DOI:10.12441/spyswjs.20240627001 [文章编号] 1673-1689(2025)12-0010-08

平菇富集微量元素锌和硒的研究进展

张 静[1] 徐萌萌[2,3,4] 赵丽婷[2,3,4] 李 萃[2,3,4] 陈 磊[2,3,4] 明 松[1*] 丁重阳[2,3,4]

(1. 江苏中农科食品工程股份有限公司,江苏 宿迁 223800; 2. 江南大学糖化学与生物技术教育部重点实验室,江苏 无锡 214122; 3. 江南大学生物工程学院,江苏 无锡 214122; 4. 江南大学粮食发酵与食品生物制造国家工程研究中心,江苏 无锡 214122)

摘要:锌和硒是人体必需的微量元素,对维持人体正常生理功能至关重要。锌或硒缺乏不仅会导致免疫功能缺陷,还可能诱发心血管疾病、高脂血症等慢性疾病,严重时甚至增加癌症的发病风险。由于人体无法自主合成锌、硒这类微量元素,需完全通过日常膳食摄入,但天然食物中锌、硒含量较低,难以满足人体需求。因此,开发微量元素强化型食品是满足居民健康需求的重要途径。食用菌是天然的微量元素富集载体,也是理想的膳食补充剂。平菇作为食用菌的典型代表,不仅可单独高效富集锌或硒,还能对2种元素进行同步富集;另外,平菇可将无机锌、无机硒代谢转化为有机锌、有机硒,从而发挥增强机体免疫力及提高抗氧化、抗炎、抗肿瘤等生物活性。作者综述了平菇富集微量元素锌、硒的研究进展,重点涵盖了培养方式、富集能力调控、代谢产物、生物活性及相关产品等,为开发单富集、双富集型精细化平菇系列产品及推动其在大健康领域的广泛应用提供了理论依据。

关键词:平菇;生物富集;微量元素;代谢产物;生物活性

Research Progress in Enrichment of Trace Elements Zinc and Selenium in *Pleurotus* spp.

ZHANG Jing[1] *XU Mengmeng*[2,3,4] *ZHAO Liting*[2,3,4] *LI Cui*[2,3,4] *CHEN Lei*[2,3,4]
MING Song[1*] *DING Zhongyang*[2,3,4]

(1. Jiangsu Zhongnongke Food Engineering Co., Ltd., Suqian 223800, China; 2. Key Laboratory of Carbohydrate Chemistry and Biotechnology, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 4. National Engineering Research Center for Cereal Fermentation and Food Biomanufacturing, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Zinc and selenium are essential trace elements for maintaining human normal physiological function. Deficiency of zinc or selenium can result in immune dysfunction, chronic diseases such as cardiovascular diseases and hyperlipidemia, and even increase the risk of cancer. The human body cannot independently synthesize these trace elements, which can only be obtained from the daily diet. However, natural food sources have low content of zinc and selenium, which is insufficient to meet the body's needs. Therefore, developing fortified foods with trace nutrients is an important approach to meeting residents' requirements. Edible fungi serve as natural carriers for enriching trace elements and ideal dietary supplements. *Pleurotus* spp., as a typical example, not only enrich zinc or selenium but also efficiently enhance both simultaneously. They metabolize inorganic forms of zinc and selenium into organic forms, which demonstrate various biological activities including immune enhancement, antioxidant effects, anti-inflammatory properties, and potential anti-tumor effects among others. The author summarized the research progress in the enrichment of zinc and selenium in

通信作者:明松(1980—),男,硕士,主要从事基于富集微量营养素食药用真菌资源的开发与应用研究。E-mail:ms18951595777@outlook.com

收稿日期:2024-06-27 **修回日期:**2024-08-15

Pleurotus spp., involving the cultivation methods, enrichment regulation, metabolites, biological activities, and related products. These findings provide a theoretical foundation for comprehensively understanding *Pleurotus* spp.-based refined products enriched with zinc or/and selenium while promoting their extensive application in the field of health.
Keywords: *Pleurotus* spp.; biological enrichment; trace element; metabolite; biological activity

锌和硒是人体必需的微量元素，对维持人体健康至关重要[1-2]。锌在人体内主要以酶的组成成分存在，是200多种酶及活性蛋白质的激活因子，在促进蛋白质间相互作用、调节酶催化活性、调控基因表达等方面发挥着重要作用[3]。锌缺乏与厌食症、认知功能障碍、儿童死亡率升高、性腺功能减退、免疫功能受损、腹泻、肺炎、生长发育迟缓和皮肤病患病率升高等密切相关[4]。硒主要存在于人体胰腺、肾肝和脾中，参与人和动物体内多种硒蛋白的合成，同时也是谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）的重要辅基，GSH-Px可以中和过氧化氢及有机过氧化物[3]。硒缺乏会导致克山病和大骨节病，还可能诱发免疫系统疾病、心血管疾病、癌症等[5]。

