

二氧化硫在鲜食葡萄保鲜中的应用研究进展

张一帆, 吴培文, 朱本忠*

(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要: 二氧化硫 (Sulfur Dioxide, SO₂) 被广泛应用于葡萄贮藏, 它具有出色的抗菌性能、使用成本低廉、而且保鲜效果显著, 是一种理想的保鲜剂。但是过量 SO₂ 会对鲜食葡萄的果实造成严重伤害, 常见的症状包括果实漂白、大量落粒、果实开裂以及风味劣变, 在贮藏过程中造成较大损失。目前, 缺乏对于鲜食葡萄保鲜中 SO₂ 应用效果和作用机制的系统性归纳整理。针对这一问题, 该文综述了 SO₂ 处理对鲜食葡萄采后贮藏病害、果实感官品质以及生理代谢的影响; SO₂ 在鲜食葡萄保鲜应用中的抑菌作用原理和积累途径; 以及过量 SO₂ 会对鲜食葡萄造成漂白、落粒和贮藏风味劣变的伤害。最后对 SO₂ 在鲜食葡萄保鲜上的研究和应用趋势进行展望, 旨在为 SO₂ 葡萄保鲜剂的精准应用奠定理论基础, 以及为我国鲜食葡萄贮藏保鲜技术的发展提供相应的参考。

关键词: 二氧化硫 (SO₂); 鲜食葡萄; 品质; 保鲜; 研究进展

文章编号: 1673-9078(2024)06-311-317

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.6.0645

Research Progress on the Application of Sulfur Dioxide in the Preservation of Fresh Table Grapes

ZHANG Yifan, WU Peiwen, ZHU Benzhong*

(College of Food Science & Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Sulfur dioxide (SO₂) is the widely used in the storage of grapes, offering advantages such as excellent antimicrobial effect, low cost, and significant fresh-keeping effects, thus, it is an ideal preservative. However, excessive SO₂ can lead to serious damage to fresh grape fruits, with the common symptoms including fruit bleaching, increase of fruit falling, fruit cracking and flavor deterioration, causing high fruit loss during storage. At present, there is currently a lack of systematic induction and arrangement for the application outcome and working mechanism of SO₂ preservation of table grapes. In order to solve this issue, this article reviews the effects of SO₂ treatment on the postharvest diseases, sensory quality and physiological metabolism of fresh grapes, the antimicrobial mechanism and accumulation pathway associated with the application of SO₂ in preseving table grapes, and the harms to the fresh grapes caused by excessive SO₂ including fruit bleaching, fruit falling, and flavor deterioration during storage. Finally, the research and application trends of SO₂ in the preservation of table grapes were prospected, with the aim to lay a theoretical foundation for the precise application of SO₂ in grape preservation, and provide a corresponding reference for the advancement of storage and preservation technologies for table grapes in China.

Key words: sulfur dioxide (SO₂); table grape; quality; preservation; research progress

引文格式:

张一帆, 吴培文, 朱本忠. 二氧化硫在鲜食葡萄保鲜中的应用研究进展[J]. 现代食品科技, 2024, 40(6): 311-317.

ZHANG Yifan, WU Peiwen, ZHU Benzhong. Research progress on the application of sulfur dioxide in the preservation of fresh table grapes [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(6): 311-317.

收稿日期: 2023-05-31

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD2100103); 国家自然科学基金项目 (32272373; 31871847)

作者简介: 张一帆 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬采后生理与分子生物学, E-mail: 2669713637@qq.com

通讯作者: 朱本忠 (1975-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬采后生理与分子生物学, E-mail: zbz@cau.edu.cn

葡萄 (*Vitis vinifera* L.) 作为葡萄科葡萄属的一种植物, 具有悠久的栽培历史。因其果实具有独特的香气、别具一格的口感和丰富的营养而深受消费者喜爱, 成为全球最流行的水果之一^[1,2]。2020年葡萄的世界总产量达到7 800万t, 而且有2 800万t为鲜食葡萄^[3], 在我国则有超过83%的葡萄用于鲜食^[4]。

鲜食葡萄在采收后不耐贮藏, 容易变软变质^[5]。尽管葡萄果实属于非呼吸跃变型果实^[6], 但由于其中糖分含量较高, 再加上葡萄皮薄多汁、果肉易分离的特性, 使得葡萄果实采后极易受到病害腐烂、落粒、果梗干枯褐变以及机械损伤等影响^[7]。这些问题很大程度的降低了葡萄的外观品质和食用口感^[8], 无法满足消费者对鲜食水果的需求。更重要的是, 在我国葡萄的采收时间和产地比较集中, 葡萄的生产和供应受到严重的季节性限制和地域性限制^[5]。为保证鲜食葡萄的全面供应, 需要研发和应用更加有效的葡萄采后保鲜技术。

