

硫化氢 (H₂S) 熏蒸对葡萄损伤接种黑曲霉的抑制及其采后品质的影响

张磊¹, 魏佳², 张政², 吴斌²

(1. 新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

(2. 新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所, 新疆乌鲁木齐 830091)

摘要: 为了探讨气体信号分子硫化氢 (H₂S) 间歇熏蒸处理对葡萄采后病害的控制及贮藏品质的影响, 本文以新疆无核白葡萄为试材, 采用 500 μL/L H₂S 气体对葡萄果实进行间歇熏蒸, 分析研究 H₂S 处理对果实病情指数、病斑直径、果实主要贮藏品质和相关防御酶活性的影响。结果表明: H₂S 熏蒸可显著降低损伤接种果实的病情指数, 抑制病斑直径的扩大; 降低了失重率、落粒率、腐烂率; 延缓果实硬度、可溶性固形物、可滴定酸和抗坏血酸含量的下降, 降低了叶绿素的分解速率, 维持了其含量。同时, H₂S 熏蒸处理能诱导果实体内过氧化物酶、多酚氧化酶、苯丙氨酸解氨酶等防御酶活性的增强。说明 H₂S 气体熏蒸方式在延缓葡萄果实采后衰老、腐烂和软化, 果实的采后抗病性和贮藏品质方面具有一定的应用前景。

关键词: H₂S 熏蒸; 葡萄; 诱导抗性; 损伤接种; 贮藏品质

文章编号: 1673-9078(2018)07-89-96

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.7.014

Effect of Gaseous H₂S Fumigation on *Aspergillusnige* Inhibition and Postharvest Quality of Table Grape

ZHANG Lei¹, WEI Jia², ZHANG Zheng², WU Bin²

(1. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)(2. Institute of Agro-Products Storage and Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract: The effects of intermittent fumigation with gaseous hydrogen sulfide (H₂S) on postharvest disease control and storage quality of the grape were studied. The table grape (*Vitis vinifera* L. cv Thompson Seedless) was fumigated intermittently by 500 μL/L H₂S. The effects of H₂S treatment on the disease index, lesion diameter, and fruit storage quality were analyzed. The disease-related enzymes were measured as well. The results showed that H₂S intermittent fumigation significantly reduced the disease index of inoculated fruits and inhibited the expansion of lesion diameter. The weight loss, drop rate, decay rate as well as the firmness were reduced by H₂S. The H₂S intermittent fumigation delayed the soluble solids (TSS), titratable acid (TA) and ascorbic acid. The H₂S treatment also decreased the rate of chlorophyll decomposition and maintained its content. The activities of defense enzymes, such as POD, PPO and PAL, were significantly enhanced by H₂S fumigation treatment. These results suggested that the senescence improvement and the disease-resistance enhancement of postharvest grapes may be attributed to the induction of H₂S. The H₂S intermittent fumigation showed special prospects in disease resistance and quality improvement of postharvest fruits.

Key words: H₂S fumigation; grape; induced resistance; wounded-inoculated; storage quality

无核白葡萄(*Vitis vinifera* L. cv Thompson Seedless)又名“无籽露”, 皮薄肉脆, 汁多味甜, 品质优良^[1]。但无核白葡萄不耐贮藏, 易受病原菌侵染而腐烂变质。

收稿日期: 2018-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31560473); 广州市科技计划项目 (201604020003)

作者简介: 张磊 (1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品贮藏与加工
通讯作者: 吴斌 (1973-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬采后分子生物学

黑曲霉引起的真菌病害是葡萄常见的采后病害, 黑曲霉为常温优势菌, 葡萄果穗部位的伤口处易被感染, 使健康葡萄组织褐色软腐, 感染部位先长出白色菌丝后变成黑色的成熟分生孢子^[2]。同时葡萄贮藏期间也易发生果实软化、果梗褐变、果粒脱落腐烂等现象, 导致葡萄品质的下降, 造成巨大经济损失^[3]。

硫化氢 (Hydrogen sulfide, H₂S) 是继一氧化氮 (NO) 和一氧化碳 (CO) 被发现之后的又一种新型气体信号分子^[4]。近年来, 越来越多的研究显示, H₂S

作为信号分子参与了植物体中的多种生理作用,如调节气孔运动、增强植物耐热性、延缓植物衰老、增强植物抗菌性等方面^[5-7]。但 H₂S 是否在果蔬的贮藏保鲜和病害预防中发挥着重要作用至今还不清楚。已有研究表明,采用 H₂S 供体 NaHS 处理甘薯能够抑制黑腐病和软腐病,并有效缓解了甘薯的衰老和腐烂^[8]。H₂S 还能够有效抑制梨黑曲霉和青霉的生长,且延长了梨的保质期,有效保持了果实的贮藏品质^[9]。Hu 等人^[10]证明 H₂S 延缓草莓衰老所需浓度是很低的,表明低浓度 H₂S 熏蒸水果是食用安全可行的。目前, H₂S 在果蔬贮藏保鲜中的研究主要以 NaHS 水溶液处理方式为主,这种一段式释放方式不易控制气体浓度和应用,如何精准控制 H₂S 熏蒸方式是果蔬保鲜方面应用研究的难点。

熏蒸技术是利用熏蒸剂杀死果皮表面病菌,从而降低果实发病率、延长贮藏期。H₂S 间歇熏蒸采用短时多次的熏蒸方式,可以降低高浓度气体对果实造成的伤害,也有利于气体浓度的精准调控。目前在果蔬保鲜贮藏方面已有相关应用。前期课题组发现 NO 间歇熏蒸处理木纳格葡萄,可延缓果实的衰老,维持贮藏品质^[11]。SO₂ 间歇熏蒸处理红地球葡萄,避免了高浓度 SO₂ 气体长时间处理对果实的伤害^[12]。因此,间歇熏蒸这种新型处理方式体现了它的优势性。

