**双孢蘑菇褐变的影响因素及控制方法研究进展**

**摘要**:

背景：双孢蘑菇（agaricus bisporus）在世界市场上有着广泛的应用。蘑菇表面褐变是影响消费者购买的最直观因素。采后褐变的发生与冲洗次数、机械损伤、多酚氧化酶、酚类物质、病原菌和采后环境有关。研究了冷却、气调包装（MAP）和涂膜等多种方法控制钮扣菇褐变。

范围与方法：综述了影响蘑菇褐变的主要因素，包括蘑菇酪氨酸酶、采后因素和病原菌，并介绍了几种蘑菇表面颜色的检测方法。此外，还综述了不同的褐变控制方法，包括MAP、多酚氧化酶（PPO）抑制剂、可食性涂层、辐照、冷却等新兴技术。

主要发现和结论：蘑菇采后褐变的**内在因素**包括减量、酶和蘑菇细胞完整性，这些因素受机械损伤、温度、相对湿度和大气等因素的影响,成像或计算机视觉和高光谱成像是检测蘑菇颜色的新兴方法，可以用来分析蘑菇整个表面的每个像素为了控制蘑菇的褐变，人们对蘑菇的保鲜方法进行了广泛的研究，包括map、涂膜、ppo抑制剂和辐照等。此外，热缓冲包装、商用膜材料、MAP气体组成、天然涂层、PPO缓蚀剂材料等也有待进一步研究。

**关键词**:**双孢菇 褐变 酪氨酸酶 采后处理 保存方法**

1. **前言**

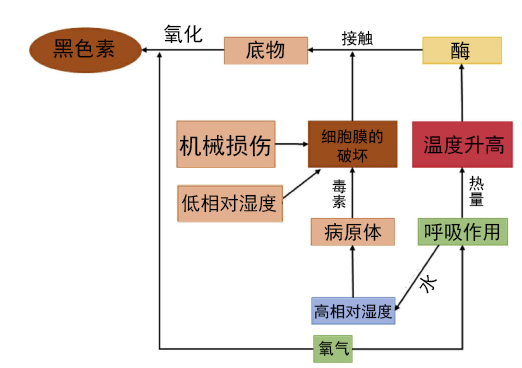
双孢蘑菇（agaricus bisporus）是世界上最常见的食用栽培蘑菇品种，因其营养、感官和药用特性而深受消费者欢迎（Nasiri、Barzegar、Sahari和Niakousari，2017）。纽扣蘑菇的质量取决于颜色、质地、清洁度和风味，其中，颜色是消费者首先感知到的（Weijn等人，2011）。近年来，人们对钮扣菇的这些特性的研究进展进行了综述（Zhang，Pu，&Sun，2018）褐变是蘑菇质量损失的主要原因之一（Wu等人，2016）。褐变降低了商业价值，通常白蘑菇需要最高的价格。

蘑菇贮藏过程中的酶促褐变是一个复杂的过程。蘑菇细胞完整性的破坏允许酶和它们的底物之间的接触（比利，D'APRANO，LaRoxIX，2002），主要负责蘑菇褐变的酶是多酚氧化酶（雷等人，2018）。**影响蘑菇酶促褐变的因素有蘑菇的花期数、多酚氧化酶的活性和数量、酚类化合物含量、病原菌、采后环境如温度和相对湿度等**。因此，采后环境、PPO活性和病原菌等可控因素是蘑菇采后保鲜研究中最受欢迎的课题（Gantner等人，2017；Ghasemi Varnamkhasti、Mohammad Razdari、Yoosefian和Izadi，2018；Joshi等人，2018）。在**控制蘑菇褐变方面，有许多技术是可行的.冷却是延长农产品货架期最常用的方法,但冷却对蘑菇褐变的抑制作用有限**。许多研究者还对气调包装、涂膜、辐照等方法进行了研究，以期找到延长按钮菇货架期的最有效途径。

尽管这一专题很重要，但目前还没有关于这一领域研究进展的详细资料。JOLIVET，ARPIN，Wikes和Pellon（1998）回顾了纽扣蘑菇褐变，**重点是多酚氧化酶、底物和贮藏期间变色和细菌感染**。因此，本综述旨在对2007年以来发表的相关文献进行综述，对抑制蘑菇变色的技术进展进行综述，并比较不同方法的抑制效果。探讨了蘑菇采后褐变发生的原因，提出了控制蘑菇采后褐变的保鲜方法。希望本文的综述能对蘑菇褐变的原因及相应的控制方法提供有益的见解，并对抑制蘑菇褐变或变色的进一步理论和实验研究有所启发。

