

## 采后绿色蔬菜保鲜护绿技术研究进展

林 帆, 王利强\*

(江南大学机械工程学院 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室 江苏无锡 214122)

**摘要** 绿色蔬菜是指富含叶绿素而外观呈绿色的一类蔬菜。由于酶和微生物的共同作用,会引起蔬菜失绿、感官变差,乃至腐烂,造成了大量的浪费,因此研究蔬菜采后贮藏的保鲜护绿技术具有重要意义。本文综述绿色蔬菜失绿与腐烂机制,非热物理、化学和生物以及它们的组合保鲜技术对蔬菜品质的影响,阐述这些技术存在的问题,展望其研究前景。

**关键词** 蔬菜; 保鲜; 护绿; 贮藏

**文章编号** 1009-7848(2023)03-0416-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.03.041

绿色蔬菜是指富含叶绿素而外观呈绿色的一类蔬菜,其不仅含有膳食纤维,还含有丰富维生素、酚类化合物等营养元素,对人体健康有着不可替代的作用<sup>[1]</sup>。食用一些绿叶菜还可以减少患慢性疾病、心血管疾病等的疾病风险<sup>[2-3]</sup>。然而,很多蔬菜本身较为脆弱且采后保质期较短,在采后运输、处理(切割、剥皮等)过程中因微生物活动、氧化作用、本身生理活性等容易引起蔬菜变质乃至腐败,主要表现为失水、纹理变化、风味变差、颜色变化等。

颜色被认为是消费者接受或拒绝新鲜水果和蔬菜等商品的决定性因素之一,并常被用作最终产品整体质量水平和成熟度的指标<sup>[4]</sup>。对于绿色蔬菜来说,绿色保留的程度基本决定消费者是否购买。如何维持蔬菜采后叶绿素含量成为研究人员重点关注的问题。

绿色蔬菜采后贮藏失绿褐变、变质腐败是制约蔬菜市场发展的障碍,研究其采后贮藏保鲜技术具有重要意义。本文概述新鲜蔬菜保鲜及护绿技术的最新进展、存在的问题,展望其研究前景,为延长蔬菜贮藏期提供理论参考。

### 1 蔬菜腐败及失绿机制

蔬菜不可逆腐败和感官变差的主要因素与潜在的微生物和酶活性有关<sup>[4]</sup>。蔬菜的腐烂主要是由微生物引起,根霉属、镰刀菌属、葡萄孢属、核盘菌属等霉菌,欧氏杆菌属、假单胞菌属等细菌广泛存在于其表面,这些微生物通过直接侵入、自然孔口侵入和伤口侵入等方式将多糖纤维素、半纤维素和果胶等分解成微生物生长繁殖所需的营养物质,引起腐败<sup>[5]</sup>。此外,由于采后运输等发生的机械损伤,或因为衰老引起叶绿素降解而增加细胞对光诱导氧化损伤的易感性所造成的组织损伤<sup>[6]</sup>,使有利于微生物生长的蔬菜营养物质与空气接触,从而加快腐烂<sup>[7]</sup>。蔬菜体内相关酶的表达也会降低蔬菜的品质,如细胞壁降解酶表达使蔬菜质地软化,酚酶催化酚类化合物生成醌类及其聚合物引起褐变,苯丙胺酸解氨酶会加速蔬菜的衰老等<sup>[8]</sup>。另外,乙烯对酶活性有重大影响,当乙烯含量大于 0.01  $\mu\text{L/L}$  时,可刺激蔬菜的呼吸强度<sup>[9]</sup>,影响糖含量的变化,细胞壁降解酶的表达,叶绿素的稳定性和酚类化合物的合成等生理变化,加速衰老,降低蔬菜品质,甚至引起腐败<sup>[10]</sup>。

蔬菜采后失绿主要是因为叶绿素的降解,是叶绿素 a 在叶绿素酶作用下降解为叶绿素 a 酸酯,随后经一系列相关降解酶的作用降解为非荧光叶绿素降解物<sup>[11]</sup>。此过程也称为脱镁叶绿素 a 加氧酶途径<sup>[12]</sup>,该过程伴随蔬菜的衰老,与叶绿素降解酶活性相关。有研究表明,叶绿素降解的另一途径是氧化降解途径<sup>[13]</sup>。此过程可能是由于活性氧(reactive oxygen species,ROS)的过量积累,对

收稿日期: 2022-03-24

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP21115);江苏省食品先进制造装备技术重点实验室自主研究课题资助项目(FMZ201902)

第一作者: 林帆,男,硕士生

通信作者: 王利强 E-mail: wlqcom@163.com

蔬菜生物分子如蛋白质、脂质、核酸等造成氧化损伤所引起的<sup>[14]</sup>。此外,还有植物激素也会引起叶绿素降解,如乙烯、花青素等。乙烯与叶绿素降解高度相关,乙烯信号通路重要转录因子 ETHYLENE INSENSITIVE3(EIN3)通过结合相关叶绿素代谢基因可以直接对叶绿素的降解产生影响<sup>[15]</sup>。花青素通过吸收绿光和减少多余的激发能来保护光合作用系统不受光抑制,同时可作为抗氧化剂;只有在叶绿素降解开始时才有可能合成花青素,表明叶绿素降解和花青素合成之间可能有密切关系<sup>[16]</sup>。

## 2 采后绿色蔬菜的保鲜及护绿技术

### 2.1 非热物理技术

热处理虽能减少微生物负荷,但极易破坏蔬菜细胞组织结构,影响蔬菜的品质特性,而非热物理技术却能较好地保留蔬菜的原始特性<sup>[17]</sup>。近几十年来,各种非热处理方法相继出现,其中包括气调包装(modified atmosphere packaging, MAP)、超声波(ultrasound, US)预处理、辐照(紫外线、 $\gamma$ 射线、X射线等)、低温(冷藏、冷冻)等,这些非热物理技术通过短时或长期调整蔬菜贮藏环境条件,使蔬菜中的微生物负荷减少,抑制相关酶活性,让保质期增加,维持感官和结构特征。

**2.1.1 MAP** MAP是通过调整蔬菜贮藏包装内的气体成分及比例或用惰性气体替代来延长货架寿命的技术,一般结合低温贮藏,有助于抑制蔬菜的生化反应和微生物活性。传统 MAP 中最佳气氛通常有较高的  $\text{CO}_2$  含量。有研究表明,高水平的二氧化碳,不超过 20%,有助于防止叶绿素在组织中的降解,主要是通过抑制叶绿素酶的活性和叶绿素分解代谢基因的表达<sup>[16]</sup>,调节 ROS 的代谢来实现<sup>[18]</sup>。Guo 等<sup>[18]</sup>从分子水平研究了 MAP(充入气体体积分数比例分别为 10% $\text{CO}_2$ , 3% $\text{O}_2$ , 87% $\text{N}_2$ )在 4℃下对莴苣保鲜的机理,贮藏 6 d 后  $\text{CO}_2$  浓度上升到 17%,表现出较低的超氧阴离子和羟自由基水平,以及较高的细胞色素 c 氧化酶与琥珀酸脱氢酶活性,说明能调整电子传递链的动态平衡,保护线粒体结构和功能,从而降低 ROS 的积累,抑制叶绿素的降解并限制莴苣细胞的损伤。6 d 后叶绿素含量和新鲜度明显优于对照组。然而,对于呼吸速率高的蔬菜来说,低浓度的  $\text{O}_2$  可能导致厌氧发

