

食用菌菌体自溶机制的研究进展

赵天鹏^{1,2,3}, 郜海燕^{1,3}, 周拥军^{1,3}, 陶菲^{1,3*}

(1. 浙江省农业科学院食品科学研究所, 杭州 310021; 2. 安徽农业大学茶与食品科技学院, 合肥 230036;
3. 浙江省果蔬保鲜与加工技术研究重点实验室, 杭州 310021)

摘 要: 食用菌营养丰富, 具有一定的药用价值, 已成为我国重要的经济作物之一。但由于食用菌水分含量较高, 菌体细嫩没有保护结构, 采后代谢旺盛, 使其不易保鲜且容易发生自溶现象。食用菌菌体自溶是引起其采后损失的主要原因, 严重影响其食用品质和商品价值, 是限制食用菌贮运保鲜的关键因素之一。因此有必要对食用菌自溶的相关物质、影响因子和可能的发生机制进行深入系统地研究, 明确其参与的主要成分和发生机制, 为进一步的调控研究和应用奠定基础。本文综述了食用菌在自溶过程中几丁质、葡聚糖、果胶等细胞壁物质的代谢、细胞膜脂氧化及超微结构的变化, 探讨了食用菌的自溶机制, 为其贮藏保鲜提供理论依据。

关键词: 食用菌; 自溶; 细胞壁代谢; 超微结构

Study on autolysis mechanism of mushroom

ZHAO Tian-Peng^{1,2,3}, GAO Hai-Yan^{1,3}, ZHOU Yong-Jun^{1,3}, TAO Fei^{1,3*}

(1. Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Science, Hangzhou 310021, China;
2. College of Tea & Food Science and Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;
3. Key Laboratory of Fruits and Vegetables Postharvest and Processing Technology Research of Zhejiang Province, Hangzhou 310021, China)

ABSTRACT: As one of important economic crops, mushroom is rich in nutrition and has some medicinal value. Mushroom is hard to preserve due to its high water content, strong physiological metabolism and is lack of protecting structure. All of these shortcomings make autolysis of mushroom easier. The autolysis of mushroom is one of major reasons that lead to the economy loss and seriously affects their eating quality and value of the goods. Furthermore it has become a key limiting factor for the storage of mushroom. It's necessary to research the autolysis-related substance, factors, and the possible mechanism deeply. We need find out major components and mechanisms of autolysis, so that we can be ready for further regulation study and application. This paper reviewed the metabolism of chitin, glucan, pectin and other cell wall material, and it also reviewed membrane lipid peroxidation and changes of ultrastructure during autolysing, so that we can explore the mechanism of autolysis and provide some theoretical basis for the storage of mushroom.

KEY WORDS: mushroom; autolysis; cell wall metabolism; ultrastructure

基金项目: 国家自然科学基金项目(31101369)、公益性行业(农业)科研专项(201303080)、浙江省自然科学基金项目(Y307575)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China(31101369), Agro-Scientific Research in the Public Interest (201303080), and Natural Science Foundation of Zhejiang Province(Y307575)

*通讯作者: 陶菲, 副研究员, 主要研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: taofei02@163.com

*Corresponding author: TAO Fei, Associate Professor, Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Science, No.298, Shiqiao Road, Hangzhou 31000, China. E-mail: taofei02@163.com

1 引言

食用菌具有很高的经济价值,根据中国食用菌协会统计,我国2012年食用菌产量2800万吨,产值1700亿元,从业人员2000万以上,是重要的经济作物^[1]。我国人工栽培的食用菌有60多种,主要的品种有香菇、双孢菇、金针菇、秀珍菇、木耳、银耳等,其中平菇、香菇和双孢菇的产量均达百万吨以上^[2]。食用菌味道鲜美,营养丰富,含有丰富的蛋白质、脂肪酸、纤维素、矿物元素等营养物质。以双孢菇为例,每100 g新鲜双孢菇中,含灰分3.98 g,蛋白质3.7 g,脂肪0.2 g,糖3.0 g,纤维素0.8 g,除此之外还含有17种氨基酸,其中8种是人体必需氨基酸^[3]。食用菌除了具有极高的营养价值外,还有一定的医疗保健作用,如食用菌多糖具有抗肿瘤作用,食用菌中的酪氨酸酶具有降低血压和胆固醇的作用,从食用菌中提取的抗菌素对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌具有很好的抑制效果^[4,5]。