1. **影响蘑菇褐变的因素**

蘑菇褐变受多种因素的影响，包括内在因素和外在因素。图1显示了影响蘑菇酶促褐变的重要因素如图1所示，**底物被酶催化并氧化成黑色素，从而导致蘑菇褐变。机械损伤、低Rh和病原体毒素诱导细胞膜破裂，从而允许底物和酶之间的接触。较高的O2压力加速了底物的氧化和呼吸速率，呼吸产生的水分和热量增加了表面Rh和温度，导致微生物生长和酶活性的增加。**



2**.1蘑菇酪氨酸酶**

两种多酚氧化酶，即酪氨酸酶（EC 1.1418.1）和漆酶，通过多种研究鉴定，导致蘑菇褐变。酪氨酸酶在蘑菇中起着最重要的作用，而漆酶的作用是有限的（Jolivet等人，1998）酪氨酸酶催化不同酚类底物的顺序氧化反应，是黑色素生物合成起始步骤中的关键酶。

* + 1. 酪氨酸酶的结构

一直以来，人们致力于研究钮扣菇酪氨酸酶的结构。已鉴定出6个金针菇酪氨酸酶基因（ppo1-ppo6），其中ppo 2、ppo 3、ppo 4和ppo 5彼此有密切关系（weijn，bastiaan net，wichers，&mes，2013；wichers et al.，2003；wu et al.，2010）。这种酶是由两个H亚基和两个L亚基组成的四聚体蛋白质（Strotkhamp，Jolley，&Mason，1976）h亚单位是酪氨酸酶结构域，包含一个双核铜位点（cua和cub），每个铜离子由三个组氨酸残基配位。有一个氧原子，它被鉴定为一个水分子，连接活性部位的两个铜离子（Zou等人，2017）。蘑菇酪氨酸酶L亚基是一种功能未知的巴氏蘑菇蛋白（Ismaya等人，2017）尽管L亚单位对酶活性没有显著影响，但它在H亚单位折叠、铜结合或稳定性方面发挥着重要作用（Ismaya等人，2011）Goldfeder、Kanteev、IsascharOvdat、Adir和Fishman（2014）证明了单酚和双酚在朝向CuA的同一活动部位有界其他研究表明，在一个方向上，单酚和邻二酚之间的cub配位允许氧转移到正位，并分别桥接两个铜离子（decker，schweikardt，&tuczek，2006；ismaya et al.，2011）。

对蘑菇酪氨酸酶的两种催化活性，证明了三种不同形式（间位,氧和脱氧）的共同催化位点：单酚邻羟基化成双酚（甲酚酶活性）和双酚氧化成醌（儿茶酚酶活性）。 认为铜离子处于三种不同的氧化态：活性部位的脱氧（CuI-CuI）、氧（CuI-O2-CuI）和met（CuI-CuI）（Solomon等人，1985年）这三种形式的相互关系如图2所示（FeNoLL等人，2004；Garcia Jimenez等人，2016；RoDrigeZelopez，图德拉，Valon，Garcia Carmona，Garcia Canovas，1992），表明只有氧酪氨酸酶羟基化酚基底物，同时脱氧和蛋氨酸酪氨酸酶氧化儿茶酚胺底物。然而，天然酪氨酸酶由少量的氧酪氨酸酶和大量的蛋氨酸酪氨酸酶组成，在一个滞后期后导致甲酚酶反应的开始（Rodriguez-Lopez等人，1992）邻苯二酚衍生物是从酚类底物中缓慢生成的，它将MET的酪氨酸酶转化为脱氧的酪氨酸酶，从而产生苯甲酰化酶，并使其氧化加速，直至所有的酪氨酸酶都被还原（等人，2004；Garcia Jimenez等人，2016；Rodriguez Lopez等人，3）。

2.1.2酶促褐变机理

图3显示了钮扣蘑菇黑色素合成的四种途径Calas队友转化为三种不同的化合物，包括γ-L-谷氨酰胺-4-羟基苯（GHB），对氨基苯酚（PAP）和酪氨酸，它们最终被氧化和聚合成GHB，PAP和多巴黑色素。儿茶酚黑色素是由儿茶酚的起始底物形成的（Weijn，van den BergSomhorst，et al2013A和Weijn，Bastiaan Net等。2013年b）。酪氨酸酶对二羟基酚的亲和力比单羟基酚和三羟基酚强。邻苯二酚在单羟基酚（酪氨酸）、二羟基苯酚（邻苯二酚，左旋多巴）和三羟基苯酚（间苯三酚）之间化合物中表现出最大的活性。