鲜食葡萄的保鲜技术主要分为物理和化学两大类, 其中物理方法包括低温冷藏、气调、辐照和臭氧等, 化学方法则包括二氧化硫 (Sulfur Dioxide, SO₂)、二氧化氯 (Chlorine Dioxide, ClO₂) 和乙醇等单一或结合处理^[9,10]。

目前, SO₂ 处理被认为是鲜食葡萄采后最有效、应用最广泛的保鲜技术^[11]。SO₂ 处理不仅可以抑制葡萄贮藏过程中病原菌的生长和繁殖, 还可以降低葡萄自身的呼吸强度, 进而减少营养物质的损耗^[12]。与其它保鲜技术相比, SO₂ 处理具有保鲜效果明显、使用方便、价格低廉且不需要复杂的技术和设备等优势。但是葡萄在实际贮藏过程中, 容易出现 SO₂ 处理浓度不稳定、波动大等问题, 破坏葡萄特有的风味, 导致葡萄漂白和大量落粒, 甚至会危害人体健康^[13,14]。由于摄入过量的亚硫酸盐会引发食品安全问题, 我国对食品中 SO₂ 的使用量已建立明确的规定, 葡萄产业对于 SO₂ 的使用也建立了完善的制度, 中国标准规定 SO₂ 的残留限量为 0.05 g/kg, 美国 FDA 标准规定 SO₂ 的残留限量为 0.01 g/kg^[15]。因此如何在保证 SO₂ 保鲜效果的同时, 降低其在果实中的残留, 成为了今后保鲜领域的一个研究重点。本文主要就 SO₂ 在鲜食葡萄保鲜中的研究现状及发展趋势展开综述, 着重叙述了 SO₂ 处理对鲜食葡萄采后各项生理指标和品质指标的影响, 以及 SO₂ 在保鲜中的抑菌作用原理、积累

途径和 SO₂ 过量对鲜食葡萄的伤害, 旨在为我国鲜食葡萄贮藏保鲜技术的进一步发展提供理论支持。

1 SO₂处理对鲜食葡萄的保鲜效果

SO₂ 处理是维持鲜食葡萄采后品质和控制贮藏病害的最常用以及最有效的方法^[16], SO₂ 处理不仅可以提高葡萄果实的抗病性, 还可以维持其采后的感官品质以及生理代谢的平衡, 从而延缓衰老, 延长鲜食葡萄的货架期^[17]。

1.1 SO₂减少鲜食葡萄贮藏病害的发生

鲜食葡萄采后贮藏期间, 容易受到霉菌等致病细菌感染而腐败变质, SO₂ 处理则能提高鲜食葡萄对病原体微生物的抗性, 维持葡萄的采后品质。SO₂ 可以增强葡萄果实的次生代谢反应, 增加次生代谢产物的积累量, 提高细胞的抗氧化能力和细胞壁的防御能力, 从而增强果实的抗病性^[18]。刘丽青等^[19,20]研究发现, 使用 SO₂ 作为保鲜剂, 会显著增强玫瑰香、龙眼葡萄果实次生代谢途径的关键酶苯丙氨酸解氨酶 (Phenylalanine Ammonialyase, PAL) 的活性, SO₂ 处理组 PAL 活性在 95 d 内一直维持较高水平。PAL 作为次生代谢途径中的第一个酶, 具有重要的作用, 它会催化苯丙氨酸发生生物反应, 合成多种具有防御结构和功能的次生代谢产物^[21], 从而提高植物细胞的防御能力, 增强果实的抗病性。其中酚类物质是主要的次生代谢产物, 包括类黄酮和木质素等, Xue 等^[22]研究发现, SO₂ 可以使红提葡萄中的木质素和类黄酮等次生代谢产物在贮藏 60 d 内保持较高水平。一些类黄酮类物质能够在植物受到致病菌侵染后形成植物防御素, 限制致病菌的进一步扩散^[23]; 而木质素则是植物细胞壁的主要组分, 不仅能增强细胞壁对病原微生物穿透的抗性, 限制致病菌和毒素的扩散, 还对致病菌从寄主中获得水分和营养的途径起到限制作用^[24,25]。另外, SO₂ 的应用可以显著提升葡萄果实中多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 的活性, PPO 能够将次生代谢产物酚类氧化成醌类物质, 这些物质具有良好的抗病性^[26], 有效地降低了葡萄贮藏过程中的病害风险。

此外, 葡萄可以产生多种抗病防御产物, 其中病程相关蛋白是很重要的一类。β-1,3-葡聚糖酶和几丁质酶是目前最常见的两种病程相关蛋白, 具有抗菌功能, 这两种酶都能抑制病原菌的生长^[27]。这