食用菌没有明显的外皮保护,并且组织细嫩,在贮运过程中极易损伤,并易受到微生物的侵扰;采摘后的食用菌仍然具有旺盛的生理代谢,其子实体营养成分被迅速消耗,感官上表现为萎缩、褐变,甚至腐烂、自溶,从而失去商品价值^[6]。食用菌采后保质期短、工业化生产产能的限制以及目前消费者趋向于食用新鲜菇类^[7],这三个方面的要求促使食用菌保鲜技术的不断进步。本文通过综述食用菌菌体在自溶过程中细胞壁物质的代谢、膜脂氧化和超微结构变化,探讨食用菌菌体自溶机制,为食用菌的贮藏、保鲜提供理论依据。

2 食用菌自溶的研究现状

2.1 自溶定义

自溶是指当微生物耗尽外部环境营养物质或者周围的环境不适宜微生物生长时,细胞内的水解酶被释放,酶和反应底物的区室化分布状态被打破,水解酶作用于细胞质、细胞壁使细胞降解,最终表现为子实体溶解、流汁并趋于腐烂^[8]。微生物的自溶分为外自溶和内自溶两种类型。外自溶型:自溶部位是细胞壁,起主要自溶作用的酶是胞壁质酶,主要降解细胞壁中的肽聚糖。大多数细菌以此方式进行自溶。内自溶型:起主要作用的酶是蛋白酶,蛋白酶水解细胞膜,破坏细胞内部结构,大分子物质被降解释放,细胞壁组分很少被降解,最后剩下细胞外壳。以此方式自溶的有真菌、酵母菌及部分细菌^[9,10]。

2.2 食用菌自溶

自溶现象广泛存在于食用菌中,目前的研究认为引起食用菌菌体自溶主要的原因有两个。第一是细菌作用于果蔬组织,引起自溶;Doores等^[11]认为细菌数的增加与双孢菇采后褐变有相关性,但郑秀丽^[12]通过茶树菇的接菌实

验发现,茶树菇自溶后,组织结构被破坏,内容物流出,引起微生物滋生,加速了茶树菇的自溶,证明微生物不是引起茶树菇自溶的直接原因。第二是组织内的自溶酶引起的自溶。乔娜^[13]在研究草菇低温环境下诱导基因表达变化和自溶的相关性时,发现草菇自溶也有可能是子实体细胞强烈的呼吸作用使体内基质迅速消耗而引起的。黄碧芳等^[14]研究了虎奶菇菌丝体自溶机制,结果表明高温破坏膜结构,蛋白水解酶得到释放,渗透压的改变破坏了细胞器的结构导致细胞内容物合成、水解失去平衡,最终引起自溶。

3 与自溶相关的生理代谢

3.1 细胞壁物质组成及代谢

细胞壁是细胞的支撑物,具有一定的形状和硬度,能够维持细胞形态、提供一定的机械强度并控制细胞之间的粘连^[15]。真菌细胞壁厚约100~250 nm,占细胞干物质30%左右。其主要成分为多糖,其次为蛋白质和类脂。不同类型真菌所含细胞壁多糖类型不同。真菌细胞壁多糖主要包括几丁质、纤维素、葡聚糖(β -1,3 葡聚糖、 β -1,6 葡聚糖、 α -1,3 葡聚糖等)、甘露聚糖等。低等真菌的细胞壁成分以纤维素为主,酵母菌以葡聚糖为主,而高等真菌则以几丁质为主^[16]。

真菌细胞壁结构分为2个部分:微纤维部分,无定形基质部分。微纤维部分以几丁质为主(卵菌以纤维素为主)构成细胞壁骨架,无定形基质部分作为骨架上的填充物,主要成分包括葡聚糖、甘露聚糖和一些糖蛋白质^[17]。真菌细胞壁为真菌细胞抵御外界渗透压、机械力提供了保护,此外它还具有抗原性、以及某些酶的结合位点^[18]。自溶过程中,细胞壁结构、成分的变化,会直接导致细胞间的连接松弛,细胞彼此分离,组织结构松散,果实硬度下降,耐贮性降低^[19]。

