百合色泽变化机制及控制的研究进展

杨莉萍[1]，郭旭东[1]，姬　捷[1]，胡慧芳[1]，席少阳[1]，黄钰芳[1]，马晓辉[1, 2, 3, 4]，晋　玲[1, 2, 3, 4*]

1. 甘肃中医药大学药学院，甘肃 兰州　730000
2. 西北中藏药省部共建协同创新中心，甘肃 兰州　730000
3. 陇药产业创新研究院，甘肃 兰州　730000
4. 甘肃省珍稀中药资源评价与保护利用工程研究中心，甘肃 兰州　730000

摘　要：百合作为药食同源之品，因具有较高的药用、食用和经济价值而备受关注。长期以来，褐变、紫红色变的色泽变化问题影响着百合的贮藏加工以及品质。研究百合的色变机制和防控技术，对保持百合营养价值和色泽特性、延长货架贮藏期、保障品质、提高消费者接受度具有重要意义。因此，通过对百合色变机制、控制技术及色变对其造成的影响进行综述，为百合色泽变化控制技术的研究和应用发展提供参考。

关键词：百合；褐变；酶促褐变；非酶促褐变；紫红色变；色变机制；控制技术

中图分类号：R283　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0253 - 2670(2023)06 - 1978 - 08

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2023.06.030

Research progress on mechanism of *Lilii Bulbus* color change and control

YANG Li-ping[1], GUO Xu-dong[1], JI Jie[1], HU Hui-fang[1], XI Shao-yang[1], HUANG Yu-fang[1], MA Xiao-hui[1, 2, 3, 4], JIN Ling[1, 2, 3, 4]

1. School of Pharmacy, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730000, China
2. Northwest Collaborative Innovation Center for Traditional Chinese Medicine Co-constructed by Gansu Province & Ministration of Education, Lanzhou 730000, China
3. Gansu Pharmaceutical Industry Innovation Research Institute, Lanzhou 730000, China
4. Gansu Research Center for Evaluation, Protection and Utilization of Rare Chinese Medicine Resources, Lanzhou 730000, China

Abstract: Baihe (*Lilii Bulbus*), as a homologous product of medicine and food, has attracted much attention because of its high medicinal, edible and economic value. For a long time, the color change of browning and violet-red has affected the storage, processing and quality of *Lilii Bulbus*. Studying the color change mechanism and prevention and control technology is of great significance to maintain the nutritional value and color characteristics of *Lilii Bulbus*, prolong the shelf life, ensure the quality and improve consumer acceptance. Therefore, the mechanism of color change, control technology and the effect of color change on *Lilii Bulbus* were reviewed in this paper, with view to providing reference for the research and application of color change control technology of *Lilii Bulbus*.

Key words: *Lilii Bulbus*; browning; enzymatic browning; non-enzymatic browning; violet-red color change; color change mechanism; control technology

百合 *Lilii Bulbus* 是百合科（Liliaceae）百合属 *Lilium* L.所有种类的统称[1]，约有 110 种，广泛分布在整个亚热带地区到北半球最冷的地区[2]。我国百合属资源丰富，被誉为百合属植物的多样性中心，有 55 个种，其中特有种 36 个[3]，其中药用百合有卷丹 *L. lancifolium* Thunb.、百合 *L. brownii* F. E. Brown var. *viridulum* Baker 和细叶百合 *L. pumilum* DC.[4]，食用百合有兰州百合 *L. davidii* Duchartre ex

收稿日期：2022-09-18

基金项目：道地药材生态种植及质量保障项目（国中医药科技 [2020] 153 号）；甘肃道地药材产业关键技术及其组方的基础与开发应用研究（GSSYLXM-05）；中央本级重大增减支项目（2060302）；财政部和农业农村部：国家现代农业产业技术体系资助（CARS-21）；兰州百合综合质量评价体系及质量标准的建立（2022KCZD-6）

作者简介：杨莉萍，硕士研究生，研究方向为中药资源评价、保护与可持续利用。E-mail: 1694761937@qq.com

***通信作者：**晋　玲，教授，从事中药资源开发与质量综合评价研究。E-mail: 1131858632@qq.com

Elwes var. *willmottiae* (E. H. Wilson) Raffill、麝香百合 *L. longiflorum* Thunb.等[5]，是我国卫生部审批通过的首批药食两用资源，有止咳、平喘、降血糖、抗肿瘤、改善睡眠、免疫等功能[6-8]，含有多种矿质元素、氨基酸、维生素及大量营养素等营养成分[9]，可被加工成百合醋、百合乳酸饮料、百合面条、百合酸奶等产品[10-12]，具有极高的药用、食用和经济价值。但长期以来，褐变、紫红色变问题影响着百合的贮藏加工、品质及商业价值[13-14]，因此研究百合的色变机制和防控技术对保持百合营养价值和色泽特性、延长货架贮藏期、保障品质、提高消费者接受度具有重要意义。