酵,并相应地积累不利的气味和造成组织损害<sup>[19]</sup>。此外,还由于蒸腾作用和其它生理活动会在薄膜上凝结水雾,滋生微生物,促进腐败,而微孔膜可以让气体、水分在包装的内、外环境之间以高速度实时交换,从而减少或消除这类问题的影响。Yuan 等<sup>[20]</sup>研究表明,12 微孔(100  $\mu\text{m}$ )处理白菜,能维持膜内理想的  $\text{O}_2$  与  $\text{CO}_2$  的浓度,让叶绿素降解酶活性明显降低,延缓叶绿素降解,且风味相关的化学物质如异戊醛、异硫氰酸酯、3-甲基-3-丁烯腈等得到较好地保留,提高了抗氧化能力,保持了白菜的新鲜度。而对于呼吸速率较低的蔬菜来说,通常主动气调保鲜效果更好<sup>[19]</sup>。Torales 等<sup>[19]</sup>评价微孔膜技术(0.3 mm)与主动气调(3kPa $\text{O}_2$ +5kPa $\text{CO}_2$ 或 5kPa $\text{O}_2$ +20kPa $\text{CO}_2$ )在芝麻菜上的应用效果,结果表明:主动气调比微孔膜技术更能有效抑制叶绿素降解酶活性,保护叶绿素,延缓芝麻菜的黄化,与对照组相比,保质期延长 15 d。

另外,与低氧气氛相比,高氧气氛包装(high oxygen atmosphere packaging, HOAP)对某些蔬菜的品质变化有相似,甚至更有利的影响<sup>[21]</sup>。HOAP(初始  $\text{O}_2$  含量 90%)处理羽衣甘蓝的结果表明,羽衣甘蓝的感官品质得到保持,衰老过程被延缓,这可能与其贮藏过程中功能蛋白的积累有关;虽然在贮藏开始时可能由于高氧产生的氧化应激会引起叶绿素的轻微降解,但是其新鲜度、气味和腐烂率均优于空气包装样品<sup>[22]</sup>。值得注意的是 HOAP 处理也可能对采后蔬菜产生负面影响,在高氧浓度下,卷心莴苣中乙烯的产生会增强<sup>[23]</sup>。

总而言之,MAP 的处理效果很大程度上取决于蔬菜品种、储存温度、气体比例、贮藏前蔬菜品质以及预处理等,应根据蔬菜呼吸特征来确定适宜的 MAP 方式及充入气体比例。对于大型气调贮藏系统,还可以安装制冷系统、气体控制仪表和监控系统(例如氧气、二氧化碳、乙烯、温度和湿度传感器)来提高应用效果。传统 MAP 的使用也存在白色污染的问题,将生物可降解性的材料运用在 MAP 上是今后的研究方向之一。

**2.1.2 US 及其组合技术** US 有较强的空化效应和其它同生效应,在液体中产生局部极高的温度和压力变化,使微生物细胞壁结构被破坏,达到灭菌和酶变性、失活的目的<sup>[24]</sup>。据报道,经扫描超声

波处理的小白菜,酵母菌和霉菌数量显著减少<sup>[25]</sup>。另外,在生菜中的应用表明,US可以抑制多酚氧化酶(Polyphenol oxidase,PPO)和过氧化物酶(Peroxidase,POD)活性<sup>[26]</sup>,可能是超声空化气泡产生的剪切力可以破坏维持蛋白质空间结构稳定性的氢键、范德华力、静电力等,导致蛋白质的二级和三级结构发生变化,进而使酶变性和失活<sup>[24]</sup>。而温度、pH等环境条件的变化也会使酶活性发生变化,因此,US与能改变温度和pH等的技术结合起来,形成US组合技术。研究发现,US组合技术在蔬菜上的运用不仅表现出较好的灭菌效果,还有利于维持蔬菜的贮藏品质。Zhang等<sup>[27]</sup>研究发现,US和MAP组合技术降低了小白菜贮藏期间菌落总数的增加,减缓了其质量损失、黄化、丙二醛含量的增加,维持细胞膜通透性,减缓了可溶性固形物总量的下降和抗坏血酸和叶绿素的损失,可延长保质期至30 d。超声-次氯酸钠-植酸联合处理生菜<sup>[28]</sup>,能有效抑制大肠杆菌O157:H7的生长,减轻鲜切生菜的质量损失和颜色变化,抑制POD和PPO活性,对维生素C(vitamin C,VC)、总酚、叶绿素以及水分含量有维持作用。范凯<sup>[29]</sup>发现US联合MAP处理生菜,抑制了冷藏期间微生物生长,减缓了叶绿素的降解,抑制生菜的超氧阴离子生成量和脂氧合酶活性,维持ABTS与DPPH自由基清除能力,表明组合处理对生菜的衰老具有延缓作用,将生菜货架期延长至12 d。

US短时间处理灭菌效果有限,而处理时间过长,会造成蔬菜表皮损伤、组织软化和营养流失等<sup>[30]</sup>。有研究证明,小白菜叶片的物理损伤和VC的损失随着超声功率的增加而增加,随着超声频率的增加而减少<sup>[31]</sup>。不同的蔬菜所采用的最佳处理时间、功率和频率还有待研究,这也是限制US应用的因素之一。

**2.1.3 辐照** 辐照是使蔬菜受到特定剂量的非电离辐射,如紫外(Ultraviolet,UV)、可见光、无线电波等,或电离辐射,如 $\gamma$ 射线、X射线、加速电子束等来消灭蔬菜中的微生物,抑制某些代谢反应<sup>[32]</sup>,来延长蔬菜贮藏期。

根据UV波长分为UV-A、UV-B、UV-C 3种类型<sup>[32]</sup>,其作为一种无残留的物理杀菌方法,对蔬菜采后病害控制、生理活性、植物激素生成有重大

影响<sup>[33]</sup>。UV-A在自然界中广泛存在,对植物的影响较小;UV-B能改变植物细胞的抗氧化代谢等生理活动<sup>[33]</sup>。有研究表明,低剂量UV-B的刺激作用会增强西兰花自身的保护机制,诱导酚类抗氧化剂的生成,延缓黄化,对西兰花的颜色保持和品质维持有明显作用<sup>[34]</sup>。而UV-C有较短的波长(200~280 nm),是遗传物质的吸收峰值区域,因此对病毒、细菌的杀灭效果最显著,也可以影响植物代谢反应<sup>[32]</sup>。Gogo等<sup>[35]</sup>研究发现,UV-C(1.7 kJ/m)处理非洲茼蒿和非洲茄叶能显著降低好氧菌、酵母菌和霉菌数量,维持矿物元素,减少碳水化合物含量的流失,延缓叶绿素降解。