些物质能够水解病原菌的细胞壁,有效地降低其主要成分几丁质或葡聚糖的含量,从而阻止病原体的扩散,防止植物进一步感染^[18]。王凤超^[28]研究发现,在采后贮藏期间,用 200 $\mu\text{L/L}$ 的 SO_2 熏蒸全球红葡萄 30 min,能提高葡萄几丁质酶和 β -1,3-葡聚糖酶的活性,在贮藏第 60 天, SO_2 处理组的几丁质酶活性比对照高 33.33%, β -1,3-葡聚糖酶比对照组高 10.50%。说明 SO_2 能促进病程相关蛋白的表达,从而有效地激发葡萄的抗病性。

1.2 SO_2 提高鲜食葡萄采后贮藏品质

SO_2 处理能够提高鲜食葡萄采后的感官品质,不仅能较好的抑制葡萄的腐烂、落粒和失重,还能保持葡萄果梗的新鲜度^[29]。对于鲜食葡萄来说,果梗的颜色直接影响果实的新鲜度,果梗褐变是降低葡萄食用品质和商业价值的主要因素^[30]。李杰等^[31]研究发现,使用 3 000 $\mu\text{L/L}$ 的 SO_2 熏蒸木纳格葡萄,经过 10 min 的熏蒸, SO_2 处理后的果梗褐变度始终低于未处理组,而且在 90 d 的储存期间, SO_2 熏蒸组比未熏蒸组果柄褐变度降低了 2.60%,同时 SO_2 处理组的果梗叶绿素含量比对照组高 40.54%,说明 SO_2 能抑制葡萄果梗褐变和果梗叶绿素的降解,使葡萄维持更好的外观品质。此外, SO_2 能降低鲜食葡萄的呼吸强度,从而延缓果实衰老,延长贮藏时间^[32]。对于鲜食葡萄来说,可溶性固形物和可滴定酸等都是其感官评价的重要指标, SO_2 能减少葡萄贮藏期间果实中可溶性固形物、有机酸和维生素 C 等营养物质的流失,维持果肉汁液的 pH,较好地保持葡萄的原有风味^[32]。

果实的品质很大程度上取决于它的质地,包括硬度、弹性、凝聚性、回复性和咀嚼性等,果肉的质地不仅直接影响口感品质,也会影响果品的储运特性和货架期^[33]。 SO_2 能够很好的维持葡萄的硬度、胶黏性和咀嚼性,李杰等^[31]通过使用 3 000 $\mu\text{L/L}$ SO_2 、10 min 的熏蒸技术,成功地改善了木纳格葡萄的硬度、胶黏性以及口感,结果表明经过 SO_2 处理的果实硬度都比未处理组大,且硬度下降速度也比未处理组小,在贮藏至 40 d 后, SO_2 处理组果实的硬度比未处理组高 18.60%;贮藏至 90 d 时, SO_2 处理组葡萄果肉的胶黏性比贮藏初期降低了 18.10%,而未处理组降低了 28.20%。这一发现有助于保护葡萄的新鲜度,维持果实的采后品质,并且可以延长鲜食葡萄的货架期。

1.3 SO_2 维持鲜食葡萄采后生理代谢平衡

鲜食葡萄经过 SO_2 处理,自身会发生一系列生理反应来适应 SO_2 胁迫^[34]。 SO_2 会增强鲜食葡萄在贮藏期间的硫转化和硫还原途径,促进活性氧 (Reactive Oxygen Species, ROS) 的氧化应答,并且促进超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 和过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 等多个酶的生成^[35]。鲜食葡萄在采后 ROS 清除能力下降,使得 ROS 在果实内大量积累,进一步导致细胞膜脂过氧化,破坏了膜系统,引起一系列的生理生化反应,进一步加快果实的衰老和变质^[36]。然而, SO_2 处理能够使葡萄果实中 POD、SOD 和 CAT 的活性有所提升^[37], SOD 会促进 O^{2-} 发生歧化反应,产生过氧化氢 (Hydrogen Peroxide, H_2O_2), POD 和 CAT 则能将 H_2O_2 分解,生成无毒害的 H_2O 和 O_2 ,从而清除果实内的 H_2O_2 ^[28]。因此 SO_2 可以维持鲜食葡萄果实内 ROS 代谢平衡,保护细胞膜结构,维护细胞的稳定性,延缓果实衰老。

可见, SO_2 处理不仅能够提高葡萄果实的抗病性,抑制致病菌的侵染,还能够提高鲜食葡萄的质地和风味。因此, SO_2 作为鲜食葡萄采后处理的保鲜剂,具有重要的应用价值。 SO_2 在保鲜过程中的作用机制以及对葡萄果实的伤害成为目前的关注重点。