外源 H₂S 气体诱导处理对葡萄果实品质和贮藏特性影响的研究目前尚未见报道。为此,本文以新疆无核白葡萄果实为试材,研究了 H₂S 处理对其采后黑曲霉病害的控制及果实贮藏品质的影响。为 H₂S 处理在葡萄果实采后保鲜中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与菌种

黑曲霉 (*Aspergillus niger*) 新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所;无核白葡萄 (*Vitis vinifera* L. var Thompson Seedless), 于 2017 年 7 月采自吐鲁番,挑选大小均一、无机械损伤、无病虫害的葡萄果实,采后当日置于 (0±1) °C 实验室冷库中进行预冷处理,预冷时间 24 h 后待用。

1.2 试剂与仪器

硫化氢 (H₂S) 气体 (气体纯度为 99.99%), 广州世源气体有限公司; L-苯丙氨酸, 广州市江顺化工科技有限公司; 愈创木酚、Triton X-100, 天津市光复精细化工研究所; 三氯乙酸、聚乙烯吡咯烷酮、聚乙二醇 6000、邻苯二酚, 天津市致远化学试剂有限公司;

30%过氧化氢、抗坏血酸、酚酞, 天津市北联精细化学品开发有限公司; 乙二胺四乙酸、β-巯基乙醇、丙酮、氢氧化钠, 天津市福晨化学试剂厂; 以上试剂均为国产分析纯。

DELTA320 分析天平, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; SIM-F140ADL 制冰机, 日本松下电器; UV-2600 型分光光度计, 日本岛津; DW-86L626 80 °C 超低温冰箱, 青岛海尔特种电器有限公司; IKA[®] A11 基本型研磨机, 广州仪科实验室技术有限公司; GY-4 硬度计, 北京市兴光测色仪器公司; PAL-1 数显折射仪, 日本 Atago 公司; Centrifuge 5810 R 型高速冷冻离心机, 德国 Eppendorf 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 H₂S 熏蒸处理

预实验采用不同 H₂S 浓度 (50, 250, 500, 750, 1000 μL/L) 间歇熏蒸处理葡萄, 然后损伤接种黑曲霉, 发现 500 μL/L 的 H₂S 处理对黑曲霉病斑直径和果实病情指数的抑制效果最好, 筛选出 H₂S 对葡萄果实病害控制的适宜浓度为 500 μL/L。故此后续试验都采用该浓度, 将 18 kg 葡萄随机分成 6 份, 每份约重 0.5 kg, 置于 30 L 的熏蒸装置中, 密闭后将 H₂S 气体注入熏蒸装置中使其浓度为 500 μL/L, 同时将装置内的小风扇打开, 然后立即关闭进气孔密闭 3 h 后取出。从第 0 d 开始熏蒸, 每隔 24 h 在常温下熏蒸一次, 共熏蒸 5 次。每次熏蒸结束后立即取样, 共 6 次。另有 18 kg 葡萄未经处理为对照组, 将处理后的葡萄果实置于常温贮藏。

1.3.2 黑曲霉孢子悬浮液的配制

参考 Bi 等人^[13]方法进行修改, 将纯化好的黑曲霉接种到 PDA 培养基中, 于 25 °C 培养 7 d 后, 用无菌水将孢子洗下, 再用灭菌的双层纱布过滤, 最后用血球计数板在显微镜下计数, 并且调节浓度将菌悬液稀释至 1×10⁶ 个/mL, 4 °C 下保存备用。

1.3.3 果实损伤接种

熏蒸后的葡萄放置 24 h 后, 每盒选取 15 颗葡萄对其进行黑曲霉损伤接种, 先用 75% 的酒精溶液擦拭果实表面需要接种的位置, 然后在果实赤道部位用灭菌针刺尺寸深 2 mm、直径 2 mm 的孔, 用微量移液枪向孔中注入 15 μL 预先配制好的孢子悬浮液。接种结束后将葡萄果粒分装到塑料盒 (175×135×76 mm) 中, 每个盒子有 6 个直径 1 cm 的孔。盒内放置保鲜纸, 密闭后套上保鲜袋置于 25 °C 条件下贮藏 6 d (果实在第 6 d 腐烂严重, 故取样至第 5 d), 每 24 h 观察果粒的病情指数和病斑直径。同时避开果实病斑, 取健康果

肉样品，切碎混匀后用液氮速冻并置于-80℃保存待测。

1.3.4 果实病情指数和病斑直径测定

病情指数 (disease index, DI) 参照吴斌等^[14]的方法；病斑直径利用游标卡尺进行十字交叉法测定，每个病斑测量3次，计算平均值作为其测量值。

$$DI = \sum \frac{\text{相应级别病果的个数} \times \text{病情级数}}{\text{最高级数} \times \text{果实总个数}}$$

1.3.5 果实失重率、落粒率、腐烂率测定

采用称重法测定葡萄的质量失重率、落粒率、腐烂率，重复测定3次。计算公式如下：

$$\text{失重率} (\%) = \frac{\text{贮前质量} - \text{贮后质量}}{\text{贮前质量}} \times 100$$

$$\text{落粒率} (\%) = \frac{\text{落粒果质量}}{\text{总质量}} \times 100$$

$$\text{腐烂率} = \frac{\text{腐烂果质量}}{\text{总质量}} \times 100$$

1.3.6 果实硬度、可溶性固形物、可滴定酸、抗坏血酸含量的测定

葡萄果实的硬度测定采用 GY-4 型硬度计；可溶性固形物 (TSS) 含量测定采用 PAL-1 型数显折射仪测定；可滴定酸 (TA) 采用酸碱中和滴定法^[15]；抗坏血酸含量测定参照钼蓝比色法测定^[15]。各处理平行重复测定3次。