本文对百合在运输、贮藏期间色泽变化机制、控制技术及色变对百合造成的影响等研究现状进行阐述，并对现有色变机制及控制技术等存在的问题及发展方向进行探讨和展望，为百合色变机制及控制技术的进一步研究和应用发展提供参考。

1 百合色泽变化机制

基于产地及市场调研表明，百合色泽变化主要以褐变和紫红色变为主，对现阶段百合褐变研究进展进行分析可得其褐变机制又可分为酶促褐变和非酶促褐变。

1.1 褐变

1.1.1 酶促褐变 酶促褐变是指百合在受到机械损伤或处于受热、受冻的异常环境下，在酶的作用下将酚类物质氧化形成醌类物质，随后醌类物质与蛋白质、脂肪等其他物质结合或自身聚合产生褐色聚合物的生理生化过程[15-16]。发生酶促褐变必须同时具备酚类底物、酶、氧气 3 个必要因素[17]。

（1）酚类底物：酚类底物是百合组织褐变的物质基础及反应底物，其共同点是都含有带羟基的苯环结构，羟基的数目和位置因种类而异[18]。品种、栽培条件、部位等不同，酚类物质不同，且在褐变过程中起主要作用的酚类物质亦各不相同[19]。靳磊等[20]在研究 3 种百合鳞茎多酚类物质抗氧化活性分析时发现，渥丹、山丹、兰州百合鳞茎中单体酚的组分和含量均有差异，卷丹中层鳞片在同一贮藏时间大部分酚类物质相对含量较低，而内层在中后期酚类物质含量显著高于外层和中层。万冰[1]研究发现微加工百合鳞茎储藏过程中王百合苷 F 与褐变度相关系数最高。而卷丹、百合、宜兴百合多酚氧化酶（polyphenol oxidase，PPO）对 4-甲基邻苯二酚的亲和力最高[21]。Zhao 等[22]研究表明丙二醛、PPO 及次生代谢产物（酚酸）水平的变化与百合褐变的相关性较高。

（2）酶：酶促褐变与 PPO、过氧化物酶（peroxidase，POD）、苯丙氨酸解氨酶（phenylalanine ammonia-lyase，PAL）等酶活力具有相关性，且百合不同部位酶活性亦不相同。PPO 对底物具有专一性，仅作用于邻苯酚和一元酚，百合鳞茎不同部位 PPO 活性不同，表现为心部＞中部＞皮部鳞片[23]，贮藏过程中百合褐变度与 PPO、PAL、POD 活性变化呈正相关[24-25]，且引起其褐变的关键酶依次为 PPO＞PAL＞POD[1]。李彦丽等[26]在研究热烫方式对褐变内源酶的影响过程中发现龙牙百合 PPO 活力较 POD 活力高，其中厚外片 PPO 活力最高，薄内片最低；薄外片 POD 活力最高。影响酶的活性其他因素与百合褐变程度之间也有一定的关系，当外界环境达到最适宜酶活性条件时褐变程度明显增加，相关影响因素与酶活性的关系见表 1。

结合表 1 可知在不同品种百合中影响酶活性的 pH 和温度具有明显的差异，研究表明酶活性的最适 pH 值取决于酚类底物[29]。故针对不同品种的百合需要有针对的找出影响酶活性的主要酚类底物以及不同酚类底物最适的 pH。

另外，能量代谢与褐变密切相关，王志华等[30]

表 1 不同品种百合中酶活性的最适 pH 和温度

Table 1 Optimal pH and temperature of enzyme activity in different varieties of *Lilii Bulbus*

种名	酶的类型	最适温度	最适 pH	文献
龙牙百合	PPO、POD	—	6.0～7.0	27
兰州百合	PPO	25 ℃	4.0、6.0	28
兰州百合	POD、PAL	20 ℃酶活性显著高于 10 ℃和 4 ℃	—	25
卷丹	PPO	15 ℃	4.0、6.5～7.0	21

“—”没有相关数据

“—” no relevant data

研究发现低温诱导可减少三磷酸腺苷和二磷酸腺苷的含量，导致细胞供能不足，从而增加果肉褐变，且温度越低，能量亏损越严重，褐变指数越高。同时参与能量代谢的琥珀酸脱氢酶、细胞色素氧化酶、氢-钾 ATP 酶、Ca^{2+}-ATP 酶与百合褐变度均有极显著的关系[1]。在百合鳞片的贮藏过程中，百合鳞片细胞因衰老而造成活性氧等自由基积累，少量的活性氧积累不会对组织造成伤害，当组织内的活性氧等异常积累超出系统的清除能力，导致蛋白质和酶的结构与功能受损，膜脂中的不饱和脂肪酸因活性氧的攻击发生过氧化反应，膜的通透性增强，引起褐变加剧、品质下降[1,31]。超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）和过氧化氢酶（catalase，CAT）是植物自由基清除系统中的重要保护酶，二者协同作用可以有效阻止活性氧的积累，防止膜脂过氧化，故 SOD 和 CAT 在后期酶活性的下降也加剧褐变[32]。