$\gamma$ 射线与X射线有较强的穿透作用,通过破坏细胞与微生物DNA的共价键,对酶的表达和微生物生长有显著影响<sup>[32]</sup>。低剂量 $\gamma$ 射线处理欧芹叶使酵母和霉菌总数降低,产生的褐藻素类化合物含量较低,延缓欧芹黄化,这可能是由于 $\gamma$ 辐射的灭菌作用和对叶绿素酶的部分抑制所致,在4℃下 $\gamma$ 辐照使欧芹贮藏期延长至30 d<sup>[36]</sup>。X射线辐射已证实能灭活各种致病菌,且高达2.0 kGy的辐射量对菠菜叶的颜色和质地无不利影响<sup>[37]</sup>。另外,有学者指出X射线和没食子酸联合处理生菜,对食源性致病菌有协同杀菌作用,对生菜的颜色和质地有维持作用<sup>[38]</sup>。

合适剂量的几种其它类型辐照在不同种类绿叶菜上的应用见表1,表现出良好的保鲜护绿效果。然而,高剂量的辐照会对蔬菜有负面影响。高剂量UV-B处理的西兰花失重率较高,影响保质期<sup>[34]</sup>。同样,高剂量 $\gamma$ 射线辐射会软化欧芹植物细胞壁,使其失去硬度,让气味和风味变差<sup>[36]</sup>。不同辐照处理对蔬菜品质,包括色泽、硬度、抗氧化性以及营养成分的影响不能以一概全,而且不同处理剂量效果各异,再加上不同蔬菜自身特性的差异,对于特定品种绿色蔬菜的保鲜及护绿仍需进一步的研究。

## 2.2 化学保鲜及护绿技术

**2.2.1 1-甲基环丙烯** 1-甲基环丙烯(1-Methylcyclopropene,1-MCP)是乙烯抑制剂,通过与乙烯竞争乙烯受体(Ad-ERS 1a、Ad-ETR 2和Ad-ETR 3)和抑制多种转录因子(Ad-ERF 4、Ad-ERF 6、Ad-ERF 10和Ad-ERF 14)的表达,来防

表 1 几种其它类型辐照在蔬菜上的应用

Table 1 Application of several other types of irradiation on vegetables

蔬菜	辐照类型及条件	效果	参考文献
西兰花	2.4 kGy 电子束辐照,0.02 mm 聚氯乙烯保鲜袋,4 ℃	抑制冷藏期间菌落总数、霉菌和酵母的增加,减少黄化发生和总叶绿素含量下降幅度,延长保鲜期至 18~24 d	[39]
小白菜	10 μmol/m/s 的 LED 白光 + 0.3 kJ/m UV-C,0.03 mm 聚乙烯袋,20 ℃	降低其损耗率和失重率,保持较高的叶绿素含量和 VC 含量,维持采后品质	[40]
西兰花	300 W 微波 40 s,4 ℃	降低过氧化物酶活性,延缓 VC、水分及叶绿素含量的下降	[41]
白菜	35 μmol/(L·m <sup>2</sup> ·s)LED 红光 8 h, 聚氯乙烯袋,20 ℃	抑制叶绿素降解和衰老相关基因的表达,叶绿素、VC 和总可溶性蛋白质含量得到维持,延缓衰老	[42]

止蔬菜过度衰老<sup>[9]</sup>。目前其延缓衰老和品质恶化的机制尚未完全阐明,可能是 1-MCP 与乙烯受体的结合形态抑制蔬菜生理活性物质的形成,从而干扰乙烯的信号转导,抑制乙烯的生理效应<sup>[9]</sup>。1-MCP 也能有效抑制参与叶绿素降解的相关基因的表达,降低了叶绿素酶等酶的活性<sup>[43]</sup>,从而限制绿叶颜色的丧失。Hu 等<sup>[44]</sup>用 1-MCP 处理甘蓝,研究发现,从储存开始到第 8 天,1-MCP 处理组贮藏期间乙烯生成受到抑制,呼吸速率降低,延缓了抗坏血酸、总酚含量的丢失,且总叶绿素、叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均比对照组多,甘蓝的采后品质较好。1-MCP 在牛心甘蓝<sup>[45]</sup>、山芹<sup>[46]</sup>等蔬菜也有应用,均能延缓叶绿素降解,维持采后品质。

单一地使用 1-MCP 保鲜还不能完全解决如易氧化、微生物影响等问题,与其它具有灭菌和抗氧化效果的化学保鲜剂组合使用,可为蔬菜贮藏保鲜和护绿提供新的途径。张四普等<sup>[47]</sup>采用柠檬酸和植酸复合保鲜剂结合 1-MCP 处理芥蓝,以叶绿素含量、相对电导率、过氧化物酶活性、丙二醛含量等为评价指标,结果显示,常温贮藏 6 d,复合处理组上述指标均优于对照。金童<sup>[43]</sup>对比 1-MCP、ClO<sub>2</sub> 单独处理与组合处理对青椒的影响,结果发现组合处理组抑制青椒叶绿素降解的相关基因(*CLH*、*PPH*、*PAO* 和 *RCCR*)的表达能力更强,叶绿素酶等酶的活性得到抑制,延缓了叶绿素降解,且能维持可溶性糖等营养物质含量,保鲜护绿效果较好。

目前 1-MCP 对果蔬保鲜作用的研究在生理水平上已非常明确,而对延缓果蔬衰老的分子基

理研究不足。深入研究 1-MCP 作用的相关基因和蛋白质,将会发现更多与 1-MCP 起协同作用的化合物和保鲜处理手段,这是开发更多 1-MCP 组合技术的关键。

2.2.2 乙醇 乙醇处理蔬菜分为诱导内源乙醇生成和外源乙醇熏蒸,可减少乙烯对蔬菜的刺激作用以及抑制内源乙烯的生成和表面微生物生长。Techavuthiporn 等<sup>[48]</sup>发现西兰花在缺氧 20 h 的条件下,会产生适宜的内源乙醇浓度,可以抑制乙烯生成等关键生理过程和有效去除过氧化氢来减轻氧化应激,对叶绿素和抗坏血酸的保留有积极作用。而 Asoda 等<sup>[49]</sup>用适宜浓度的外源乙醇、外源乙烯单独或同时处理西兰花,发现外源乙烯会促进黄化,而乙醇与乙烯处理组中,外源乙烯对西兰花的黄化没有促进作用,贮藏期间仍保持绿色;进一步研究表明,乙醇蒸汽降低了 1-氨基环丙烷-1-羧酸(1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid, ACC)合成酶和 ACC 氧化酶的活性,这些酶的活性会影响内源乙烯的生成<sup>[50]</sup>,同时也会抑制编码乙烯生物合成酶基因的表达,包括 *BO-ACO1*、*BO-ACO2* 和 *BO-ACS1*<sup>[49]</sup>。这些结果表明,乙醇熏蒸处理通过抑制西兰花对乙烯的响应和乙烯的生物合成而抑制采后西兰花的衰老。另外,乙醇也能通过减轻蔬菜微生物负荷来维持贮藏品质。冯晓汀<sup>[51]</sup>评价不同体积分数的乙醇溶液浸泡西兰花的效果,发现贮藏 21 d 后,20%乙醇处理组的微生物数量比对照组低 1 个数量级,28 d 后低 2 个数量级。乙醇还可以抑制呼吸强度。汪峰等<sup>[52]</sup>研究表明,适宜浓度的外源乙醇熏蒸食荚豌豆,可有效维

