

果蔬茶贮藏与加工过程品质调控研究现状及趋势

赵 靛¹, 田世平², 郜海燕³, 宛晓春⁴, 盛 军⁵, 单 杨^{6*}

¹ 中国农业大学食品科学与营养工程学院 国家果蔬加工工程技术研究中心
农业农村部果蔬加工重点实验室 食品非热加工北京市重点实验室 北京 100083

² 中国科学院植物研究所 北京 100093

³ 浙江省农业科学院食品科学研究所 杭州 310021

⁴ 安徽农业大学 茶树生物学与资源利用国家重点实验室 合肥 230036

⁵ 云南农业大学 普洱茶学教育部重点实验室 昆明 650201

⁶ 湖南省农业科学院农产品加工研究所 洞庭实验室 长沙 410125)

摘要 果蔬茶产业是我国现代农业产业体系和国民经济的重要组成部分,然而存在产后损失大,产品附加值低,综合利用水平不高等问题,制约了产业的高质量发展。实现果蔬茶贮藏加工过程的品质调控,是减损增值的关键。本文综述果蔬茶贮藏加工过程中颜色、香气、滋味、质构和营养品质调控研究现状,提出未来研究的关键科学问题为果蔬茶品质劣变的贮藏生物学基础,绿色贮藏加工技术对果蔬茶品质调控的基础理论,果蔬茶营养物质生物利用度提升和健康效应机理等3个方面,指出多维度解析品质调控机制,绿色加工技术集成创新,多学科交叉与智能化的新方向、新理念、新趋势。本文将为果蔬茶贮藏加工品质调控相关研究和产业高质量发展提供重要理论依据。

关键词 果蔬茶; 贮藏; 加工; 品质调控; 分子机制

文章编号 1009-7848(2024)05-0019-11 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2024.05.002

我国是世界最大的果蔬茶生产国,2022年水果产量超3.13亿t,蔬菜产量超7.99亿t,茶叶产量超334.21万t,分别占全球总产量近28%,52%和50%,均居全球首位^[1]。2020年全国规模以上果蔬茶加工企业4520家,完成主营业务收入5473.2亿元,实现利润总额344.8亿元^[2],果蔬茶及其加工业已成为我国现代农业产业体系和国民经济的重要组成部分。我国柑橘罐头、浓缩苹果汁、番茄浆和绿茶出口量分别占全球的70%,70%,15%和70%^[1]。近年来,柑橘、苹果、番茄等大宗果蔬产业持续发展之余,芒果、辣椒、发酵茶等特色果蔬茶产业规模也逐渐扩大。果蔬茶产业为我国乃至全球食物和营养供给提供了坚实的保障。

同时,我国果蔬茶产业存在产后损失大,产品附加值低,综合利用水平不高等问题,制约了产业

的高质量发展。采后处理不当,冷链体系缺失等问题导致我国果蔬产后损失率高达25%,其中贮藏环节的损失率高达15%,远高于发达国家的平均水平。经不完全估算,2022年我国果蔬损失约2.7亿t,相当于损失约13万t维生素,浪费约1.3亿亩(866.7万hm²)耕地,消耗约4700万t淡水,产生约0.3亿tCO₂当量^[3]。果蔬产后损失不仅造成生产资源的浪费,而且带来环境污染。除了数量上的“显性损失”,高温杀菌、蒸发浓缩、热风干燥等传统加工工艺还带来了“隐性损失”,即果蔬品质劣变和营养素的损失。例如,橙汁浓缩过程造成叶黄素损失约17%,高温杀菌过程造成38%的紫黄质损失^[4]。此外,果蔬茶加工产生的皮、渣、种子等副产物产量大,例如,2019年我国柑橘产量4584.5万t,加工产生的柑橘皮渣副产物可达50%,年产柑橘皮渣超过1300万t^[5];2018年我国茶叶产量264万t,加工产生的茶渣、茶梗等副产物占30%左右,年产茶叶加工副产物约为100万t^[6]。果蔬副产物中富含果胶、类黄酮、类胡萝卜素等营养物质,例如柑橘果皮中叶黄素、玉米黄素、 β -胡萝卜素和番茄红素等天然色素含量为果肉的2.5~15