为全面推进健康中国建设，“十三五”期间，以习近平同志为核心的党中央将保障人民健康置于优先发展的战略位置，作出实施健康中国战略的决策部署。2022年4月27日，国务院办公厅发布了《“十四五”国民健康规划》。此外，世界卫生组织（WHO）在第76届世界卫生大会上批准了“通过安全有效的食品强化来加快预防微量营养素缺乏症”的决议，会员国还通过了WHO成立以来首项关于行为科学促进健康的决议。不同年龄段人群对锌、硒的需求量存在差异：WHO推荐健康成年人每日锌摄入量为6.0 mg，6月龄~3岁儿童每日锌摄入量为1.5~2.5 mg，3~8岁儿童每日锌摄入量为3.0~4.0 mg，妊娠期女性每日锌摄入量为7.0~13.0 mg，哺乳期女性每日锌摄入量为11.0~14.0 mg[4]；WHO推荐健康成年人每日硒摄入量为60 μg，美国国家科学院推荐男性每日硒摄入量为40~70 μg，女性每日硒摄入量为45~55 μg[6]。因此，微量元素是保障人民健康的重要基础，开发安全高效的微量元素补充剂具有重要的现实意义。

人体无法自主合成锌和硒，必须通过日常膳食或营养补充剂获取[7]。锌主要来源于内脏、贝类、蛋类、豆类及燕麦等食物，硒则主要存在于海产品、动物内脏及某些受地域环境影响的植物性食物中[8]。然而，仅靠正常饮食往往难以满足人体对锌、硒的需要，因此开发补充锌、硒的途径尤为重要。天然富锌、硒资源作为理想的微量元素补充剂，已成为近年来的研究热点[9]。食用菌是一类天然的富锌、硒微生物载体，富含功能蛋白质、多糖、膳食纤维等生物活性物质，不仅食用价值较高，还具备抗氧化、抗炎、抗癌、抗菌、免疫调节、保肝、降血糖等生物活性[10]。食用菌具有较强的富集锌、硒等微量元素的能力，还能将无机锌、无机硒代谢转化为锌多糖和硒蛋白等有机形态化合物[11]。相较于无机锌、无机硒，有机锌和有机硒的毒性更低，且生物利用度更高[12-13]。因此，食用菌在微量元素强化产品开发领域具有极大的应用潜能。

平菇在分类学上属于侧耳科、侧耳属，因其营养价值丰富、风味独特而广受消费者喜爱。在世界范围内，平菇是栽培最广泛的食用菌之一，也是全球第二大商业化生产的食用菌品种[10]，同时还是优质的微量元素富集载体。基于此，作者综述了平菇富集微量元素锌、硒的研究进展，总结了其在抗氧化、抗癌、抗肿瘤、缓解疲劳、降血糖、降血脂、抑菌等方面的药用价值和相关产品的开发，揭示了平菇富集微量元素锌、硒的潜力与应用现状，为进一步深化平菇富集锌、硒的机制研究，推动相关产品开发及促进其在医药、食品等领域的精准应用提供了重要的理论依据。

1 平菇富集锌、硒的方式及代谢产物

平菇是人们日常食用的大型食用菌，营养价值极高。新鲜平菇的水分质量分数为85%~95%，子实体中含有约100种生物活性化合物，其中酚类化合物包括酚酸、类黄酮、羟基苯甲酸、羟基肉桂酸、单宁、木脂素和氧化多酚等。在营养成分方面，平菇富含蛋白质、碳水化合物、维生素（维生素B_1、B_2、B_{12}、C、D、E、K）、矿物质（钾、铁、铜、锌、锰）和膳食纤维[10]。平菇还具有显著的抗肿瘤、改善胃肠道功能、增强机体免疫力、保肝解毒、降血糖、降血脂等功效，是开展锌、硒生物转化的优良载体。平菇作为中国居民餐桌上最常见的食用菌之一，在富锌、硒功能食品的开发领域具有十分广阔的应用前景[11]。

1.1 培养方式及富集能力

富锌、硒平菇的培养方式分为液态发酵与固体栽培。液态发酵通常产生菌丝体和菌球，而固体栽培通常产生子实体。采用不同培养方式培养的平菇，其锌、硒元素富集量存在明显差异。目前，关于固体栽培培养富锌、硒平菇的相关研究比液态发酵多。此外，平菇对锌元素的耐受能力普遍高于对硒元素的耐受能力。培养基中硒元素的添加质量分数为5~60 μg/g，而锌元素的添加质量分数为6~400 μg/g。当培养基中硒元素添加质量分数为4 μg/g时，红平菇（*Pleurotus djamor*）对硒元素的富集能力可达（381.50±17.22）mg/kg；当培养基中锌元素的添加质量分数为6 μg/g时，秀珍菇（*Pleurotus geesteranus*）对锌元素的富集能力可达（233.57±15.71）mg/kg。