2 SO_2 的抑菌作用原理

SO_2 是一种有效的葡萄保鲜剂,能够杀死致病菌,阻止真菌的繁殖,从而达到防腐保鲜的目的。其作用原理为 SO_2 可以通过植物的气孔或皮孔扩散进入植物细胞,溶于水生成 SO_3^{2-} 和 HSO_3^{-} ^[38]。 SO_2 和 H_2SO_3 都能起到抑菌的作用,一方面, H_2SO_3 可以渗透至微生物的细胞内,改变其原生质的 pH 值,造成原生质与核酸分解,最终导致微生物死亡^[28]。另一方面,结合态 SO_2 会和微生物中的醛基发生加成反应,产生磺酸类物质,使微生物细胞液 pH 值降低,导致蛋白质的结构和功能的破坏,从而阻碍微生物的正常生命活动,抑制微生物的繁殖^[28]。

此外, H_2SO_3 具有还原性,被氧化时能消耗组织中的氧气,抑制好氧微生物的生命活动,以及降低某些微生物活动所需氧化酶的活性^[39]。而且在氧化反应过程中会有 ROS 生成^[40], ROS 作为细胞内

的信号分子调控防御基因的表达^[41]，但是过量的 ROS 具有高度活性和极强的氧化反应能力，会破坏脂质、蛋白质及核酸等生物大分子，对微生物细胞造成氧化损伤^[42]，从而抑制微生物的生命活动。可见，SO₂ 处理对致病微生物的生命和繁殖活动起着抑制作用，在鲜食葡萄贮藏过程中抑菌效果明显，具有重要的应用价值。

3 SO₂在鲜食葡萄中的吸收与积累

不同类型的植物吸收 SO₂ 的部位不同，例如蚕豆通过叶片、茎等部位吸收 SO₂^[43]，而葡萄与外界的气体交换通常是通过果柄、穗轴和果皮上的气孔和皮孔实现的如图 1。但是葡萄果粒的表面没有气孔，当它们受到机械损伤或者角质层出现裂缝，SO₂ 能够通过这些伤口和裂缝由果皮进入葡萄^[44]。而且，葡萄果皮只存在少量发育成被蜡封住的皮孔，并且皮孔木栓化程度较高，使得细胞难以透水、透气，所以 SO₂ 不容易进入葡萄的表皮^[28]。葡萄的果柄和穗轴与果皮不同，它们上边存在着大量不同形态的气孔，方便 SO₂ 的进入，是葡萄与外界进行气体交换的主要通道。

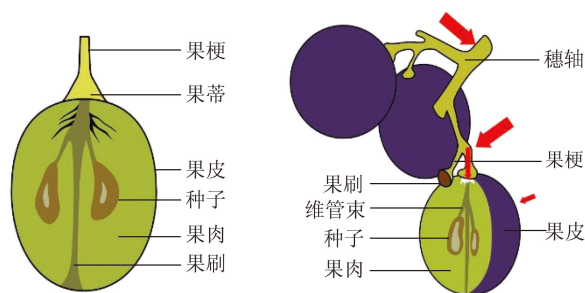


图 1 SO₂ 进入葡萄的途径

Fig.1 The pathway of SO₂ into grapes

不同品种的鲜食葡萄对 SO₂ 的积累量有所不同。Yuan 等^[16]研究无核白、木纳格、红地球和巨峰四种不同种类鲜食葡萄中 SO₂ 的积累量，结果表明用 1 200 μL/L 的 SO₂ 熏蒸 180 min 后，四种鲜食葡萄浆果中 SO₂ 的积累量分别为：无核白>木纳格>红地球>巨峰，说明不同品种的鲜食葡萄对 SO₂ 的吸收能力不同。此外，SO₂ 在葡萄各个部位的积累量也存在差异。Gao 等^[45]研究葡萄吸收 SO₂ 途径，用 4 包/kg 的剂量加入 CT₂ 片剂（成分为 SO₂）处理红地球葡萄，每隔 1 d 取样测定葡萄各部位 SO₂ 的积累量，结果表明积累量由高到低顺序为：果柄>穗轴>果刷>果皮>果肉。浆果中各

个部位 SO₂ 的积累趋势相同，均为随着贮藏时间的延长 SO₂ 积累量不断增加，但果柄中 SO₂ 的积累量始终显著高于穗轴和果肉中的积累量，说明果柄是鲜食葡萄中吸收和积累 SO₂ 的主要部位^[46]。

4 过量 SO₂ 对鲜食葡萄的伤害

在鲜食葡萄贮运过程中，SO₂ 虽然保鲜效果明显，但是由于不同品种的葡萄以及葡萄的不同部位对其敏感性不同，使得 SO₂ 保鲜剂在使用过程中释放条件难以精确控制，容易发生 SO₂ 过量的情况。这会对鲜食葡萄产生药害作用，常见的症状有果实漂白、落粒、裂果、风味劣变以及化学试剂残留^[47]，严重影响葡萄的贮藏品质。