收稿日期: 2024-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(32330084,32322066);
中国工程院战略研究与咨询项目(2023-XY-25);国家重点研发计划项目(2022YFD2100804)

第一作者: 赵靛,女,博士,教授

通信作者: 单杨 E-mail: sy6302@sohu.com

倍^[5];苹果和柑橘皮渣中含有大量的果胶;葡萄果皮中多酚含量可达50%,籽中可达70%。目前果蔬茶加工副产物综合利用率低,造成资源的严重浪费,显著降低了果蔬茶的营养品质^[7]。此外,多数副产物资源利用主要集中于单一成分,缺乏对其全组分的梯次链式转化利用,直接导致综合利用率不高和资源浪费,严重制约产业的可持续健康发展^[5]。对果蔬茶副产物进行有效的闭环利用,达到绿色加工和副产物高值化利用,是实现“吃干榨净”,可持续发展的有效手段^[7]。

近年来,产地预冷、冷链物流、物理保鲜等绿色贮藏技术不断发展,非热杀菌、节能干燥、高效冷冻、低温提取、生物发酵等绿色加工技术日益创新,是实现果蔬茶及其副产物资源综合利用的关键共性技术,推动了果蔬茶加工业的转型升级。同时,绿色贮藏及加工促进了低碳环保生产技术的工业化发展,使产品开发、生物转换和活性成分的提取过程更加绿色低碳、节能减排^[5,7]。随着消费者生活水平的提高和营养膳食理念深入人心,果蔬茶关键组分的营养与健康功效受到越来越多的关注。果蔬茶产品的颜色、香气、滋味、质构、营养等品质直接影响商品的价值,高品质、高营养型果蔬茶产品已经成为消费者追求和产业发展的新方向。在此背景下,深入研究果蔬茶在贮藏加工过程中的品质调控机制,实现产品品质的定向调控,促进新型食品开发,是满足人民美好生活需要的必然选择,是践行“大食物观”“健康中国2030”等国家战略的重要举措。

1 果蔬茶贮藏与加工过程品质调控研究现状

1.1 颜色调控

颜色是决定果蔬茶及其产品品质的重要因素之一,决定了产品外观以及消费者的选择。花色苷、茶色素等水溶性色素及类胡萝卜素、叶绿素等脂溶性色素赋予果蔬茶缤纷色彩,其中花色苷、叶绿素等易变色素受温度、pH值、光照等因素影响发生降解,导致果蔬茶及加工品颜色劣变,直接影响产品品质和商品价值。提高易变色素贮藏加工过程中的稳定性,最大程度地保留果蔬茶原有的颜色,是目前果蔬茶加工业需要解决的共性问题。

目前果蔬茶颜色调控的主要方法如下:

1) 花色苷稳定性调控。花色苷是以2-苯基苯并呋喃阳离子为基础形成的多羟基或多甲氧基衍生物,属类黄酮化合物,赋予果蔬红、橙、蓝、紫等颜色^[8]。果蔬贮藏及加工过程中温度和酶、氧气、微生物等因素均影响花色苷结构稳定性。花色苷可能的降解途径和降解机制为:①热降解^[9]:黄烺盐正离子→水合生产糖基化甲醇假碱→脱糖开环→查尔酮→裂解为酚酸和醛类物质;②酶降解^[10]:多酚氧化酶/过氧化物酶氧化其它酚类→邻位醌类→邻位醌氧化花色苷为花色苷邻位醌→邻位醌与花色苷醌或花色苷醌间自发聚合→黑色素;③氧化降解^[11]:花色苷结合臭氧/过氧化氢→C环2和3位碳碳键裂解→降解为酚酸和醛类;④肠道微生物降解^[12]:脱去花色苷糖基→ α -二酮→降解生成酚酸和醛类。为减少贮藏加工过程中果蔬花色苷的损失,开发花色苷稳态化调控技术十分重要。