（3）氧气：由于酚类物质分布于液泡中，造成百合褐变的关键酶 PPO 存在类囊体腔（包括叶绿体、有色体等）中[33]，二者互不接触，导致外界氧气无法直接进入。研究表明氧气正常情况下进入果蔬内部主要通过 2 种机制，氧气的运输主要通过表皮细胞和蜡沉淀，而空隙空间的传输机制发生了扩散导致氧气进入内部，最后在组织膜内扩散至耗氧点[34]。Aguilera[35]提出细胞膜是一种半透膜，维持着细胞内外渗透压平衡。故在正常情况下酚类物质、酶及氧气无法接触而不能发生褐变，当膜结构遭到破坏或膜的通透性被改变时，液泡中的酚类物质泄漏，在氧的参与下被 PPO（褐变主要酶）氧化成醌类，随后醌类物质聚合成为褐色物质，见图 1。

1.1.2　非酶促褐变　非酶促褐变可分为美拉德反应、焦糖化反应、抗坏血酸氧化褐变，反应底物主要是维生素 C 和酚类物质[19]。1912 年由法国化学家 Maillard 首次提出美拉德反应的概念[36-37]，又称非酶褐变，为反应体系中存在的氨基酸及其化合物与具有羰基的化合物之间所发生的羰氨反应，也是食品加工、贮藏、运输中普遍存在的一类非常重要的化学反应。Kanzler 等[38]研究发现美拉德反应中类黑素是由糖和氨基酸经过一系列反应最终形成的色素的聚合物。糖类在没有氨基化合物存在的情况下，当加热温度超过其熔点 135 ℃时，即发生脱水或降解，然后进一步缩合生成黏稠状的黑褐色产物，这类反应称为焦糖化反应[39]。抗坏血酸氧化褐变是抗坏血酸自身氧化引起的褐变，酚类物质在一些条件下发生的自动氧化变色过程[40]。美拉德反应较常发生在百合的运输、贮藏过程中，然焦糖化反应即使在百合产品热加工的过程中也不常见到。目前对于百合非酶褐变的研究相对较少，仅有研究指出还原糖和蛋白质发生羰氨反应可能是引起百合的非酶褐变的原因[41]。

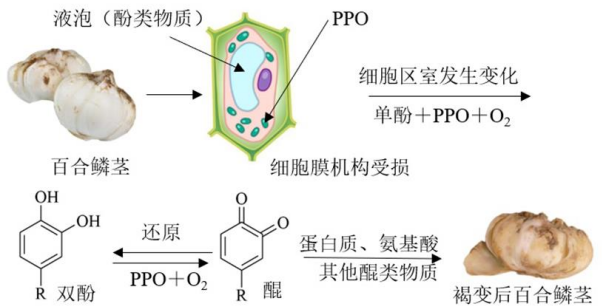

图 1　百合的酶促褐变机制

Fig. 1　Mechanism of enzymatic browning of *Lilii Bulbus*

1.2　紫红色变

紫红色变的原因可能与花色苷类物质的生成有关[41]。姜语丝[42]初次定性分析了造成鲜切百合“粉变”的物质为花色苷类物质，并基于蛋白组学分析技术对贮藏期间百合鳞茎“粉变”部位的蛋白信息进行分析，初步探讨了花色苷合成途径涉及蛋白的变化情况。Fan 等[43]指出在百合鳞茎储存加工过程中，紫红色变与酶促褐变是不同的，基于代谢组学和转录组学分析结果表明，参与类黄酮生物合成的 19 个差异基因，如查耳酮合成酶、查耳酮异构酶、黄烷酮-3-羟化酶、花青素合成酶等在紫红色百合鳞茎中高表达，与柚皮素查耳酮、柚皮素、表儿茶素、矢车菊素和矢车菊素 3-芸香糖苷的含量呈现高度正相关，表明类黄酮生物合成基因表达的增加导致类黄酮的积累，进而导致百合鳞茎的紫红色变，见图 2。

2　控制技术

褐变会加速食品的变质和腐烂，从而影响品质和口感。因此通过抑制褐变的发生条件达到控制的褐变的目的[33]。主要分为酶促褐变和非酶促褐变的控制方法。对百合紫红色变控制措施的研究尚处于初始阶段，抑制产生紫红色变生理成分环节中酶活性、基因表达是目前主要的研究方向。