研究发现，当同步富集锌、硒时，菌丝体对锌、硒的富集效率显著优于子实体。有研究者以杏鲍菇（*Pleurotus eryngii*）为研究对象，向培养基中添加锌、硒元素后，其子实体的锌富集量仅略有增加；尽管子实体对硒的富集效率高于锌，但仍仅为菌丝体富集量的1/20，且外源锌、硒的添加会对杏鲍菇的产量产生不利影响[14]。此外，在锌、硒同步富集过程中，2种元素会产生交互作用，两者添加比例会直接影响平菇对锌、硒的富集能力。当硒添加水平较低时，锌水平的升高会促进平菇对硒的富集；而在同一锌添加水平下，硒水平的升高对平菇富集锌的能力无显著影响[15]。不同培养方式下平菇富集锌、硒的能力见表1。

1.2 锌、硒代谢产物

平菇菌丝体与子实体均可吸收利用外源无机锌、无机硒化合物，并将其代谢转化为有机态化合物，如锌多糖、硒蛋白等。在食用菌富集培养中，外源添加的硒化合物主要包括硒酸盐（SeO_4^{2-}）与亚硒酸盐（SeO_3^{2-}），研究表明，平菇对亚硒酸盐的利用效率最高，硒酸盐次之。有机硒是平菇中硒的主要赋存形态，占比为46%~90%[25]。平菇不仅能将溶解度高、毒性强的硒酸盐、亚硒酸盐同化还原为硒代氨基酸，进而形成硒蛋白，还可将其转化为低毒性

表1 不同培养方式下平菇富集锌、硒的能力

Table 1 Zinc and selenium enrichment of *Pleurotus* spp. cultivated under different cultivation methods

富集元素	培养方式	平菇	添加量	测定结果	参考文献
硒	固体栽培		20~40 μg/g Na_2SeO_3	12 mg/kg	[16]
	固体栽培	*Pleurotus ostreatus*	6.4 μg/g Na_2SeO_3	（19±1）mg/kg	[17]
	固体栽培	*Pleurotus djamor*	25.6 μg/g Na_2SeO_3	（76±2）mg/kg	[17]
	固体栽培	*Pleurotus florida*	4 μg/g Se	（109.59±12.54）mg/kg	[18]
	固体栽培	*Pleurotus sajor caju*	4 μg/g Se	（174.81±14.35）mg/kg	[18]
	固体栽培	*Pleurotus djamor*	4 μg/g Se	（381.50±17.22）mg/kg	[18]
	固体栽培	*Pleurotus geesteranus*	60 μg/g Na_2SeO_3	140.36 mg/kg	[19]
	液态发酵		5 μg/g Na_2SeO_3	硒吸收率为53.25%	[20]
锌	固体栽培		2.13 μg/g $ZnCO_3$	62.6 mg/kg	[21]
	液态发酵		50 μg/g $Zn(CH_3COO)_2$	锌多糖得率为1.04%	[22]
	液态发酵		163.90 μg/g $Zn(CH_3COO)_2$	锌多糖最佳得率为6.70%	[23]
	固体栽培	*Pleurotus geesteranus*	6 μg/g Zn	（233.57±15.71）mg/kg	[18]
	固体栽培	*Pleurotus geesteranus*	350 μg/g $ZnSO_4$	65.38 mg/kg	[19]
锌、硒同步富集	液态发酵		1.5 μg/g Na_2SeO_3、600 μg/g $ZnSO_4$	Se 0.18 mg/kg、Zn 76.47 mg/kg	[15]
	固体栽培	*Pleurotus djamor*	10 μg/g Se(f)Zn*	Se（501.65±14.58）mg/kg	[18]
	固体栽培	*Pleurotus sajor caju*	4 μg/g Se-Zn*	Se（164.79±13.92）mg/kg	[18]
	固体栽培	*Pleurotus eryngii*	Na_2SeO_3、Na_2SeO_4、$Zn(NO_3)_2$ 终浓度均为1.5 mmol/L	Se（9.74±11.06）mg/kg、Zn（2.926±0.987）mg/kg	[24]
	固体栽培	*Pleurotus eryngii*	Na_2SeO_3、Na_2SeO_4、$Zn(NO_3)_2$ 终浓度均为1.5 mmol/L	Se（4.39±0.79）mg/kg、Zn（5.95±2.22）mg/kg	[24]

注：“*”表示硒和锌在非富集小麦秸秆上的双重补充；Se(f)表示硒生物强化小麦秸秆（收集自旁遮普邦的富硒地区）；Se(f)Zn表示添加锌的硒生物。

纳米硒（SeNPs），或转化为挥发性的硒甲基硒化物[26-27]。

此外，食用菌富集锌的外源锌化合物主要为二价锌盐。有研究从富锌金针菇中分离得到6种不同的锌组分，即悬浮态锌、可溶态锌、无机态锌、有机态锌、蛋白质结合态锌及多糖结合态锌，并采用火焰原子吸收光谱法（FAAS）测定各组分的锌含量。结果表明，可溶态锌最为丰富，占总锌的67.50%；在可溶态锌中，有机态锌占比达43.36%，且大部分有机态锌存在于多糖和蛋白质中[28]。研究发现，在培养基中添加相同浓度的Na_2SeO_3和$ZnSO_4$后，平菇菌体中硒蛋白的含量最高，胞外硒多糖次之；而胞外锌多糖含量最高，锌蛋白次之[15]。在平菇与红平菇中，硒主要与白蛋白和谷蛋白结合，且红平菇中白蛋白和谷蛋白的含量均高于平菇[17]。同时，硒代氨基酸的分析结果显示，平菇中的硒代氨基酸主要为硒代蛋氨酸，而红平菇中则以硒代蛋氨酸、硒代半胱氨酸和硒甲基硒代半胱氨酸为主[17]。刘思杉等[19]采用固体基料培养富锌、硒秀珍菇，发现富硒秀珍菇中总蛋白质含量高于富锌秀珍菇，且白蛋白含量最高，其次是球蛋白和谷蛋白。