4.1 过量 SO₂ 造成鲜食葡萄的漂白伤害

花色苷是葡萄果实主要的呈色物质，均匀溶解在表皮细胞的空泡溶液中^[48]。对于鲜食葡萄而言，果皮颜色会影响果实的品质^[49]，而果皮的颜色取决于果皮中花色苷的数量和组成种类^[50,51]。果皮漂白的主要原因是果皮中花色苷结构发生改变而失去颜色，这种反应是不可逆的^[46]。高浓度的 SO₂ 处理会抑制花色苷的合成以及促进葡萄果皮花色苷的降解，导致果皮漂白^[52]。对于花色苷合成而言，4-香豆酸 CoA 连接酶（4-Coumarate : CoA Ligase, 4CL）能够促进肉桂酸辅酶 A 酯的生成，这种物质能够作为花色苷的前体物质^[53]，从而促进花色苷的形成。张磊等^[52] 2018 年研究发现，红地球葡萄经过 2 h 的 100 和 500 μL/L 的 SO₂ 熏蒸处理后，对照组和 100 μL/L SO₂ 处理组的 4CL 活性均呈上升趋势，而 500 μL/L SO₂ 处理组 4CL 的活性在贮藏后期 60~100 d 时呈现下降趋势，且显著低于对照组和 100 μL/L SO₂ 处理组。说明高浓度的 SO₂ 对花色苷的合成有一定的抑制作用，从而减少花色苷的数量，影响葡萄果皮呈色。不同品种的葡萄花色苷总量不同^[54]，袁宇尧等选择红地球和巨峰两种葡萄分别进行适量以及过量 SO₂ 熏蒸处理，结果发现在这两种鲜食葡萄中总花色苷的含量随着 SO₂ 熏蒸量和熏蒸时间的增加而逐渐减少，与对照相比适量处理组降低了 13.09%，而过量处理组降低了 36.97%^[16]。这说明过量 SO₂ 会加快花色苷的降解，从而使果皮褪色发生漂白现象，这严重影响了鲜食葡萄的外观品质，降低了葡萄的商业价值。

4.2 过量SO₂造成鲜食葡萄大量落粒

葡萄落粒是降低鲜食葡萄采后经济价值的主要原因,正常情况下,SO₂可以在一定程度上减少葡萄的脱落,但过量的SO₂反而会引起葡萄果粒的大量脱落^[42],从而给鲜食葡萄采后贮运过程带来巨大损失。杨盛迪等^[55]使用CT-2保鲜剂处理巨峰葡萄,发现在贮藏过程中高浓度的SO₂处理会率先引起落粒,并且落粒率显著高于未处理组,在第6天时,SO₂处理组葡萄的脱落率达到38.25%,远高于未处理组的11.85%。SO₂引起葡萄落粒与糖代谢、细胞壁代谢、能量代谢以及激素信号传导途径密切相关^[55]。Chen等^[56]研究发现用CT-2葡萄保鲜剂处理巨峰葡萄,过量SO₂使葡萄离区的多聚半乳糖醛酸酶和果胶甲酯酶等细胞壁降解酶活性增加,中胶层逐渐降解,离层初生壁松动,导致贮藏期间葡萄果粒迅速脱落。植物激素对器官脱落的调节通常会发挥协同效应^[57],用三张葡萄保鲜纸(主要成分为SO₂)处理5kg无核白葡萄,会使脱落酸含量和乙烯释放量显著增加,同时加速葡萄果粒的脱落^[58]。此外糖代谢途径也可能会影响葡萄果粒的脱落,尽管糖代谢相关研究在葡萄落粒中较少,但Yi等^[59]研究发现,一些糖代谢相关基因UDPG、UGE的表达可以修饰细胞壁的结构和功能,对抑制荔枝落果具有重要作用。

4.3 过量SO₂影响鲜食葡萄的贮藏风味

葡萄的香气和口感对于它作为鲜食水果这一属性来说至关重要,其中酯类、醇类、醛类以及萜烯类化合物是其典型的风味物质,它们不仅决定了葡萄的口感,还能作为葡萄品质评估的重要参考^[60]。随着贮藏时间的延长,葡萄中挥发性风味物质的种类和数量不断变化^[61],采后的保鲜处理方式会对其变化产生较大影响^[62]。姜沛宏等^[63]用气相色谱-离子迁移谱(Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy, GC-IMS)分析藤稔葡萄经过SO₂缓释包熏蒸处理后香气成分的变化,发现SO₂处理的葡萄风味物质含量都会降低,并且葡萄在第14天与第42天会产生3-己烯醇等衍生风味物质,导致葡萄产生异味。说明在葡萄的贮藏后期,SO₂处理并不能很好的保留葡萄的原有风味。