2.1　酶促褐变的抑制方法

防止百合酶促褐变主要是通过控制酶促褐变过

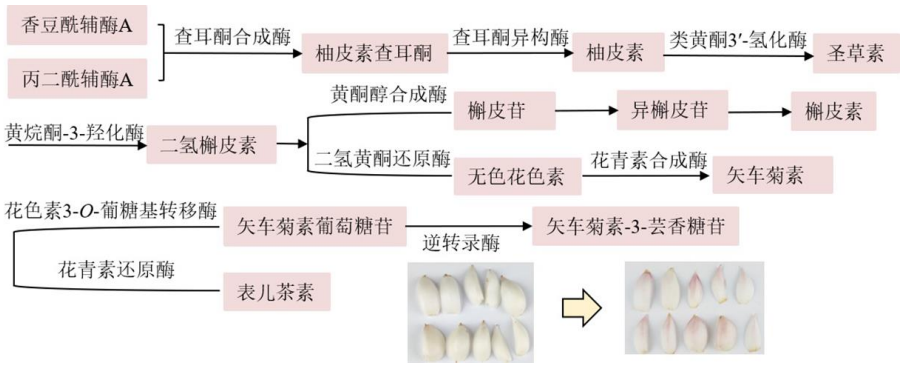

图 2　百合紫红色变的机制

Fig. 2　Mechanism of violet-red color change of *Lilii Bulbus*

程中的关键环节而达到预防百合褐变的目的。酶促褐变的速率取决于酶的活性，研究表明 PPO 是百合酶促褐变的关键酶，通过控制 PPO 的活性抑制酶促褐变的发生。目前针对抑制 PPO 活性的方法有很多，常见的有物理方法热处理[44-45]、去氧或隔离氧[46]、低温贮藏[47]、降低 pH[48]、高压处理[49]、辐照[50]、超声处理等[51]；化学方法涂膜法[52]、酶抑制剂法[53]、抗氧化剂法[54]、酸化剂法[55]等；生物方法有天然提取物抑制法[56]，常见的天然提取物有桑叶提取物[57]、百里香精油[58]、积雪草提取物[59]等，以及以上相互配合使用来防止褐变[60]。

2.2　非酶促褐变的控制方法

在褐变过程中并不是酶促褐变单独的发生作用，在酶钝化失去活性后，非酶促褐变在褐变过程中发挥极大的效应。研究表明果蔬中含有丰富的多酚物质和抗坏血酸，由抗坏血酸氧化和多酚引起的非酶促褐变是影响果蔬品质的重要因素[61-62]。目前针对非酶褐变的控制措施主要有避光干燥保存、低温保存法、控制 pH 等。

2.3　紫红色变的控制方法

紫红色变使百合外观色泽发生变化，极大地降低了消费者的接受度。而针对紫红色变控制方法的研究报道相对较少。刘燕等[63]研究发现低温与包装之间具有较好的协同作用，且低温与塑料薄膜包装贮藏能有效抑制百合的紫红色变。Huang 等[64]研究发现 NaHS 熏蒸能诱导内源 H_2S 的产生，H_2S 通过调节花青素合成途径中关键酶的活性和基因表达，降低了花青素积累引起的颜色变化，从而改善兰州百合在储存过程中鳞片的外观质量，随着 NaHS 浓度的增加，颜色变化减小（特别是紫红色变）。

近年来人们对食品安全的关注度日益增加，使用安全、有效的方式防止百合的色泽变化逐渐受到广泛关注。目前的百合保鲜方式有气调保存、低温储存、控制贮藏温度和湿度等。这些技术均不同程度地延缓百合的褐变进而推迟百合的腐烂和变质，抑制百合的紫红色变。现对目前百合防止百合色泽变化的方法进行整理，见表 2。

3　色泽变化对百合的影响

3.1　褐变对百合的影响

通常外形较好的百合商业价值更高，然而百合采后加工包装贮藏环节的调查研究发现真空包装的鲜百合会出现腐烂、零售的新鲜百合会因贮藏不当产生微生物污染、变味等变质现象，其中最常见的变质现象是褐变[13]。根据上文整理可知百合褐变主要是酶促褐变引起的，此过程引起百合鳞片色泽呈褐色、酚类物质的含量下降，进而影响其抗氧化活性[3]，故酶促褐变不仅影响百合的感官品质，其影响百合质量的酚类物质含量也降低。非酶促过程中的美拉德反应较常发生在百合运输过程中，此反应又被称为羰氨反应，体现在百合贮藏运输过程中多糖化合物与氨基酸的反应，多糖类成分是百合的主要有效成分，具有免疫调节、抗衰老、抗氧化、降血糖、抗肿瘤等生物学活性[73]，在大健康领域有重要价值，氨基酸作为百合的主要的营养成分是评价百合质量的重要标志之一，非酶造成的褐变不但使百合色泽失去优势同样降低了其质量。

3.2　紫红色变对百合的影响

Fan 等[43]在研究百合紫红色变机制的过程中发现，相比未紫变的兰州百合，发生紫变的兰州百合氨基酸及其衍生物含量呈现下降趋势，甘氨酸、丝氨酸、苏氨酸、精氨酸、脯氨酸代谢差异显著，其中甘氨酸、丝氨酸、苏氨酸、脯氨酸被称之为甜味氨基