1.3　富集锌、硒对平菇其他代谢产物的影响

锌、硒的富集培养过程还会对平菇中酚类、黄酮类等其他代谢产物的生物合成产生影响。总体而言，锌、硒的富集可提高平菇中酚类与黄酮类物质的含量，同时也会改变菌丝体和子实体中其他元素的含量，但具体影响与平菇的种类以及组织部位相关。

向培养基中添加0.5~5.0 mmol/L的硒盐（Na_2SeO_4与Na_2SeO_3体积比1∶1），虽然会抑制平菇的生长，但可显著促进酚类和类黄酮物质的生物合成[29]。锌、硒同步富集培养也会导致总酚类化合物、总黄酮类化合物和抗坏血酸含量显著增加[24]。但也有研究发现，锌、硒同步富集会导致平菇中总酚含量下降[18]。有研究者采用固态基质培养富硒平菇，发现富硒处理对平菇中的钙、铜、铁、钾、镁、锰、硫、锌等元素的含量无显著影响，但该处理可提高红平菇中铁、锰、磷、硫、锌的生物利用度，降低白平菇中铁、磷的生物利用度[17]。另有研究显示，锌、硒的富集培养会影响杏鲍菇中的金属元素含量，锌的补充会降低杏鲍菇子实体中钾的含量，同时提高菌丝体中镁的含量、降低铁的含量；硒的补充会降低菌丝体中钙、镁的含量，同时提高铁的含量；而锌、硒的同时补充则会降低菌丝体中钾、锰的含量，提高子实体中镁、钙、铁的含量，并降低子实体中锰的含量[14]。

1.4　生物利用度

生物利用度是指膳食中的营养物质被人体充分利用的比例，主要分为3个阶段：1）营养物质在肠腔中的可吸收性；2）营养物质在体内的吸收、滞留与分布；3）营养物质在组织与细胞层面的利用[30]。锌、硒等微量元素可在人体胃肠道内溶解，随后被人体吸收并发挥多种生理功能。因此，对富集锌、硒食用菌中锌、硒的释放量及赋存状态进行评估，对于制定高效精准的生物富集策略具有重要意义。

研究表明，不同硒浓度培养的白平菇和红平菇的硒生物富集没有改变其生物利用度（均>94%）；但富硒培养显著提高了红平菇中铁（7%~11%）、锰（12%~13%）、磷（4%~6%）、硫（7%~12%）和锌（10%~14%）的生物利用度，同时降低了白平菇中铁（18%~28%）和磷（7%~13%）的生物利用度[31]。Zhou等[25]分析了平菇子实体中硒的总量和赋存形态分布，并通过体外生理提取试验测定了平菇子实体中硒的生物利用度。结果显示，平菇子实体中的硒经胃肠道消化后的生物利用度较高，可达70%~92%，且硒的日摄入量处于安全范围内。

2　富锌、硒平菇的生物活性

2.1　富硒平菇的生物活性

2.1.1　免疫调节活性

硒与人体免疫力密切相关，在硒缺乏状态下，人体的先天性免疫应答与适应性免疫应答均会受损。硒具有免疫刺激作用，对多种免疫细胞（如T细胞、B细胞、自然杀伤细胞、先天免疫细胞等）的活性和功能至关重要[32]。平菇硒多糖的免疫活性研究表明，在试验设定的质量浓度（0~800 μg/mL）范围内，Se-POP-2可显著促进RAW264.7细胞的增殖，同时促进该细胞表面协同刺激因子CD80的表达，增强该细胞的吞噬能力和活化T淋巴细胞CD86的表达，进而激活免疫应答；此外，Se-POP-2还可显著促进RAW264.7细胞分泌活性氧（ROS）、一氧化氮（NO）等活性物质和肿瘤坏死因子（TNF-α）、白细胞介素（IL-1β、IL-6）等细胞因子。体外试验证实，Se-POP-2可调控RAW264.7细胞中核因子蛋白NF-kB的表达，通过激活NF-kB信号通路

发挥免疫调节活性[33]。另有研究探讨了富硒平菇对老年大鼠免疫功能的影响，发现富硒平菇可抑制老年大鼠脾淋巴细胞的凋亡，降低大鼠血清中可溶性白细胞介素-2（sIL-2R）受体的分泌水平，从而实现对老年大鼠免疫功能的调节作用[34]。