3.1.1 几丁质的代谢

几丁质又称甲壳素、甲壳质、聚乙酰氨基葡萄糖等,是真菌细胞壁的重要组成部分,广泛存在于节肢动物外骨骼、微生物真菌类,在软体动物和绿藻中也含有一定量的几丁质^[20]。Chen^[21]认为食用菌中的几丁质含量占细胞壁物质总量的44%以上。Bowman^[22]认为细胞壁结构是由几丁质、葡聚糖和糖蛋白的共价交联在一起而形成的一个动态结构,其中几丁质是细胞壁的主要组分。有研究表明食用菌贮藏过程由于几丁质酶的作用,几丁质的含量呈下降趋势,几丁质酶水解几丁质中的 β -1,4糖苷键,生成N-乙酰氨基葡萄糖寡体或单体^[23]。Jiang等^[24]将香菇分别封装在无孔M(0),2孔M(1),4孔M(2)低密度聚乙烯袋中,在4℃下储存16 d,并用未经包装的香菇作为对照。实验结果表明经三种处理,香菇细胞壁多糖均减少,M(2)处理效果最好,细胞壁保持完整,M(0)处理的双孢菇软化严重,可能是CO₂积累,几丁质、纤维素含量下降引起。Lim等^[25]发现

双孢菇在 25 °C 光照 15 h 迅速自溶产生黑色的汁液,通过 PCR 技术从基因层面证实双孢菇自溶过程中几丁质酶合成量明显大于正常双孢菇中的合成量。从侧面反映了双孢菇在自溶过程中几丁质含量是逐渐降低的。然而 Chen 等^[26]在实验过程中发现香菇贮藏过程中,菌柄伸长,菌帽表面积增大,测定结果表明香菇贮藏过程中几丁质的含量逐渐上升。

3.1.2 葡聚糖的代谢

葡聚糖是由 D-葡萄糖聚通过 β -1,2 键、 β -1,3 键、 β -1,4 键、 β -1,6 键等糖苷键聚合而成^[27]。通过研究担子菌属:裂褶菌^[28]、巴西蘑菇^[29]、*Coprinopsis cinerea*^[30]、香菇^[31],均表明食用菌细胞壁中的葡聚糖主要是 β -1,3 葡聚糖和 β -1,6 葡聚糖。侯雪等^[32]对采后香菇子实体进行钙处理,实验结果表明香菇子实体细胞壁的稳定性与 β -1,3 葡聚糖、 β -1,3 葡聚糖酶有一定相关性,通过抑制 β -1,3 葡聚糖酶的活性可以延缓香菇老化。Camelini^[33]测定姬松茸在不同生长阶段的 β -葡聚糖含量时发现, β -葡聚糖含量在姬松茸中含量大小依次为:未成熟阶段>成熟阶段>老化阶段。

3.1.3 果胶物质的代谢

果胶的降解直接影响果实的硬度,是果实衰老软化的重要原因^[34]。果胶主要分布在相邻细胞的胞间层和初生壁中,与纤维素、半纤维素形成交联结构,共同维持细胞的骨架形态^[35]。它是由不同酯化度的半乳糖醛酸通过 α -1,4 糖苷键聚合而成的杂聚糖,主要成分除了半乳糖醛酸,还包括半乳糖、鼠李糖、阿拉伯糖等^[36]。根据成分和理化性质可将果胶分为三类:果胶酸、果胶和原果胶。Brummell^[37]认为果实成熟软化的早中期果胶分子开始解聚,后期变得非常明显。杨宏顺^[错误!未定义书签]认为在不同成长阶段,果蔬中的果胶以不同的形式存在:果蔬在未成熟阶段, -OR 键为 -OCH₃, 此时甲酯化含量很高,果胶以原果胶形式存在。成熟阶段,酯键开始水解,部分 -OR 键为 -OH, 甲酯化含量开始降低,此时主要以果胶形式存在于果蔬中。果蔬继续完熟时,酯键水解增多, -OR 表现为 -OH, 此时主要以果胶酸形式存在。果蔬自溶过程中水溶性果胶和低分子量果胶含量随贮藏时间延长逐渐增加。胡笑安^[38]研究发现柑橘贮藏过程中,柑橘皮中水溶性果胶含量逐渐上升。沈奇等^[39]利用不同浓度的 CaCl₂ 溶液对双孢菇进行处理,并测定原果胶和可溶性果胶含量在贮藏期间的变化,实验结果表明贮藏过程中双孢菇体内细胞壁不断降解,原果胶含量不断下降,水溶性果胶含量升高。

