

蓝莓采后生理病理与保鲜技术的研究进展

姬亚茹^{1,3}, 胡文忠^{2,3*}, 廖嘉^{2,3}, 姜爱丽^{2,3}, 修志龙¹

1(大连理工大学 生物工程学院, 辽宁 大连, 116024) 2(大连民族大学 生命科学学院, 辽宁 大连, 116600)

3(生物技术与资源利用教育部重点实验室, 辽宁 大连, 116600)

摘 要 蓝莓鲜果酸甜可口, 风味独特, 富含花青素、Vc 等抗氧化成分, 营养价值和保健价值极高, 是消费者青睐的浆果之一。然而, 蓝莓果皮薄, 含水量高, 且采后蒂痕处极易受到微生物的侵染, 引起蓝莓腐烂, 极大地缩短蓝莓的货架期, 限制蓝莓产业的健康发展, 因此探寻高效安全的保鲜技术是目前蓝莓采后研究的热点问题。该文对蓝莓采后生理病理研究现状及目前国内外蓝莓保鲜技术进行综述, 关于采后蓝莓的衰老、微生物侵染机理及保鲜技术的调控机理等依然不清晰。今后应从细胞和分子水平上对蓝莓采后衰老发生机理进行深入研究, 这将为蓝莓采后病害防治、贮运保鲜技术研究提供一定的理论基础。

关键词 蓝莓; 采后生理; 采后病理; 贮运保鲜技术

蓝莓(*Vaccinium Spp*), 一种新兴浆果, 因其独特风味及极高的营养价值, 深受人们的喜爱。蓝莓果实富含花青素、Vc 和 V_E 及黄酮类等活性物质^[1], 蓝莓果实的抗氧化能力在目前已知果蔬中最高, 具有抗癌、抗衰老及改善视力等功效^[2], 其栽培面积及产量增长非常迅速^[3]。

1 蓝莓采后生理及病理

1.1 采后生理

1.1.1 呼吸代谢与乙烯

蓝莓在离开树体之前表现出典型的呼吸跃变行为^[4], 采后主要进行呼吸作用产生能量以维持果实生命状态, 但同时自身贮存的有机物质会被不断消耗, 加速蓝莓衰老。特别是蓝莓采摘于高温的夏季, 呼吸速率更强, 影响果实品质及贮藏性能。目前研究者在定义蓝莓的呼吸模式上仍存有争议, 但更多的证据认为蓝莓分属呼吸跃变型水果^[5]。蓝莓果实在晚熟阶段才开始大量积累糖, 因此蓝莓一般达到全蓝后再进行采摘^[6], 乙烯和呼吸高峰的出现也即发生在采摘之前, 且蓝莓在贮藏过程中的乙烯产生速率和呼吸速率是相近的, 所以, 通过调控乙烯生成来控制采后蓝莓贮藏品质及延长货架期的试验多以失败而告

终^[7]。乙烯在采后蓝莓成熟衰老中的作用仍有待进一步研究。WANG 等近期研究表明乙烯吸收剂可以改善蓝莓长期贮藏过程中的果实品质^[8]。应用乙烯合成抑制剂氨氧乙基乙烯基甘氨酸(AVG)或 1-甲基环丙烯(1-MCP)处理采后蓝莓, 可以降低乙烯合成量, 延缓蓝莓的成熟衰老^[9]。适量外源乙烯(1.0 mL/L 和 1 mL/L)处理蓝莓也能诱导果实抗病性, 提高抗病相关酶(苯丙氨酸解氨酶(PAL)、多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)等)的活性^[2]。

1.1.2 质地变化

采后软化是影响蓝莓贮运销售市场的一个主要问题, 是一个复杂的过程。蓝莓成熟过程中, 总水溶性果胶含量降低, 细胞壁和中间层降解是造成果肉硬度下降的主要原因。然而蓝莓一般在完熟之后被采摘, 所以由成熟诱导的软化在果实完熟后就终止了。硬度是表征采后蓝莓软化的主要特性, 不仅影响果实品质, 也影响其贮藏寿命、运输性和抗病性。蓝莓采后硬度的下降主要还与细胞壁降解、失水率^[10]以及表皮硬度有关。细胞壁降解主要与细胞壁的成分(水溶性果胶(WSP)、碱溶性果胶(SSP)、半纤维素及纤维素含量)变化及水解酶(果胶甲酯酶(PME)、纤维素酶(Cx)以及多聚半乳糖醛酸酶(PG))活性相关。1-MCP 减缓硬度的下降就是通过抑制细胞壁水解酶活性, 延缓半纤维素降解实现的^[11]。研究还发现, 蓝莓果实采后少量失水对于果实硬度的维持是有利的。MILLER 等研究不同高丛蓝莓和兔眼蓝莓硬度与失重率的变化, 发现当果实失重率 < 1% 时果实硬