目前,借助分子修饰、分子辅色、封装、花色苷与蛋白质/多糖互作等技术可有效实现花色苷稳态化。分子修饰是通过酰基化、糖基化、甲基化等方法修饰花色苷结构以阻止其发色母核水化转换,从而保持原有颜色^[13]。分子辅色主要包括分子内辅色、分子间辅色、自缔合和金属络合等方式;封装是利用固体颗粒或液体囊泡等载体包埋花色苷以强化其颜色显色度,提高环境稳定性^[14]。近年来,花色苷与生物大分子蛋白质/多糖互作发生静态结合形成非共价复合物,以提高花色苷稳定性,成为研究热点。例如,紫薯蛋白与花色苷通过疏水相互作用形成络合物,显著提高了其中性/酸性、光、高温及紫外线稳定性^[15]。Yang等^[16]发现花色苷与牛血清白蛋白(BSA)间相互作用具有pH值依赖性,pH7条件下矢车菊素-3-O-葡萄糖苷(C3G)与BSA亲和力最强,C3G主要通过疏水相互作用和氢键作用结合到BSA表面^[17]。花色苷与淀粉、环糊精、葡聚糖、果胶等多糖通过非共价力形成配合物以提高花色苷稳定性,包括氢键、静电相互作用(离子相互作用)和疏水相互作用。研究发现超高压技术通过改变淀粉空间结构来调控原生淀粉与花色苷间的相互作用及结合率^[18],有望提高花色苷稳定性。

2) 叶绿素稳定性调控。叶绿素是自然界中分布广泛的天然脂溶性绿色色素。叶绿素的特征分子骨架包括中央嵌有镁离子的卟啉环和卟啉环上的植基侧链。影响叶绿素结构稳定性的因素主要有酶、酸、热、光、氧。其降解机制主要有:①酶促降解^[19]:叶绿素酶催化叶绿素脱去植基→脱植基叶绿素→脱镁螯合酶催化脱去卟啉环中心镁离子(Mg^{2+})→脱镁叶绿素→卟啉大环加入两分子氧和四分子氢后裂解→无色初级叶绿素荧光代谢产物。此外在过氧化物酶的作用下,叶绿素 C151 和 C13 位点分别生成内酯和羟基^[20]。②非酶促降解(热、酸、氧): pH 值低于 4 时,叶绿素卟啉环中心的 Mg^{2+} 容易被 H^+ 取代生成褐色的脱镁叶绿素^[19]。在持续加热过程中叶绿素 C13 位点失去甲氧基或发生重排, 分别生成焦叶绿素衍生物或立体异构体^[21]。高氧环境可能促进卟啉大环裂解反应^[22]。

针对叶绿素稳定性差的问题, 主要解决方法有:化学改性、碱处理、复合包埋、叶绿素同分子以及异分子聚集。化学改性是将叶绿素卟啉环中的 Mg^{2+} 替换为 Cu^{2+} 以生成叶绿素的铜络合物^[23]。碱处理法是利用碱中和酸体系, 以防止叶绿素在酸性条件结构被破坏^[24]。复合包埋借助亲水载体, 如乳液、凝胶等负载叶绿素来提高叶绿素的稳定性^[25]。叶绿素同分子聚集指高浓度下, 基态、基态-激发态叶绿素单体通过静电力自聚集, 显著增强叶绿素的稳定性(达低浓度的 323.92%)^[25]; 异分子聚集是叶绿素与 β -胡萝卜素等异分子间通过共轭烯炔链与叶绿素卟啉环及弯曲的植基产生大面积范德华作用, 以维持聚集体稳定性, 同时不影响组分的呈色特性。叶绿素与天然生物大分子蛋白质/多糖互作形成非共价复合物同样可以提高其稳定性, 是目前研究热点。Cao 等^[26]发现高压下大豆分离蛋白结构重排导致叶绿素/大豆分离蛋白的相互作用增强, 显著提高叶绿素稳定性。低浓度叶绿素主要通过其卟啉环上的酮基和酯基与蛋白质形成氢键相互作用。叶绿素浓度较高时, 其植基通过疏水相互作用深入大豆分离蛋白的内部。目前花色苷/叶绿素与蛋白质互作研究集中于非特异性结合和简单物理包埋, 对花色苷/叶绿素保护效果有待提高。通过量子化学计算模拟筛选匹配结合程度高的组分分子, 有目的地设计空间匹配性和