3.1.4 纤维素的代谢

纤维素是由葡萄糖单元通过 β -1,4 糖苷键聚合而成的链状大分子结构,并以微纤维丝的形式存在于细胞壁内。一个微纤维丝大概需要 2000 个纤维素分子组成。微纤维丝以三维晶体的形式有序地排列在细胞周围,其间填以蛋白质和非纤维素多糖。纤维素在细胞壁中起着维持细胞形状、增强细胞壁的强度和韧性的作用^[40]。研究表明纤维素含量

的变化和果实的软化、衰老有密切的联系。张华云等^[41]认为构成香菇细胞壁的主要成分是纤维素、半纤维素、果胶。随着贮藏时间延长纤维素酶对香菇细胞壁的降解率逐渐增大。巫光宏等^[42]在 5 °C、25 °C 下对姬菇进行贮藏,实验结果表明 25 °C 贮藏条件下,姬菇迅速自溶,25 °C 贮藏期间其纤维素酶(Cx)酶活明显高于 5 °C。郑秀丽^[错误!未定义书签]认为多聚半乳糖醛酸酶(PG)和 Cx 是茶树菇自溶的关键酶,茶树菇自溶过程中 PG、Cx 被释放出来,与纤维素、果胶反应,从而使果胶、纤维素发生降解,最终导致茶树菇自溶。

3.2 膜脂过氧化

食用菌贮藏过程中,活性氧代谢失衡,导致了活性氧的积累,活性氧引发膜脂过氧化,膜脂过氧化产生的有害物质破坏了细胞的膜结构,导致细胞内水解酶释放、细胞渗透压改变,加速食用菌的自溶进程^[43]。刘伟^[44]通过不同的温度条件对草菇进行处理,发现贮藏过程中膜电导率上升,丙二醛(MDA)不断积累,抗氧化相关酶活降低,因此认为膜脂过氧化是导致草菇品质劣变的最主要因素。边晓琳^[45]发现金针菇品质劣变过程中超氧阴离子(O₂⁻)、MDA 含量不断上升,从而加速了膜脂过氧化进程,进一步破坏细胞膜结构的完整性,使金针菇迅速衰老。王成涛^[46]在研究金针菇的贮藏保鲜中发现贮藏过程中金针菇超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)酶活减弱,脂氧合酶(LOX)、多酚氧化酶(PPO)酶活增强从而导致了 O₂⁻、-OH 含量上升,膜结构遭受破坏,细胞内容物渗出导致金针菇衰老、自溶。孙娅等^[47]在低温条件下(0~2 °C,湿度 90%~95%)以不同浓度的 CaCl₂(0.5%、1%、2%)处理采后的双孢菇,并以清水处理为对照,研究双孢菇的生理变化。结果表明 0.5%钙处理的双孢菇 O₂⁻生成速率降低,LOX 活性降低,POD、SOD、CAT 酶活上升,双孢菇膜脂过氧化进程得到抑制,采后衰老得到明显控制。

4 超微结构变化

细胞内各种细胞器结构在普通光学显微镜下不能够被很好地观察、分辨,电子显微镜能够很好地显示组织、细胞的显微结构以及它们的不同功能状态和分化发育过程中的变化^[48]。通过观察食用菌细胞超微结构可以帮助我们更好地了解食用菌的自溶机制。平菇在贮藏过程中,膜结构随着贮藏时间的延长逐渐遭到破坏,相对电导率逐渐上升^[49]。姜红波^[50]对不同贮藏阶段的茶树菇超微结构进行观察,新鲜的茶树菇细胞壁、质膜结构完整,细胞内可以清晰观察到不同形状的内质网、线粒体双层膜、内膜内折形成的嵴以及线粒体上大量的核糖体。贮藏后期茶树菇细胞壁、膜系统遭到严重破坏,细胞内的细胞器分布散乱,线粒体数目减少,线粒体双层膜、内折形成的嵴模糊,核糖体和内质网急剧减少,但是溶酶体数目增多。朱继英等^[51]研究气