第一作者: 博士研究生(胡文忠教授为通讯作者, E-mail: h wz@dlnu.edu.cn)。

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0400903); 国家自然科学基金(31471923, 31172009); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD38B05)

收稿日期: 2018-12-29, 改回日期: 2019-05-21

度提高,而失重率在4%~5%时伴随果实软化^[12]。

1.1.3 细胞衰老

蓝莓采收后,不再有母体营养物质和水分的供应,其生理生化及结构会发生改变,开始迈入衰老。果肉细胞酶活下降,代谢减弱。目前关于蓝莓衰老的研究多集中在生物大分子蛋白质等的合成和降解,但对其具体主导蓝莓衰老机制中的何种功能尚不清楚。细胞中的活性氧(ROS)介导蓝莓衰老的许多相关反应。当蓝莓采收后受到生物胁迫或非生物胁迫时,活性氧平衡被打破,核酸结构、蛋白质合成及膜脂均受到破坏。果实体内可通过酶促防御系统和非酶类自由基清除剂2种方式清除活性氧来延缓衰老、提高抗病性的。蓝莓富含的花青素、Vc等抗氧化物质和多种抗氧化酶,均可有效清除各类活性氧,且花色苷在蓝莓贮藏期间可不断积累和合成^[2]。

1.1.4 其他

蓝莓果粉在维持蓝莓采后品质方面也起着关键作用。蜡质层附着在蓝莓果皮上,降低蒸腾速率,减少失重。YANG等指出蓝莓果实在0℃贮藏期间,蜡质层损伤及出汗均加速其软化^[13]。蓝莓蜡质层能够抑制PME、PG、Cx酶活性,降低硬度损失速率^[14]。同时,蜡质层中的抑菌成分能够抑制微生物的侵染。然而,蓝莓采收贮运过程中蜡质层易受损,色泽变暗,影

响贮藏品质。所以在蓝莓采摘以及贮运的过程中要尽可能地减少果粉的破坏。

1.2 采后病理

微生物侵染也是限制采后鲜食蓝莓贮藏和物流过程中另一重要因素。贮藏后期,蓝莓衰老软化使得自身抗性减弱,潜伏在蓝莓表面或者环境中的病原菌作用致腐;机械伤口及蒂痕处也是微生物的侵染点。果实自身抗性机制涉及几丁质酶(Chitinase)、β-1,3-葡聚糖酶(Glucoamylase)、PAL和POD等抗病蛋白的活性。

各种真菌病原体可侵袭蓝莓果实,其中最常见的腐烂病害主要有由*Botrytis cinerea*引起的灰霉病,由*Alternaria* sp.引起的黑斑病和由*Colletotrichum acutatum*引起的炭疽病。不同地区的蓝莓贮藏期内易感染的病原菌种群组成存在差异,如表1所示。

*Botrytis cinerea*被认为是蓝莓最主要的致腐菌,通常在采收前通过花残体侵染蓝莓,采后随着自身抗性减弱,蒂痕或者机械伤口也是其主要侵染点。灰葡萄孢菌孢子萌发的适宜温度为15~25℃,可在极低温度(例如-2℃)下生长,这使得灰葡萄孢菌在冷藏条件下也能表达其症状^[23]。经灰葡萄孢菌侵害部位的蓝莓果皮初期呈现水浸状的灰白色,之后随着组织软腐,病部表面密生大量灰色菌丝体,富含分生孢子,且伴随轻微的水果萎蔫,风干后果实干瘪、僵硬^[24]。

表1 不同地区蓝莓贮运期间的主要致腐菌种类

Table 1 Species of rot fungus during blueberry storage and transportation in different regions

产区	主要病害菌	参考文献
北卡罗来纳州	链格孢菌(<i>Alternaria</i> sp.)	MILHOLLAND等 ^[15]
智利中部和南部	茎渍疡病菌(<i>Diaporthe australafricana</i>)	LATORRE等 ^[16]
智利蓝莓主产区	<i>Diaporthe</i> 属真菌	KARINA等 ^[17]
加利福尼亚州和华盛顿州	灰葡萄孢菌(<i>Botrytis cinerea</i>)	SAITO等 ^[18]
贵州地区	青霉菌(<i>Penicillium</i> sp.)、拟盘多毛孢(<i>Pestalotiopsis</i> sp.)和枝孢霉(<i>Acremonium</i> sp.)等	周笑犁等 ^[19]
云南地区	枝孢霉(<i>Acremonium</i> sp.)、链格孢菌(<i>Alternaria</i> sp.)和匍柄霉属(<i>Stemphylium</i> sp.)真菌	郭晓月等 ^[20]
辽南地区	灰葡萄孢菌(<i>Botrytis cinerea</i> Pers.)、链格孢菌(<i>Alternaria</i> sp.)、青霉菌(<i>Penicillium</i> sp.)和粉红单端孢菌(<i>Trichothecium roseum</i>)	戴启东等 ^[21]
大连地区	灰葡萄孢菌(<i>Botrytis cinerea</i> Pers.)	白雪等 ^[22]