表 2　百合防色变技术

Table 2　Anti-color technology of *Lilii Bulbus*

种名	处理方法	方法类型	结果	文献
百合（未注明品种）	低温＋包装膜	物理	可有效抑制百合的紫红色变，对百合贮藏效果佳	63
百合（未注明品种）	60 mg·kg^{-1} 焦亚硫酸钠＋0.20%柠檬酸＋0.10%氯化钙＋0.025%明矾	化学	保存 2 月以上不变色变质	65
兰州百合	1-MCP、ClO_2 熏蒸	化学	不同程度降低百合贮藏期间的腐烂率、呼吸强度、水分、维生素 C 的含量	66
兰州百合	硫磺熏蒸	化学	抑制鲜百百合在短期贮藏过程中的酶促褐变	67
卷丹	热处理＋2-氨基茚满-2-膦酸处理	物理＋化学	抑制褐变相关酶的活性，有效维持细胞膜完整性，控制脂膜过氧化程度，减少褐变底物酚类物质含量防止褐变	1
兰州百合	0.5 mmol·L^{-1} 水杨酸、6 mg·L^{-1} 二氧化氯分别浸泡	化学	缓解百合鳞片的褐变，抑制维生素 C、总黄酮、总酚含量的下降，降低 PPO 活性，提高 DPPH 自由基、羟基自由基清除能力和总抗氧化能力	68
卷丹	50 ℃处理 3 min	物理	降低总酚含量并抑制褐变相关酶的活性、细胞死亡率和细胞膜通透性	45
兰州百合	曲酸-海藻酸钠复合液涂膜	生物	有效抑制百合鳞茎片褐变，显著保持色度、硬度，抑制丙二醛含量升高，减缓 PAL、PPO、POD、总酚和醌类的升高	52
兰州百合	茶树精油熏蒸	生物	抑制轻加工百合贮藏期间 PPO、POD 的活性，保持其白度值，从而抑制其褐变，提高 PAL 酶活性从而诱导酚类物质的产生；降低丙二醛的积累和微生物负荷，使轻加工百合在贮藏期间更好地保持外观及生理品质	69
兰州百合	微环境气调结合相温贮藏	物理	可降低腐烂程度，维持百合硬度，营养物质处于相对平稳状态，前期提高呼吸强度，后期抑制呼吸与乙烯生成速率，降低醇类、酯类及烯烃类物质，促进醛类物质的释放	70
兰州百合	NaHS 熏蒸	化学	延长兰州百合鳞片的贮藏寿命，使可溶性糖、可溶性蛋白质和抗坏血酸水平升高，总酚和类黄酮含量降低，同时还降低脂质过氧化水平和活性氧积累等	71
兰州百合	NaHS 熏蒸	化学	诱导内源 H_2S 产生，H_2S 通过调节花青素合成途径中关键酶的活性和基因表达，降低了花青素积累引起的颜色变化，从而改善兰州百合在收获后储存过程中鳞片的外观质量	64
卷丹	2-氨基茚满-2-膦酸	化学	降低鲜切百合鳞茎的褐变程度，同时降低了鳞茎的总酚含量以及与褐变相关的酶活性	72

酸[74]，故而紫红色变不仅影响百合外观形状的变化，更有可能使百合的甜味下降，对食用百合造成严重的经济影响。

4　结语与展望

由 PPO 与酚类底物反应引起的褐变是百合贮藏、加工过程中色泽加深和品质变差的主要原因之一。百合品种丰富，故而与酶反应的底物更为复杂。目前针对酶催化的机制尚没有完全明确，百合褐变与底物及活性酶之间的相关性还需要进一步深入研究。同时百合紫红色变的机制处于研究的初级阶段，抑制紫红色变能有效延长百合贮藏时间，提高经济效益。因此贮藏环境及个体差异与色泽变化之间的关键步骤和关键因素都值得深入研究。只有深入研究和了解其色变机制，区分不同色变类型的诱导因素才能更有效地采取控制措施。

防止百合色泽变化控制的技术很多，有些也取得

了良好效果，但多技术复合使用后的作用机制、互作关系仍有很多盲区亟待解决。特别是对百合紫红色变还未深入研究，可进一步结合组学、基因工程等技术系统研究色变的外界成因、色泽变化与质量之间的相关性及色变机制，从而研发出针对其色变的控制技术，为百合产品的开发利用奠定理论基础。

根据品种、采前因素和采后因素等研究影响百合色变发生的机制，筛选鉴定色变相关的特定生理成分，研究建立基于生理成分的百合色变发生的数学模型和预测预警技术，实现在百合入库初期即对百合贮藏期间色泽变化发生情况进行预测，或根据生理成分检测结果，对百合冷藏期间色泽变化发生的概率进行预测预警，见图 3，均有利于企业提前采取有针对性的控制或预防措施，减少因色泽改变带来的经济损失，更有利于开发能兼顾食品营养物质和风味保持的环境友好型控制技术。