**蘑菇的酶促褐变受多种因素的控制：酪氨酸酶的数量、酶的潜在形式的激活、酚类底物的含量和类型以及底物与活性酶的接触,**所有这些因素因组织而异，并在孢子体发育、采后和贮藏期间发生变化（Jolivet等人，1998）**蘑菇中酪氨酸酶的底物主要是酪氨酸和GHB(Y-羟基丁丙脂)，以及它们的氧化和水解产物**（JOLIVET等，1998）。由于ghb和酪氨酸是相当稳定的化合物，酪氨酸酶活性是褐变过程的主要触发因素。菌褶中总酚和GHB含量最高，内帽最低但不同组织间酪氨酸含量无显著差异（Jolivet et al.，1998；Wu et al.，2016）。

* 1. **病菌**

纽扣菇对包括假单胞菌、黄萎病菌、哈茨木霉和真菌莱卡尼氏菌以及法国拉病毒在内的病原体高度敏感（Rokni&Goltapeh，2019；Soković&van Griensven，2006）在所有的病原体中，假单胞菌是蘑菇中最丰富的细菌属，是蘑菇采后变色的原因（Jolivet等人，1998）。tolaasii假单胞菌（P.tolaasii）是双孢蘑菇（Kertesz&Thai，2018）、杏鲍菇（Rodriguez Estrada&Royse，2007）、香菇（Jiang，Feng，Zheng，&Li，2013）和金针菇（Han et al.，2012）等几种蘑菇的一种常见病原菌。

Tolaasin（Soler Rivas，Jolivet，Arpin，Olivier，&Wichers，1999）和P.Tolaasii产生的挥发性有机化合物（Lo Cantore，Giorgio，&Iacobellis，2015）被认为是导致细菌性胃溃疡症状的潜在因素。托拉辛只从致病形式P.Telaasii是一种胞外毒素，明确地确定为主要参与P.Telaasii变色效应的主要化合物（Lo Cantore等人，2006）。首次鉴定出毒素（ToLⅠ和ToLⅡ）的两个组分（Nutkin et al.，1991）和五个其他托拉辛类似物（托拉辛α-E）随后被分离（BassRayLo等人，2004）。据报道，Tolaasin破坏蘑菇膜，使酪氨酸酶与其底物接触，酪氨酸酶活化过程也涉及酪氨酸酶（Largeteau&Savoie，2010）。

据报道，除P.Tolaasii外，其他种类的细菌也会引起各种变色的斑点病（Navarro、GEA和González，2018）。假单胞菌反应物的致病菌株（Largeteau&Savoie，2010）分泌一种称为白线诱导原理（WLIP）的细胞外物质，在蘑菇孢子体上诱导变色和凹陷病变WLIP的活性低于TOLⅠ，但在体外，由假单胞菌反应物NCPPB1311产生的WLIP数量大于由P.Tolaasii菌株NCPPB2192产生的TOLⅠ（Lo Cantore等人，2006）。

* 1. **采后因素**

蘑菇褐变是一个复杂的过程，受机械损伤、温度、相对湿度、o2和co2浓度等外界因素的影响.

* + 1. 机械损伤

蘑菇的褐变也由使用带吸盘装置的手动或机器人采摘设备采摘时的磨损损坏引起（Weijn等人，2012）.细胞膜的直接机械损伤导致细胞的破坏，从而使酪氨酸酶、其酚性底物和O2之间发生接触,机械收获的蘑菇通常用于罐头或加工，因为它们在收获后一小时内立即变褐。此外，Gao等人（2015）报道了钮扣菇瘀伤敏感性的数量性状位点定位，为培育不太敏感的品种提供了基础。到目前为止，新鲜市场上的蘑菇主要是由机器人设备人工采摘（Zied&PardoGimÃ，2017）。

