.24±0.04 ^a	1.54±0.10 ^b	1.42±0.00 ^c	6.32±0.06 ^{abc}
S1-3	6.83±0.09 ^b	1.42±0.06 ^b	2.70±0.06 ^b	6.41±0.15 ^{ab}
S1-4	6.63±0.08 ^b	1.42±0.11 ^b	3.41±0.06 ^a	6.14±0.06 ^c
S2-0	7.23±0.11 ^c	1.24±0.06 ^c	3.21±0.06 ^b	5.40±0.06 ^{ab}
S2-1	6.95±0.12 ^{cd}	2.01±0.06 ^a	3.82±0.10 ^a	5.53±0.06 ^{ab}
S2-2	8.27±0.06 ^a	1.73±0.10 ^b	1.62±0.00 ^d	5.54±0.00 ^{ab}
S2-3	7.59±0.16 ^b	1.20±0.00 ^c	2.70±0.12 ^c	5.62±0.10 ^a
S2-4	6.82±0.08 ^d	1.30±0.10 ^c	4.01±0.10 ^a	5.31±0.12 ^b

3 结 论

本研究通过栽培基质添加模式对香菇‘向阳二号’和

‘9608’进行硒营养强化剂添加, 对不同硒添加浓度下两种香菇品种各营养品质的变化规律发现, ‘向阳二号’硒营养强化剂添加量为 2 或 6 mg/kg 时, 香菇中绝大部分氨基酸、蛋白质、营养元素、多糖等均有一定的提升, 可见添加适当浓度硒可以有效提升‘向阳二号’香菇的营养品质; ‘9608’随着硒营养强化剂浓度的增加, 除了酪氨酸、脯氨酸、蛋氨酸、铜、钾、钠、钙、镁等元素及多糖、脂肪、灰分等指标与‘向阳二号’变化规律相似, 整体呈现先升高后降低趋势外, 大部分氨基酸、蛋白质、粗纤维等均随着硒添加量的增加先降低再升高, 在硒添加量为 40 mg/kg 时有最大值, 更高浓度硒添加量对其变化规律的影响有待进一步探讨。另外, 对比两个香菇品种, ‘向阳二号’的氨基酸、蛋白质等含量均高于‘9608’。总的来说, 添加适当浓度硒营养强化剂不仅能提升香菇的富硒功效性, 还能在一定程度上提升香菇的营养品质, 这不仅可以更好地推广富硒香菇产品、提高国民对硒元素的摄取, 还为功能农业的研究与发展提供了一定的参考。同时, 富硒效果及富硒后营养品质变化规律与香菇品种有很大关联, 这也为富硒香菇品种的选择提供了一定参考。

参考文献

- [1] 谢燕妮, 陆有飞, 梁珠民, 等. 硒在蛋鸡营养中的应用效果及机理[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2022, (12): 20-24.
XIE YN, LU YF, LIANG ZM, *et al.* Study on application effect and mechanism of selenium in nutrition of laying hens [J]. Heilongjiang Anim Sci Vet Med, 2022, (12): 20-24.
- [2] 武文玥, 马红梅, 武志明, 等. 叶面喷施亚硒酸钠对甜荞籽粒品质的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(6): 854-860.
WU WY, MA HM, WU ZM, *et al.* Effects of foliar spraying of sodium selenite on grain quality of common buckwheat [J]. J Shanxi Agric Sci, 2022, 50(6): 854-860.
- [3] SCHOMBURG L. The other view: The trace element selenium as a micronutrient in thyroid disease, diabetes, and beyond [J]. Hormones (Athens, Greece), 2020, 19(1): 15-24.
- [4] ZHOU XB, YANG J, KRONZUCKER HJ, *et al.* Selenium biofortification and interaction with other elements in plants: A review [J]. Front Plant Sci, 2020, 11: 586421.
- [5] 李傲瑞, 乔新星, 赵飞飞, 等. 硒与人体健康关系研究进展[J]. 绿色科技, 2020, 912: 121-122.
LI AOR, QIAO XX, ZHAO FF, *et al.* Research progress on the relationship between selenium and human health [J]. J Green Sci Technol, 2020, 912: 121-122.
- [6] OGRA Y, ISHIWATA K, ENCINAR JR, *et al.* Speciation of selenium in selenium-enriched Shiitake mushroom, *Lentinula edodes* [J]. Anal Bioanal Chem, 2004, 379(5/6): 861-866.