Alternaria sp. 是多种水果和蔬菜的主要致腐真菌属之一,如柚子、草莓、葡萄、番茄、胡椒和洋葱,其中*Alternaria alternata* (Fr.) Keissler和*Alternaria tenuissima* (Kunze: Fr.) Wiltshire是引起蓝莓腐烂的主要菌种^[25],孢子萌发的最适宜温度为28℃左右,且能在-3℃的温度下保持生长,因此在冷链运输和冷藏过程中也能保持生长^[23]。链格孢菌丝能够直接穿透蓝莓表皮,在果实内部保持休眠状态,直到内部

抗真菌物质的浓度降低后发挥作用^[26]。有研究表明,链格孢菌属在蓝莓果实上存在采前潜伏侵染,通常受链格孢菌侵染的蓝莓果实与健康果实一起采收,从而在整个采后链(包括采摘、运输、包装和贮藏)中进行病害传播^[27]。经链格孢菌侵害部位的蓝莓果皮初期呈现塌陷的黑褐色斑点,之后在病部表面密生大量的白色菌丝^[24]。

Colletotrichum acutatum 是草莓等多种水果的主

要致腐真菌属之一^[28]。炭疽菌以孢子的形式在蓝莓发育的不同阶段侵染蓝莓,通常待蓝莓成熟或采摘后大量繁殖表现出症状^[29]。炭疽菌分生孢子的萌发和附着胞的形成需要较高的温度(即 20~27℃),受到侵染的蓝莓果实变软且发生凹陷,在果实的花萼端周围密生大量橙色分生孢子。然而,炭疽菌不能在 9℃ 以下生长,这限制了它们在冷藏条件下的生长^[23]。

2 蓝莓采后贮藏保鲜技术

2.1 物理防控技术

2.1.1 低温贮藏

温度是最影响蓝莓品质最重要的环境因素。低温冷藏,一方面通过抑制果实呼吸减少物质消耗,延缓衰老;另一方面也不利于微生物的生长繁殖,降低病害。蓝莓在高于 10℃ 的环境中不超过 12 h 就会有腐败迹象产生^[30]。于湿度适宜的环境中冷藏将减少鲜活农产品的水分流失产生较大膨压,减少萎蔫,延长贮藏期。研究表明,低温可使蓝莓果实的抗氧化活性提高^[31],抑制各种病菌生长,降低腐烂率。CHEN 等研究指出 5℃ 冷藏可使蓝莓 WSP 含量较低,SSP、半纤维素及纤维素含量升高,同时抑制细胞壁降解酶如 PG、Cx、 β -半乳糖苷酶和 α -甘露糖苷酶的活性,减缓果胶的溶解,从而有效维持蓝莓硬度,延缓软化^[32]。

冰温贮藏是指将蓝莓果实贮藏在冰点至 0℃ 以下的温度范围内,能更有效地降低呼吸速率,抑制微生物生长。有研究发现 -0.5℃ 冰温条件下贮藏蓝莓,减缓其总酚含量的下降,降低腐烂率,提升贮藏品质^[33]。于继男等研究发现蓝莓低温驯化后冰温贮藏可以保护蓝莓果实表面的果粉、延缓腐烂,说明逐步降温使得蓝莓有一个适应过程,免受突然的较低温度造成的冷害,延长贮藏期^[34]。

机械冷藏库是目前果蔬低温贮藏过程中经常采用的设备。但长时间冷藏也会使蓝莓果实产生伤害,如出库后货架期间果皮蜡质层严重脱落,发生红变;果蒂痕严重凹陷^[35]等,影响蓝莓果实的感官和贮运期。目前蓝莓保鲜的基础仍是低温贮藏,结合其他保鲜技术延长蓝莓保质期。

2.1.2 气调贮藏

气调贮藏即人为地降低贮藏环境中 O₂ 含量,提高 CO₂ 含量,能抑制果实呼吸,减少营养消耗,减少微生物侵染引起的病害。气调保鲜蓝莓的研究已有很多,在品质提升和贮藏期延长上都有显著效果。ALSMA-IRAT 等表明气调在采后蓝莓的腐败控制方面有显著