调贮藏对双孢菇超微结构的影响时,发现双孢菇贮藏过程中随着贮藏时间的延长褐变程度越来越严重,子实体细胞结构遭受破坏程度也逐渐增大。陶菲等^[52]在研究真空预冷处理对双孢菇品质影响时发现,双孢菇在贮藏过程中失水严重,组织中的中空管状结构遭受严重破坏,贮藏末期对照组组织网状菌丝体结构不再完整,细胞壁结构受损严重,部分细胞完全自溶。

5 展 望

采后的食用菌仍然进行旺盛的生理代谢和呼吸作用,这些生理活动会急剧消耗食用菌体内的营养物质。在无法获取外来营养物质的条件下,为了能够维持这些生理代谢的进行,只能消耗菌体自身的营养物质甚至是消化自身的组织,最终导致食用菌的自溶。食用菌自溶过程中细胞壁物质的降解使细胞壁结构遭到破坏;不饱和脂肪酸被氧化、活性氧代谢产物的积累导致细胞膜、细胞器膜缺失。而细胞膜、细胞壁的破坏使细胞内容物流出,最终的表现是汁液流出、风味变差、失去商品价值。自溶过程中细胞壁结构的变化和细胞壁物质的代谢相关,但是哪种组分在自溶的不同阶段对细胞壁结构变化影响最大;在菌体自溶过程中起主导作用的酶;超微结构的变化和膜脂氧化与自溶的相关性等方面还缺乏深入的研究。在后续的研究中,期望能够找到影响自溶的关键因素,明确食用菌自溶与细胞壁物质代谢的机制,为食用菌的采后物流贮藏和运输提供理论和应用指导。然后通过多种技术手段来控制这些因素,最终达到延长食用菌贮藏期和保持其品质的目的。