特异性较强的互作系尤为必要。此外, 色素-大分子络合物结构与色素稳定性间的构效关系亟待挖掘。

1.2 香气调控

果蔬茶独特的香气属性由其特征香气物质的种类、含量和组成比例决定^[27-29]。香气物质在成熟过程中形成, 主要包括醛类、酯类、酮类、醇类、乙炔类和含硫化合物等, 能赋予果蔬茶花香、果香、甜香、清香、酯香等特征香气^[3]。香气物质一般热敏性强, 不稳定, 高温下易发生美拉德、脂肪酸氧化降解、类异戊二烯氧化降解、硫胺素热降解、酚酸热脱羧等反应, 使其特征香气物质发生逸散、分解或聚合。

近年来, 负离子、非热、发酵、微胶囊、香气回填等技术常用于保持或增强风味。负离子技术是一种利用空气中的负离子及所产生的臭氧进行保鲜的方式。Zhang 等^[30]通过负离子处理香菇, 可提高脂肪氧化酶和氢过氧化物裂解酶活性, 促进 C8 香气化合物的合成, 同时促进亚油酸和亚麻酸的积累, 延缓脂肪酸代谢, 提高醇类和醛类香气物质的含量, 有效保持香菇的香气品质。超高压技术是一种非热加工技术, 处理温度低, 可通过促进特征香气形成, 减少热敏性香气降解和抑制热异味产生等 3 条途径有效保持香气品质。Zhao 等^[31]研究发现 20% CO_2 协同 600 MPa 超高压处理 3 min, 与高温加工相比, 可提高黄瓜汁中脂肪氧化酶保留率 22.0%, 使反、顺-2,6-壬二烯醛, 反、顺-3,6-壬二烯-1-醇和顺-6-壬烯醛等 C9 特征香气成分提高到 20.4%。Cao 等^[32]发现 500 MPa 超高压处理 10 min, 与热加工相比, 可以减少热敏性香气降解, 使草莓汁、苹果汁中 2,5-二甲基-4-甲氧基-3(2H)呋喃酮(呋喃酮甲醚)、乙酸丁酯、乙酸己酯等热敏性香气成分保留率提高达 56.7%。此外, Liu 等^[33]发现 600 MPa 超高压处理 1 min, 与高温短时处理相比, 可使芒果汁中二甲基硫醚和丙酮等热异味成分分别降低 96.1% 和 86.9%, 抑制了热异味的产生。然而, 并非所有非热加工技术均能实现风味的保持, 而且对于不同果蔬适用的香气调控技术也存在差异。例如, 辐照处理会引起以不饱和脂肪酸为前体的 C6-C9 醇、酮和醛等异味物质产生^[14], 不适宜对不饱和脂肪酸含量高的热敏性果蔬进行

辐照加工。综上,虽然非热加工技术是保留果蔬风味的重要手段,但部分理论和应用研究还不够全面和深入,限制了非热加工对风味品质的精准调控。

1.3 滋味调控

果蔬茶的滋味主要包括甜、酸、苦、鲜、涩等,其物质基础为可溶性糖、有机酸、咖啡因、游离氨基酸、单宁、酚类物质等。滋味物质的含量、比例和存在形式影响果蔬茶的整体风味。滋味物质易受贮藏加工的影响而发生改变,主要包括①酶促反应:果蔬组织在加工过程中受到损伤,破坏了氧化-还原偶联反应的平衡,如儿茶素等酚类滋味化合物经多酚氧化酶、过氧化物酶催化形成醌类化合物,产品滋味品质下降^[34];②非酶促反应:如果蔬茶中单宁物质的酚羟基(-OH)与氧气发生反应,形成更为稳定的环氧化物并发生聚合,就会导致单宁结构改变,涩味下降。另外,果蔬茶中的可溶性糖与蛋白质或氨基酸发生美拉德反应生成糖基化蛋白、糖酮等褐色物质,增加苦味^[35-36]。综上,在加工及贮藏过程中控制温度、酶活性、氧气含量等条件,对调控果蔬茶的滋味品质具有重要意义。