效果^[36]。姜爱丽等研究发现蓝莓耐受高浓度 CO₂ (99.9%),使得蓝莓在贮藏 50 d 内的品质都满足食用和售卖的要求^[2]。动态气调包装,即先于 5% O₂ 和 50% CO₂ 的气体环境中贮藏 4 d 后转入 5% O₂ 和 30% CO₂ 的气体环境中,能够有效控制蓝莓的衰老与腐败,延长贮藏期^[37]。SCHOTSANS 等研究表明将蓝莓置于气调环境(2.5 kPa O₂ + 15 kPa CO₂) 6 周,硬度下降速率及腐烂率均显著降低,且花青素含量及抗氧化能力提高^[38]。

2.1.3 高压静电场技术

孙贵宝采用高压静电处理蓝莓,显著提高了其贮藏保鲜度,降低呼吸强度、果实硬度等^[39]。低温等离子体(CP)是一种新兴的可以杀灭鲜活农产品表面微生物的非热杀菌技术。由高压放电、微波或其他能源诱导气体电离产生由离子、自由电子、自由基、紫外线和臭氧等其他活性物质组成的复杂混合物,能有效地杀死或灭活细菌、酵母和霉菌等有害微生物,而杀灭孢子和生物膜通常很困难^[40]。LACOMBE 等用等离子体技术处理蓝莓,结果表明等离子体处理后,新鲜蓝莓表面潜在好氧微生物的数量在整个贮藏期间持续下降,且蓝莓的品质与对照组相比也有所改善^[40]。王卓等也证实了低温等离子体在杀灭蓝莓表面微生物、延长贮藏期的同时可诱导蓝莓抗氧化酶活性的提高^[41]。

2.1.4 辐照处理

辐照处理能较好地杀灭致病菌而延缓果实的衰老,具有低温、杀菌彻底、无任何残留的优点。美国科学家研究指出蓝莓对辐照有明显高耐性,且能保持蓝莓在贮运过程中的果实品质^[42]。不同剂量⁶⁰Co- γ 射线辐照处理蓝莓果实,可不同程度地杀灭微生物,减少病害发生,使蓝莓贮藏期达到 60~70 d^[43]。周慧娟等利用电子束辐照能将蓝莓贮藏期达到 60 d 左右^[44]。UV-C 照射已由美国食品药品监督管理局(FDA)通过可以作为采后鲜食果蔬的一种处理技术,其操作简单,能减少蓝莓腐烂,改善品质,延长保鲜期^[45]。

2.2 化学保鲜技术

2.2.1 熏蒸处理

目前,熏蒸保鲜因无需直接接触果实,以气体的形式直接杀菌并渗透入果实内部调控生理代谢,对蓝莓蜡质层、形状、组织等几乎无影响,深受研究者的青睐。

1-MCP 作为一种乙烯受体抑制剂,对呼吸跃变型

水果保鲜效果特别明显,显著延长贮藏期。 $0.3 \mu\text{L/L}$ 1-MCP 可有效降低“晚蓝”蓝莓的失重率和腐烂率^[9]。GUSTAVO 等将 NO 和 1-MCP 结合处理蓝莓,不仅有效维持了蓝莓的硬度,还提高了 Vc 和 GSH 含量,延长蓝莓的贮藏期,提高营养品质^[46]。选择合理有效的 1-MCP 剂量,可达到不同的品质保鲜效果。

茉莉酸甲酯(MeJA)是植物自身调节各种生命活动的代谢物质。研究发现, $50 \mu\text{mol/L}$ MeJA 处理能诱导提高蓝莓贮藏期间自身组织的抗病性,抑制灰霉菌生长,降低发病率^[47]。 $0.1 \mu\text{mol/L}$ MeJA 通过激发蓝莓苯丙氨酸解氨酶、查尔酮合成酶及花青素合成酶基因的表达,显著提高酚类物质表儿茶素和花青素含量^[48]。

乙醇是植物自身的一种次级代谢物,对真菌、细菌等均有一定的抑制和杀死效应。而且,外源乙醇处理采后水果能增加果实中酚类和花色苷的积累、提高果实的抗氧化能力,同时减缓硬度的下降。黄晓杰等实验表明 $500 \mu\text{L/L}$ 乙醇室温下熏蒸处理能有效抑制蓝莓表面微生物的生长,减少腐烂,并能提高果实中总酚和总花色苷含量,提高蓝莓的总抗氧化能力^[49]。乙醇熏蒸用于草莓、葡萄和鸭梨等水果的保鲜处理都已取得明显效果,且已广泛应用,而在蓝莓贮藏保鲜上的研究较少,需进一步深入研究。