1.3.7 果实叶绿素含量的测定

采用丙酮提取法^[16]进行测定。

1.3.8 果实防御相关酶活性的测定

过氧化物酶 (POD) 和多酚氧化酶 (PPO) 活性的测定参考曹建康等^[15]的方法，苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 活性参照 Mei^[17] 等的方法，略有改动。

1.4 数据处理与分析

使用 Sigma Plot 12.0 软件作图，SPSS 19.5 进行数据方差分析并利用 Duncan 法进行均值比较。 $p < 0.05$ 表示差异显著， $p < 0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 H₂S处理对葡萄果实病情指数与病斑直径的影响

病情指数和病斑直径是影响葡萄果实贮藏期长短的主要因素，是判断果蔬保鲜效果的重要依据之一^[18]。如图1所示，葡萄果实在接种黑曲霉后2 d才开始发病，随着时间的延长，葡萄果实的病情指数呈不

断上升趋势，H₂S 处理能够延缓接种葡萄果实病斑面积的扩大，在 25℃ 条件下贮藏 6 d 后，H₂S 处理组果实病情指数为 0.88 (图 1a)，显著低于对照组的 0.92 ($p < 0.05$)。葡萄果实接种黑曲霉后，病斑直径随贮藏时间的推移逐渐增大。在整个贮藏期间，H₂S 处理组果实的病斑直径始终低于对照果实。H₂S 处理可显著抑制果实病斑的扩展，在 25℃ 条件下贮藏至第 3 d，H₂S 处理组和对照组葡萄果实的病斑直径分别为 10.8 mm 和 14.3 mm (图 1b)，H₂S 处理组果实的病斑直径比对照果实低了 24.5% ($p < 0.01$)。

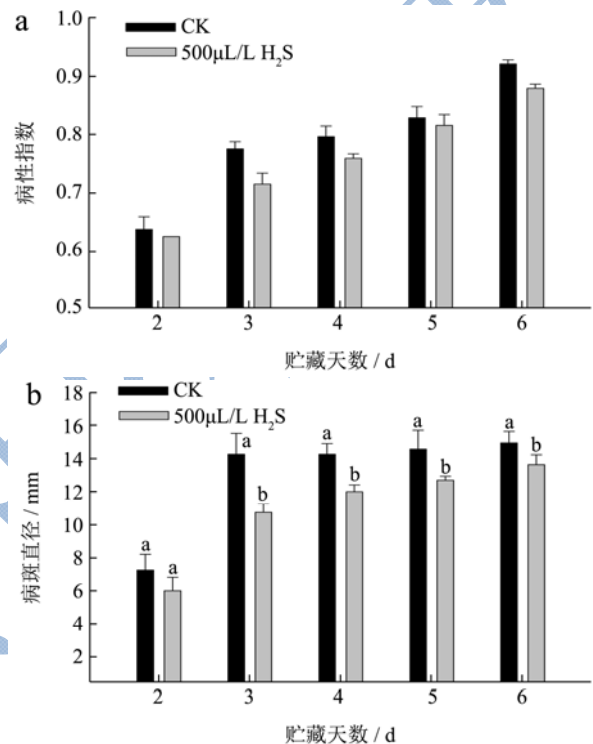


图1 H₂S处理对葡萄果实病情指数(a)和病斑直径(b)的影响

Fig.1 Effects of H₂S treatment on disease index (A) and lesion diameter (B) of grapes during storage

2.2 H₂S处理对葡萄果实失重率、落粒率、腐烂率的影响

蒸腾失水是导致果蔬贮藏期间失重的主要原因之一^[19]。葡萄贮藏过程中，随着时间的延长，果实营养物质损失和受霉菌侵染，造成葡萄果粒脱落和果实腐烂变质^[20]。

由表1可以看出，在整个贮藏期间，葡萄的失重率呈上升趋势，且H₂S处理组失重率始终低于对照组，贮藏至第5 d，对照组失重率为H₂S处理组的1.39倍 ($p < 0.01$)；葡萄的落粒率在整个贮藏期间呈上升趋势，且H₂S处理组落粒率显著低于对照组 ($p < 0.01$)；

在葡萄整个贮藏期间,其腐烂率总体来说呈现上升趋势,贮藏至第2 d,葡萄果实才开始腐烂,但对照组腐烂率显著高于H₂S处理组($p < 0.01$),但在贮藏至3~5

d,对照组和H₂S处理组的腐烂率差异不是很大($p > 0.05$)。这表明H₂S可以抑制葡萄质量损失率的上升,缓解葡萄果实的落粒,降低腐烂率。

表1 H₂S处理对葡萄果实失重率、落粒率和腐烂率的影响

Table 1 Effects of H₂S treatment on weight loss rate, drop rate and decay rate of grapes during storage