* + 1. 温度

温度是影响采后褐变的重要因素之一。较高的贮藏温度可以激活酪氨酸酶并促进微生物生长，从而加速颜色降解（Singh、Langowski、Wani和Saengerlaub，2010）Quevedo，Pedreschi，Bastias，and Diaz（2016）报告了纽扣蘑菇切片的褐变率随着储存温度从5℃增加到35℃。Aguirre，Frias，Barry RyanGrogan（2009）表明，通过将储存温度从25℃降低到3℃来改善白度，减少75%的褐变。蘑菇在11℃下储存超过两天后颜色会迅速下降，因此商业蘑菇被包装在PET容器中，并在4-5℃下冷藏运输到超市或家中的温度波动会导致蘑菇质量恶化（Singh、Gaikwad、Lee和Lee，2018）。最近，宋等人。（2019）开发了数学模型，以预测在4–20°C下配送链和储存期间纽扣蘑菇的保质期。

* + 1. 相对湿度

相对湿度是影响蘑菇白度的另一个重要参数。低相对湿度会导致失水，失水会降解纹理并增加酶活性，从而加快褐变速度（Singh等人，2010）相反，非常高的相对湿度（100%）有利于蘑菇表面的水蒸气凝结，从而增加微生物的生长和变色（Rux等人，2015）。纽扣蘑菇在5°C、相对湿度90%的MAP中包装16天，保存完好（Oz、Ulukanli、Bozok和Baktemur，2015）Aguirre、Frias、Barry Ryan和Grogan（2008年）报告说，5-6°C的贮藏温度和接近饱和的相对湿度可以最佳地保持蘑菇的颜色。

* + 1. 呼吸

蘑菇的变色还与它的高呼吸率有关。根据化学反应（C6H12O6+6O2→6CO2+6H2O+能量），呼吸伴随着热量和H2O的释放（Joshi等人，2018）因此，蘑菇的高呼吸速率会导致高湿度和高表面温度，从而加速褐变速率。呼吸速率受温度、氧气和二氧化碳浓度的影响（Joshi等人，2018；Pereira、Amaro、Pintado和Po\_as，2017）。降低氧气压力和增加二氧化碳压力被广泛用于减缓呼吸。然而，在包装中，二氧化碳浓度应保持在12%以下，以避免蘑菇的生理损伤（Borchert等人，2014年），而二氧化碳浓度应保持在1%以上，以避免无氧呼吸（Joshi等人，2018年）乔希等人。（2018）得出的结论是，蘑菇的最佳保存条件为2.5–5%二氧化碳和5–10%氧气（在2°C下）。然而，Li、Kitazawa、Wang和Sun（2017）报告说，80%氧气和20%二氧化碳通过调节呼吸途径，将蘑菇的储存时间延长至24天。

**2.4蘑菇褐变的测定**

蘑菇褐变是通过颜色变化来衡量的。CIE L\*a\*b\*颜色空间是用于褐变物理指标的最广泛的颜色系统（Pathare，Opara，&Al Said，2013）用于评价蘑菇变色的参数包括红度（a\*）、黄度（b\*）、明度（l\*）、总色差（e）、白度指数（wi）和褐变指数（bi）。传统仪器如色度计和分光光度计广泛用于蘑菇的颜色测量（Fattahifar、Barzegar、Ahmadi Gavlighi和Sahari，2018；Gholami、Ahmadi和Farris，2017；Lei等人，2018；Nasiri等人，2017；Singh等人，2018；Xu、Tian、Ma、Liu和Zhang，2016）色度计不精确，主要用于日常质量控制，而分光光度计由于能够提供蘑菇反射和透射特性的逐波长光谱分析，因此在科学研究中应用较多（Pathare等人，2013）。

然而，蘑菇的表面颜色不均匀，色度计和分光光度计无法获得蘑菇的颜色分布图（Wu&Sun，2013）。成像或计算机视觉和高光谱成像是新兴的无损和非接触测量方法，能够分析蘑菇整个表面的每个像素。Weijn等人（2012）使用计算机视觉量化了钮扣蘑菇的变色。计算机视觉系统采集的图像提供rgb颜色空间值，然后将其转换为每个蘑菇的cie l\*a\*b\*颜色空间。另一方面，Taghizadeh、Gowen和O'Donnell（2011）建立了回归模型，将高光谱成像（400–1000纳米）和RGB成像数据与测量的L\*值关联起来，并表明高光谱成像在评估蘑菇变色方面优于RGB成像。高光谱成像也可以应用于识别更容易发生酶褐变的蘑菇（Gaston，Frías，Cullen，O'Donnell和Gowen，2010）然而，高光谱成像光源的加热效应会导致蘑菇严重褐变，可能会降低检测结果的准确性，因此在图像采集过程中可以将蘑菇样品放入冰箱以消除加热效应（谢、孙、徐、朱，2015；谢、孙、朱、浦，2016）。