- [7] 郭洁, 王炯, 贺平, 等. 富硒香菇生产技术规程[J]. 农业与技术, 2021, 41(8): 43–45.
GUO J, WANGN J, HE P, *et al.* Technical regulation of Se-rich *Lentinus edodes* production [J]. Agric Technol, 2021, 41(8): 43–45.
- [8] 王铁良, 周晓华, 刘冰杰, 等. 高效液相色谱-氢化物发生-原子荧光光谱联用技术测定富硒香菇中的硒形态[J]. 食品科技, 2020, 45(10): 284–288, 294.
WANG TL, ZHOU XH, LIU BJ, *et al.* Determination of selenium species in Se-enriched *Lentinus edodes* by high performance liquid chromatography-hydride generation-atomic fluorescence spectrometry [J]. Food Sci Technol, 2020, 45(10): 284–288, 294.
- [9] KLIMASZEWSKA M, GORSKA S, DAWIDOWSKI M, *et al.* Selective cytotoxic activity of se-methyl-seleno-L-cysteine and Se-polysaccharide-containing extracts from shiitake medicinal mushroom, *Lentinus edodes* (Agaricomycetes) [J]. Int J Med Mushrooms, 2017, 19(8): 709–716.
- [10] 曹德宾. 富硒香菇生产技术[J]. 农业知识, 2020, (1): 47–48.
CAO DB. Production technology of selenium-rich *Lentinus edodes* [J]. Agric Knowledge, 2020, (1): 47–48.
- [11] 宋文俊, 邓海平, 刘丹, 等. 油茶壳栽培富硒香菇的营养评价与分析[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(5): 147–151.
SONG WJ, DENG HP, LIU D, *et al.* Nutritional evaluation and analysis of selenium-enriched *Lentinus edodes* cultivated in *Camellia oleifera* shell [J]. Cere Oils, 2022, 35(5): 147–151.
- [12] 刘文玲, 江洁, 解彬, 等. 富硒香菇硒分布和蛋白质营养价值的评价[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(2): 101–106.
LIU WL, JIANG J, XIE B, *et al.* The distribution of selenium in *Lentinus edodes* and evaluation of its nutrient value of protein [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(2): 101–106.
- [13] 梁英, 杨宏志, 陈艳. 富硒香菇、木耳营养成分分析[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2000, (4): 66–69.
LIANG Y, YANG HZ, CHEN Y, *et al.* The analysis of nutrition components of selenium-enriched *Lentinus edodes* and *Auricularia auricular* [J]. J Heilongjiang Bayi Agric Univ, 2000, (4): 66–69.
- [14] 吴丹. 富硒香菇多糖和富硒平菇多糖体外抗氧化活性研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(11): 5841–5843, 5856.
WU D. Study on *in vitro* antioxidant activities of polysaccharide from selenium-rich shiitake mushroom and selenium-rich oyster mushroom [J]. J Anhui Agric Sci, 2010, 38(11): 5841–5843, 5856.
- [15] 孙中涛, 王汉忠, 孙凤鸣, 等. 硒在香菇体内的生物转化及硒蛋白的生物活性[J]. 食品与发酵工业, 2003, (8): 57–60.
SUN ZT, WANG HZ, SUN FM, *et al.* Study on biotransformation of selenium and bio-activity of Se-protein in *Lentinus edodes* mycelia [J]. Food Ferment Ind, 2003, (8): 57–60.
- [16] KUPFAHL C, GEGINAT G, HOF H, *et al.* Lentinan has a stimulatory effect on innate and adaptive immunity against murine *Listeria monocytogenes* infection [J]. Int Immunopharmacol, 2006, 6(4): 686–696.
- [17] 陈巧玲, 李忠海, 陈素琼. 5种地产食用菌氨基酸组成比较及营养评价[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 43–46, 81.
CEHN QL, LI ZM, CHEN SQ. Analysis of amino acid composition and nutritional evaluation in five local edible fungus [J]. Food Mach, 2014, 30(6): 43–46, 81.
- [18] Food and Agriculture Organization/World Health Organization. Energy and protein requirements [Z]. <https://www.fao.org/3/AA040E/AA040E00.htm>
- [19] 彭祺菲, 马文慧, 周宣宣, 等. 阿拉尔市售食用菌品质对比分析[J]. 食品工业科技, 2017, 38(16): 50–54.
PENG ZF, MA WH, ZHOU XX, *et al.* Comparative analysis on quality of edible mushrooms sold in Alar [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38(16): 50–54.
- [20] 李文, 冯杰, 马海乐, 等. 基于靶向代谢产物分析解析大球盖菇发酵特征性风味物质及其呈味特性[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(9): 2736–2744.
LI W, FENG J, MA HL, *et al.* Analysis of the characteristic flavor components and flavor characteristics of the fermentation of *Stropharia rugoso-annulata* based on targeted metabolite assay [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(9): 2736–2744.
- [21] 李润, 杨焱, 刘晓风, 等. 食用菌风味影响因素及其评价研究进展[J]. 食用菌学报, 2020, 27(4): 202–214.
LI R, YANG Y, LIU XF, *et al.* Research progress on influential factors and evaluation of edible fungi flavor [J]. Acta Edulis Fungi, 2020, 27(4): 202–214.
- [22] 王成义, 梁明, 陈星. 四种有机微量元素在家禽生产中的应用[J]. 山东畜牧兽医, 2022, 43(8): 78–80.
WANG CY, LIANG M, CHEN X. Application of four organic trace elements in poultry production [J]. Shandong J Anim Sci Vet Med, 2022, 43(8): 78–80.
- [23] 李华为, 丁昱婵, 朱盛琦, 等. 富硒对大枣中多种微量元素的生物胁迫作用研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(24): 38–43.
LI HW, DING YC, ZHU SQ, *et al.* Effects of selenium enrichment on biological stress of various trace elements in jujube [J]. Food Res Dev, 2020, 41(24): 38–43.
- [24] 孙国平, 潘跃银, 孙昕, 等. 微量元素铜、锌、硒与恶性肿瘤的关系探讨[J]. 安徽医科大学学报, 2002, 37(5): 380–382.
SUN GP, PAN YY, SUN X, *et al.* Relationship of serum trace elements with malignant tumors [J]. Acta Univ Med Anhui, 2002, 37(5): 380–382.
- [25] 陈军, 姚成, 欧阳平凯. ICP-AES法测定猫爪草中常量及微量元素[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, (4): 560–562.
CHEN J, YAO C, OUYANG PK, *et al.* Determination of constant and trace elements in *Ranunculus ternatus* Thunb by ICP-AES [J]. Spectrosc Spect Anal, 2005, (4): 560–562.
- [26] 周晓华, 贺平, 刘冰杰, 等. 河南部分地区不同品种的香菇营养价值分析[J]. 农业与技术, 2020, 40(11): 8–10.