近年来,酶解、发酵、干燥、包埋、非热等技术常用于保持或增强滋味。以干制加工为例,传统的干燥方式,如自然干燥、热风干燥等对果蔬茶的原有滋味物质造成不同程度的影响^[37]。目前研究中常采用超声波、超高压及高压脉冲电场等技术进行预处理,并与传统干燥或现代冷冻干燥等方式进行多技术融合,有效提高脱水效率,传热传质速率及其细胞通透性,缩短干燥时间,从而起到保持果蔬茶滋味物质的作用,进而提高干制产品的滋味品质^[38]。例如超声(20~40 Hz)辅助真空冷冻干燥制备的草莓片的总酚含量提高23.59%^[39]。超声波(750 W)辅助热风干燥荔枝果实干的多酚保留量达到60%,显著高于热风干燥^[40]。这些物理辅助技术对多酚氧化酶和过氧化物酶活性的抑制以及对溶解氧的消除,降低了酚类物质的氧化,有效保留了多酚含量,达到保持滋味的作用。Zhang等^[41]通过超高压、超声波以及超高压-超声波联合预处理得到的冻干草莓片的滋味评分均高于对照组冻干草莓片。目前产业中,国际高档脱水果蔬大都采用真空冻干技术生产,微波干燥和远红外干燥技术也在少数企业中得到应用^[7]。多数物理场辅助技术

仍处于实验室阶段,对理论和应用研究不够全面深入,限制了对滋味品质的精准调控。

此外,在加工过程中通过物质之间的自身生物学反应或添加外源物质与滋味物质发生相互作用也可以改善滋味品质,一般多用于减轻苦味和涩味。根据外源物质的不同,可以分为以下两种方式:①酶促反应:在茶叶加工中茶叶单宁酶促进酯型儿茶素向儿茶素转化,降低酯型儿茶素含量,减轻茶叶苦涩味^[42];②包埋技术:在苦味产品中,如苦瓜汁、茶饮料等,添加淀粉、环糊精等物质为壁材,通过包埋技术将苦味物质包裹在壁材内部,有效控制苦味感知^[43]。然而,果蔬茶滋味物质组分较多,暂未全面了解滋味物质与其它组分的相互作用机制,在实际贮藏加工过程对滋味物质的调控有限。

1.4 质构调控

质构是决定果蔬口感的关键因素,良好的质构不仅使果蔬更受消费者欢迎,还有助于保持果蔬中丰富的营养成分,延长果蔬的货架期,提高其经济价值。然而,果蔬在贮藏加工过程中极易受到品种差异^[44]、呼吸代谢^[45]、细胞壁降解^[46]、微生物侵染^[47]、乙烯生成^[48]和水分散失等原因的影响,发生软化变质,严重限制其贮藏加工品质和商品价值^[49]。低温贮藏、气体调控、激素调节、生物保鲜等技术常用于保持果蔬质构。低温贮藏能够降低采后生理代谢,推迟后熟衰老进程,延缓质地软化。气调技术是通过提高贮藏环境中CO₂浓度和降低O₂浓度,抑制果蔬呼吸作用,降低对碳水化合物和水分的消耗,减少活性氧和丙二醛对细胞膜的损伤,抑制果蔬质构软化^[50]。NO熏蒸可抑制多聚半乳糖醛酸酶基因表达,减少果胶降解,从而有效延缓果蔬软化^[51]。1-MCP可与乙烯受体竞争性结合,阻断乙烯信号的传导和表达,降低多聚半乳糖醛酸酶和果胶酯酶活性,从而抑制果蔬软化^[52]。采后钙处理能够增强果蔬细胞壁机械强度,保持细胞膜稳定性,可以有效减缓细胞壁的降解和细胞膜的损伤,从而保持果蔬硬度和组织质地稳定。辐照处理可以抑制大蒜、马铃薯等发芽,防止由采后生长和营养转移引起的组织质地松动变软。薄膜包装和涂膜保鲜能够防止果蔬水分散失,使组织细胞保持一定膨压,从而维持组织脆嫩状态。