1. **控制蘑菇褐变的方法**

在讨论影响按钮菇褐变的主要因素的基础上，提出了多种控制方法来降低或抑制其褐变效应冷却、MAP、包衣、PPO抑制剂和辐照都能通过降低温度和O2压力、抑制酶的活性和消除微生物的生长来减缓酶的褐变。

* 1. **冷却**

像干燥（Qu，Sun，Cheng，&Pu，2017；Ma，Sun，Qu，&Pu，2017；Ma，Qu，&Sun，2017；Liu，Pu，&Sun，2017；Pu，Sun，2015）和冷冻（Xie，Sun，Xu，&Zhu，2015；Xie，Sun，Zhu，&Pu，2016；Cheng，Sun，Pu，&Wei，2018a，2018b；Li，Zhu，&Sun，2018；Luo，Sun，Zhu，&Wang，2018），冷却是食品工业中广泛使用的一种方法（Zhu等人，2018年；Zhou等人，2017年；Feng、Drummond、Zhang和Sun，2014年；Kiani、Sun和Zhang，2012年）。随着温度的升高，蘑菇的褐变率增加，预冷和冷藏是防止蘑菇褐变的重要方法.采后蘑菇的温度在15-18°C之间，储存或运输前预冷（4-5°C）是减缓新陈代谢、变质和变色的必要条件（Diamantopoulou&Philippoussis，2015）。鼓风冷却、水冷和真空冷却是水果和蔬菜最常用的冷却方法（Drummond，Zheng和Sun，2014）在这些预冷方法中，真空冷却因其冷却速度快而越来越受欢迎。然而，比较真空冷却和不真空冷却蘑菇褐变率的不同研究报告了不一致的结果（Mittal，Kapoor，&Jindal，2014；Tao，Zhang，&Yu，2007；McDonald&Sun，2000），这是由于所调查蘑菇的初始质量和储存条件不同所致。蘑菇预冷后应低温贮藏，以延长货架期，减缓褐变速度新鲜蘑菇在不同温度下的褐变结果比较见表1。Bernaś（2018）比较了冷冻白色和棕色A的褐变机理。双孢霉菌在-25°C下储存8个月，表明白色品种对酶促褐变的抵抗力更高。 Wang，Hu，Pei，Mariga，and Yang（2018）和Yang，Wang，Hu，Pei，and Mariga（2019）报告，冻干蘑菇的颜色和细菌组成分别在不同温度下变化。 尽管储存温度对于降低褐变率至关重要，但低温只会延迟褐变的高峰（Mohapatra，Frias，Oliveira，Bira和Kerry，2008）。 在足够长的存储时间下，与褐变相关的酶水平与温度无关，因此，应将冷却与其他保存处理结合使用，以成功抑制较长时间的酶促褐变。

**3.2气调包装**

改性气调包装在商业上用于提高包装产品的保质期，可以有效防止水果和蔬菜的褐变（Ghidelli&Pérez Gago，2018）。MAP能减缓呼吸速率，降低酶氧化和微生物种群，增加超氧化物歧化酶和过氧化氢酶的抗氧化酶活性，抑制褐变。

蘑菇map的研究主要集中在膜材料、顶空气体的不同组成以及与其它保存方法的结合上（表1）。包装膜和气体成分是影响保鲜剂map保鲜效果的两个重要因素，尤其是被动包装。为了选择合适的包装材料，必须考虑几种薄膜特性，例如渗透性、提供的保护水平、标签的强度和能力（Yi等人，2015）在MAP中使用的商业薄膜是由塑料薄膜制成的，一些典型的薄膜包括抗氧化活性膜、纳米活性膜、生物降解膜和微穿孔膜近年来也引起了人们的极大关注（张，孟，Bhanali，and FAN，2016）。CO2、o2和n2是MAP中最常用的气体其他气体如惰性气体（He、Ar、Xe和Ne）和气体氧化物（CO、亚硝酸和氮氧化物、SO2和环氧丙烷）、乙烯、氯和臭氧，也已在MAP存储中进行了研究（奥利维拉等人，2015；张等人，2016）。此外，MAP与海藻酸盐浸泡（Jiang，2013）、纳他霉素（Jiang，2012）和二氧化氯（Cliffe Byrnes&O'Beirne，2008）等不同处理相结合比单独MAP更能有效抑制褐变。