持贮藏期间食荚豌豆的水分含量,抑制其呼吸强度、叶绿素降解、乙烯生成,保持豆荚的食用品质。

高浓度乙醇虽然可以延缓黄化,但是会对细胞内原生质体造成伤害。西兰花经高浓度乙醇处理后,其细胞形态和结构在贮藏后期受到严重损坏,最终使叶绿体失去功能<sup>[53]</sup>。对不同蔬菜而言,乙醇的作用机理、最佳处理浓度和时间还需进一步研究。

**2.2.3 纳米技术** 纳米保鲜技术主要分为纳米涂膜技术和纳米包装技术<sup>[54]</sup>。纳米涂膜技术中的纳米乳液是一个异质体系,至少由两种不相容的液体组成,一种分散在另一种小液滴中,粒径从10 nm到1 000 nm不等,典型的纳米乳液包括油相、水相和乳化剂<sup>[55]</sup>。由于其表面体积比大、粒径小,因此可将抗氧化剂、抗菌剂等作为纳米载体封装在一起,使封装组分在纳米乳液中的生物利用度得到提高。Huang等<sup>[56]</sup>将油菜素内酯和肉桂精油用乳清浓缩蛋白-高甲氧基果胶纳米双乳液封装,并对西兰花浸涂,结果表明,两种封装物利用率提高,有协同作用;双乳剂涂膜不仅抑制了叶绿素降解酶的活性,减少细胞膜的破坏,保持住叶绿素含量,而且也保持了较高的三磷酸腺苷含量,抑制了能量电荷的下降趋势,有效延缓了西兰花的衰老。纳米涂膜技术还可以在蔬菜表面形成保护层,对氧气、二氧化碳、水分、微生物的渗入有阻碍作用,形成微气调环境<sup>[55]</sup>,可以降低蔬菜的呼吸和蒸腾作用。有研究表明,将菠菜浸入纳米纤维素悬浮液后,对叶片的外观、叶绿素、颜色和含水量均有显著的保持作用,并且使呼吸速率的降低,这归功于其亲水凝胶的吸水性能以及气体屏障特性,导致叶片水分的守恒和减少了菠菜叶片的好氧呼吸<sup>[57]</sup>。

纳米包装技术是通过向包装材料中加入纳米粒子,使包装材料具有一定得抗菌、抗氧化等功能,也能提升包装材料的机械强度<sup>[54]</sup>。将纳米二氧化钛(nano-TiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> NPs)、氧化石墨烯(Graphene oxide, GO)添加到聚乳酸(Polylactic acid, PLA)中,可以显著提高PLA纳米纤维薄膜的拉伸强度和断裂伸长率,提高纳米纤维薄膜的阻水性能;制备的PLA/TiO<sub>2</sub> NPs/GO纳米纤维薄膜可以较好地保持青椒的感官品质,降低青椒的腐败率,减缓叶绿素流失,延缓青椒的红熟软化,延长保鲜期<sup>[58]</sup>。

纳米粒子的比表面积较大,促进与细胞膜的接触,因此有更强的吸收和迁移能力,一旦迁移到食物中,它们可能会引起食物的感官变化<sup>[59]</sup>。纳米技术虽可以较好地延长蔬菜的保质期,但其潜在的毒性问题不容忽视。若将纳米技术应用在蔬菜的保鲜护绿和包装上,需进一步研究其潜在毒性。

**2.2.4 其它化学保鲜剂** 化学保鲜剂种类繁多,除了1-MCP、乙醇,还有杀菌剂(臭氧、氯)<sup>[60-61]</sup>、植物生长调节剂<sup>[62-65]</sup>、抗氧化剂(有机酸)<sup>[66]</sup>等通过减少微生物负荷,抑制酶和基因的表达等方式,对蔬菜起保鲜和护绿作用。其它化学保鲜护绿方法在不同蔬菜上的应用见表2。

## 2.3 生物保鲜及护绿技术

生物保鲜技术是利用天然提取物、拮抗微生物等制成涂敷材料,涂敷在蔬菜表面来抑制蔬菜的乙烯合成和呼吸作用,延长采后保质期,主要有壳聚糖、海藻酸钠、植物精油等天然提取物,乳酸链球菌素和 $\epsilon$ -聚赖氨酸等细菌素等。

**2.3.1 可食用涂层** 可食用涂层用作蔬菜表面的屏障,调节水分、氧气、二氧化碳和乙烯的含量,保留香气和味觉化合物,也可以减少化学和机械应力的有害影响<sup>[67]</sup>。可食用涂层以淀粉、壳聚糖、海藻酸钠、羧甲基纤维素等为基料,可包含多种天然生物成分,如草药、抗菌药物、抗氧化剂、抗褐变化合物、调味品和着色剂化合物以及营养物质,以适应不同蔬菜的保鲜护绿要求。张轶斌等<sup>[68]</sup>用壳聚糖混合体积分数0.1%的姜精油浸涂甜椒样品,在8℃贮藏35 d,与对照相比,各项生理指标较好,减少VC的损失,抑制微生物生长,维持叶绿素的含量。据Abedi等<sup>[69]</sup>报道,由乳清浓缩蛋白和迷迭香精油形成的食用涂层对菠菜表面大肠菌群有显著的抗菌作用,减轻菠菜的质量损失,抑制了pH值的下降,保持了叶片的色泽和叶绿素含量,这可能是pH值升高,乳清蛋白对透氧的抑制作用以及相关酶的活性受到抑制所致。

可食用涂层虽能有效延长蔬菜的保鲜期,但其亲水性给应用带来限制,需进一步研究可食用涂料与各种添加剂的相容性、协同性,提高其阻水性以及带来其它的功能特性,使可食用涂层应用多样化。此外,涂层选用不当反而有不利影响。Kowalczyk等<sup>[70]</sup>指出,用羧甲基纤维素、小烛树蜡