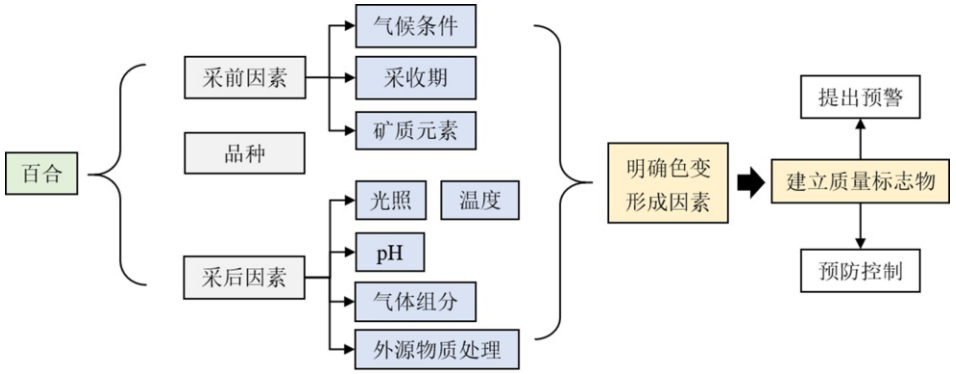

图 3　百合色泽变化的预测预警思路

Fig. 3　Prediction and early warning of *Lilii Bulbus* color change

本文旨在对百合褐变与紫红色变的机制进行综述，同时整理讨论控制色变的技术类型与结果，并对未来相关的研究方向进行展望，为百合色泽变化机制与控制技术的研究和发展应用提供参考，对进一步保持百合品质，提高消费者接受度，促进相关产业规模化具有重要的意义。

利益冲突　所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] 万冰. 微加工百合鳞茎褐变机制及其调控研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2018.

[2] Liang Z X, Zhang J Z, Xin C, *et al*. Analysis of edible characteristics, antioxidant capacities, and phenolic pigment monomers in *Lilium* bulbs native to China [J]. *Food Res Int*, 2022, 151: 110854.

[3] Jin L, Zhang Y L, Yan L M, *et al*. Phenolic compounds and antioxidant activity of bulb extracts of six *Lilium* species native to China [J]. *Molecules*, 2012, 17(8): 9361-9378.

[4] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 137.

[5] 赵祥云, 王树栋, 陈新露, 等. 百合 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-34.

[6] Zaccai M, Yarmolinsky L, Khalfin B, *et al*. Medicinal properties of *Lilium candidum* L. and its phytochemicals [J]. *Plants*, 2020, 9(8): 959.

[7] 李红娟. 卷丹百合营养成分、活性物质及栽培特性的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.

[8] 胡兆东, 田硕, 苗艳艳, 等. 百合的现代化学、药理及临床应用研究进展 [J]. 中药药理与临床, 2022, 38(4): 241-246.

[9] 郎利新, 窦晓莹, 孔滢, 等. 不同 (品) 种及产地的百合鳞茎营养成分分析 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 339-350.

[10] 马淑兰, 吴澎. 百合饮料的研究进展 [J]. 饮料工业, 2018, 21(3): 69-72.

[11] 刘颜, 吴长周. 茯苓百合冷冻面条的研制 [J]. 兰州文理学院学报: 自然科学版, 2019, 33(1): 42-46.

[12] 梁琪, 张卫兵, 张炎, 等. 百合酸奶的挥发性风味物质成分分析 [J]. 食品工业科技, 2012, 33(16): 99-104.

[13] 李瑞琦, 马玉翠, 吴翠, 等. 百合采后加工包装贮藏环节的调查 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2019, 25(23): 151-155.

[14] Friedman M. Food browning and its prevention: An overview [J]. *J Agric Food Chem*, 1996, 44(3): 631-653.

[15] Netsanet S T, Antoine D, Roman B, *et al*. Blueberry polyphenol oxidase: Characterization and the kinetics of thermal and high pressure activation and inactivation [J]. *Food Chem*, 2015, 188: 193-200.

[16] 白宇皓, 李超, 杨志国, 等. 梨多酚氧化酶特性与酶促褐变抑制研究进展 [J]. 食品科技, 2022, 47(2): 75-81.

[17] Jiang G H, Kim Y M, Nam S H, *et al*. Enzymatic browning

inhibition and antioxidant activity of pear juice from a new cultivar of Asian pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. Sinhwa) with different concentrations of ascorbic acid [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2016, 25(1): 153-158.

[18] Shahin G, Seyed H M, Mahmood G, *et al*. The inhibitory effect of nitric oxide on enzymatic browning reactions of in-package fresh pistachios (*Pistacia vera* L.) [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2020, 159: 110998.

[19] 苏艳丽, 田永真, 杨健, 等. 梨果实褐变的研究进展 [J]. 西北林学院学报, 2018, 33(3): 144-152.

[20] 靳磊, 张延龙, 牛立新, 等. 3 种百合鳞茎中多酚类物质的抗氧化活性分析 [J]. 西北植物学报, 2014, 34(5): 995-1001.

[21] Wang X Y, Yang L Z, Liu J, *et al*. Comparison of the biochemical properties and thermal inactivation of polyphenol oxidase from three lily bulb cultivars [J]. *J Food Biochem*, 2020, 44(10): e13431.

[22] Zhao K H, Xiao Z P, Zeng J G, *et al*. Effects of different storage conditions on the browning degree, PPO activity, and content of chemical components in fresh *Lilium* bulbs (*Lilium brownii* F. E. Brown var. *viridulum* baker.) [J]. *Agriculture*, 2021, 11(2): 184.