葡萄采后贮藏过程中,不同浓度的SO₂处理对不同品种葡萄的挥发性化合物影响也不同。袁宇尧^[46]用气相色谱-质谱联用(Gas Chromatography-

Mass Spectrometer, GC-MS)分析适量和过量SO₂熏蒸处理巨峰葡萄挥发性香气成分的变化,结果表明SO₂熏蒸处理对巨峰葡萄中酯类物质影响最大,在整个贮藏过程中酯类物质含量逐渐下降,其中2-己烯酸乙酯、3-己烯酸乙酯和6-庚烯酸乙酯在贮藏14d后均未被检测到;在贮藏后期(28d),过量处理组中酯类物质的总含量显著低于对照组和适量处理组,酯类物质的种类也少于适量处理组,说明过量SO₂会加快挥发性化合物的减少,影响葡萄中各种香气成分的比例,从而降低鲜食葡萄的食用品质和风味。

5 结语与展望

目前SO₂是鲜食葡萄采后贮运过程中最常用的保鲜剂,它不仅可以抑制病原菌的生命和繁殖活动,延缓葡萄腐烂,延长货架期,还可以更好的维持鲜食葡萄采后的品质和风味,应用前景广阔。但是SO₂处理也会存在一些问题,例如不同葡萄品种对SO₂耐受性不同,SO₂的使用量难以精确把控,过量的SO₂不仅会破坏葡萄特有的风味,还会导致葡萄果实发生漂白、落粒和风味劣变等降低商品价值的变化,如何有效地解决这一问题成为目前的研究热点。根据目前国内外的研究应用现状,在今后可以从以下几个方面进行研究和探索:(1)设计开发可以根据贮藏环境中的SO₂浓度来调节SO₂释放速度的装置,稳定环境中的SO₂浓度,防止SO₂过量对果实造成伤害。(2)加强SO₂与可食性包膜技术协同效应的研究,确定最佳处理和贮藏工艺参数,在发挥其保鲜作用的同时减少SO₂伤害。(3)从分子水平探究SO₂对各类鲜食葡萄的保鲜作用机制。总之,要通过进一步的研究不断地放大SO₂在鲜食葡萄采后保鲜中的价值。

参考文献

- [1] 王阳,佟伟,张文江,等.植物提取物在葡萄保鲜中的应用研究进展[J].保鲜与加工,2022,22(4):116-120.
- [2] 王洋洋.聚乳酸呼吸包装膜对巨峰葡萄花色苷的保护及葡萄保鲜效果的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
- [3] AGUIAR A C, HIGUCHI M T, RIBEIRO L T, et al. Bio-based and SO₂-generating plastic liners to extend the shelf life of 'Benitaka' table grapes [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 197(11): 112-217.
- [4] 田淑芬,苏宏,聂松青.2018年中国鲜食葡萄生产及市场形