贮藏天数/d	失重率/%		落粒率/%		腐烂率/%	
	CK	H ₂ S	CK	H ₂ S	CK	H ₂ S
0	0	0	0	0	0	0
1	0.42±0.06 ^a	0.12±0.08 ^b	7.15±0.88 ^a	5.14±0.16 ^b	0	0
2	1.61±0.41 ^a	1.1±0.2 ^b	11.77±1.02 ^a	6.89±0.37 ^b	26.72±3.8 ^a	14.11±1.36 ^b
3	2.44±0.26 ^a	1.76±0.61 ^a	23.47±3.45 ^a	10.81±0.65 ^b	33.58±3.28 ^a	26.1±4.01 ^a
4	4.26±0.65 ^a	3.34±0.66 ^a	41.3±2.01 ^a	31.91±1.04 ^b	60.24±1.8 ^a	55.69±2.65 ^a
5	9.18±0.84 ^a	6.59±0.47 ^b	61.27±1.73 ^a	47.67±2.49 ^b	81.23±5.92 ^a	73.86±1.03 ^a

注:相同指标同一贮藏天数无相同字母表示差异显著($p < 0.05$)。

2.3 H₂S处理对葡萄果实硬度、TSS、TA、抗坏血酸含量的影响

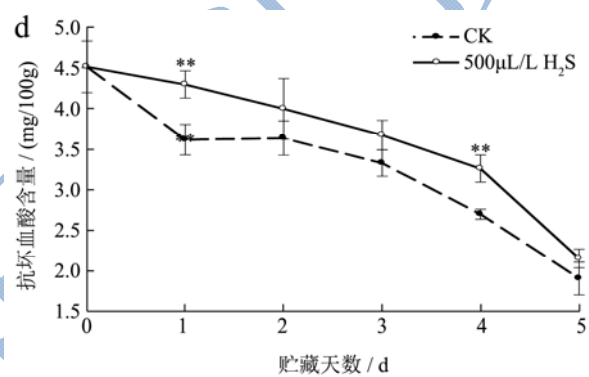
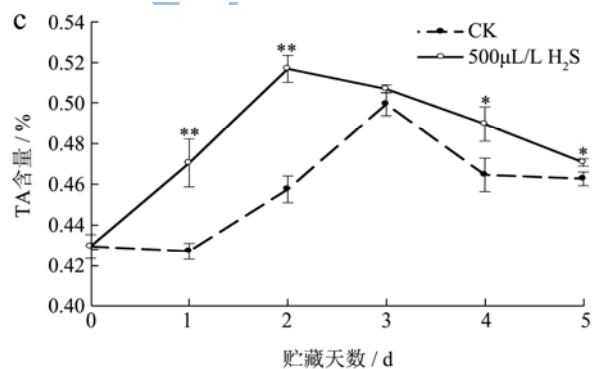
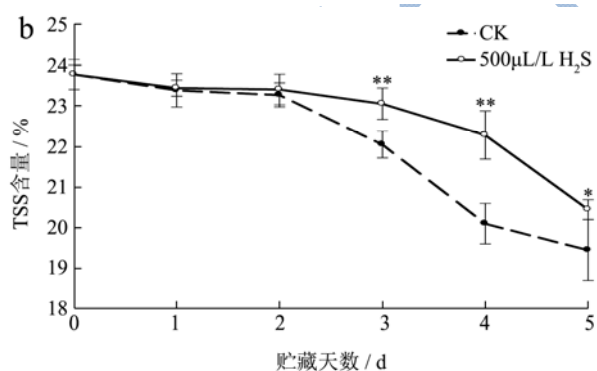
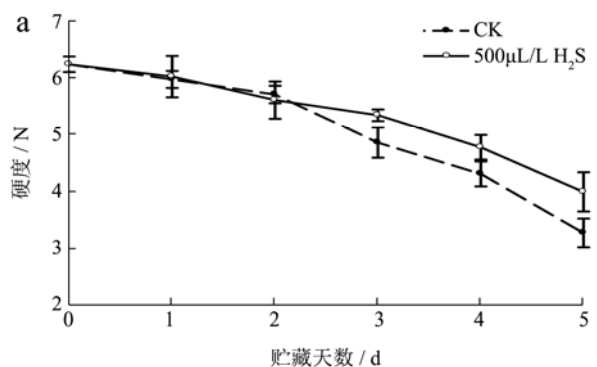


图2 H₂S处理对葡萄果实硬度(a)、可溶性固形物(b)、可滴定酸(c)和抗坏血酸(d)的影响

Fig.2 Effects of H₂S treatment on hardness (a), soluble solids (b), titratable acid (c) and ascorbic acid (d) of grapes during storage

果实硬度是葡萄采后耐贮性的重要品质之一,而软化的果实容易受机械损伤和病菌感染^[21]。由图2a可知,葡萄采后随着贮藏时间的延长逐渐软化,硬度迅速下降,H₂S处理组跟对照组葡萄的硬度在采后前2 d变化不大,从第3 d开始,对照组的葡萄的硬度显著低于H₂S处理组($p < 0.01$)。说明H₂S处理能够延缓葡萄果实的成熟软化。

果蔬样品中的可溶性固形物(TSS)主要是可溶性糖,其含量与果蔬的呼吸强度和品质状况相关^[22]。由图2b可知,葡萄果实中TSS含量随着贮藏时间的延长而逐渐降低,第1 d和第2 d,对照与H₂S处理组无显著差异($p > 0.05$),从第3 d开始,对照组TSS含量的下降速度明显高于H₂S处理组($p < 0.05$),说明H₂S能够较好的抑制TSS含量的下降。

可滴定酸(TA)作为果蔬呼吸底物会随着贮藏时间的延长被消耗,同时也是重要的呈味物质^[22]。如图2c所示,葡萄果实中的TA含量在贮藏期间整体呈先上升后下降的趋势。由于葡萄果实中的有机物被消耗