2.2.2 涂膜处理

可食性涂膜已被广泛用于浆果类的保鲜,即是通过增加果实内部 CO_2 含量,抑制果实呼吸,阻隔水蒸气流失,有效抑制微生物的生长,控制腐烂,从而延长贮藏期。多糖、蛋白质、脂质及其组合均可用作新鲜产品的涂膜材料。不同的涂膜对新鲜蓝莓采后品质有不同的影响。壳聚糖、海藻酸钠等常用果蔬涂膜剂。壳聚糖(β -(1 \rightarrow 4)-2-氨基-2-脱氧-D-葡聚糖)是甲壳素的衍生物,具有优良的成膜和抗菌功能,可显著抑制蓝莓主要致病菌灰葡萄孢菌的孢子萌发及菌丝的生长^[50]。壳聚糖与海藻酸钠复合涂膜可以提高蓝莓花青素、总酚含量及抗氧化能力,减缓硬度下降,延长贮藏期至 45 d^[51]。VIEIRO 等用壳聚糖、甘油、吐温 80 及芦荟提取物混合涂膜处理蓝莓也能显著抑制真菌生长,提高抗氧化能力,使蓝莓贮藏期延长 5 d^[52]。可用于开发、添加到涂膜中的功能性组分很多,仍需学者们不断努力。

2.2.3 化学药剂处理

化学药剂的使用主要是杀菌。将 ClO_2 喷洒于采后蓝莓表面,酵母菌及霉菌数量明显下降,降低腐烂

率^[53]。 SO_2 处理冷藏蓝莓使得灰霉病的发病率从 97.5% 降低至 6.1%,有效控制病害^[54]。然而,化学药剂会对蓝莓本身的安全性造成影响且会污染环境,所以一般多为辅助。

2.2.4 其他化学处理

ANGELETTI 等研究表明施用硫酸钙肥显著延缓了“奥尼尔”和“蓝丰”蓝莓果实的采后软化,降低采收期果实重量损失^[55]。LIATO 等用弱有机酸盐(醋酸钾、柠檬酸钾和乳酸钙)处理蓝莓 5 min,主要抑制了食源性致病菌(大肠杆菌 O157: H7、单增李斯特菌及致病真菌 *A. alternata*, *F. oxysporum* 和 *B. cinerea* 等)的生长,延长货架期^[56]。

2.3 生物保鲜技术

生物保鲜技术一般包括基因工程、生物拮抗以及天然植物提取物及保鲜剂三大类。而蓝莓采后生物保鲜主要集中在天然植物精油和生物拮抗两方面。

2.3.1 植物精油

植物精油,即油状液体,具有挥发性的植物自身次生代谢物,其中大部分由萜类和其他芳香族、脂肪族化合物组成,具有抗氧化和抗菌特性,已逐渐广泛应用于果蔬采后领域,蓝莓采后保鲜也不乏有研究^[57]。茴香脑、香芹酚、芳樟醇、紫苏醛、对伞花烃等植物精油可显著抑制贮藏于 10°C 下的北高丛蓝莓表面微生物的生长,控制采后腐烂,同时减缓花青素含量的下降,增强蓝莓抗氧化活性^[58]。适宜浓度的香芹酚精油可通过诱导蓝莓果实中 PAL、POD、PPO、CHT、GLU 等抗性酶的活性进而加强对病原真菌的抵抗能力,同时减缓蓝莓贮藏过程中硬度、可溶性固形物、可滴定酸含量的下降,提高贮藏品质^[24]。

2.3.2 生物拮抗

生物拮抗是利用微生物之间的拮抗作用,选择能够显著抑制病原菌生长且对寄主无危害的微生物以防控寄主病害的发生。秦仕维从蓝莓果实上分离出的 1 株葡萄有孢汉逊酵母(*Hanseniaspora uvarum*)对镰刀菌、互隔交链格孢霉、黑曲霉、毛壳菌、灰霉菌和青霉菌等病原菌都有显著抑制作用,抑制率为 59.88% ~ 89.34%,同时发现 *H. uvarum* 的挥发性代谢物也可抑制部分病原真菌菌丝的生长(如灰霉菌,64.29%)^[59]。哈茨木霉菌能够使得灰霉菌的菌丝断裂,通过缠绕、寄生在灰霉菌菌丝上,同时采前喷施木霉菌可以降低蓝莓呼吸、乙烯生成速率,延缓硬度和总抗氧化能力的下降,从而改善蓝莓贮藏及营养品质^[60]。