2.1.2 抗氧化活性

硒是具有强抗氧化作用的人体必需微量元素之一，目前多数关于富硒平菇生物活性的研究大多集中在硒的抗氧化活性上。硒主要通过硒蛋白（如GPx、硫氧还蛋白还原酶等）发挥抗氧化功能。富硒平菇抗氧化活性的相关研究主要集中在2个方面：1）自由基清除能力；2）自由基清除能力与富硒平菇硒含量之间的关系。

研究表明，富硒平菇对1，1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）等自由基的清除能力随着硒浓度的增加而提升[35]。此外，富硒平菇子实体中的硒多糖对羟自由基和超氧阴离子自由基也表现出较强的清除能力，且清除能力随着硒多糖浓度的增加而提升[36]。对比研究发现，富硒平菇子实体提取液的体外DPPH自由基清除能力优于液态发酵富硒平菇菌丝体和市售普通平菇子实体提取液，且其在小鼠体内的抗氧化效果显著优于亚硒酸钠和普通平菇子实体[11]。

2.1.3 其他生物活性

富硒平菇还具有抗癌、降血脂、抑菌及缓解疲劳等多种生物活性。研究表明，硒含量越低的区域，癌症发病率和死亡率越高，且癌症患者体内的硒水平显著低于健康人群[37]。富硒平菇粉与5-氟尿嘧啶联合使用可抑制肝癌细胞HepG2的生长，起到增效解毒作用[38]。富硒平菇还可以通过抑制脂质过氧化反应实现降血脂功效。研究表明，富硒平菇能显著降低高脂血症大鼠血清中甘油三酯与总胆固醇水平，同时减少大鼠体内脂质过氧化物的生成[39]。食用菌的硒富集过程可提升其抑菌能力。平菇和富硒平菇对沙门氏菌、金黄色葡萄球菌和巨大芽孢杆菌均具有良好的抑制作用，对铜绿假单胞菌也有一定的抑制作用，但对短杆菌和大肠杆菌的抑制效果并不明显，且富硒平菇对各试验菌的抑制效果均优于普通平菇[16]。此外，富硒平菇还具有促进体能恢复、缓解疲劳的作用。与普通平菇相比，富硒平菇能够有效清除血液中的乳酸，对运动后的体能恢复具有明显的促进效果[40]。

2.2 富锌平菇的生物活性

锌是超氧化物歧化酶（SOD）的重要辅因子，具有较强的抗氧化能力。目前关于单独富锌平菇的研究较少，其生物活性研究主要围绕富锌平菇中锌多糖等功能物质。以富锌平菇中提取的锌多糖制备咀嚼片，其在1.0 mg/mL下对羟自由基、超氧阴离子自由基、DPPH自由基均表现出良好的清除效果[22]。另有研究提取富锌红平菇中的锌多糖，并通过动物试验评估其体内抗氧化能力。血清生化指标结果显示，小鼠经灌胃红平菇锌多糖后，肾脏中血肌酐（CREA）、血尿素氮（BUN）含量显著降低；肝组织中谷丙转氨酶（ALT）、谷草转氨酶（AST）活性也出现不同程度的下降；同时，肝组织和肾脏组织中过氧化氢酶（CAT）活性提高、丙二醛（MDA）含量降低。结果表明，红平菇锌多糖可在一定程度上缓解因衰老引发的肝肾脏组织损伤，并对*D*-半乳糖诱导的小鼠衰老具有抑制作用[23]。

此外，杏鲍菇菌丝体锌多糖（En-MZPS）对高脂高胆固醇乳剂（HFHCM）诱导的高脂血症小鼠具有护肝及抗氧化作用。通过监测血清酶活性和血脂水平，发现En-MZPS可显著增强小鼠体内抗氧化酶活性并降低脂质过氧化产物的生成，具有潜在的抗高脂血症作用。体外清除自由基试验结果显示，En-MZPS对羟自由基和DPPH自由基的清除率分别为（59.98±6.29）%和（37.01±2.15）%[41]。

2.3 富锌、硒平菇的生物活性

相较于锌或硒的单一富集研究，关于锌、硒同步富集平菇的生物活性研究较少，且现有研究多聚焦于抗氧化活性领域。研究表明，富锌、硒平菇（SZMs）处理可显著提高小鼠体内GPx和SOD的酶活性，同时降低MDA和脂褐素的水平；在小鼠肺肿瘤模型研究中发现，SZMs能显著减少肿瘤结节数量，同时增强GPx活性。上述研究表明，SZMs可能在提升机体抗氧化能力和预防肿瘤方面发挥重要作用[42]。Gąsecka等[24]研究发现，与普通平菇相比，富锌、硒平菇的抗氧化能力得到明显改善，酚类化合物明显增加；富锌、硒平菇提取物在人血小板中展现出显著的抗氧化活性，其作用机制主要为清除ROS、抑制脂质过氧化反应[43]。