表 2 其它化学保鲜护绿方法在蔬菜上的应用

Table 2 Other chemical preservation methods for vegetables

蔬菜	保鲜方法	效果	参考文献
杭白菜	臭氧 60 μg/L 熏蒸 30 min, 2 ℃、湿度 70%~80% 条件下贮藏	可溶性固形物、叶绿素含量较高, 色泽变化较慢, 水分含量较高和过氧化产物丙二醛含量较低, 贮藏期可达 18 d	[60]
娃娃菜	6 mg/L 二氧化氯 10 min	抑制丙二醛生成, 延缓黄酮含量降低和失重率上升, 维持感官品质	[61]
西兰花	喷施 200 μmol/L 外源硝普钠	提高抗氧化酶活性, 抑制叶绿素降解酶活性和相关基因表达, 延缓黄化, 延长保质期	[62]
青椒	20 μmol/L 亚精胺+20 μmol/L 腐胺, (4±1)℃	减缓失重, 提高 DPPH 自由基清除活性, 显著降低叶绿素降解, 延长保质期至 40 d	[63]
西兰花	100 μmol/L 外源褪黑素浸泡 30 min	抑制叶绿素分解酶的活性, 下调叶绿素降解过程中的基因表达, 延缓西兰花的黄化进程, 延长贮藏寿命	[64]
大白菜	100 μmol/L 赤霉素, 25 ℃黑暗下	下调与衰老相关基因的表达, 延缓叶绿素降解	[65]
向日葵微芽	抗坏血酸+柠檬酸, 均 2.5 g/L, (10±1)℃	维持叶绿素含量, 提高 DPPH 自由基清除能力, 抑制微生物生长, 延长保质期至 16 d	[66]

为原料制作的涂层涂敷孢子甘蓝会带来负面影响, 该涂层的气体阻隔特性诱导了孢子甘蓝的厌氧代谢和乙烯积累, 加速叶绿素降解, 增加 PPO 活性, 缩短孢子甘蓝的储存期。选择合适的涂层并非易事, 部分原因在于缺乏各种涂层应用于不同蔬菜上的数据支持。

**2.3.2 细菌素** 细菌素一般可以定义为抗菌肽或能够抑制某些腐败和致病微生物的蛋白质, 它们能抑制细菌的生长, 维持蔬菜品质<sup>[21]</sup>。毕文慧等<sup>[71]</sup>研制了一种由  $\epsilon$ -聚赖氨酸、乳酸链球菌素及曲酸 3 种安全性高的生物抑菌剂组成的复配液, 浸涂青椒后, 使青椒叶绿素和其它营养物质含量得到维持, 延缓青椒相对电导率和失重率的上升, 有助于维持青椒感官品质。另外, 细菌素也能与其它物理保鲜方法及保鲜剂联合应用于蔬菜的保鲜, 达到更好的保鲜护绿效果。Fan 等<sup>[72]</sup>指出  $\epsilon$ -聚赖氨酸用在生菜上可大幅降低霉菌、酵母菌总数及大肠菌群总数, 与超声波联合处理还可抑制 PPO 和 POD 活性的上升, 降低生菜冷藏期间水分流动性, 维持生菜的叶绿素含量, 将货架期延长至 15 d。李长亮等<sup>[73]</sup>的研究表明, 溶菌酶和 1-MCP 联合处理西兰花可有效抑制霉变, 提高感官品质和总酚含量, 降低叶绿素、VC 的降解速率。

由于不同蔬菜的内环境有一定差异, 以及复杂

的贮藏环境条件, 细菌素在不同的蔬菜和不同的环境条件下发挥的作用各异, 这限制了细菌素的应用。未来应深入研究细菌素的抗菌机制, 并从分子水平上深入阐明保鲜机理。在此基础上, 可与其它技术组合, 开发持续性、广谱性和稳定性的复合保鲜护绿方法。

2.4 保鲜及护绿组合技术

蔬菜采后贮藏会发生复杂的生理变化, 考虑到酶活性和微生物影响的协同效应, 以及单一种类保鲜技术的应用效果有限, 可将物理、化学、生物保鲜护绿技术组合使用(表 3)。

3 结语

绿色蔬菜富含各种营养元素, 因微生物和酶的作用而导致其极易变质, 并可能携带食源性病菌, 引发给食品安全问题。为保持蔬菜颜色和品质, 国内外学者提出了上述多种维持品质的方式, 并取得较好的效果。然而, 不同种类的蔬菜因本身特点, 需要采用不同的保鲜护绿技术。非热物理保鲜护绿技术成本低、方便操作且安全, 然而, 保质期延长不显著。各技术条件针对不同的蔬菜还需进一步研究确认。在化学保鲜护绿方面, 虽然效果明显, 但是有潜在的安全隐患, 如纳米技术应用在绿叶菜中可能的迁移问题。生物保鲜护绿

表3 保鲜及护绿组合技术在蔬菜上的应用

Table 3 Preservation and stay green combination techniques for vegetables

蔬菜	保鲜方法	效果	参考文献
鲜切黄瓜	壳聚糖(1%)+氨气基 MAP(79%氨、3%氧气、18%CO <sub>2</sub> )	减少黄化,降低呼吸速率,维持硬度,抑制微生物数量,延长贮藏期至 12 d	[74]
绿辣椒	赤霉素(3 μmol/L)10 min + MAP(防雾膜), (8±2)℃	有效保存了辣椒的硬度、总酚含量、抗氧化活性,叶绿素总量、类胡萝卜素总量,抗坏血酸含量等品质性状,延长保质期至 30 d	[75]
甜豌豆	壳聚糖(1%) + 赤霉素(1 mmol/L)	抑制失重,减少腐烂、可滴定酸度和冷害,保留叶绿素,维持甜味和脆度	[76]
白菜	在 50 mg/L ClO <sub>2</sub> 水溶液用 180 W, 80 kHz 超声波处理 10 min	显著降低微生物数量,抑制多酚氧化酶和多酚过氧化物酶的活性,延缓叶绿素降解和白菜的衰老	[77]
大葱	5℃下,苯甲酸钠(0.1%) + γ 辐射(1.0 kGy)	保持硬度、颜色和减少微生物数量,并降低水分含量,保持其质量长达 16 d	[78]
罗马生菜	穿孔气调包装(20孔,64 m) + 乳酸钙(1.5%) + 半胱氨酸(0.5%)	钙离子的固化作用减少了 PPO 及其底物在切割表面的渗漏;维持生菜脆度、含水量和叶绿素含量;微生物数量减少	[79]
小白菜	50%富氦水 + 真空预冷	显著降低了失重率,保持叶绿素和抗氧化物质的含量	[80]

技术安全、无毒,来源天然,然而,保鲜效果不一,尚未大规模推广,还需进一步探索。目前,在不影响感官和营养品质的情况下延长蔬菜保质期,有时需要几种适当技术的组合来实现。未来应深入研究各种保鲜护绿技术在蛋白质、基因层面的作用机理,发现更多起协同作用的处理手段,通过这些技术的合理组合来维持蔬菜采后贮藏的感官质量和营养价值。

参 考 文 献

[1] VEIGA M, COSTA E M, SILVA S, et al. Impact of plant extracts upon human health: A review[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2020, 60(5): 873-886.

[2] AGGARWAL A, VERMA S, GHAI R, et al. Potential of fruits and vegetables to treat inflammatory conditions[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 47(P1): 127-134.

[3] AKIN O, PAUL O A, PAUL O, et al. Dietary intakes of green leafy vegetables and incidence of cardiovascular diseases[J]. Cardiovascular Journal of Africa, 2021, 32(4): 215-223.

[4] GIANNAKOURE M C, TSIRONI T N. Application

of processing and packaging hurdles for fresh-cut fruits and vegetables preservation[J]. Foods, 2021, 10(4): 830-830.

