

食用菌抗氧化肽研究进展

钟小云 李钦艳 罗艳芬 郭振忠

梅州市农林科学院微生物研究所 广东 梅州 514000

摘要: 食用菌抗氧化肽是从食用菌中提取的具抗氧化活性的小分子蛋白质片段,具稳定性高、易吸收等优势。本文阐述其定义、常见产肽食用菌种类及结构与活性关联;介绍制备技术,包括原料预处理、提取制备、分离纯化等;探讨抗氧化作用机制,涵盖直接、间接及协同机制;分析其在食品工业、医药保健品领域的应用现状与潜力,为食用菌抗氧化肽的研究与产业化提供参考。

关键词: 用菌;抗氧化肽;制备技术

引言:氧化应激引发的细胞损伤与多种疾病密切相关,寻找天然抗氧化剂成为研究热点。食用菌富含多种生物活性成分,其中抗氧化肽因独特优势备受关注。它不仅能直接清除活性氧与自由基,还可调节机体抗氧化系统,在食品保鲜、疾病防治等方面潜力巨大。本文聚焦食用菌抗氧化肽,梳理其研究进展,旨在为其深入研究与应用提供全面视角。

1 食用菌抗氧化肽的基础认知

1.1 食用菌抗氧化肽的定义

食用菌抗氧化肽是从食用菌子实体、菌丝体或发酵液中提取分离得到的一类具有抗氧化活性的小分子蛋白质片段,通常由2-20个氨基酸残基通过肽键连接而成。这类肽段在温和条件下即可发挥作用,具有稳定性高、生物相容性好、无毒副作用等特点,区别于人工合成抗氧化剂和其他天然抗氧化物质。其核心功能是通过自身结构中的活性基团捕捉或清除体内多余活性氧与自由基,减轻氧化应激对细胞的损伤^[1]。与食用菌中其他抗氧化成分如多糖、酚类物质相比,抗氧化肽具有分子质量小、易吸收、作用靶点明确等优势,在食品、医药等领域展现出独特应用价值,是当前天然抗氧化剂研究的重点方向之一。

1.2 常见产抗氧化肽的食用菌种类

自然界中可产生抗氧化肽的食用菌种类丰富,涵盖多个科属,其中担子菌门真菌占据主导地位。香菇作为广泛栽培的食用菌,其子实体和菌丝体中均含有丰富抗氧化肽,经提取纯化后展现出较强自由基清除能力;平菇不仅产量大,其肽类提取物对羟自由基和超氧阴离子均有良好清除效果,是低成本开发的理想原料。金针菇的肽段具有分子量小、易吸收的特点,抗氧化活性受提取工艺影响较小;杏鲍菇肽类物质在酸性和中性条件下稳定性优异,适合在多种食品体系中应用。此外,灵芝、蛹虫草等药用食用菌的抗氧化肽研究也较为深入,其肽段

除抗氧化活性外,还兼具其他生理功能;灰树花、双孢蘑菇等常见品种也被证实含有活性稳定的抗氧化肽,为产业化开发提供了丰富原料选择。

1.3 食用菌抗氧化肽的结构特征与活性关联

食用菌抗氧化肽的活性与其分子结构密切相关,核心结构特征直接决定其抗氧化能力强弱。分子质量方面,多数高活性肽段集中在1-3kDa,该范围肽段易穿透细胞膜,与活性氧和自由基充分接触发挥作用,分子质量过大则渗透性降低,过小则稳定性不足。氨基酸组成上,含疏水性氨基酸(如亮氨酸、异亮氨酸)和芳香族氨基酸(如酪氨酸、苯丙氨酸)的肽段活性更高,这些氨基酸的侧链可通过疏水作用和共轭体系捕捉自由基;含半胱氨酸的肽段因巯基可直接清除自由基,展现出极强抗氧化活性。肽链结构方面,线性肽段通常比环状肽段更易与靶点结合,而部分含特定序列的环状肽则具有更高稳定性。此外,N端和C端的氨基酸种类也影响活性,N端为脯氨酸或丙氨酸的肽段往往具有更优异的抗氧化性能。

2 食用菌抗氧化肽的制备技术与工艺优化

2.1 原料预处理技术

原料预处理是食用菌抗氧化肽制备的基础环节,直接影响后续提取效率和肽段活性。清洗除杂步骤需采用流动清水冲洗,去除原料表面的泥沙、杂质及附着微生物,避免杂质干扰提取过程;对于新鲜原料,需通过热风干燥或真空冷冻干燥脱水,其中真空冷冻干燥能最大程度保留原料中活性成分,减少热敏感肽段降解,干燥后原料含水量需控制在8%以下。粉碎环节采用超微粉碎技术,将干燥原料粉碎至200-300目,增大比表面积,提升后续提取时的溶出效率;部分木质化程度高的原料如灵芝子实体,需先进行适度膨化处理,破坏细胞壁结构。预处理还包括脱脂和脱糖步骤,采用正己烷或乙醇进行索氏提取脱脂,去除脂溶性杂质,通过水提醇沉法脱除