**3.3. 食用涂料**

半透膜可作为一种屏障，防止氧气、二氧化碳、水分和溶质的移动，从而有效地延缓水果和蔬菜的变色（Nasiri等人，2017年；Campos、Gerschenson和Flores，2011年）。涂层材料包括壳聚糖（Gholami等人，2017）、海藻酸盐（Jiang，2013）、黄芩胶（TG）（Nasiri、Barzegar、Sahari和Niakousari，2018）和芦荟凝胶（AG）（Mirshekari、Madani和Golding，2019；Mohebbi、Ansarifar、Hasanpour和Amiryousefi，2012）、高甲氧基果胶、商用淀粉和羧甲基纤维素（NiazmandGhodusi，Shahidi和Niazmand，2009）已经进行了调查，以保持蘑菇的质量。eissa（2007）报告说，壳聚糖涂层的应用显著降低了蘑菇在4℃贮藏15天期间的褐变指数，增加了蘑菇的亮度。此外，Karimirad、Behnamian、Dezhsetan和Sonnenberg（2018）使用了含有柑橘香精油的壳聚糖纳米颗粒，以减缓蘑菇变色的速度然而，Gholami等人最近的一项研究（2017）表明壳聚糖涂层对蘑菇整体颜色特性的负面影响，这可能是由于壳聚糖固有的黄色。此外，在柠檬酸和乙酸中用壳聚糖溶液处理的钮扣蘑菇在2°C下储存14天后，显示出比未涂层蘑菇更高的E、Bi和B\*和更低的L\*（Zalewska、Marcinkowska Lesiak和Onopiuk，2018）。酸化蘑菇可归因于这些化合物在菌丝细胞壁中造成的损伤，这允许多酚和多酚氧化酶之间的接触。TG包衣的多花刺菇精油（Nasii等人，2017）或Satureja KuististaNa精油（NasiRi等，2018）保持比TG涂覆的蘑菇更好的整体颜色特性，因为精油的抗氧化活性可以减少脱水和棕色聚合物的发生。此外，TG和Ag联合处理抑制蘑菇褐变的效果优于TG或Ag单独处理（Mohebbi等人，2012）。最近，在魔芋葡甘聚糖/卡拉胶涂层中加入纳米二氧化硅以改善其褐变抑制效果（Zhang，Wang，Li，Cheng，&Zhang，2019；Zhang，Wang，Wang，&Cheng，2019）。

**3.4.多酚氧化酶抑制剂**

由于蘑菇褐变与ppo有关，抑制或延缓褐变的潜在策略是降低ppo活性（hu等人，2016）。报道了一种鉴别酪氨酸酶或PPO的替代底物和真正抑制剂的方法（Ortiz Ruiz、Garcia Molina、Serrano、Tomas Martinez和Garciacanovas，2015；Ortiz Ruiz等人，2015），其起源于与Met酪氨酸酶和/或氧酪氨酸酶结合的非催化中间体（图4）。从天然和合成来源发现了广泛的PPO抑制剂（Zolghadri等人，2019年）。合成的化学支架如间苯二酚、二芳基、咪唑硫酮和一些双链寡核苷酸显示出高酪氨酸酶抑制和低毒性（ULLAH等，2016）。自然界是ppo抑制剂的重要来源，包括天然提取物、废水和副产物。酪氨酸酶抑制剂可从药用植物如芦荟、桑树和番红花中获得（Mukherjee等人，2018）葡萄园串稀过程中丢弃的未成熟葡萄为农产品食品行业提供了控制酶褐变的生物活性化合物的重要来源（Tinello&Lante，2017）。用最少的加工获得的狗玫瑰果提取物可在体内用作蘑菇酪氨酸酶的抗褐变剂（Zocca，Lomolino，&Lante，2011）。用水烹调小芸苔树叶制备的加工水具有抑制蘑菇酪氨酸酶的能力，导致50%的活性丧失，这在水的再利用和减少化学物质之间提供了一种联系（Zocca、Lomolino和Lante，2010）。