[5] 王树庆, 张咏梅, 战伟伟, 等. 蔬菜贮运中微生物腐败及其防治[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(15): 101-103.

WANG S Q, ZHANG Y M, ZHAN W W, et al. Microbiological spoilage and prevention of vegetables on storage and transportation[J]. Food Research and Development, 2014, 35(15): 101-103.

[6] CHEN J X, MAO L C, MI H B, et al. Detachment-accelerated ripening and senescence of strawberry (Fragaria×ananassa Duch. cv. Akihime) fruit and the regulation role of multiple phytohormones[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2014, 36 (9): 2441-2451.

[7] XYLIA P, BOTSARIS G, CHRYSARGYRIS A, et al. Variation of microbial load and biochemical activity of ready-to-eat salads in Cyprus as affected by vegetable type, season, and producer[J]. Food Microbiol, 2019, 83: 200-210.

[8] 胡叶静, 李保国, 张敏, 等. 鲜切果蔬保鲜技术及方法研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(22): 276-281.

- HU Y J, LI B G, ZHANG M, et al. Progresses on fresh-keeping techniques and methods of fresh-cut fruits and vegetables[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(22): 276–281.
- [9] WEI H Y, SEIDI F, ZHANG T W, et al. Ethylene scavengers for the preservation of fruits and vegetables: A review[J]. Food Chem, 2021, 337: 127750.
- [10] LEE Y, HWANG K T. Changes in physicochemical properties of mulberry fruits (*Morus alba* L.) during ripening[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 217: 189–196.
- [11] 汤红, 李娜, 曾教科, 等. 植物激素调控果实色泽形成的分子机制研究进展[J]. 分子植物育种, 2019, 17(8): 2705–2711.
- TANG H, LI N, ZENG Y J K, et al. Advances in molecular mechanisms of phytohormone in regulating formation of fruit colour[J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(8): 2705–2711.
- [12] HORTENSTEINER S. Update on the biochemistry of chlorophyll breakdown[J]. Plant Mol Biol, 2013, 82(6): 505–517.
- [13] ZHANG Y X, MA Y L, GUO Y Y, et al. Comprehensive insight into the chlorophyll degradation mechanism of postharvest broccoli heads under elevated O<sub>2</sub> controlled atmosphere[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 288: 110395.
- [14] 杨舒贻, 陈晓阳, 惠文凯, 等. 逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2016, 45(5): 481–489.
- YANG S Y, CHEN X Y, HUI W K, et al. Progress in responses of antioxidant enzyme systems in plant to environmental stresses[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition), 2016, 45(5): 481–489.
- [15] 丁跃, 吴刚, 郭长奎. 植物叶绿素降解机制研究进展[J]. 生物技术通报, 2016, 32(11): 1–9.
- DING Y, WU G, GUO C K, et al. Research advance on chlorophyll degradation in plants [J]. Biotechnology Bulletin, 2016, 32(11): 1–9.
- [16] LI D, ZHANG X, LI L, et al. Elevated CO<sub>2</sub> delayed the chlorophyll degradation and anthocyanin accumulation in postharvest strawberry fruit[J]. Food Chem, 2019, 285: 163–170.
- [17] 胡晓敏, 黄彭, 刘雯欣, 等. 非热物理技术在鲜切果蔬保鲜中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(10): 278–284.
- HU X M, HUANG P, LIU W X, et al. Application of non-thermal physical technologies in fresh-cut fruits and vegetables preservation[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(10): 278–284.
- [18] GUO Z L, LIU H J, CHEN X L, et al. Modified-atmosphere packaging maintains the quality of postharvest whole lettuce (*Lactuca sativa* L. Grand Rapids) by mediating the dynamic equilibrium of the electron transport chain and protecting mitochondrial structure and function[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 147: 206–213.
- [19] TORALES A C, GUTIÉRREZ D R, RODRÍGUEZ S D C. Influence of passive and active modified atmosphere packaging on yellowing and chlorophyll degrading enzymes activity in fresh-cut rocket leaves [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 26: 100569.
- [20] YUAN S Z, ZUO J H, LI X F, et al. Micro-perforated packaging delays leaf yellowing and maintains flavor of postharvest pak choi (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*) following low-temperature storage [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 29: 100681.
- [21] MA L, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Recent developments in novel shelf life extension technologies of fresh-cut fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 64: 23–38.
- [22] WANG L, WU S L, HUANG H, et al. High oxygen atmospheric packaging treatment regulates the postharvest changes of Chinese kale (*Brassica oleracea* var. *alboglabra*) during storage[J]. J Food Sci, 2021, 86(9): 3884–3895.
- [23] LÓPEZ-GÁLVEZ F, RAGAERT P, HAQUE M A, et al. High oxygen atmospheres can induce russet spotting development in minimally processed iceberg lettuce[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 100: 168–175.
- [24] JIANG Q Y, ZHANG M, XU B G. Application of ultrasonic technology in postharvested fruits and vegetables storage: A review [J]. Ultrason Sonochem, 2020, 69: 105261.
- [25] ALENYOREGE E A, MA H, AYIM I, et al. Efficacy of sweep ultrasound on natural microbiota reduction and quality preservation of Chinese cabbage during storage[J]. Ultrason Sonochem, 2019, 59(C): 104712.