- ZHOU XH, HE P, LIU BJ, *et al.* Nutritional value analysis of different varieties of *Lentinus edodes* in some areas of Henan Province [J]. *Agric Technol*, 2020, 40(11): 8–10.
- [27] 敖珍, 罗迎春, 刘杨, 等. 香菇多糖提取技术研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(8): 202–208.
- AO Z, LUO YC, LIU Y, *et al.* Extraction technology of lentinan: A review [J]. *Food Res Dev*, 2022, 43(8): 202–208.
- [28] 费承鑫, 王婧, 龚诗琪, 等. 香菇多糖生物活性及应用研究进展[J]. *食品安全导刊*, 2022, (5): 147–149.
- FEI CX, WANG J, GONG SQ, *et al.* Progress in the biological activity and application of the mushroom polysaccharide [J]. *China Food Saf Magaz*, 2022, (5): 147–149.
- [29] 张小爽, 徐晓飞, 张丙青, 等. 不同潮期香菇营养成分的比较研究[J]. *现代食品科技*, 2012, 28(6): 691–694, 724.
- ZHANG XS, XU XF, ZHANG BQ, *et al.* Comparison of nutrition components in mushroom in different batches [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2012, 28(6): 691–694, 724.
- [30] 黄坚雄, 袁淑娜, 潘剑, 等. 以橡胶木屑为主要基质栽培的大球盖菇与香菇、平菇的主要营养成分差异[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(8): 1625–1629.
- HUANG JX, YUAN SN, PAN J, *et al.* Difference of primary nutritional ingredient between *Lentinus edodes*, *Pleurotus ostreatus* and *Stropharia rugosoannulata* grown mainly with rubber wood dust [J]. *Chin J Trop Crops*, 2018, 39(8): 1625–1629.
- [31] 靳荣线, 李峰, 邹明, 等. 基于主成分分析法的不同等级香菇品质评价[J]. *中国瓜菜*, 2022, 35(8): 50–56.
- JIN RX, LI F, ZOU M, *et al.* Evaluation of *Lentinula edodes* quality based on principal component analysis [J]. *China Cucurbits Veg*, 2022, 35(8): 50–56.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

作者简介

郭洁, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品质量安全及农业标准化。
E-mail: 150819762@qq.com

刘进玺, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全及农业标准化。
E-mail: 1484931943@qq.com

王铁良, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品质量安全及农业标准化。
E-mail: 30031409@qq.com