参考文献

- [1] 本刊讯. 我国食用菌产业有望实现新跨越[J]. 农村工作通讯, 2014, 04: 29.
Journal News. Our mushroom industry is expected to achieve a new leap[J]. Rural Work Commun, 2014, 04: 29.
- [2] 吴素蕊, 赵春艳, 侯波, 等. 近5年我国食用菌生产区域布局情况分析[J]. 中国食用菌, 2013, 32(001): 51–53.
Wu SR, Zhao CY, Hou B, et al. Analysis on Chinese edible fungus production area layout of nearly five years[J]. Ed Fungi Chin, 2013, 32(001): 51–53.
- [3] Kalač P. A review of chemical composition and nutritional value of wild-growing and cultivated mushrooms[J]. J Sci Food Agric, 2013, 93(2): 209–218.
- [4] Xu T, Beelman RB, Lambert JD. The cancer preventive effects of edible mushrooms[J]. Anti-Cancer Agents in Med Chem (Formerly Curr Med Chem-Anti-Cancer Agents), 2012, 12(10): 1255–1263.
- [5] Adams LS, Chen S, Phung S, et al. White button mushroom (*Agaricus bisporus*) exhibits antiproliferative and proapoptotic properties and inhibits prostate tumor growth in athymic mice[J]. Nutr and Cancer, 2008, 60(6): 744–756.
- [6] Palacios I, Moro C, Lozano M, et al. Use of modified atmosphere packaging to preserve mushroom quality during storage[J]. Recent Pat Food Nutr Agric, 2011, 3(3): 196–203.
- [7] Fernandes Â, Antonio AL, Oliveira M, et al. Effect of gamma and electron beam irradiation on the physico-chemical and nutritional properties of mushrooms: A review[J]. Food Chem, 2012, 135(2): 641–650.
- [8] 黄碧芳. 不同温度对虎奶菇胞内胞外蛋白差异表达的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.
Huang BF. Temperature Influences the Differential Expression of Intracellular and Extracellular Proteins of Edible Fungus *Pleurotus Tuberculosis* (Fr.) Sing[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2008.
- [9] 田永强. 微生物自溶现象研究进展[J]. 微生物学杂志, 1997, 17(2): 52–60.
Tian YQ. Advances in microbial autolysis phenomenon[J]. J Microbiol, 1997, 17(2): 52–60.
- [10] Perez-Leblic MI, Reyes F, Martinez MJ, et al. Cell wall degradation in the autolysis of filamentous fungi[J]. Mycopathologia, 1982, 80(3): 147–155.
- [11] Beelman RB, Guthrie BD, Royse DJ. Influence of bacterial populations on postharvest deterioration of fresh mushrooms[J]. Mushroom Sci, 1989, 12(Part II): 655–666.
- [12] 郑秀丽. 茶树菇自溶机理与真空预冷技术研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
Zheng XL. Study on autolysis mechanisms and vacuum cold technology of *Agrocybe aegerita*[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011.
- [13] 乔娜. 草菇在低温下冷诱导基因表达变化研究及其与草菇低温自溶相关性分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
Qiao N. Study on the expression of cold induced gene in *Volvariella volvacea* during low temperature treatment and the analysis of its correlation to autolysis phenomenon[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008.
- [14] 黄碧芳, 陈婷, 黄杰, 等. 虎奶菇菌丝体自溶条件的优化研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(5): 254–256.
Huang BF, Chen T, Huang J, et al. Study on the optimization of the autolytic conditions of *Pleurotus tuber-regium* (Fr.) Sing Mycelium[J]. Chin Agric Sci Bull, 2010, 26(5): 254–256.
- [15] McCann MC, Bush M, Milioni D, et al. Approaches to understanding the functional architecture of the plant cell wall[J]. Phytochemistry, 2001, 57(6): 811–821.
- [16] Free SJ. Fungal cell wall organization and biosynthesis[J]. Adv in Genet, 2012, 81: 33–82.
- [17] Latgé JP. The cell wall: a carbohydrate armour for the fungal cell[J]. Mol Microbiol, 2007, 66(2): 279–290.
- [18] Klis FM, Mol P, Hellingwerf K, et al. Dynamics of cell wall structure in *Saccharomyces cerevisiae*[J]. FEMS Microbiol Rev, 2002, 26(3): 239–256.
- [19] 齐秀东, 李海山, 魏建梅, 等. 采后嘎拉苹果果实细胞壁代谢及关键酶基因表达特性研究[J]. 华北农学报, 2012, 27(2): 55–60.
Qi XD, Li HS, Wei JM, et al. The characteristics of cell wall metabolism and key enzyme genes expression in postharvest gala apple fruit[J]. Acta Agric Boreali-Sin, 2012, 27(2): 55–60.
- [20] Nitschke J, Altenbach HJ, Malolepszy T, et al. A new method for the quantification of chitin and chitosan in edible mushrooms[J]. Carbohydr Res, 2011, 346(11): 1307–1310.
- [21] Chen L, Xu WW, Lin SL, et al. Cell wall structure of mushroom sclero-