- [26] 尹晓婷, 赵葵儿, 蒋星仪, 等. 超声波处理结合纳米包装对鲜切生菜品质的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(2): 250-254.
- YIN X T, ZHAO K E, JIANG X Y, et al. Effect of ultrasonic treatment combined with nano-packaging on the quality of fresh-cut lettuce[J]. Food Science, 2015, 36(2): 250-254.
- [27] ZHANG XT, ZHANG M, DEVAHASTIN S, et al. Effect of combined ultrasonication and modified atmosphere packaging on storage quality of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(9): 1573-1583.
- [28] 孟祥慧, 马鑫敏, 谷恒梅, 等. 超声-次氯酸钠-植酸联合处理提高鲜切生菜的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 336-341.
- MENG X H, MA X M, GU H M, et al. Improvement of fresh-keeping effect of fresh-cut lettuce by US-NaClO-phytic acid[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(19): 336-341.
- [29] 范凯. 超声波/涂膜联合气调处理对鲜切生菜和黄瓜冷藏品质及其机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020: 21-29.
- FAN K. Study on the quality and mechanism of ultrasound/ coating combined with modified atmosphere treatment on fresh-cut lettuce and cucumber during cold storage[D]. Wuxi: JiangNan University, 2020: 21-29.
- [30] 李光荣, 刘欢, 张文祥, 等. 生物保鲜剂结合物理技术在果蔬保鲜中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 383-388.
- LI G R, LIU H, ZHANG W X, et al. Progress of bio-preservatives combined with physical technologies in fruits and vegetables preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42 (12): 383-388.
- [31] ZHU Y C, ZHANG T, XU D X, et al. The removal of pesticide residues from pakchoi (*Brassica rape* L. ssp. *chinensis*) by ultrasonic treatment[J]. Food Control, 2019, 95: 176-180.
- [32] BISHT B, BHATNAGAR P, GURURANI P, et al. Food irradiation: Effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables - a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 372-385.
- [33] ZHANG W L, JIANG W B. UV treatment improved the quality of postharvest fruits and vegetables by inducing resistance[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 92(C): 71-80.
- [34] DUARTE-SIERRA A, MUNZOR HASAN S M, ANGERS P, et al. UV-B radiation hormesis in broccoli florets: Glucosinolates and hydroxy-cinnamates are enhanced by UV-B in florets during storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 168: 111278.
- [35] GOGO E O, OPIYO A M, HASSENBERG K, et al. Postharvest UV-C treatment for extending shelf life and improving nutritional quality of African indigenous leafy vegetables[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 129: 107-117.
- [36] CĂTUNESCU G M, MUNTEAN M, MARIAN O, et al. Comparative effect of gamma irradiation, drying and freezing on sensory, and hygienic quality of parsley leaves[J]. Lwt, 2019, 115(C): 108448.
- [37] MAHMOUD B S, BACHMAN G, LINTON R H. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella enterica* and *Shigella flexneri* on spinach leaves by X-ray[J]. Food Microbiol, 2010, 27(1): 24-28.
- [38] JEON M J, HA J W. Bactericidal and synergistic effects of X-ray irradiation and gallic acid against foodborne pathogens on lettuce[J]. Food Microbiol, 2020, 92: 103584.
- [39] 戚文元, 王海宏, 岳玲, 等. 电子束辐照对鲜切西兰花冷藏保鲜的影响[J]. 上海农业学报, 2020, 36(6): 126-131.
- QI W Y, WANG H H, YUE L, et al. Effects of electron beam irradiation on preservation of fresh-cut broccoli at cold storage[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2020, 36(6): 126-131.
- [40] 张朦, 史君彦, 刘婧, 等. 短波 UV-C 结合 LED 白光辐照对小白菜采后保鲜的影响[J]. 北方园艺, 2021(13): 107-113.
- ZHANG M, SHI J Y, LIU J, et al. Effects of short-wave UV-C combined with LED white light irradiation on preservation in postharvest pakchoi[J]. Northern Horticulture, 2021(13): 107-113.
- [41] 黄文部. 微波结合植物精油处理对鲜切西兰花保鲜效果的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2018: 25-31.
- HUANG W B. Study on the preservation effect of microwave combined with plant essential oil on fresh-cut broccoli[D]. Yaan: Sichuan Agricultural U-

- niversity, 2018; 25-31.
- [42] SONG Y, QIU K, GAO J, et al. Molecular and physiological analyses of the effects of red and blue LED light irradiation on postharvest senescence of pak choi[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 164(C): 111155.
- [43] 金童. 1-甲基环丙烯(1-MCP)和二氧化氯联合使用对果蔬采后品质的影响[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2019: 43-56.
- JIN T. Effects of combined treatment of 1-methylcyclopropene (1-MCP) and chlorine dioxide ( $\text{ClO}_2$ ) on postharvest quality of fruit and vegetable[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2019: 43-56.
- [44] HU H L, ZHAO H H, ZHANG L G, et al. The application of 1-methylcyclopropene preserves the postharvest quality of cabbage by inhibiting ethylene production, delaying chlorophyll breakdown and increasing antioxidant capacity[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 281: 109986.
- [45] 胡花丽, 赵欢欢, 罗淑芬, 等. 多变量统计分析评价 1-甲基环丙烯对牛心甘蓝贮藏特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(16): 208-214.
- HU H L, ZHAO H H, LUO S F, et al. Evaluation the effect of 1-methylcyclopropene on storage characteristic of heart-shaped cabbage based on multivariate statistical analysis[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(16): 208-214.
- [46] 阎然, 陈庆敏, 傅茂润, 等. 1-MCP 处理对山芹货架期品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2019, 19(5): 33-39.
- YAN R, CHEN Q M, FU M R, et al. Effect of 1-MCP treatment on the shelf life quality of wild celery (*Ostericum sieboldii*)[J]. *Storage and Process*, 2019, 19(5): 33-39.
- [47] 张四普, 邓楠茜, 胡青霞, 等. 柠檬酸和植酸结合 1-MCP 复合保鲜处理对芥蓝常温贮藏品质的影响[J]. *中国瓜菜*, 2021, 34(5): 57-63.
- ZHANG S P, DENG N X, HU Q X, et al. Effects of citric acid and phytic acid combined with 1-MCP on storage quality of kale at room temperature[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2021, 34(5): 57-63.
- [48] TECHAVUTHIPORN C, THAMMAWONG M, NAKANO K. Effect of short-term anoxia treatment on endogenous ethanol and postharvest responses of broccoli florets during storage at ambient temperature[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 277: 109813.
- [49] ASODA T, TERA I H, KATO M, et al. Effects of postharvest ethanol vapor treatment on ethylene responsiveness in broccoli[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2009, 52(2): 216-220.
- [50] SUZUKI Y, UJI T, TERA I H. Inhibition of senescence in broccoli florets with ethanol vapor from alcohol powder[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2004, 31(2): 177-182.
- [51] 冯晓汀. 鲜切西兰花保鲜及机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016: 7-17.
- FENG X T. Studies on preservation and mechanism of fresh-cut broccoli[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016: 7-17.
- [52] 汪峰, 郑永华, 冯磊, 等. 乙醇处理对食荚豌豆保鲜效果的影响[J]. *食品科学*, 2003, 24(4): 155-158.
- WANG F, ZHENG Y H, FENG L, et al. Effect of ethanol treatment on storage of edible podded pea[J]. *Food Science*, 2003, 24(4): 155-158.
- [53] 韩俊华, 周君一, 牛天贵, 等. 乙醇对鲜切西兰花抗氧化酶及叶绿体超微结构的影响[J]. *食品科学*, 2008, 29(3): 283-287.
- HAN J H, ZHOU J Y, NIU T G, et al. Effects of ethanol vapor treatment on antioxidant enzyme and chloroplast ultrastructure of fresh-cut broccoli florets[J]. *Food Science*, 2008, 29(3): 283-287.
- [54] 曲健磊, 李晓风. 纳米材料在果蔬保鲜中的应用效果分析[J]. *中国果菜*, 2020, 40(1): 53-55, 58.
- QU J L, LI X F. Analysis on the application effect of nanomaterials in fruits and vegetables preservation[J]. *China Fruit and Vegetable*, 2020, 40(1): 53-55, 58.
- [55] HASAN S M K, FERRENTINO G, SCAMPICCHIO M. Nanoemulsion as advanced edible coatings to preserve the quality of fresh-cut fruits and vegetables: a review[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, 55(1): 1-10.
- [56] HUANG H, WANG D, BELWAL T, et al. A novel W/O/W double emulsion co-delivering brassinolide and cinnamon essential oil delayed the senescence of broccoli via regulating chlorophyll degradation and energy metabolism[J]. *Food Chem*, 2021, 356: 129704.
- [57] PACAPHOL K, SERAYPHEAP K, AHT-ONG D. Development and application of nanofibrillated cellu-