分解,使其 TA 含量短时间内增加, H₂S 处理组在第 2 d 达最大值。而处理组 TA 含量高峰推迟了 1 d, 但其含量依然低于 H₂S 处理组, 随贮藏时间的延长, 果实呼吸作用持续进行, 有机酸含量逐渐降低。在整个贮藏期间, 除了第 3 d 外, H₂S 处理组 TA 含量均显著高于对照组($p<0.05$)。结果表明, H₂S 能够较好的维持 TA 含量。

抗坏血酸含量与水果的品种、成熟度、耐贮性和贮藏条件有关, 是水果营养价值的重要组成部分^[23]。从图 2d 可以看出, 贮藏期间, 葡萄果实中的抗坏血酸含量呈下降趋势, 且 H₂S 处理组抗坏血酸含量始终高于对照组, 贮藏至第 1 d 和第 4 d, H₂S 处理组抗坏血酸含量分别是对照组的 1.19 和 1.21 倍($p<0.01$)。结果表明, H₂S 对葡萄抗坏血酸的损失起到较好的保护作用。

2.4 H₂S 处理对葡萄果实叶绿素含量的影响

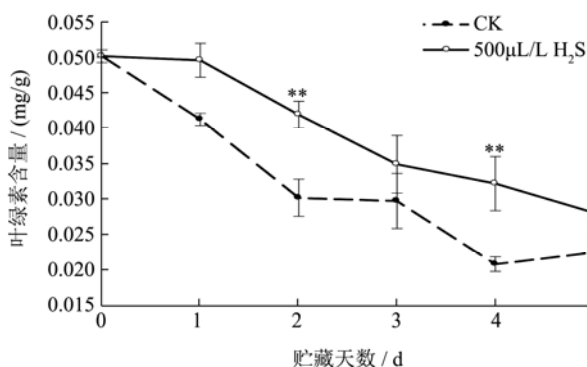


图 3 H₂S 处理对葡萄果实叶绿素的影响

Fig.3 Effects of H₂S treatment on chlorophyll of grapes during storage

叶绿素是与果蔬采后商品性状密切相关的重要色素之一^[24]。H₂S 处理对葡萄果实叶绿素含量的影响如图 3 所示, 贮藏期间, 葡萄果实中的叶绿素含量呈下降趋势, 且 H₂S 处理组叶绿素含量始终高于对照组, 在贮藏第 2 d 和第 4 d, H₂S 处理组叶绿素含量分别高于对照组 28.16% 和 35.4% ($p<0.01$)。说明 H₂S 能有效维持果实叶绿素含量。

2.5 H₂S 处理对葡萄果实防御相关酶活性的影响

过氧化物酶 (POD) 是植物体内重要的抗病防御相关酶, 在病害防御方面发挥着重要作用^[25]。图 4a 表明, 经接种黑曲霉后, POD 活性在整个病害观察期均呈先逐渐升高后下降的趋势, 接种后第 2 d, H₂S 处理组 POD 活性出现高峰后缓慢下降, 而对照组 POD

活性在第 3 d 出现高峰后快速下降, 尤其接种第 4 d 后, H₂S 处理组 POD 活性下降速率显著大于对照组 ($p<0.01$)。表明 H₂S 能够较好的抑制 POD 活性的下降。

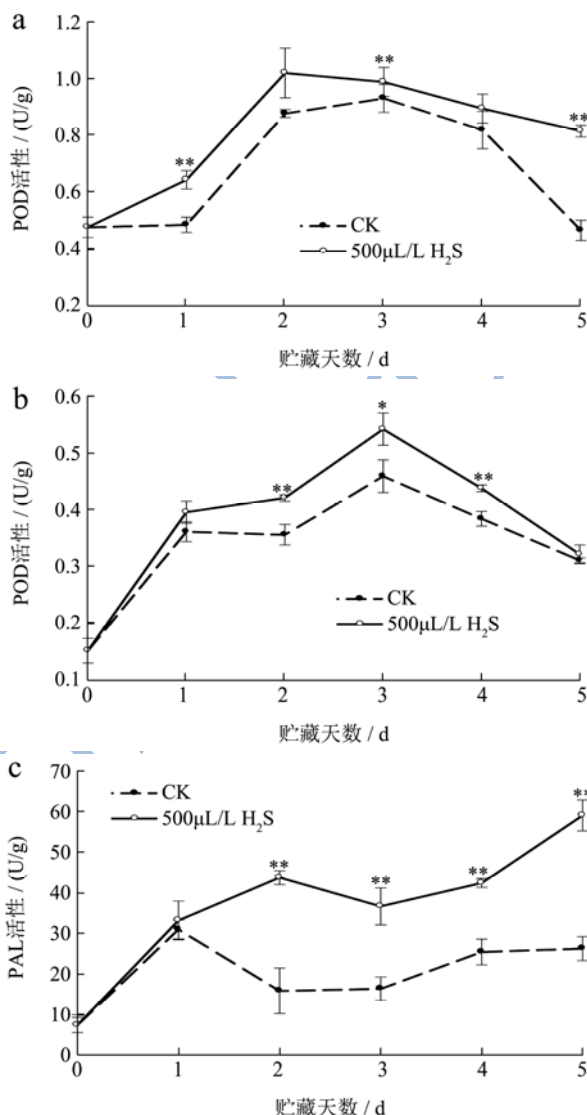


图 4 H₂S 处理对葡萄果实在贮藏期间 POD (a)、PPO (b) 和 PAL (c) 活性的影响

Fig.4 Effects of H₂S treatment on of POD (a), PPO (b) and PAL (c) activities of grapes during storage