在加工过程中,调控果蔬质构变化主要包括低温保水、杀菌钝酶等途径^[53]。以鲜切果蔬为例,可通过筛选纤维素和果胶含量高的鲜切适应性品种,延缓质构软化。除此之外,冷激处理则使用低温水减少鲜切果蔬失重率,增加硬度,保持总酚含量和过氧化物酶活性,延缓氧化导致质构变化^[53]。使用紫外处理可以杀灭鲜切果蔬表面的细菌和霉菌,防止微生物分泌胞外酶水解果蔬组织结构,延缓质构软化^[54]。除此之外,高压脉冲电场(PEF)处理能同时对鲜切果蔬杀菌、钝酶的作用。PEF通过强电场作用改变果胶甲酯酶活性位点空间构型,造成果胶甲酯酶失活,降低了果胶去甲基化效率,减缓细胞壁果胶的降解,从而较好地保持果蔬原有的质构^[55]。虽然多种质构保持技术被提出,但是目前单一技术无法达到最佳的质构保持效果,而多技术联用研究较少,耦合机制和作用靶点不明,尚需深入研究。

1.5 营养调控

果蔬茶中富含维生素、矿物质、膳食纤维等人体必需的营养成分,还含有多酚、多糖、萜烯等多种功能性植物化学物,对于维持人体健康至关重要。例如维生素 C 具有抗氧化、预防败血症等作用^[3]。膳食纤维能够调节肠道微生物以及机体代谢^[5]。类黄酮具有抗氧化作用及其它生物活性^[18-19]。《中国居民膳食指南(2022)》建议成人每天摄入蔬菜 300~500 g、水果 200~350 g。目前我国人均水果摄入量约 56 g/d,蔬菜摄入量约 270 g/d,茶叶摄入量不足 2 g/d,远远低于膳食指南推荐量。截至 2020 年国家卫健委数据统计,我国有 3 亿人正遭受“隐性饥饿”,且 70% 的慢性疾病(糖尿病、心血管疾病、癌症、肥胖等)与果蔬食品营养成分摄入缺乏有关^[52]。

果蔬茶中的多酚、类胡萝卜素、维生素 C 等特征性营养因子存在稳定性差、生物利用度低的问题,受贮藏加工过程中的温度、水分、气体组成、能量输入等因素影响大,直接影响产品品质。果蔬贮藏加工营养品质劣变的原因主要包括:采后衰老代谢导致的营养物质内源性降解和转化,热处理或其它能量输入引起营养物质的分解、聚合和氧化,以及过度加工导致的营养物质丢失等。以多酚为例,多酚的分子结构中含有一个或多个芳香环

和至少一个羟基基团,是天然的抗氧化剂,苹果、浆果等的多酚含量可达到 2 mg/g 鲜果,茶叶的多酚含量可达 300 mg/g 干重。多酚的活性和生物利用度与食物基质组成、多酚的结构、多酚与其它成分(蛋白质、脂肪、碳水化合物和纤维)之间的相互作用等有关,更易受到加工方式的影响。果蔬加工中杀菌、干燥、烹饪等过程中的热处理和茶叶加工中萎凋、酶促氧化、微生物发酵等工艺都会导致多酚损失。研究表明,常规高温/短时处理对苹果汁进行巴氏杀菌导致总多酚含量降低 32.3%,而脉冲电场处理的巴氏杀菌仅将其水平降低 14.9%^[56]。与水煮相比,蒸和炸可以保存更多的多酚化合物,这可能与多酚的水溶性有关^[57]。与热风干燥相比,冷冻干燥对多酚的保留率更高,且抗氧化活性更强^[58]。果蔬冷冻过程也会影响其多酚含量和活性,冷冻过程(尤其是慢冻)会因冰晶的形成而损坏果蔬细胞,从而影响多酚的溶出和稳定性。有研究表明慢冻草莓的单体花青素水平低于速冻草莓^[59]。

近年来,越来越多的研究关注于果蔬茶在贮藏加工过程中营养品质的保持和提升。脉冲电场、超高压、高压 CO₂、等离子体等非热加工技术在保持果蔬茶营养品质方面的优势逐渐凸显。例如,利用超高压技术进行果蔬汁加工,在促进维生素 C、酚类等营养物质的释放的同时,也减少了营养物质的热降解,使果蔬汁品质大幅提升^[60-61]。超高压技术还能够靶向激活果蔬中的超氧化物歧化酶(SOD),经过 400~500 MPa 超高压处理 5~20 min, SOD 酶活提高达 41.0%^[62]。这一方面是因为压力导致 SOD 活性位点暴露,有利于底物结合;另一方面是因为压力诱导四聚体形成,增加焓值,提高 SOD 构象稳定性^[63]。此外,借助于分子修饰、微胶囊包埋、纳米化修饰、粉体结构设计等稳态化技术,提高多酚、类胡萝卜素等营养因子在果蔬茶加工以及人体消化吸收过程中的稳定性和靶向性。例如,利用喷雾冷冻干燥技术处理天然酪蛋白胶束,通过冷冻程度调控胶体磷酸钙的解离程度,可以控制多酚类物质在胃肠中的缓慢和爆发式释放,实现多酚类物质的精准释放^[64]。