- lose coating for shelf life extension of fresh-cut vegetable during postharvest storage[J]. *Carbohydr Polym*, 2019, 224(C): 115167.
- [58] DONG X R, XU L, ZHOU Y T, et al. Preparation of polylactic acid/TiO<sub>2</sub>/GO nano-fibrous films and their preservation effect on green peppers[J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 177: 135-148.
- [59] NAIR M S, TOMAR M, PUNIA S, et al. Enhancing the functionality of chitosan- and alginate-based active edible coatings/films for the preservation of fruits and vegetables: A review[J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 164: 304-320.
- [60] 王晓, 刘晨霞, 陈冰洁, 等. 臭氧处理对杭白菜保鲜效果的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(5): 270-274.
- WANG X, LIU C X, CHEN B J, et al. Effects of ozone treatment on the preservation of Hangzhou cabbage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(5): 270-274.
- [61] 李翠红, 魏丽娟, 李长亮, 等. 不同保鲜剂对鲜切娃娃菜贮藏品质及抗氧化活性的影响[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(3): 22-28.
- LI C H, WEI L J, LI C L, et al. Effects of different preservatives on the quality and antioxidant activity of fresh-cut baby cabbages during storage[J]. *Storage and Process*, 2021, 21(3): 22-28.
- [62] SHI J, GAO L, ZUO J, et al. Exogenous sodium nitroprusside treatment of broccoli florets extends shelf life, enhances antioxidant enzyme activity, and inhibits chlorophyll-degradation[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 116: 98-104.
- [63] PATEL N, GANTAIT S, PANIGRAHI J. Extension of postharvest shelf-life in green bell pepper (*Cap-sicum annuum* L.) using exogenous application of polyamines (spermidine and putrescine) [J]. *Food Chem*, 2019, 275: 681-687.
- [64] WU C H, CAO S F, XIE K Q, et al. Melatonin delays yellowing of broccoli during storage by regulating chlorophyll catabolism and maintaining chloroplast ultrastructure[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 172: 111378.
- [65] FAN Z Q, WEI W, TAN X L, et al. A NAC transcription factor BrNAC087 is involved in gibberellin-delayed leaf senescence in Chinese flowering cabbage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021: 181.
- [66] DALAL N, SIDDIQUI S, PHOGAT N. Post - harvest quality of sunflower microgreens as influenced by organic acids and ethanol treatment[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(9): e14678.
- [67] PANAHIRAD S, DADPOUR M, PEIGHAMBARDOUST S H, et al. Applications of carboxymethyl cellulose- and pectin-based active edible coatings in preservation of fruits and vegetables: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 110: 663-673.
- [68] 张轶斌, 贾晓昱. 壳聚糖姜精油复合保鲜剂对甜椒贮藏品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(22): 228-232.
- ZHANG Y B, JIA X Y. Effects of chitosan coating enriched with ginger oil on qualitative properties of sweet pepper[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(22): 228-232.
- [69] ABEDI A, LAKZADEH L, AMOUEYDARI M. Effect of an edible coating composed of whey protein concentrate and rosemary essential oil on the shelf life of fresh spinach[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(4): e15284.
- [70] KOWALCZYK D, KORDOWSKA - WIATER M, KAŁWA K, et al. Physiological, qualitative, and microbiological changes of minimally processed Brussels sprouts in response to coating with carboxymethyl cellulose/candelilla wax emulsion[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(8): e14004.
- [71] 毕文慧, 李丽, 姚健, 等. 复配抑菌剂对青椒细菌性软腐病防治及保鲜效果研究[J]. *保鲜与加工*, 2019, 19(6): 8-14.
- BI W H, LI L, YAO J, et al. Prevention and preservation effect of compound antibacterial agent on bacterial soft rot of green pepper[J]. *Storage and Process*, 2019, 19(6): 8-14.
- [72] FAN K, ZHANG M, BHANDARI B, et al. A combination treatment of ultrasound and  $\epsilon$ -polylysine to improve microorganisms and storage quality of fresh-cut lettuce[J]. *Lwt*, 2019, 113: 108315.
- [73] 李长亮, 李翠红, 魏丽娟, 等. 1-MCP和溶菌酶对西兰花的采后保鲜效果[J]. *甘肃农业科技*, 2021, 52(5): 45-49.
- LI C L, LI C H, WEI L J, et al. Effect of 1-MCP and lysozyme on fresh-keeping of broccoli[J]. *Gansu*

- Agricultural Science and Technology, 2021, 52(5): 45–49.
- [74] OLAWUYI I F, PARK J J, LEE J J, et al. Combined effect of chitosan coating and modified atmosphere packaging on fresh-cut cucumber[J]. Food Sci Nutr, 2019, 7(3): 1043–1052.
- [75] MAURYA V K, RANJAN V, GOTHANDAM K M, et al. Exogenous gibberellic acid treatment extends green chili shelf life and maintain quality under modified atmosphere packaging[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 269: 108934.
- [76] EL-HAMAHMY M A M, ELSAYED A I, ODERO D C. Physiological effects of hot water dipping, chitosan coating and gibberellic acid on shelf-life and quality assurance of sugar snap peas (*Pisum sativum* L. var. macrocarpon)[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2017, 11: 58–66.
- [77] WU W J, GAO H Y, CHEN H J, et al. Combined effects of aqueous chlorine dioxide and ultrasonic treatments on shelf-life and nutritional quality of bok choy (*Brassica chinensis*) [J]. Lwt, 2019, 101: 757–763.
- [78] MEMON N, GAT Y, ARYA S, et al. Combined effect of chemical preservative and different doses of irradiation on green onions to enhance shelf life[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2020, 19(3): 207–215.
- [79] SALEMI B, SEDAGHAT N, VARIDI M J, et al. The combined impact of calcium lactate with cysteine pretreatment and perforation-mediated modified atmosphere packaging on quality preservation of fresh-cut ‘Romaine’ lettuce[J]. J Food Sci, 2021, 86(3): 715–723.
- [80] AN R, LUO S, ZHOU H, et al. Effects of hydrogen-rich water combined with vacuum precooling on the senescence and antioxidant capacity of pakchoi (*Brassica rapa* subsp. *Chinensis*) [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 289: 110469.

## Progress in Preservation and Green Protection for Postharvest Green Vegetables

Lin Fan, Wang Liqiang\*

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi 214122)

**Abstract** Green vegetables refer to a group of vegetables that are green in appearance because of their high chlorophyll content. Due to the combined action of enzymes and microorganisms can cause vegetable chlorosis, sensory deterioration, and even decay, resulting in a lot of waste, it is of great importance to study the preservation and green protection technique for postharvest storage of vegetables. In this paper, the mechanisms of chlorosis and decay of green vegetables, the effects of non-thermal physical, chemical, biological and their combination on the quality of vegetables are reviewed. The problems of these technologies are expounded, and the research prospects are prospected.

**Keywords** vegetable; preservation; preserving green; storage