3 展望

随着人们对蓝莓营养价值的进一步认识,其种植面积及产量均迅速增长,采后贮运保鲜技术的研究无论是在蓝莓营养品质的保持还是经济价值的提升方面均显得尤为重要。目前虽然已经在物理处理(冷藏、气调、辐照处理等)、1-MCP、乙醇等熏蒸技术和壳聚糖等天然物质涂膜等蓝莓保鲜方面取得了成果,但这些多集中于保鲜效果的表面研究,而对于采后蓝莓的衰老、微生物侵染机理及保鲜技术的调控机理等依然不清楚。今后应从细胞和分子水平上对蓝莓采后衰老发生机理进行深入研究,将为蓝莓采后病害防治、贮藏保鲜技术研究提供一定的理论基础。同时应鼓励以物理保鲜为主,化学等其他贮藏技术辅助的保鲜方式,将更有利于降低贮运成本,提高保鲜效应。因此,探寻安全、无毒、便捷的保鲜技术将是蓝莓采后贮运市场一直研究的一个重点。

参 考 文 献

- [1] HOWARDL R, HAGER T J. Berry Fruit Phytochemicals [M]. Boca Raton: CRC Press, 2007: 410.
- [2] 姜爱丽. 蓝莓果实采后生理生化代谢及调控研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2011.
- [3] 李亚东. 2017 中国蓝莓产业年度报告[D]. 长春:吉林农业大学, 2017.
- [4] PANIAGUA A C, EAST A R, HINDMARSH J P, et al. Moisture loss is the major cause of firmness change during postharvest storage of blueberry [J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 79(1): 13 - 19.
- [5] EL-AGAMY S Z A, SHERMAN W B, LYRENE P M. Pollen incompatibility in blueberries (*Vaccinium* spp.) [J]. Journal of Palynology, 1982, 18: 103 - 112.
- [6] ZHENG Y, WANG C I, WANG S Y. Effect of high-oxygen atmospheres on blueberry phenolics, anthocyanins, and antioxidant capacity [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(24): 7 162 - 7 169.
- [7] BLAKER K M, OLMSTEAD J W. Effects of preharvest applications of 1-methylcyclo-propene on fruit firmness in southern highbush blueberry [J]. Acta Horticultrae, 2014, 1 017: 71 - 75.
- [8] WANG S, ZHOU Q, ZHOU X, et al. The effect of ethylene absorbent treatment on the softening of blueberry fruit [J]. Food Chemistry, 2018, 246: 286 - 294.
- [9] CHIABRANDO V, GIACALONE G. Shelf-life extension of highbush blueberry using 1-methylcyclopropene stored under air and controlled atmosphere [J]. Food Chemistry, 2011, 126(4): 1 812-1 816.
- [10] PANIAGUA A C, EAST A R, HINDMARSH J P, et al. Moisture loss is the major cause of firmness change during postharvest storage of blueberry [J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 79(1): 13 - 19.
- [11] DENG J, SHI Z J, LI X Z, et al. Effects of cold storage and 1-methylcyclo propene treatments on ripening and cell wall degrading in rabbiteye blueberry (*Vaccinium ashei*) fruit [J]. Food Science and Technology International, 2014, 20(4): 287 - 298.
- [12] MILLER W R, MCDONALD R E, CROCKER T E. Quality of two Florida blueberry cultivars after packaging and storage [J]. Hortscience, 1993, 28(2): 144 - 147.
- [13] YANG Y, CHEN S, CHU H J, et al. Epicuticular wax's effect on fruit softening of blueberry [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 14(2): 102 - 108.
- [14] 邵海燕, 杨帅, 陈杭君, 等. 蓝莓外表皮蜡质及其对果实软化的影响 [J]. 中国食品学报, 2014, 14(2): 102 - 108.
- [15] MILHOLLAND R D. A leaf spot disease of highbush blueberry caused by *Alternaria tenuissima* [J]. Phytopathology, 1973, 63(11): 1 395-1 397.
- [16] LATORRE B A, EL FAR K, ESPINOZA, et al. First report of *Diaporthe australafricana* associated with stem canker on blueberry in Chile [J]. Plant Disease, 2012, 96(5): 768.
- [17] EL FAR K, TORPES R, DIAZ GA, et al. Characterization of *Diaporthe australafricana* and *Diaporthe* spp. associated with stem canker of blueberry in Chile [J]. Plant disease, 2013, 97(8): 1 042 - 1 050.
- [18] SAITO S, MICHAILIDES T, XIAO C L. Fungicide resistance profiling in *Botrytis cinerea* populations from blueberries in California and Washington and their impact on control of gray mold [J]. Plant Disease, 2016, 100(10): 2 087 - 2 093.
- [19] 周笑犁, 王瑞, 雷零卿. 蓝莓采后病原真菌分离及其生物学鉴定 [J]. 食品科技, 2015, 40(9): 283 - 293.
- [20] 郭晓月, 丁雅迪, 邓佳. 蓝莓贮藏期病原真菌的分离与鉴定 [J]. 北方园艺, 2015(24): 104 - 108.
- [21] 戴启东, 李广旭, 杨华, 等. 蓝莓采后病害的病原鉴定及发生规律研究 [J]. 果树学报, 2016, 33(10): 1 299 - 1 306.
- [22] 白雪, 姜爱丽, 胡文忠, 等. 采后蓝莓果实表面病原菌的分离鉴定及 PCR 检测 [J]. 食品工业科技, 2015, 36(23): 297 - 300; 305.