- tium (*Pleurotus tuber regium*): Part 1. Fractionation and characterization of soluble cell wall polysaccharides [J]. Food Hydrocolloid, 2014, 36: 189–195.
- [22] Bowman SM, Free SJ. The structure and synthesis of the fungal cell wall[J]. Bioessays, 2006, 28(8): 799–808.
- [23] Buitimea CGV, Rosas BEC, Cinco MFJ, *et al.* In Vitro Effect of *Antifungal Fractions* from the Plants *Baccharis glutinosa* and *Jacquinia macrocarpa* on Chitin and β -1,3-Glucan Hydrolysis of Maize Phytopathogenic Fungi and on the Fungal β -1,3-Glucanase and Chitinase Activities[J]. J Food Safe, 2013, 33(4): 526–535.
- [24] Jiang T, Wang Q, Xu S, *et al.* Structure and composition changes in the cell wall in relation to texture of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) stored in modified atmosphere packaging[J]. J Sci Food Agric, 2010, 90(5): 742–749.
- [25] Lim H, Choi HT. Enhanced expression of chitinase during the autolysis of mushroom in *Coprinellus congregatus*[J]. J Microbiol, 2009, 47(2): 225–228.
- [26] Chen K, Locke DC, Maldacker T, *et al.* Separation of ergot alkaloids by micellar electrokinetic capillary chromatography using cationic Gemini surfactants[J]. J Chromatogr A, 1998, 822(2): 281–290.
- [27] 赵华, 代彦, 齐刚. 紫外照射培养对酵母细胞壁葡聚糖的影响[J]. 四川食品与发酵, 2003, 39(4): 24–26.
- Zhao H, Dai Y, Qi G. Effect of UV radiation on glucan of cell walls of yeast[J]. Sichuan Food and Ferment, 2003, 39(4): 24–26.
- [28] Williams DL, Browder IW, DiLuzio NR. Soluble phosphorylated glucan: methods and compositions for treatment of neoplastic diseases: U.S. Patent 4,818,752[P]. 1989-4-4.
- [29] Ohno N, Furukawa M, Miura NN, *et al.* Antitumor β -glucan from the cultured fruit body of *Agaricus blazei*[J]. Biol Pharm Bull, 2001, 24(7): 820–828.
- [30] Bottom CB, Siehr DJ. Structure of an alkali-soluble polysaccharide from the hyphal wall of the basidiomycete *coprinus macrorhizus* var. *microspores*[J]. Carbohydr Res, 1979, 77(1): 169–181.
- [31] Ishibashi K, Miura NN, Adachi Y, *et al.* Relationship between solubility of grifolan, a fungal 1,3- β -D-glucan, and production of tumor necrosis factor by macrophages in vitro[J]. Biosci, Biotechnol, Biochem, 2001, 65(9): 1993–2000.
- [32] 侯雪, 李喜宏, 薛婷. 采后钙处理对香菇多糖和细胞稳定性的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(10): 298–300.
- Hou X, Li HX, Xue T. Effect of postharvest calcium treatment on lentinan content and cell stability of *Lentinula edodes*[J]. Food Sci, 2012, 33(10): 298–300
- [33] Camellini CM, Maraschin M, de Mendonca MM, *et al.* Structural characterization of β -glucans of *Agaricus brasiliensis* in different stages of fruiting body maturity and their use in nutraceutical products[J]. Biotechnol Lett, 2005, 27(17): 1295–1299.
- [34] Redgwell RJ, Fischer M. Fruit texture, cell wall metabolism and consumer perceptions[J]. Fruit Qual Its Biol Basis, 2002: 46–88.
- [35] 杨宏顺. 果蔬气调冷藏下表皮和果胶超微结构与品质变化[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.
- Yang HS. Effects of controlled atmosphere on epidermic and pectic ultrastructure and quality of postharvest fruits and vegetables[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2005.
- [36] Jarvis MC, Briggs SPH, Knox JP. Intercellular adhesion and cell separation in plants[J]. Plant, Cell & Environ, 2003, 26(7): 977–989.
- [37] Brummell DA. Cell wall disassembly in ripening fruit[J]. Funct Plant Biol, 2006, 33(2): 103–119.
- [38] 胡笑安. 不同贮藏条件下柑橘皮中果胶变化的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
- Hu XA. Study on the changes of pectin in the citrus pericarp during different storage conditions[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2012.
- [39] 沈奇, 孙娅, 张维敏, 等. 钙处理对双孢菇贮藏期间品质的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(12): 331–335.
- Sheng Q, Sun Y, Zhang WM, *et al.* Effect of calcium treatment on quality of button mushroom (*Agaricus bisporus*) during storage[J]. Food Sci, 2013, 34(12): 331–335.
- [40] 颜季琼. 高等植物细胞壁的结构和功能(一)[J]. 生物学通报, 1999, (1): 6–7.
- Sheng JQ. Structure and function of the cell wall of advanced plants(First)[J]. Bull of Biol, 1999, (1): 6–7.
- [41] 张华云, 李文香, 姜连芳, 等. 酶对香菇细胞壁降解作用的研究[J]. 中国果品研究, 1996, (4): 26–27.
- Zhang HY, Li WX, Jiang LF, *et al.* Research on the role of cell wall degrading enzymes of mushrooms[J]. China Fruit Res, 1996, (4): 26–27.
- [42] 巫宏光, 詹福建, 詹爱军, 等. 姬菇采后贮藏过程中几种酶活性变化的研究[J]. 食用菌学报, 2006, 12(4): 17–21.
- Wu GH, Zhan FJ, Zhan AJ, *et al.* A Study on the changes of several kinds of enzyme activities in the fruitbodies of *Pleurotus cornucopiae* during postharvest storage period[J]. Acta Edulis Fungi, 2006, 12(4): 17–21.
- [43] 谢雯君, 王则金. 蘑菇采后生理及保鲜技术研究进展[J]. 食品与机械, 2005, 21(3): 69–75.
- Xie WJ, Wang ZJ. Advance on post-harvest physiology and fresh-keeping technique of *Agaricus bisporus*[J]. Food Mach, 2005, 21(3): 69–75.
- [44] 刘伟, 邱银清, 徐惠云, 等. 采后草菇的膜脂过氧化作用[J]. 华南农业大学学报, 1997, 18(3): 96–99.
- Liu W, Qiu YQ, Xu HY, *et al.* Membrane lipid peroxidation in postharvest straw mushroom[J]. J Huazhong Agric Univ, 1997, 18(3): 96–99.
- [45] 边晓琳. 不同气体成分和包装材料对金针菇采后品质和活性氧代谢的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- Bian XL. Effects of different gas composition and packaging materials on postharvest quality and active oxygen metabolism of *Flammulina Velutipes*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [46] 王成涛, 王吕涛, 赵磊, 等. 不同氧分压条件下金针菇贮藏保鲜相关酶活性的研究[J]. 食品科学, 2011, 32(8): 300–304.
- Wang CT, Wang LT, Zhao L, *et al.* Age-related changes in antioxidant enzyme activities in golden needle mushroom during modified atmosphere storage under varying oxygen content conditions[J]. Food Sci, 2011, 32(8): 300–304.
- [47] 孙娅, 李志强, 王毓宁, 等. 采后钙处理对双孢菇贮藏生理的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 2: 081.
- Sun Y, Li ZQ, Wang SM, *et al.* Effects of post-harvest calcium treatment on storage physiology of button mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. Sci Tech Food Ind, 2013, 2: 081.
- [48] Zivanovic S, Busher RW, Kim KS. Textural changes in mushrooms (*Agaricus bisporus*) associated with tissue ultrastructure and composition[J]. J