[23] 徐真. 百合鳞茎多酚氧化酶特性的研究及褐变的控制 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2005.

[24] 蒋益虹. 百合褐变与多酚氧化酶和过氧化物酶活性关系的研究 [J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2003, 29(5): 518-522.

[25] 张朝阳. 兰州百合保鲜过程中酶活性研究 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2018.

[26] 李彦丽, 丁胜华, 高炜, 等. 热烫方式对百合褐变内源酶及微观结构的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39(17): 53-60.

[27] 付桂明, 万茵. 百合在加工储藏过程中的褐变控制研究 [J]. 食品研究与开发, 2005, 26(5): 35-38.

[28] 姜慧, 沈群. 百合鳞茎多酚氧化酶特性的初步研究 [J]. 食品工业科技, 2010, 31(4): 166-168.

[29] M.Helena G, Tiago V, Joana F, *et al*. Polyphenoloxidase activity and browning in fresh-cut 'Rocha' pear as affected by pH, phenolic substrates, and antibrowning additives [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2014, 91: 32-38.

[30] 王志华, 贾朝爽, 王文辉, 等. 低温贮藏对'金红'苹果能量代谢和品质的影响 [J]. 园艺学报, 2020, 47(12): 2277-2289.

[31] 李桂峰. 苹果果肉褐变机理和近红外无损检测技术研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2008.

[32] 阚娟, 万冰, 解王晶, 等. 百合鳞片褐变过程中膜脂过氧化研究 [J]. 食品科学, 2019, 40(1): 9-15.

[33] 闫星羽, 陈存坤, 薛文通. 绿豆芽防褐变技术的研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2021, 42(14): 185-192.

[34] 李山林, 张雁, 廖娜, 等. 淮山褐变机理及其控制技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 434-444.

[35] Aguilera J M. Why food microstructure? [J]. *J Food Eng*, 2005, 67(1/2): 3-11.

[36] 宫瑞泽, 霍晓慧, 张磊, 等. 美拉德反应对中药品质的影响及调控研究进展 [J]. 中草药, 2019, 50(1): 243-251.

[37] 周逸群, 贺福元, 杨岩涛, 等. 美拉德反应研究现状及对中药炮制和制剂工艺研究方法的影响 [J]. 中草药, 2014, 45(1): 125-130.

[38] Kanzler C, Haase P T. Melanoidins formed by heterocyclic Maillard reaction intermediates via aldol reaction and Michael addition [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(1): 332-339.

[39] Rosin M P, Stich H F, Powrie W D, *et al*. Induction of mitotic gene conversion by browning reaction products and its modulation by naturally occurring agents [J]. *Mutat Res*, 1982, 101(3): 189-197.

[40] Intarasit S, Saengnil K. Transient production of H_2O_2 and NO induced by ascorbic acid coincides with promotion of antioxidant enzyme activity and reduction of pericarp browning of harvested Longan fruit [J]. *Sci Hortic*, 2021, 277: 109784.

[41] 蒋益虹. 影响百合色泽变化因素的研究 [J]. 中国食品学报, 2004, 4(3): 25-28.

[42] 姜语丝. 鲜切百合粉变机制的研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.

[43] Fan W G, Li B Y, Tian H, *et al*. Metabolome and transcriptome analysis predicts metabolism of violet-red color change in *Lilium* bulbs [J]. *J Sci Food Agric*, 2022, 102(7): 2903-2915.

[44] Prabasari I, Setiawan C K, Andani A P, *et al*. Modified atmosphere packaging and heat treatment for maintaining the quality of fresh-cut pineapple (*Ananas comosus*) [J]. *IOP Conf Ser*: *Earth Environ Sci*, 2021, 752(1): 012024.

[45] Kan J, Xie W J, Wan B, *et al*. Heat-induced tolerance to browning of fresh-cut lily bulbs (*Lilium lancifolium* Thunb.) under cold storage [J]. *J Food Biochem*, 2019, 43(5): e12816.

[46] 冯坤蓉, 范桃会, 魏发明, 等. 高海拔地区不同温度及处理方式对食用百合贮藏效果的影响 [J]. 农业科技通讯, 2021(9): 182-184.

[47] 周俐宏, 印东生, 宁景华. 东方百合鳞茎打破休眠和低温冷藏技术研究 [J]. 黑龙江农业科学, 2010(2): 46-48.

[48] 袁江, 张绍铃, 曹玉芬, 等. 梨果实酚类物质与酶促褐变底物的研究 [J]. 园艺学报, 2011, 38(1): 7-14.

[49] Wu Z S, Zhang M, Wang S. Effects of high pressure argon

treatments on the quality of fresh-cut apples at cold storage [J]. *Food Control*, 2012, 23(1): 120-127.

[50] Agarwal V, Malcolm J G, Pradilla G, *et al*. Tractography for optic radiation preservation in transcortical approaches to intracerebral lesions [J]. *Cureus*, 2017, 9(9): e1722.