对果蔬茶加工副产物的综合利用,是减少产品营养品质损失,提高产品营养价值的关键。利用亚临界萃取、膜分离、发酵工程、酶工程等绿色加

工技术从果蔬茶加工副产物中分离、提取、浓缩功能性成分,制成胶囊或添加到食品和保健品产品中,已成为当前果蔬茶加工的一个新趋势。此外,基于肠道微生物宏基因组学与人类营养代谢组学,探索果蔬茶及其副产物功效成分对营养靶向的影响,实现功能因子高通量筛选与绿色制备,功能因子稳态化及靶向递送,已成为保持和提升果蔬茶营养品质的重要途径^[5]。目前,通过非热加工、微胶囊包埋、副产物提取回填等保持和提高果蔬茶营养品质的技术发展较快,然而仍存在加工技术对营养成分生物利用度的影响探索不够,营养品质精准控制难,新技术产业化应用瓶颈等问题,亟需开展深入研究。

2 果蔬茶贮藏与加工过程品质调控的关键科学问题

果蔬茶成分组成复杂,其颜色、香气、滋味、质构、营养等品质受到原料种类、物质组分、贮藏条件、加工技术等多种因素的影响且相互关联,现有的果蔬茶品质变化和调控理论难以全面系统解析这些复杂相互作用,缺乏准确预测贮藏加工过程品质动态变化规律的理论模型,限制了果蔬茶品质的精准调控和新技术的产业化应用。亟需开展深入研究,破解果蔬茶品质劣变的贮藏生物学基础,绿色贮藏加工技术对果蔬茶品质调控的基础理论,果蔬茶营养物质生物利用度提升和健康效应机理三大关键科学问题,为果蔬茶贮藏加工过程品质调控奠定重要的理论支撑。

2.1 果蔬茶品质劣变的贮藏生物学基础

探明果蔬茶采后品质变化的核心物质基础,揭示呼吸衰老等过程调控品质相关物质的合成途径和代谢通路网络,明确基因表达、蛋白酶等内源性因子和环境因素、物理场等外源性因子对果蔬茶品质劣变的影响规律。建立品质劣变的特异标识基因及代谢物谱库,解析调控果蔬营养品质变化与抗性应答的关键节点、信号通路和代谢途径,构建果蔬茶特征品质指纹图谱,利用分子调控网络及环境多维协同实现果蔬品质定向调控。

2.2 绿色贮藏加工技术对果蔬茶品质调控的基础理论

解析新型热加工、非热加工、高效分级、物性

修饰、亚临界萃取、膜分离、发酵工程、酶工程、生物工程等绿色加工技术与节能干燥等低碳制造技术对果蔬茶的理化特征和物质组成的影响,揭示加工介质、能量输入、传热传质等对品质变化的影响规律,明确加工工艺对果蔬茶物质迁移、质构塑造、营养保持等的影响规律及调控机理。解析加工过程中不同组分间相互作用特征,揭示果蔬茶物性品质形成与关键分子的相互关系,建立“原料特性-加工参数-产品品质-副产物利用”可预测模型,构建果蔬茶品质保持的精准调控方法。

2.3 果蔬茶营养物质生物利用度提升和健康效应机理

明确果蔬茶中的关键营养物质,建立营养物质化学结构与生物利用度构效关系,明确营养物质在人体消化吸收代谢过程中的变化规律,建立果蔬茶营养物质稳态化和靶向性提升理论策略。挖掘果蔬茶关键营养物质的功能活性和作用靶点,明确其改善人体健康的代谢通路和分子机制,探索果蔬营养物质的人体感知机制与调控机理,揭示不同营养组分对人体健康的协同作用,基于果蔬茶食品的特征性营养成分设计个性化的健康干预路径。