- [23] SROMME, N. F. Role of controlled environments in suppression of postharvest diseases[J]. Canadian Journal of Plant Pathology, 1985, 7(3): 331–339.
- [24] 许晴晴. 香芹酚对蓝莓采后病害抑制和贮藏品质的影响研究[D]. 南京:南京农业大学, 2014.
- [25] BARKAI-GOLAN R. Postharvest Diseases of Fruits and Vegetables[M]. Amsterdam: Elsevier, 2001.
- [26] SNOWDON A L. A Colour Atlas of Post-Harvest Diseases and Disorders of Fruits and Vegetables: General Introduction and Fruits (Vol. 1)[M]. Barcelona: Wolfe Scientific Ltd, 1990.
- [27] CARUSO F, RAMSDELL D C. Compendium of Blueberry and Cranberry Diseases[M]. Saint Paul: APS Press, 1995.
- [28] EL-AKHAL M R, COLBY T, CANTORAL J M. Cantoral proteomic analysis of conidia germination in *Colletotrichum acutatum*[J]. Archives of Microbiology, 2013, 195(4): 227–246.
- [29] MILES T, WHARTON P, SCHILDER A. Cytological and chemical evidence for an active resistance response to infection by *Colletotrichum acutatum* in ‘Elliott’ blueberries[J]. Acta Horticulturae, 2009, 810: 361–368.
- [30] ANDRES CRISTOBAL PANIAGUA GONZALEZ. Influence of temperature management deficiencies during post-harvest on the quality of sea exported blueberries[D]. New Zealand: Massey University, Palmerston North, 2012.
- [31] 王芳, 刘华, 陈文荣, 等. 贮藏温度对蓝莓活性成分及抗氧化活性的影响[J]. 宁夏大学学报(自然版), 2011(2): 172–175.
- [32] CHEN H, CAO S, FANG X, et al. Changes in fruit firmness, cell wall composition and cell wall degrading enzymes in postharvest blueberries during storage[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 188: 44–48.
- [33] 唐坚, 乔勇进, 王凯晨, 等. 不同物理处理方式对蓝莓贮藏品质的影响[J]. 农产品加工, 2015(1): 43–46.
- [34] 于继男, 薛璐, 鲁晓翔, 等. 温度驯化对蓝莓冰温贮藏期间生理品质变化的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 265–269.
- [35] 周倩. 冷藏蓝莓果蒂凹陷的发生机理及控制技术研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2014.
- [36] ALSMAIRAT N, CONTRERAS C, HANCOCK J, et al. Use of combinations of commercially relevant O₂ and CO₂ partial pressures to evaluate the sensitivity of nine high-bush blueberry fruit cultivars to controlled atmospheres[J]. Hort Science, 2011, 46: 74–79.
- [37] 司琦, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 动态气调贮藏对蓝莓采后生理代谢品质的影响[J]. 包装工程, 2017, 38(17): 13–18.
- [38] SCHOTSANS W, MOLAN A, MACKEY B. Controlled atmosphere storage of rabbiteye blueberries enhances post-harvest quality aspects[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 44(3): 277–285.
- [39] 孙贵宝. 高压静电场长期贮藏保鲜蓝莓果的试验研究[J]. 农机化研究, 2003(1): 121–123.
- [40] LACOMBE A, NIEMIRA B A, GURTLE J B, et al. Atmospheric cold plasma inactivation of aerobic microorganisms on blueberries and effects on quality attributes[J]. Food Microbiology, 2015, 46: 479–484.
- [41] 王卓, 周丹丹, 彭菁, 等. 低温等离子体对蓝莓果实的杀菌效果及对其品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 110–107.
- [42] 禾本. 美国: 辐照处理不影响葡萄、蓝莓品质[J]. 中国果业信息, 2016, 33(2): 30.
- [43] WANG C, GAO Y, TAO Y, et al. γ -irradiation treatment decreased degradation of cell-wall polysaccharides in blueberry fruit during cold storage[J]. Postharvest Biology & Technology, 2017, 131: 31–38.
- [44] 周慧娟, 叶正文, 张学英, 等. 电子束辐照对蓝莓品质及生理代谢的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(9): 1308–1316.
- [45] 于刚. 纳米硒和 UV-C 处理对蓝莓品质及贮藏性的影响[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
- [46] GUSTAVO E G G, MATIAS L A, MARIA E S, et al. Combination of nitric oxide and 1-MCP on postharvest life of the blueberry (*Vaccinium* spp.) fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 133: 72–80.
- [47] 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.
- [48] COCETTA G, ROSSONI M, GARDANA C, et al. Methyl jasmonate affects phenolic metabolism and gene expression in blueberry (*Vaccinium corymbosum*) [J]. Physiologia Plantarum, 2015, 153(2): 269–283.
- [49] 黄晓杰, 冯叙桥, 赵宏侠, 等. 采后乙醇处理对蓝莓果实酚类物质含量及抗氧化能力的影响[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(3): 150–155.
- [50] JIANG H, SUN Z, JIA R, et al. Effect of chitosan as an antifungal and preservative agent on postharvest blueberry[J]. Journal of Food Quality, 2016, 39(5): 516–523.
- [51] CHIABRANDO V, GIACALONE G. Anthocyanins: Phenolics and antioxidant capacity after fresh storage of blueberry treated with edible coatings[J]. Interactional Journal of Food Science and Nutrition, 2015, 66(3): 248–253.