(责任编辑: 赵静)

Food Sci, 2000, 65(8): 1404–1408.

- [49] 肖功年, 张懋, 彭建, 等. 平菇气调包装保鲜[J]. 无锡轻工大学学报, 2002, 21(6): 592–596.

Xiao GN, Zhang M, Peng J, *et al.* Study on modified atmosphere package of fresh mushrooms (*Pleurotus ostreatus*) [J]. J Food Sci Bio, 2002, 21(6): 592–596.

- [50] 姜红波. 茶树菇综合保鲜研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2007.

Jiang HB. The study on integrated freshness preservation of *Agrocybe aegerita*[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2007.

- [51] 朱继英, 王相友, 王娟. 气调贮藏对双孢蘑菇细胞超微结构的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 78–81.

Zhu JY, Wang XY, Wang J. Effects of CA storage on ultrastructure of *Agaricus bisporus*[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2009, 25(1): 78–81.

- [52] 陶菲, 郜海燕, 葛林梅, 等. 真空预冷减缓双孢菇细胞壁物质的降解[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 264–268.

Tao F, Gao HY, Ge LM, *et al.* Vacuum cooling retards degradation of cell wall matter in *Agaricus bisporus*[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2013, 29(16): 264–268.

作者简介



赵天鹏, 研究生, 主要研究方向为农产品贮藏与加工。

E-mail: wochihongshaorou@126.com



陶菲, 副研究员, 主要研究方向为农产品加工与贮藏。

E-mail: taofei02@163.com