多糖类物质,避免其与肽类物质竞争提取溶剂,确保后续提取液中肽类纯度,为后续制备奠定优质原料基础^[2]。

2.2 肽的提取与制备核心技术

肽的提取与制备核心技术以酶解法为主,辅以发酵法和化学法,其中酶解法因条件温和、活性保留好成为主流。酶解法需根据原料特性选择合适蛋白酶,如香菇采用中性蛋白酶和木瓜蛋白酶复合处理,金针菇选用碱性蛋白酶效果更佳,酶添加量控制在底物质量的1%-3%,温度维持在40-55℃,pH值调节至酶最适范围,反应时间2-4小时,通过控制这些参数实现蛋白质充分水解。发酵法利用微生物如枯草芽孢杆菌、酵母菌的代谢作用产生蛋白酶,对原料中蛋白质进行生物转化,发酵温度28-37℃,发酵时间3-7天,通过优化碳氮比提升肽产量。化学法采用酸或碱水解,虽效率高但易导致氨基酸消旋和肽段降解,仅用于实验室初步提取。提取后需进行灭酶处理,通常采用80-100℃加热10-15分钟,或调节pH值至酶失活范围,确保水解反应终止,保留肽段活性。

2.3 分离纯化技术体系

分离纯化技术体系采用阶梯式工艺,逐步提升食用菌抗氧化肽纯度。初步分离采用离心和过滤技术,离心转速3000-5000r/min,去除提取液中残留的原料残渣和大分子杂质;过滤采用陶瓷膜或有机滤膜,孔径0.22-0.45μm,进一步去除悬浮颗粒。浓缩环节采用真空减压浓缩,温度控制在50-60℃,降低肽液体积同时避免活性损失,浓缩至原体积的1/5-1/10。纯化核心步骤为柱层析,首先通过凝胶过滤层析分离不同分子量肽段,选用Sephadex G-15或G-25凝胶,以去离子水为洗脱剂,收集分子量1-3kDa的活性组分;再通过反相高效液相色谱进行精制,采用C18色谱柱,以乙腈-水(含0.1%三氟乙酸)为流动相梯度洗脱,检测波长220nm,收集主峰对应的组分。部分高纯度需求场景还需采用制备型高效液相色谱进一步纯化,确保肽纯度达到90%以上,满足后续研究和应用需求。

2.4 结构鉴定与活性评价方法

结构鉴定采用多种技术联用方式,全面解析食用菌抗氧化肽的分子特征。分子量测定采用基质辅助激光解吸电离飞行时间质谱,精确测定肽段分子量,误差控制在0.1Da以内;氨基酸序列分析通过埃德曼降解法或质谱法,确定氨基酸组成及排列顺序,明确活性中心结构。二级结构分析采用圆二色谱,通过测定远紫外区CD光谱,分析α-螺旋、β-折叠、无规卷曲等结构比例,探讨结构与活性关系。活性评价分为体外和体内两种体系,体外评价采用DPPH自由基清除法、羟自由基清除法、超氧阴

离子清除法等,测定半数清除浓度评估抗氧化能力;同时采用脂质过氧化抑制实验,评价对生物膜的保护作用。体内评价以小鼠或大鼠为模型,通过灌胃给予肽样品,检测血清中超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶活性及丙二醛含量,观察组织氧化损伤程度,全面评估肽的体内抗氧化效果。

3 食用菌抗氧化肽的抗氧化作用机制

3.1 直接抗氧化机制:清除活性氧与自由基

食用菌抗氧化肽通过多种途径直接清除活性氧与自由基,减轻氧化损伤。其分子结构中的活性基团发挥核心作用,半胱氨酸中的巯基可直接与羟基自由基、超氧阴离子结合,形成稳定的硫化物,实现自由基快速清除;酪氨酸的酚羟基可通过电子转移或氢原子转移,中和自由基活性,生成稳定的酚氧自由基。部分肽段通过螯合铁、铜等过渡金属离子,抑制Fenton反应和Haber-Weiss反应发生,减少羟基自由基等强活性自由基的生成^[3]。另外,肽段的疏水性可增强其与脂质过氧化产物的亲和力,通过捕获脂质自由基中断脂质过氧化链式反应,阻止氧化损伤扩散。不同结构的肽段清除靶点存在差异,小分子线性肽易穿透细胞膜清除胞内自由基,含芳香族氨基酸的肽段对脂溶性自由基清除效果更优,共同构成直接抗氧化网络。