多酚氧化酶 (PPO) 是一种能够催化酚类生成醌类的氧化酶, 当果蔬组织受到逆境胁迫或病原菌侵染时, PPO 会快速上升来保护果蔬组织^[26]。如图 4b 所示, 接菌后葡萄的 PPO 活性总体上呈先升高后降低的变化趋势。在第 3 d, 两者同时达到最大值, 此时 H₂S 处理组的 PPO 活性高出对照组 15.24% ($p<0.05$), 随后处理组与对照组的 PPO 活性均开始下降, 但处理组的 PPO 活性始终高于对照。说明 H₂S 处理可提高葡萄果实 PPO 的活性。

苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 是苯丙烷途径中的关键

酶和限制酶,其活性的高低直接与寄主的抗性强弱有密切的关联^[27]。由图 4c 可知, H₂S 处理组和对照组的 PAL 活性整体上都呈先上升后降低再上升的变化趋势。接种后第 1 d, 对照组便出现小峰, 而处理组 PAL 活性不断升高, 于第 2 d 出现峰值, 此时为对照 PAL 活性的 2.75 倍, 且差异性显著 ($p < 0.01$)。之后对照组 PAL 活性缓慢上升, 而对照组 PAL 活性先下降后快速上升。贮藏期间处理组 PAL 活性始终高于对照。H₂S 处理不仅增强了果实 PAL 活性, 并使其维持相对较高水平。

3 讨论

近年来, 研究发现 H₂S 作为一种新型气体信号分子, 可诱导采后果蔬产生抗病性。如 H₂S 对草莓灰霉病的主要致病菌包括酿酒酵母、黄绿青霉和梨形毛霉均有较强的抑制作用^[28]。H₂S 抑制了采后桃果实褐腐菌菌斑直径和果实病斑直径的扩展^[29]。本文中, H₂S 熏蒸能够有效控制常温条件下葡萄采后黑曲霉的生长, 显著降低了果实的病情指数, 抑制了病斑直径的扩展。这可能是由于 H₂S 直接诱导黑曲霉 ROS 产生以及过量的 ROS 导致氧化损伤对菌丝生长和孢子萌发起关键作用^[30]。

H₂S 处理的葡萄果实失重率、落粒率、腐烂率与对照组相比显著下降, 明显降低果实硬度、TSS、TA 和抗坏血酸含量下降的速度, 保持了果实叶绿素含量。从而延缓葡萄果实采后衰老速度, 延长其贮藏时间。H₂S 可作为果蔬保鲜剂, 明显延缓西兰花、莴笋、苹果、番茄、哈密瓜等鲜切果蔬的萎蔫失水、成熟、衰老和霉变, 维持采后果蔬的品质特性, 延长其贮藏期^[31]。采后 H₂S 处理可以抑制猕猴桃失重率、硬度、TSS、TA、抗坏血酸和叶绿素含量的下降, 延缓了猕猴桃成熟和衰老进程^[32]。H₂S 处理还能显著降低贮藏过程中桃果实腐烂率和失重率, 延缓 TSS 的升高和硬度的下降, 从而延缓果实的软化进程, 显著延长采后桃果实的货架期和贮藏期^[33]。这与本实验的研究结果相一致。

POD、PPO 活性的增强对于采后果实抗病性的增强具有重要作用。1-MCP 诱导红富士苹果抗病过程中, POD、PPO 活性显著升高^[25]。Tang 等^[8]研究发现 H₂S 处理甘薯显著提高 POD 的活性, 从而增强了甘薯的抗病性, 有效缓解了甘薯的衰老和腐烂。H₂S 处理还能增强采后鲜切梨 POD 活性, 阻止了黑曲霉和青霉病原菌的进一步生长^[35]。这与本试验结果一致, 在本研究中, 采后 H₂S 处理明显增强了葡萄果实 POD、PPO 防御酶的活性, 这可能是因为 H₂S 诱导了

木质素、植保素等抗性物质的形成, 增强酚类物质氧化能力, 生成对病原微生物有毒性作用的醌类物质^[34]。PAL 是苯丙烷代谢途径的关键酶和限速酶。马铃薯^[36]和甜瓜^[37]抗病性的增强都伴随着 PAL 活性的上升。本研究表明 H₂S 处理诱导了葡萄果实 PAL 活性的上升, 可能是 H₂S 可以诱导苯丙烷代谢系统, 激活抗病代谢产物的生成, 如酚类、类黄酮类、木质素和植保素等, 从而提高果实的抗病性^[34]。这与张畅^[29]在桃果实上的研究结果一致。但 H₂S 对病害控制的分子机理尚不清楚, 有待后续实验进一步研究。

4 结论

综上所述, H₂S 气体熏蒸处理显著降低了损伤接种黑曲霉无核白葡萄果实的病斑直径和病情指数, 明显诱导了果实体内 POD、PPO、PAL 等防御酶活性的增强。有效抑制了失重率、落粒率、腐烂率的上升, 显著降低了果实硬度、TSS、TA 和抗坏血酸含量下降的速度, 保持了果实叶绿素的含量。从而延缓葡萄果实采后衰老进程, 提高果实的采后抗病性和贮藏品质。由此表明, 500 μL/L H₂S 处理在一定程度上能够增强葡萄果实的抗病性, 还能提高葡萄果实的贮藏品质。