- 势分析[J].中外葡萄与葡萄酒,2019,2: 95-98.
- [5] 卢丽丽.果梗保鲜影响鲜食葡萄贮藏品质研究进展[J].现代食品,2022,28(13):40-43.
- [6] 王泽彬,集贤,兰义宾,等.1-甲基环丙烯在葡萄采后贮藏中的应用及研究进展[J].中外葡萄与葡萄酒,2023,1:67-71.
- [7] WANG L, LUO Z, LI J, et al. Morphological and quality characterization of grape berry and rachis in response to postharvest 1-methylcyclopropene and elevated oxygen and carbon dioxide atmospheres [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 153: 107-117.
- [8] 田竹希,龙明秀,李咏富,等.1-甲基环丙烯结合60Co- γ 辐照处理对水晶葡萄保鲜效果的影响[J].食品安全质量检测学报,2021,12(23):9124-9131.
- [9] 雷超,吴明松,魏雪宁,等.二氧化氯对巨峰葡萄的保鲜效果及品质影响[J].江苏农业科学,2020,48(1): 184-188.
- [10] 张冲,陈昊,张鹤洋,等.乙醇处理对鲜食葡萄“玫瑰香”采后贮藏品质的影响[J].吉林农业大学学报,2019,41(6): 676-680.
- [11] CHEN Y, LI Z, ETTOU MI FE, et al. The detoxification of cellular sulfite in table grape under SO₂ exposure: Quantitative evidence of sulfur absorption and assimilation patterns [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 408: 135-188.
- [12] 吴忠红,马晓芬,张婷,等.二氧化硫保鲜纸对无核白葡萄果实采后品质的影响[J].新疆农业科学,2014,51(8):1512-1518.
- [13] CHEN R C, WU P W, CAO D Y, et al. Edible coatings inhibit the postharvest berry abscission of table grapes caused by sulfur dioxide during storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 152: 1-8.
- [14] CHRISTIAN C, PASCALE W, GHISLAINE M. Ethanol vapours limit Botrytis development over the postharvest life of table grapes [J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 36(3): 2005.
- [15] CONSIDINE M J, FOYER C H. Metabolic responses to sulfur dioxide in grapevine (*Vitis vinifera* L.): photosynthetic tissues and berries [J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 1-10.
- [16] YUAN Y Y, WEI J, XING S J, et al. Sulfur dioxide (SO₂) accumulation in postharvest grape: The role of pedicels of four different varieties [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 190: 111-119.
- [17] YOUSSEF K, JUNIOR O J, MUHLBEIER D T, et al. Sulphur dioxide pads can reduce gray mold while maintaining the quality of clamshell-packaged ‘brsnubia’ seeded table grapes grown under protected cultivation [J]. Horticulturae, 2020, 6(2): 20.
- [18] 薛美昭,仪慧兰.果实抗病防御应答参与SO₂对‘红提’葡萄的采后保鲜[J].应用与环境生物学报,2017,23(5):806-810.
- [19] 刘丽青,仪慧兰.SO₂处理激活龙眼葡萄果实采后防御应答[J].食品科学,2015,36 (18):209-212.
- [20] 刘丽青,王燕楠,仪慧兰,等.二氧化硫对玫瑰香葡萄果实采后保鲜的机理[J].应用与环境生物学报,2016,22 (2): 338-341.
- [21] SANGEETHA S, SARADA D. Phenyl derivative of pyranocoumarin precludes fusarium oxysporum f.sp. lycopersici infection in lycopersicon esculentum via induction of enzymes of the phenylpropanoid pathway [J]. Appl Biochem Biotechnol, 2015, 175: 1168-1180.
- [22] XUE M, YI H. Induction of disease resistance providing new insight into sulfur dioxide preservation in *Vitis vinifera* L [J]. Scientia Horticulturae, 2017, 225: 567-573.
- [23] 李合生.现代植物生理学 [M].北京:高等教育出版社,2012.
- [24] 燕红.木质素降解菌的降解机制及其应用[M].北京:化学工业出版社,2019.
- [25] SATTLER S E, FUNNELL-HARRIS D L. Modifying lignin to improve bioenergy feedstocks: strengthening the barrier against pathogens? [J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 4: 70.
- [26] 陈媛媛.青梅中两种形态多酚氧化酶的分离纯化、酶学性质及抑制作用研究[D].成都:西华大学,2022.
- [27] ZHANG Z, WEI J, WANG M, et al. Induced sulfur metabolism by sulfur dioxide maintains postharvest quality of ‘Thompson Seedless’ grape through increasing sulfite content [J]. Sci Food Agric, 2022, 102: 1174-1184.
- [28] 王凤超.二氧化硫处理对鲜食葡萄贮藏病害及生理的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.
- [29] 许惠金兰,吴培文,陈仁驰,等.贮藏温度对巨峰葡萄采后生理和贮藏品质的影响[J].食品研究与开发,2018, 39(21):192-197.
- [30] 吴敏,杜鹃,王曼,等.一氧化氮对无核白葡萄果梗贮藏品质和微观结构的影响[J].食品工业科技,2022,43(21):350-359.
- [31] 李杰,魏佳,张政,等.二氧化硫(SO₂)熏蒸改善木纳格葡萄的采后品质[J].现代食品科技,2020,36(2):114-121,151.
- [32] ZHANG Z Q, LIU T, XU Y, et al. Sodium pyrosulfite inhibits the pathogenicity of *Botrytis cinerea* by interfering with antioxidant system and sulfur metabolism pathway [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 189: 28-36.
- [33] 张雯,马依努尔·加马力,王敏,等.不同葡萄品种果肉质地和细胞结构及生理指标分析[J].西北植物学报,2022, 42(11):1870-1879.
- [34] 薛美昭.SO₂对植物microRNA转录的影响及葡萄采后保鲜作用研究[D].太原:山西大学,2018.
- [35] GIRAUD E, IVANOVA A, GORDON CS, et al. Sulphur dioxide evokes a large scale reprogramming of the grape berry transcriptome associated with oxidative signalling and biotic defence responses [J]. Plant Cell Environ, 2012, 35: 405-417.