丁香、肉桂醛和百里香精油熏蒸巴戟蘑菇后，褐变延迟显著（Gao，Feng，&Jiang，2014）。Fattahifar等人（2018）报道说，在真空浸渍开心果绿壳提取物、焦亚硫酸钠和抗坏血酸处理过的蘑菇中，用开行绿壳提取物处理过的蘑菇表现出最高的L\*和最低的Bi。浸有L-精氨酸（Li et al.，2019）、4-羟基肉桂酸（Hu et al.，2016）、水杨酸（Dokhanieh&Aghdam，2016）、油菜素内酯（Ding et al.，2016）、甘氨酸甜菜碱（Wang、Chen、Yang和Wang，2015）、茉莉酸甲酯（Meng、Song、Shen、Zhang和Sheng，2012）和苹果酸（Singla、Ganguli&Ghosh，2012）在储存期间被显著抑制此外，PPO抑制剂与真空浸渍、超声波和MAP等其他技术相结合（Fattahifar等人，2018；Jiang，2012；Wu等人，2018）比单独使用PPO抑制剂更有效地延缓褐变。

**3.5辐照**

辐照可以通过消除微生物发展和食源性疾病，保持食品质量，提高食品安全，延长产品保质期（Barkai戈兰&Follett，2017；Odueke，Farag，Baines，和Chadd，2016）。用于控制蘑菇褐变的辐射包括紫外线-C辐射（Guan，Fan，&Yan，2012，2013；Lei等人，2018；Lu等人，2016）、γ辐射（Wani，Hussain，Meena，Dar，&Mir，2009；Mami，Peyast，Zaie，Ghasemnezhad，&Salmanpour，2013；Ghasemi Varnamkhasti等人，2018）和电子束辐射（MamiPeyvast、Zaie、Ghasemnezhad和Salmanpour，2014年）。Cardoso等人（2019）比较了γ射线和电子束辐照作为蘑菇保存技术的效果，表明辐照对蘑菇化学剖面的保持是有效的。紫外线照射的蘑菇从麦角固醇转化为维生素D2.（Cardwell、Bornman、James和Black，2018年；Taofiq、Fernandes、Barros、Barreiro和Ferreira，2017年）。此外，辐照已被证明具有在储存期间抑制褐变的能力，通过其抗菌性能，增加总抗氧化能力，并降低PPO活性（Ghasemi Varnamkhasti等人，2018；雷等人，2018；MAMI等人，2014）。然而，辐照后蘑菇表面c会立即受到组织损伤，这在某些情况下会抵消辐照本身以及其他联合方法的抗褐变能力（Guan等人，2013）。

**3.6其他方法**

血浆活化水（PAW）是一种在保持感官特性的同时提高微生物安全性的新方法（Ma等人，2016）Xu等人（2016）评估了PAW对蘑菇采后质量的影响，结果表明，PAW能有效地防止蘑菇褐变，因为PAW处理蘑菇的细菌数量减少。

电解水由盐溶液电解产生，是一种新型广谱消毒剂（Rahman，Khan，&Oh，2016；Gil，Gómez-López，Hung，&Allende，2015）。Aday（2016）将电解水与被动改性气氛相结合，应用于蘑菇上25mg/L电解水处理的蘑菇比未处理的蘑菇有显著性差异（p<0.05），电解水可以通过抑制呼吸酶活性来减缓蘑菇的呼吸速率此外，与单独的电解水处理相比，低浓度酸性电解水与超声波结合能够更好地保持片状蘑菇的表面颜色（Wu等人，2018）。

脉冲光是美国食品和药物管理局（FDA，2015）批准的一种去污技术，能够灭活PPO（Pellicer，Navarro，&Gómez-López，2018）。Oms Oliu，Aguiló-Aguayo，martin-Belloso和Soliva Fortuny（2010）研究了脉冲光处理对鲜切蘑菇酶褐变的影响，结果表明，在4.8和12j/cm2的高脉冲光照射下，1%的抗坏血酸能显著抑制PPO，降低PPO贮藏15天后褐变。

高湿度会导致蘑菇头的张开，而低湿度会促进蘑菇的衰老和组织变化因此，蘑菇包装的最佳相对湿度应在96%左右。Mahajan、Rodrigues、Motel和Leonhard（2008）将快速吸收的吸湿剂CaCl2和山梨醇与缓慢吸收的干燥剂膨润土相结合，发现最佳组合分别为膨润土、山梨醇和CaCl2Of 0.55、0.25和0.2g/g干燥剂。5g干燥剂包装内的蘑菇褐变指数显著低于未加干燥剂包装内的蘑菇褐变指数。