参考文献

- [1] 王宁, 邓冰, 李珍, 等. 低温贮藏结合 SO₂ 保鲜剂对无核白葡萄保鲜效果研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(6): 330-334, 345
WANG Ning, DENG Bing, LI Zhen, et al. Study on low temperature storage and SO₂ preservative on preservation of Thompson Seedless grape [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(6): 330-334, 345
- [2] 宋开艳. 葡萄采后病害病原菌致病特点及拮抗菌的筛选[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2011
SONG Kai-yan. Pathogenic characteristics and antagonistic microorganisms screening of postharvest disease of Grapes [D]. Alear: Tarim University, 2011
- [3] 龙清红, 高梵, 李晓安, 等. BABA 处理对葡萄果实采后灰霉病的影响及机理[J]. 食品科学, 2016, 37(14): 213-218
LONG Qing-hong, GAO Fan, LI Xiao-an, et al. Effect and mechanism of β-Aminobutyric acid on incidence of grey mold decay in postharvest grapes [J]. Food Science, 2016, 37(14): 213-218
- [4] ZHANG H, HU S-L, ZHANG Z-J, et al. Hydrogen sulfide acts as a regulator of flower senescence in plants [J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 60(3): 251-257
- [5] 郭鸿鸣, 肖天宇, 谢彦杰. 气体信号分子硫化氢在植物中的

- 生理功能及作用机制[J].中国生物化学与分子生物学报,2016,5:488-495
- GUO Hong-ming, XIAO Tian-yu, XIE Yan-jie. The physiological function and molecular mechanism of signaling molecule hydrogen sulfide in plants [J]. Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology, 2016, 5: 488-495
- [6] 闵雄,周志豪,李忠光.信号分子硫化氢的代谢及其在植物耐热性形成中的作用[J].植物生理学报,2016,1:37-46
- MIN Xiong, ZHOU Zhi-hao, LI Zhong-guang. Signal molecule hydrogen sulfide metabolism and its role in plant heat tolerance [J]. Acta Phyto Physica Sinica, 2016, 1: 37-46
- [7] 汪伟,张伟,朱丽琴,等.植物硫化氢生理效应及机制研究进展[J].中国农学通报,2013,31:78-82
- WANG Wei, ZHANG Wei, ZHU Li-qin, et al. Research advances of physiological effect and mechanism of hydrogen sulfide in plants [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 31: 78-82
- [8] TANG J, HU K-D, HU L-Y, et al. Hydrogen sulfide acts as a fungicide to alleviate senescence and decay in fresh-cut sweetpotato [J]. Hort Science, 2014, 49(7): 938-943
- [9] HU K D, QIAN W, HU L Y, et al. Hydrogen sulfide prolongs postharvest storage of fresh-cut pears (*Pyrus pyrifolia*) by alleviation of oxidative damage and inhibition of fungal growth [J]. Plos One, 2014, 9(1): e85524
- [10] HU L Y, HU S L, WU J, et al. Hydrogen sulfide prolongs postharvest shelf life of strawberry and plays an antioxidative role in fruits [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2012, 60(35): 8684
- [11] 张政,王倩,张辉,等.一氧化氮间歇熏蒸对木纳格葡萄活性氧代谢的影响[J].食品科学,2016,37(22):249-254
- ZHANG Zheng, WANG Qian, ZHANG Hui, et al. Effect of intermittent fumigation with nitric oxide on reactive oxygen species metabolism of 'Munage' Table grapes [J]. Food Science, 2016, 37(22): 249-254
- [12] 周江.二氧化硫(SO₂)间歇熏蒸对红地球葡萄采后品质的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2016
- ZHOU Jiang. Effects of Sulfur dioxide intermittent fumigation on postharvest quality of red globe grapes during storage [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016
- [13] BI Y, TIAN S, ZHAO J, et al. Harpin induces local and systemic resistance against *Trichothecium roseum* in harvested Hami melons [J]. Postharvest Biology & Technology, 2005, 38(2): 183-187
- [14] 吴斌.小分子气体对几种南方水果采后品质劣变的调控作用及其机理[D].广州:华南农业大学,2011
- WU Bin. Regulatory effect and mechanism of small molecule gases on postharvest quality of several southern fruits [D]. Guangzhou: Journal of South China Agricultural University, 2011
- [15] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007
- CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo, ZHAO Yu-mei. Fruit and vegetable postharvest physiological and biochemical experimental guidance [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007
- [16] 杨相政,李喜宏,马宏原,等.SO₂熏蒸处理对维多利亚葡萄保鲜效果研究[J].食品工业科技,2013,34(16):326-329
- YANG Xiang-zheng, LI Xi-hong, MA Hong-yuan, et al. Effect of different concentrations of SO₂ fumigation treatment on Victoria Grape [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(16): 326-329
- [17] 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
- [18] FU L H, HU K D, HU L Y, et al. An antifungal role of hydrogen sulfide on the postharvest pathogens *Aspergillus niger* and *Penicillium italicum* [J]. Plos One, 2014, 9(8): e104206
- [19] 张政,王倩,吴斌,等.一氧化氮间歇熏蒸对木纳格葡萄贮藏品质的影响[J].食品科技,2016,8:28-33
- ZHANG Zheng, WANG Qian, WU Bin, et al. Effect of nitric oxide intermittent fumigation on quality of 'Munage' table grapes during storage [J]. Food Science and Technology, 2016, 8: 28-33
- [20] 兰杰,李学文,杨婷婷,等.1-MCP结合ClO₂处理对无核白葡萄短期冷藏及货架期品质的影响[J].食品工业科技,2014,35(14):347-350
- LAN Jie, LI Xue-wen, YANG Ting-ting, et al. Effect of 1-MCP and ClO₂ treatments on quality of white seedless grape during short-term cold storage and shelf-life [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(14): 347-350
- [21] 喻讓,姜璐璐,王焕宇,等.UV-C处理对杨梅采后品质及苯丙烷类代谢的影响[J].食品科学,2015,12:255-259
- YU Xuan, JIANG Lu-lu, WANG Huan-yu, et al. Effects of UV-C Treatment on quality and phenylpropanoid metabolism of postharvest Chinese bayberry fruit [J]. Food Science, 2015, 12: 255-259
- [22] 王宁,邓冰,李珍,等.低温贮藏结合SO₂保鲜剂对无核白葡