- [36] 余鹏,孟祥轩,余义,等.采前喷施胺鲜酯对采后‘巨峰’葡萄果实品质和活性氧代谢的影响[J].食品科学,2023,44(01):182-188.
- [37] 葛毅强,叶强,张维一.SO₂对采后葡萄某些生理生化特性的影响[J].植物生理学通讯,1998,34(3):185-187.
- [38] HANSCH R, MENDEL RR. Sulfite oxidation in plant peroxisomes [J]. Photosynth Res, 2005, 86: 337-343.
- [39] KOZLOWSKI T L. Postharvest decay control of grapes by using sodium metabisulfite in cartons enclosed in plastic bags [J]. Am J Enol Vitic, 1986, 37: 132-136.
- [40] 费小辉.黑穗醋栗(*Ribes nigrum* L.)二次萌芽的活性氧代谢特征及信号转导研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2020.
- [41] LI L, YI H. Differential expression of Arabidopsis defense-related genes in response to sulfur dioxide [J]. Chemosphere, 2012, 78: 718-724.
- [42] MITTLER R, VANDERAUWERA S, GOLLERY M, et al. Reactive oxygen gene network of plants [J]. Trends Plant Sci, 2004, 9: 490-498.
- [43] KLEIN H, JÄGER H-J, DOMES W, et al. Mechanisms contributing to differential sensitivities of plants to SO₂ [J]. Oecologia, 1978, 33(2): 203-208.
- [44] 张华云.葡萄采后保鲜技术及机理的研究[D].北京:中国农业大学,2002.
- [45] GAO H Y. Sensitivity of grape to SO₂ injury and absorption of SO₂ [J]. Science and Technology of Food Industry, 2006, 6: 156-159.
- [46] 袁宇尧.鲜食葡萄采后二氧化硫(SO₂)积累及其对花色苷降解和风味物质的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2022.
- [47] LOU T, HUANG W, WU X, et al. Monitoring, exposure and risk assessment of sulfur dioxide residues in fresh or dried fruits and vegetables in China [J]. Food Addit, 2017, 34: 918-927.
- [48] XIA S, QIONG Q Z, HUA P Z. Anthocyanins: from biosynthesis regulation to crop improvement [J]. Botany Letters, 2021, 44(7): 1-12.
- [49] JIN M K, LIAN S C, NGOH K G, et al. Analysis and biological activities of anthocyanins [J]. Phytochemistry, 2003, 64(5): 923-933.
- [50] 曹婷,刘艳艳,朱明,等.‘夏黑’葡萄花色苷定性检测及组成成分分析[J].中国农学通报,2019,35(20):138-142.
- [51] TORRES C D, DÍAZ-MAROTO M C, HERMOSÍN-GUTIÉRREZ I, et al. Effect of freeze-drying and oven-drying on volatiles and phenolics composition of grape skin [J]. Analytica Chimica Acta, 2010, 660(2): 177-182.
- [52] 张磊,许静,魏佳,等.二氧化硫(SO₂)熏蒸对葡萄果实结构和花色苷含量的影响[J].食品工业科技,2018,39(10):292-297.
- [53] 范丙友,胡诗宇,陆海,等.毛白杨4-香豆酸:辅酶A连接酶可溶性原核表达及活性检测[J].北京林业大学学报,2006,28(2):1-8.
- [54] 张岩,赵遵乐,邹琴艳,等.超声辅助提取酿酒葡萄皮渣花色苷工艺的优化及4个品种花色苷组分分析[J].中国食品添加剂,2022,33(3): 181-189.
- [55] 杨盛迪,孟祥轩,郭大龙,等.SO₂引起巨峰葡萄采后落粒的共表达网络和转录调控分析[J].中国农业科学,2022,55(11):2214-2226.
- [56] 宋雅慧,吴志蒙,余俊,等.葡萄贮藏过程中落粒调控研究进展[J].农业科技通讯,2021,4:4-6.
- [57] PATHARKAR O R, WALKER J C. Advances in abscission signaling [J]. Journal of Experimental Botany, 2017, 69(4): 733-740.
- [58] 葛毅强,陈颖.SO₂对葡萄采后呼吸强度及内源激素的影响[J].园艺学报,1997,24(2):17-21.
- [59] YI J W, WANG Y, MA X S, et al. LcERF2 modulates cell wall metabolism by directly targeting a UDP-glucose-4-epimerase gene to regulate pedicel development and fruit abscission of litchi [J]. The Plant Journal, 2021, 106(3): 801-816.
- [60] 朱丹实.葡萄采后软化机制及风味劣变的研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2014.
- [61] 张红,李洪山,申玉香.夏黑葡萄采后壳聚糖等多种保鲜剂处理对其保鲜效果的影响[J].食品科技,2017,42(9): 26-29.
- [62] FURDIKOVAK, MACHYNAKOVAA, DRTILOVAT, et al. Comparison of volatiles in noble-rotten and healthy grape berries of Tokaj [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 105: 37-47.
- [63] 姜沛宏,郭风军,陈东杰,等.不同保鲜处理对葡萄果实采后风味物质的影响[J].中国果菜,2021,41(11):7-12.