3 相关产品的开发利用

富锌、硒平菇兼具口感好与生物活性多样的优势，相关产品的开发具有广阔的发展潜力。目

前已有产品研制成功，例如，以红平菇锌多糖为原料研制开发了具有抗氧化活性的咀嚼片[22]；通过向面粉中添加富硒平菇粉，成功研制出具有抗癌活性的富硒代糖面包[38]。此外，市场上也已出现部分相关产品，如徐州佳联农业发展有限公司推出的富硒平菇脆、云浮市聚丰富硒生物科技有限公司研发的具有增强免疫力的聚丰牌富硒平菇沙棘片，以及江苏中农科食品工程股份有限公司的富硒平菇粉等。

尽管已有产品问世，但当前相关产品仍存在诸多不足：1）产品形式较为单一，主要以富锌、硒平菇粉为主；2）产品种类分布不均匀，市面上除了具有少量的单独富硒产品外，几乎没有单独富锌和锌、硒同步富集的产品；3）产品质量参差不齐，就现有富硒产品而言，不少产品包装未清晰标识硒含量，普遍存在硒含量过低或超标现象[44-46]；4）产品定位缺乏针对性，用户人群划分宽泛，而不同年龄段人群对硒元素的需求量存在显著差异。

因此，未来相关产品的开发应聚焦于技术体系完善与产品品质提升。同时，需结合不同人群、不同年龄段的营养需求差异，开发出富集效果好、营养成分丰富的富锌、硒平菇产品。

4 展望

锌、硒摄入不足或比例失衡均会对人体健康产生负面影响，因此，科学、合理地补充锌、硒元素至关重要。深度开发富集锌、硒食品资源，并探究其在食品、医药等领域的应用，是当前功能食品领域的研究重点。平菇作为天然的锌、硒富集载体，是理想的膳食补充剂。它不仅能单独高效地富集锌或硒，还可以实现锌、硒的同步富集；同时，平菇能将无机锌、无机硒代谢转化为硒蛋白、锌多糖等有机形式，进而发挥抗氧化、抗癌、抗炎及增强人体免疫力等生物活性，对维护人体健康具有重要作用。

然而，目前相关研究多集中于富集方式、富集水平等基础层面，对锌、硒转化后的赋存形态、富集机制缺乏深入研究，这在一定程度上限制了富锌、硒平菇资源的深度开发与应用。因此，基于明确的元素赋存形态，深入解析并阐明富集机制，同时结合传统育种、基因工程、代谢工程等技术优化平菇种质资源，培育出能高效富集且生物利用度高的平菇品种，进而开发相关系列产品，对于富锌、硒平菇产品的精深加工及其在食品、医药等领域的推广应用具有重要的理论意义和实践价值。此外，尽管当前关于锌、硒同步富集的相关研究相对较少，但已有研究表明，在适宜条件下开展锌、硒同步富集培养，不仅可提升2种元素的富集量，还有助于提高平菇的产量及营养物质含量。因此，未来可进一步研究锌、硒同步富集的相互作用机制，开发出功能更全面、作用效果更优异的富锌、硒系列产品，推动相关产业的高质量发展。

参考文献

[1] 宋兵兵，李建科，刘颖沙，等. 紫阳富硒茶对人肝癌细胞凋亡过程的诱导[J]. 食品与生物技术学报，2019，38（7）：154-159.
SONG B B，LI J K，LIU Y S，et al. Ziyang Se-rich tea induced apoptosis in human hepatoma cells[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2019，38（7）：154-159.（in Chinese）

[2] 邓鹏裔. 人体内9种微量元素多了、少了怎么办?[J]. 科技视界，2023（27）：54-59.
DENG P Y. 9 Kinds of trace elements in human body，what if there is too much or less?[J]. Science & Technology Vision，2023（27）：54-59.（in Chinese）

[3] 刘婧昀，左群. 微量元素铜、锌、硒、铁在机体氧化应激与炎症状态下的变化及机制研究进展[J]. 中国运动医学杂志，2019，38（2）：159-164.
LIU J Y，ZUO Q. Research progress on changes and mechanisms of trace elements Cu，Zn，Se and Fe under oxidative stress and inflammation[J]. Chinese Journal of Sports Medicine，2019，38（2）：159-164.（in Chinese）

[4] KHAN S T，MALIK A，ALWARTHAN A，et al. The enormity of the zinc deficiency problem and available solutions：an overview[J]. Arabian Journal of Chemistry，2022，15（3）：103668.

[5] WANG K X，FANG Q T，HE P M，et al. Unveiling the potential of selenium-enriched tea：compositional profiles，physiological activities，and health benefits[J]. Trends in Food Science & Technology，2024，145：104356.

[6] WROBEL J K，POWER R，TOBOREK M. Biological activity of selenium：revisited[J]. IUBMB Life，2016，68（2）：97-105.

[7] LI Q，YU X，LIU H，et al. Emerging insights into the role of trace elements in human health and disease prevention[J]. Nutrients. 2025，17（23）：3678.