[51] Xu Y J, Wang D, Zhao W T, *et al*. Low frequency ultrasound treatment enhances antibrowning effect of ascorbic acid in fresh-cut potato slices [J]. *Food Chem*, 2022, 380: 132190.

[52] 范文广, 杜娜娜, 牛晓倩, 等. 曲酸-海藻酸钠复合膜的制备及其对百合鳞茎片褐变的抑制作用 [J]. 食品工业科技, 2019, 40(11): 284-290.

[53] 常大伟, 魏送送, 刘树兴, 等. 抑制剂对梨浊汁酶促褐变的控制研究 [J]. 食品与机械, 2016, 32(2): 106-110.

[54] Ali S, Sattar K A, Ullah M A, *et al*. Combined application of ascorbic and oxalic acids delays postharvest browning of litchi fruits under controlled atmosphere conditions [J]. *Food Chem*, 2021, 350: 129277.

[55] Xiao Y H, Zhang J L, Jiang Y Y, *et al*. Cinnamic acid treatment reduces the surface browning of fresh-cut taro [J]. *Sci Hortic*, 2022, 291: 110613.

[56] Hamdan N, Lee C H, Wong S L, *et al*. Prevention of enzymatic browning by natural extracts and genome-editing: A review on recent progress [J]. *Molecules*, 2022, 27(3): 1101.

[57] Kim J, Choi J Y, Kim J, *et al*. Effect of edible coating with *Morus alba* root extract and carboxymethyl cellulose for enhancing the quality and preventing the browning of banana (*Musa acuminata* Cavendish) during storage [J]. *Food Packag Shelf Life*, 2022, 31: 100809.

[58] Khan M R, Huang C X, Zhao H, *et al*. Antioxidant activity of thymol essential oil and inhibition of polyphenol oxidase enzyme: A case study on the enzymatic browning of harvested Longan fruit [J]. *Chem Biol Technol Agric*, 2021, 8(1): 61.

[59] Wong J X, Ramli S, Desa S, *et al*. Use of *Centella asiatica* extract in reducing microbial contamination and browning effect in fresh cut fruits and vegetables during storage: A potential alternative of synthetic preservatives [J]. *LWT*, 2021, 151: 112229.

[60] Qiao L P, Gao M, Zheng J X, *et al*. Novel browning alleviation technology for fresh-cut products: Preservation effect of the combination of *Sonchus oleraceus* L. extract and ultrasound in fresh-cut potatoes [J]. *Food Chem*, 2021, 348: 129132.

[61] Yu A N, Zhou Y Y, Yang Y N. Kinetics of browning and correlations between browning degree and pyrazine compounds in l-ascorbic acid/acidic amino acid model systems [J]. *Food Chem*, 2017, 221: 1678-1684.

[62] 杨子涵, 陈丹丹, 季俊夫, 等. 果蔬汁中多酚介导的非酶褐变研究进展 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(24): 367-375.

[63] 刘燕, 卢立新. 贮藏温度和包装材料对百合保鲜包装品质的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(1): 152-155.

[64] Huang D J, Li W T, Dawuda M M, *et al*. Hydrogen sulfide reduced colour change in Lanzhou lily-bulb scales [J]. *Postharv Biol Technol*, 2021, 176.

[65] 胡国华, 翟瑞文. 百合贮运保鲜技术的研究 [J]. 西部粮油科技, 2002, 27(5): 34-36.

[66] 巩慧玲, 袁惠君, 冯再平, 等. 1-MCP、ClO_2 对兰州百合贮藏保鲜效果的影响 [J]. 食品工业科技, 2010, 31(10): 338-339.

[67] 魏黎阳. 硫磺熏蒸对兰州百合品质的影响 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.

[68] 李翠红, 冯毓琴, 魏丽娟, 等. 保鲜剂对百合鳞片常温贮藏期间品质及抗氧化活性的影响 [J]. 农产品质量与安全, 2018(3): 87-91.

[69] 高凯丽, 胡文忠, 刘程惠, 等. 茶树精油熏蒸处理对轻加工百合褐变及品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2019, 40(18): 267-272.

[70] 魏宝东, 康丹丹, 张鹏, 等. 微环境气调结合相温贮藏对兰州百合采后品质的影响 [J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 241-249.

[71] Li C X, Chen G B, Huang D J, *et al*. The antioxidant defense system during Lanzhou lily scales storage is modulated by hydrogen sulfide [J]. *Horticulturae*, 2021, 7(7): 183.

[72] Kan J, Liu Y, Hui Y Y, *et al*. 2-aminoindan-2-phosphonic acid alleviates oxidative browning in fresh-cut lily bulbs [J]. *J Food Process Pres*, 2022, 46(4): e16449.

[73] 白光剑, 陈少丹, 张普照, 等. 百合多糖的化学结构表征和生物活性研究进展 [J]. 中草药, 2022, 53(20): 6583-6592.

[74] 王馨雨, 王蓉蓉, 王婷, 等. 不同品种百合内外鳞片游离氨基酸组成的主成分分析及聚类分析 [J]. 食品科学, 2020, 41(12): 211-220.

[责任编辑 赵慧亮]