- [52] VIEIRO J M, FLORES-LOPEZ M L, DE RODRIGUEZ D J, et al. Effect of chitosan-*Aloe vera* coating on postharvest quality of blueberry (*Vaccinium corymbosum*) fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 116: 88 – 97.
- [53] CHUN H H, KANG J H, SONG K B. Effects of aqueous chlorine dioxide treatment and cold storage on microbial growth and quality of blueberries [J]. Applied Biological Chemistry, 2013, 56(3): 309-315.
- [54] CANTINA C M, GOULAS V, JIMENEZ M, et al. Sulfur dioxide fumigation alone or in combination with CO-enriched atmosphere extends the market life of highbush blueberry fruit [J]. Postharvest Biology & Technology, 2012, 67: 84 – 91.
- [55] ANGELETTI P, CASTAGNASSO H, MICELI E, et al. Effect of preharvest calcium applications on postharvest quality, softening and cell wall degradation of two blueberry (*Vaccinium corymbosum*) varieties [J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 58(2): 98 – 103.
- [56] LIATO V, HAMMAMI R, AÏDER M. Influence of electro-activated solutions of weak organic acid salts on microbial quality and overall appearance of blueberries during storage [J]. Food Microbiology, 2017, 64: 56 – 64.
- [57] DHARINI S, BAUTISTA-BANÑOS S. A review on the use of essential oils for postharvest decay control and maintenance of fruit quality during storage [J]. Crop Protection, 2014, 64: 27 – 37.
- [58] WANG C Y, WANG S Y, CHEN C. Increasing antioxidant activity and reducing decay of blueberries by essential oils [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(10): 3 587 – 3 592.
- [59] 秦士维. 蓝莓果实潜伏侵染病原真菌分离鉴定及生物防治研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [60] 曹森, 王瑞, 赵成飞, 等. 采前喷施哈茨木霉菌对采后蓝莓贮藏品质及生物活性的影响 [J]. 江苏农业学报, 2017, 33(2): 424 – 431.

Research progress on postharvest physiology and pathology of blueberry and preservation technology

JI Yaru^{1,3}, HU Wenzhong^{2,3*}, LIAO Jia^{2,3}, JIANG Aili^{2,3}, XIU Zhilong¹

1 (School of Bioengineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

2 (College of Life Science, Dalian Minzu University, Dalian 116600, China)

3 (Biotechnology and Bioresources Utilization, Ministry of Education, Dalian 116600, China)

ABSTRACT Blueberry, one of the berries favored by consumers, has unique flavor, and is rich in antioxidants such as anthocyanins and Vc, contributing extremely high nutritional and health care value. However, fresh blueberry, with thin peel and high water content, is highly susceptible to microbial infection at the stalk, which can cause blueberry decay, greatly shorten the shelf life of blueberry, and restrict the healthy development of blueberry industry. Therefore, it's a hot issue in the postharvest research of blueberry to explore an efficient and safe fresh – keeping technology. The research status of postharvest physiology and pathology of blueberry and its preservation technology at home and abroad were reviewed. It was found that the senescence mechanism, microbial infection mechanism and regulation mechanism of preservation technology were still unclear. Consequently, in the future, the mechanism of blueberry postharvest senescence should be further studied at both cellular and molecular level, which can provide a theoretical basis for the research on prevention and control of blueberry postharvest diseases and preservation technology.

Key words blueberry; postharvest physiology; postharvest pathology; preservation technology