3.2 间接抗氧化机制:调节机体抗氧化系统

食用菌抗氧化肽通过调节机体自身抗氧化系统,增强内源性抗氧化能力,实现间接抗氧化作用。其可促进抗氧化酶的合成与活性提升,作用于肝脏等代谢器官,上调超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶、过氧化氢酶等关键酶的基因表达,增加酶蛋白合成量,同时通过激活酶的活性中心,提高酶催化效率,加速活性氧分解。对于非酶抗氧化系统,肽段可促进谷胱甘肽、维生素C、维生素E等内源性抗氧化物质的合成,或通过保护其不被氧化降解,维持体内抗氧化物质水平。此外,肽段可抑制氧化应激相关信号通路的激活,如下调核因子κB信号通路,减少炎症因子释放,间接降低活性氧生成;同时修复氧化损伤的细胞结构,维持线粒体等细胞器功能稳定,减少活性氧的内生性产生,从源头增强机体抗氧化防御能力。

3.3 协同抗氧化作用机制

食用菌抗氧化肽的协同抗氧化作用体现在多个层面,通过与其他物质协同或自身不同肽段间协同,提升整体抗氧化效果。与其他天然抗氧化剂联用时,呈现显著协同效应,如与食用菌多糖联用,肽段清除小分子自由基,多糖通过调节免疫增强机体抗氧化能力,二者互补提升

抗氧化效率；与维生素C、维生素E联用时，肽段可还原被氧化的维生素，使其恢复抗氧化活性，形成抗氧化循环。同一食用菌来源的不同分子量肽段间存在协同作用，大分子肽段可作为载体将小分子肽段输送至作用靶点，小分子肽段发挥快速清除自由基作用，同时大分子肽段可保护小分子肽段不被降解。肽段与机体抗氧化系统协同，既直接清除自由基，又通过上调抗氧化酶活性增强内源性防御，两种机制相互配合，在低浓度下即可实现高效抗氧化，展现出比单一机制更优异的抗氧化性能。

4 食用菌抗氧化肽的应用现状与产业化探索

4.1 在食品工业中的应用

食用菌抗氧化肽在食品工业中已实现多场景应用，主要作为天然抗氧化剂和功能成分添加。在油脂类食品中应用广泛，添加香菇抗氧化肽可延缓植物油、油炸食品的氧化酸败，延长保质期2-3倍，添加量仅为0.01%-0.05%，远低于人工合成抗氧化剂限量标准。在肉制品加工中，金针菇抗氧化肽可抑制肌红蛋白氧化，保持肉制品鲜亮色泽，同时减少亚硝酸盐生成，提升产品安全性，已应用于香肠、腊肉等产品生产。在乳制品中，杏鲍菇抗氧化肽与乳蛋白协同作用，提升酸奶、奶酪的抗氧化活性，同时改善产品质地和风味，增强产品市场竞争力。另外，还作为功能成分添加到保健食品中，如制成肽粉、口服液等产品，标注抗氧化功能；在烘焙食品中添加可延缓淀粉老化和脂肪氧化，提升产品品质。目前已有多家企业实现规模化生产，建立从原料加工到产品应用的完整产业链，市场接受度逐步提升。

4.2 在医药与保健品领域的应用潜力

食用菌抗氧化肽在医药与保健品领域展现出巨大应用潜力，成为研发热点。在保健品领域，已开发出多种以灵芝、蛹虫草抗氧化肽为核心成分的产品，针对亚健康

康人群推出抗氧化口服液、胶囊等，通过清除自由基缓解疲劳、改善睡眠，经临床观察证实可显著提升人体抗氧化指标^[4]。在医药研发方面，针对氧化应激相关疾病的研究取得进展，实验证实香菇抗氧化肽可通过减轻氧化损伤，改善糖尿病小鼠的胰岛功能，降低血糖水平；杏鲍菇抗氧化肽对神经细胞氧化损伤具有保护作用，为阿尔茨海默病、帕金森病等神经退行性疾病的防治提供新方向。在皮肤医药领域，肽段因良好透皮性和抗氧化活性，被用于研发抗衰护肤品，可减少皮肤皱纹生成、改善皮肤弹性。目前多个候选肽已进入临床前研究阶段，随着作用机制研究深入和临床试验推进，有望开发出治疗氧化应激相关疾病的新型药物，推动医药领域发展。

结束语

食用菌抗氧化肽凭借独特优势，在食品、医药等领域展现出广阔应用前景。目前，其制备技术不断优化，作用机制逐渐明晰，应用产品也日益丰富。然而，在产业化进程中，仍面临成本、标准化等挑战。未来，需加强多学科交叉研究，突破技术瓶颈，推动食用菌抗氧化肽大规模应用，为人类健康和产业发展贡献力量。

参考文献

- [1]南鑫,朱振宝,梁蕾,等.食用菌抗氧化肽研究进展[J].食品科学,2025,46(12):316-324.
- [2]毛雪,赵明,李婷,等.食用菌液体发酵工艺及活性成分应用研究进展[J].食品安全质量检测学报,2025,16(15):195-202.
- [3]矫文玉,王守现,刘宇,等.食用菌活性物质研究进展[J].蔬菜,2025(3):18-29.
- [4]侯娣,杨瑞恒,鲍大鹏.我国食药菌驯化栽培物种名录[J].微生物学杂志,2023,43(06):62-74.