[8] 荆伊. 论科学的膳食模式与人体健康提升的关系[J]. 太原学院学报（自然科学版），2020，38（4）：78-84.
JING Y. Discussion of the association between scientific dietary patterns and the promotion of body health[J]. Journal of Taiyuan University（Natural Science Edition），

2020,38(4):78-84.(in Chinese)

[9] 刘书畅,马布平,周忠发,等. 富硒食用菌的研究进展[J]. 食药用菌,2018,26(2):74-78.
LIU S C,MA B P,ZHOU Z F,et al. Research progress of selenium-enriched edible mushrooms[J]. Edible and Medicinal Mushrooms,2018,26(2):74-78.(in Chinese)

[10] LESA K N, KHANDAKER M U, MOHAMMAD RASHED IQBAL F, et al. Nutritional value, medicinal importance, and health-promoting effects of dietary mushroom (*Pleurotus ostreatus*)[J]. Journal of Food Quality,2022,2022(1):2454180.

[11] 王伟. 富硒平菇的研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2010.

[12] 李建明,王文君,陈慧,等. 植物富硒肽的来源及生物活性的研究进展[J]. 食品工业科技,2024,45(16):391-403.
LI J M, WANG W J, CHEN H, et al. Progress of the source and biological activities of plant-derived selenium-containing peptides[J]. Science and Technology of Food Industry,2024,45(16):391-403.(in Chinese)

[13] DUAN M P, LI T, LIU B, et al. Zinc nutrition and dietary zinc supplements[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition,2023,63(9):1277-1292.

[14] ZIĘBA P,KAŁA K,WŁODARCZYK A,et al. Selenium and zinc biofortification of *Pleurotus eryngii* mycelium and fruiting bodies as a tool for controlling their biological activity[J]. Molecules,2020,25(4):889.

[15] 魏志毅. 平菇液体发酵富集硒和锌的研究[D]. 无锡:江南大学,2021.

[16] 王新风,石红娟,陈颖,等. 富硒平菇的体外抑菌作用研究[J]. 食品科学,2006,27(12):106-109.
WANG X F, SHI H J, CHEN Y, et al. Study on bacteriostasis of the selenium-rich *Pleurotus ostreatus*[J]. Food Science,2006,27(12):106-109.(in Chinese)

[17] DE OLIVEIRA A P, NAOZUKA J. Preliminary results on the feasibility of producing selenium-enriched pink (*Pleurotus djamor*) and white (*Pleurotus ostreatus*) oyster mushrooms: bioaccumulation, bioaccessibility, and Se-proteins distribution[J]. Microchemical Journal, 2019,145:1143-1150.

[18] MADAAN K, SHARMA S, KALIA A. Effect of selenium and zinc biofortification on the biochemical parameters of *Pleurotus* spp. under submerged and solid-state fermentation[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology,2024,82:127365

[19] 刘思杉,江洁,朱淑珍,等. 富锌、富硒秀珍菇蛋白质结构特征及其功能特性[J]. 食品科学,2021,42(12):52-59.
LIU S S, GANG J, ZHU S Z, et al. Structural and functional characteristics of proteins extracted from zinc-enriched and selenium-enriched fruit bodies of *Pleurotus geesteranus*[J]. Food Science,2021,42(12):52-59.(in Chinese)

[20] MILOVANOVIC I, CHILLON T S, HACKLER J, et al. Comparative investigation of selenium-enriched *Pleurotus ostreatus* and *Ganoderma lucidum* as natural sources of selenium supplementation[J]. Food Chemistry, 2024, 437:137842.

[21] FONTES VIEIRA P A, GONTIJO D C, VIEIRA B C, et al. Antioxidant activities, total phenolics and metal contents in *Pleurotus ostreatus* mushrooms enriched with iron, zinc or lithium[J]. LWT-Food Science and Technology,2013,54(2):421-425.

[22] 张梦宇,侯敏婕,时焕军,等. 红平菇锌多糖咀嚼片制备工艺及其体外抗氧化活性研究[J]. 微生物学杂志,2022,42(2):108-116.
ZHANG M Y, HOU M J, SHI H J, et al. Preparation technology and *in vitro* antioxidant activities of zinc polysaccharides chewable tablets from red flat mushroom (*Pleurotus djamor*)[J]. Journal of Microbiology,2022, 42(2):108-116.(in Chinese)

[23] 时焕军,陈婕妤,高铄皓,等. 红平菇锌化多糖制备工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 山东农业科学,2023,55(1):150-156.
SHI H J, CHEN J Y, GAO S H, et al. Optimization of preparation technology and antioxidant activity of zincated polysaccharide from red mushroom[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2023, 55(1): 150-156.(in Chinese)

[24] GĄSECKA M, MLECZEK M, SIWULSKI M, et al. Phenolic composition and antioxidant properties of *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus eryngii* enriched with selenium and zinc[J]. European Food Research and Technology,2016,242(5):723-732.

[25] ZHOU F, DINH Q T, YANG W X, et al. 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

[26] 徐巧林,吴文良,赵桂慎,等. 微生物硒代谢机制研究进展[J]. 微生物学通报,2017,44(1):207-216.
XU Q L, WU W L, ZHAO G S, et al. Selenium metabolism in microorganisms[J]. Microbiology China, 2017,44(1):207-216.(in Chinese)

[27] ŽIŽIĆ M, STANIĆ M, AQUILANTI G, et al. Biotransformation of selenium in the *Mycelium* of the fungus *Phycomyces blakesleeanus*[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry,2022,414(20):6213-6222.