本文介绍了几种控制干蘑菇变色的方法渗透脱水是一种用于去除植物组织中水分的操作，涉及将食品浸入高渗溶液中，该操作已应用于干蘑菇（Fei等人，2018；González-Pérez等人，2019）。经25%盐溶液和70°B糖浆处理的渗透脱水蘑菇在室温下储存期间褐变较少（Kumar、Barmanray和Kumar，2017）。纽扣菇微波真空干燥前的热超声预处理可以改善干燥样品的颜色（Jiang等人，2018）不影响BI值的功率超声用于改善蘑菇的大气冷冻干燥（Carrión、Mulet、García-Pérez和Cárcel，2018）。

**3.7条不同控制方法的比较**

自2007年以来发表的有关鲜蘑菇变色控制方法的研究频率（f）如图5所示。MAP（f=19）、PPO抑制剂（f=10）、涂层（f=10）、辐照（f=8）和冷却（f=6）是控制蘑菇褐变的5种研究最多的方法。MAP是所有方法中最常用的一种，尽管冷却（2-4°C）在几乎所有蘑菇贮藏研究中都有使用，但自2007年以来，有关冷却本身的文章不断发表目前国内外关于冷却方法的研究主要集中在不同温度对蘑菇贮藏的影响上，近年来出现了热缓冲包装等新技术。关于地图的研究几乎每年都发表。其他的控制方法，包括辐照，ppo抑制剂和涂层也不断出现在文献调查期间。此外，从2015年到2018年，已发表的有关蘑菇变色的文章逐渐增多，其中2018年最高（f=10），包括一些新兴方法的研究，如使用电解水。

从图5可以看出，MAP、涂层、PPO抑制剂和辐照是以往研究中最常用的4种方法表2总结了MAP、涂层、PPO抑制剂和辐照处理的L\*、E和BI值为了消除不同研究中蘑菇初始颜色特征不同所引起的差异，提出了不同处理对L\*（L\*）降低、E和Bi增加的抑制率，并按以下公式计算：

不同方法的L\*、E和Bi的抑制率值如图6所示。储存时间分为4组（1-4、5-8、9-12和12-16天）如图6所示，相同处理对L\*、Bi和E的抑制率表现出不同的特征。例如，UV-C对L\*和E的抑制率高于海藻酸钠+O2，而对BI的抑制率低于海藻酸钠+O2因此，在研究中应考虑L\*、Bi和E，以准确评估其抑制作用。

根据对L\*的抑制率，MAP、涂层、PPO抑制剂和辐照的最佳处理为：WH2O2、TGSEO5，pghe和pe+ag+2i在最长时间内抑制率最高。对L\*的抑制率依次为：PE+Ag+2i>PGHE>TGSEO5>WH2O2，7d后抑制率大于50%。在贮藏过程中，MAP（5%O2）和包被（TGSEO5）方法对L\*的抑制率增加。相反，ppo抑制剂（2.5gb）和辐照法（uv-c）在贮藏期间对l\*的抑制率降低。因此，可以结合不同的方法来保持对L\*的相对稳定和高抑制率对BI的抑制率，涂层、PPO抑制剂和辐照处理分别为TGSEO5、PGHE和PE+Ag+2i，在最长时间内抑制率最高另一方面，map（wh2o2）和ppo抑制剂（pghe）对e的抑制率均高于50%，说明这两种方法对总颜色有明显的抑制作用。

1. **结论和未来展望**

本文综述了引起蘑菇褐变的因素。采后机械损伤、温度、相对湿度、o2和co2浓度是影响蘑菇细胞完整性的三个最重要的内在因素。冷却、气调包装、涂膜和辐照对蘑菇褐变有抑制作用。PPO抑制剂能降低PPO的活性，从而降低蘑菇的褐变。

虽然冷却在商品蘑菇中应用广泛，但低温抑制褐变的效果有限，因此冷却与其它方法的结合是延长蘑菇货架期的关键，一些新兴的技术如热缓冲包装等有待于进一步研究。MAP的应用研究主要集中在包装材料、氧气、二氧化碳和氮气的气体比例以及与其它方法如涂层和PPO抑制剂的结合等方面为了实现商品化，需要进一步研究调整map中气体比例的新型包装材料。涂膜、ppo抑制剂和辐照在一定程度上会引起蘑菇的变色，应采取措施将这种可能的变色控制在可接受的水平。天然来源的涂层材料和ppo抑制剂仍然是一个重要的研究领域。虽然不同方法的组合可以提高褐变的抑制效果，但其经济效益也应考虑到未来的商业应用。