- 萄保鲜效果研究[J].食品工业科技,2016,37(6):330-334,345
WANG Ning, DENG Bing, LI Zhen, et al. Study on low temperature storage and SO₂ preservative on preservation of Thompson Seedless grape [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(6): 330-334, 345
- [23] YANG B, JIANG Y, SHI J, et al. Extraction and pharmacological properties of bioactive compounds from longan (*Dimocarpus longan Lour.*) fruit - A review [J]. Food Research International, 2011, 44(7): 1837-1842
- [24] 杨晓棠,张昭其,庞学群.果蔬采后叶绿素降解与品质变化的关系[J].果树学报,2005,22(6):691-696
YANG Xiao-tang, ZHANG Zhao-qi, PANG Xue-qun. Effect of chlorophyll degradation on post-harvest quality of fruits and vegetables [J]. Journal of Fruit Science, 2005, 22(6): 691-696
- [25] 周晓婉,唐永萍,石亚莉,等.1-MCP 对低温贮藏苹果灰霉病抗性的诱导作用[J].食品科学,2016,37(12):254-260
ZHOU Xiao-wan, TANG Yong-ping, SHI Ya-li, et al. Mechanism of 1-MCP treatment in induced resistance to gray mold of apples during low-temperature storage [J]. Food Science, 2016, 37(12): 254-260
- [26] 李江阔,曹森,张鹏,等.1-MCP 采前处理对葡萄采后相关酶活性与品质的影响[J].食品科学,2014,35(22):270-275
LI Jiang-kuo, CAO Sen, ZHANG Peng, et al. Effects of preharvest 1-mcp treatments on postharvest quality and related enzyme activities of grapes [J]. Food Science, 2014, 35(22): 270-275
- [27] 李丽花,张瑞杰,姚远丽,等.24-表油菜素内酯调控苯丙烷代谢增强杏果实抗病性的研究[J].现代食品科技,2017,33(9):71-76
LI Li-hua, ZHANG Rui-jie, YAO Yuan-li, et al. 24-Epibrassinolide enhances disease resistance in apricot fruits via regulation of phenylpropanoid metabolism [J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(9): 71-76
- [28] 胡树立.H₂S 延缓采后草莓衰老及调控植物切花保鲜的信号机制[D].合肥:合肥工业大学,2012
HU Shu-li. Signaling mechanism of hydrogen sulfide delaying strawberry postharvest senescence and regulating cut flower refreshing in plant [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012
- [29] 张畅.硫化物对桃果实抗病性和成熟衰老的调控作用研究[D].泰安:山东农业大学,2016
ZHANG Chang. Regulation effect of sulfur-containing substances on disease resistance and ripening and senescence of peach fruit [D]. Tai'an: Shandong Agriculture University, 2016
- [30] LH F, KD H, LY H, et al. An Antifungal Role of hydrogen sulfide on the postharvest pathogens *Aspergillus niger* and *Penicillium italicum* [J]. Plos One, 2014, 9(8): e104206
- [31] 张华,吴俊,唐君,等.一种硫化氢供体硫氢化钠促进果蔬储藏保鲜的新用途:CN102550652A [P]. 2012
ZHANG Hua, WU Jun, TANG Jun, et al. A new hydrogen sulfide donor sodium hydrosulfide to promote the preservation of fruits and vegetables: CN102550652A [P]. 2012
- [32] SHEN Y, WEI W, WEI Z, et al. Hydrogen sulfide facilitating enhancement of antioxidant ability and maintenance of fruit quality of kiwifruits during low-temperature storage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(z1): 367-372
- [33] 汪伟,沈勇根,石晶莹,等.外源硫化氢对桃果实保鲜效果及活性氧代谢的影响[J].果树学报,2014,31(2):302-307
WANG Wei, SHEN Yong-gen, SHI Jing-ying, et al. Effects of exogenous H₂S on preservation of peaches and active oxygen metabolism [J]. Journal of Fruit Science, 2014, 31(2): 302-307
- [34] 黄晓杰,李婧,柴媛,等.MeJA 处理对蓝莓果实采后灰霉病的影响及机理[J].食品科学,2016,37(22):307-312
HUANG Xiao-jie, LI Jing, CHAI Yuan, et al. Effect and mechanism of methyl jasmonate on incidence of grey mould decay in postharvest blueberry [J]. Food Science, 2016, 37(22): 307-312
- [35] Hu K D, Wang Q, Hu L Y, et al. Hydrogen sulfide prolongs postharvest storage of fresh-cut pears (*Pyrus pyrifolia*) by alleviation of oxidative damage and inhibition of fungal growth [J]. Plos One, 2014, 9(1): e85524
- [36] YIN Y, LI Y C, BI Y, et al. Postharvest treatment with β -aminobutyric acid induces resistance against dry rot caused by *Fusarium sulphureum* in potato tuber [J]. Agricultural Sciences in China, 2010, 9(9): 1372-1380
- [37] 邓惠文,毕阳,葛永红,等.采后 BTH 处理及粉红单端孢 (*Trichothecium roseum*) 挑战接种对厚皮甜瓜果实苯丙烷代谢活性的诱导[J].食品工业科技,2013,34(1):323-326
DENG Hui-wen, BI Yang, GE Yong-hong, et al. Induction of phenylpropanoid metabolic activity in muskmelon fruit by postharvest BTH treatment and challenge inoculation with *Trichothecium roseum* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(1): 323-326