[28] LIU F, PEI F, MARIGA A M, et al. Separation and

speciation analysis of zinc from *Flammulina velutipes*[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2015, 23(4): 630-635.

[29] GĄSECKA M, MLECZEK M, SIWULSKI M, et al. The effect of selenium on phenolics and flavonoids in selected edible white rot fungi [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(1): 726-731.

[30] HALL A G, KING J C, HALL A G, et al. The molecular basis for zinc bioavailability[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(7): 6561.

[31] DE OLIVEIRA A P, NAOZUKA J, LANDERO-FIGUEROA J A. Effects of Se (IV) or Se (VI) enrichment on proteins and protein-bound Se distribution and Se bioaccessibility in oyster mushrooms[J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132582.

[32] AVERY J C, HOFFMANN P R. Selenium, selenoproteins, and immunity[J]. Nutrients, 2018, 10(9): 1203.

[33] 王德. 平菇硒多糖的提取分离、结构表征及免疫活性研究[D]. 长沙：中南大学，2022.

[34] 宋明，许素铭，阴瑞兰，等. 富硒平菇对老年大鼠脾淋巴细胞凋亡及血清 sIL-2R 的影响[J]. 现代预防医学，2011, 38(1): 23-25.
SONG M, XU S M, YIN R L, et al. Effects of oyster mushroom rich in selenium on apoptosis of splenic lymphocyte cell and expression of soluble interleukin-2 receptor in aged rats[J]. Modern Preventive Medicine, 2011, 38(1): 23-25.(in Chinese)

[35] 马玲，赵亚娜，张乐，等. 富硒平菇多糖提取纯化及抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发，2018, 39(10): 38-42.
MA L, ZHAO Y N, ZHANG L, et al. Extraction and purification of polysaccharide from selenium contained *Pleurotus ostreatus* and antioxidant activity assay [J]. Food Research and Development, 2018, 39(10): 38-42.(in Chinese)

[36] 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]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(11): 5841-5843, 5856.(in Chinese)

[37] HAN M Q, LIU K L. Selenium and selenoproteins: their function and development of selenium-rich foods [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(11): 7026-7037.

[38] 余嘉莲，丁静华，罗晓琪，等. 富硒平菇粉的抗癌活性评价及富硒代糖面包的研制[J]. 现代食品科技，2023, 39(1): 177-184.
YU J L, DING J H, LUO X Q, et al. Anticancer activity evaluation of selenium-enriched *Pleurotus ostreatus* fungus powder and development of selenium-enriched sugar substitute bread [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(1): 177-184.(in Chinese)

[39] 凌宏通，宋斌，林群英，等. 富硒食用菌的研究进展[J]. 微生物学杂志，2008,(4): 78-84.
LING H T, SONG B, LIN Q Y, et al. Advances in selenium-enriched edible fungi study [J]. Journal of Microbiology, 2008,(4): 78-84.(in Chinese)

[40] 马敏. 富硒平菇对促进体能恢复的影响[J]. 中国食用菌，2021, 40(4): 99-103.
MA M. Effects of selenium-enriched *Pleurotus ostreatus* on recovery after exercise[J]. Edible Fungi of China, 2021, 40(4): 99-103.(in Chinese)

[41] XU N, GAO Z, ZHANG J J, et al. Hepatoprotection of enzymatic-extractable mycelia zinc polysaccharides by *Pleurotus eryngii* var. *tuoliensis* [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 157: 196-206.

[42] YAN H M, CHANG H. Antioxidant and antitumor activities of selenium- and zinc-enriched oyster mushroom in mice[J]. Biological Trace Element Research, 2012, 150(1): 236-241.

[43] PONIEDZIAŁEK B, MLECZEK M, NIEDZIELSKI P, et al. Bio-enriched *Pleurotus* mushrooms for deficiency control and improved antioxidative protection of human platelets?[J]. European Food Research and Technology, 2017, 243(12): 2187-2198.

[44] 田宗仁. 植物富硒研发与行业发展的对策建议[J]. 现代食品，2021(23): 10-12.
TIAN Z R. Countermeasures and suggestions for plant selenium-rich research and development and industry development [J]. Modern Food, 2021(23): 10-12.(in Chinese)

[45] 吴素春，胡梦娜，蒙淑兰，等. 我国富硒产业发展现状及影响因素研究[J]. 安徽农业科学，2021, 49(14): 212-216.
WU S C, HU M N, MENG S L, et al. Research on the development status and influencing factors of selenium-rich industry in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(14): 212-216.(in Chinese)

[46] 赵雷. 硒的营养价值及富硒农产品开发利用现状[J]. 青海农林科技，2019(1): 50-53.
ZHAO L. Nutritional value of selenium and present situation of development and utilization of selenium-rich agricultural products[J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2019(1): 50-53.(in Chinese)

（责任编辑：张馨文）