3 趋势与展望

经济社会发展推动了人类生产方式的变革,随着食品加工的颠覆性技术迅速发展和科学研究的新方法不断涌现,果蔬茶贮藏加工和品质调控相关的研究也不断深入,研究边界不断拓展,研究体系日趋成熟。未来,多维度解析果蔬茶品质调控机制成为新方向,绿色加工技术与集成创新成为新理念,多学科交叉融合与智能化成为新趋势。利用基因组学、蛋白组学、食品组学、肠道微生物宏基因组学、人类营养代谢组学等多组学的靶向和非靶向研究手段,建立宏观物性与微观分子的相关模型,构建果蔬茶品质精准调控网络。非热杀菌、节能干燥、组分重组、生物发酵、生物合成、生物酶法等绿色加工技术的研发集成,将极大地促进果蔬茶产品的品质提升。应用基因编辑技术富集果蔬茶及其副产物中的关键营养组分,使用生物酶法加工技术实现果蔬茶及其副产物中功能营养物质高效靶向提取,利用合成生物学技术实现

果蔬茶营养素的高活性、低成本制备,将为果蔬茶加工带来新的增长点。人工智能、移动互联等信息技术的融合将使果蔬茶在贮藏加工过程中的品质调控更加准确、高效、智能,从单一环节的调控转变为全产业链的一体化智能控制,有效提升果蔬茶产品的品质和稳定性。在科技革新的推动下,果蔬茶产业将迎来高质量发展的新阶段。

参 考 文 献

- [1] 联合国粮食及农业组织. 粮农组织统计数据库[Z/OL]. (2024-03-25)[2024-04-15]. <https://www.fao.org/faostat/zh/#data/WCAD>.
Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT[Z/OL]. (2024-03-25)[2024-04-15]. <https://www.fao.org/faostat/zh/#data/WCAD>.
- [2] 农业农村部乡村产业发展司. 2020年中国农产品加工业经济运行报告[R/OL]. [2024-04-15]. <https://www.baidu.com/link?url=6GV0PxVwEAUQ7tJnQa83hYgtN22NSYTUFBqS8vcQ6pew8yZtTYHWyDy-dTsjhZudFTIxFITiTn2DVMl2SKHhewJtmrZBG37D8hdq6bxts-xmmLUvVGQyHMTIwJngact&wd=&eqid=aca52d970022bde200000002661f979b>.
Rural Industry Development Department of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Report on the economic operation of China's agricultural product processing industry in 2020[R/OL]. [2024-04-15]. <https://www.baidu.com/link?url=6GV0PxVwEAUQ7tJnQa83hYgtN22NSYTUFBqS8vcQ6pew8yZtTYHWyDy-dTsjhZudFTIxFITiTn2DVMl2SKHhewJtmrZBG37D8hdq6bxts-xmmLUvVGQyHMTIwJngact&wd=&eqid=aca52d970022bde200000002661f979b>.
- [3] LIU G. Food losses and food waste in China: A first estimate[J]. OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers, 2014, 66: 1-29.
- [4] GAMA J J T, SYLOS C M D. Effect of thermal pasteurization and concentration on carotenoid composition of Brazilian Valencia orange juice[J]. Food Chemistry, 2007, 100(4): 1686-1690.
- [5] 单杨, 丁胜华, 苏东林, 等. 柑橘副产物资源综合利用现状及发展趋势[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(4): 1-13.
SHAN Y, DING S H, SU D L, et al. Status quo of comprehensive utilization and development trend of citrus by-product resources [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(4): 1-13.
- [6] 孟洋, 陈莉, 卢红梅. 茶叶副产物中的有效成分、功效及综合利用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(5): 207-212.
MENG Y, CHEN L, LU H M. Research progress on active components, efficacy and comprehensive utilization of tea by-products[J]. Food Research and Development, 2020, 41(5): 207-212.
- [7] 单杨. 中国果品加工产业现状及发展趋势[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2012, 30(3): 1-12.
SHAN Y. Present states and developing trend of fruits processing industry in China [J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2012, 30(3): 1-12.
- [8] NURTIANA W. Anthocyanin as natural colorant: A review[J]. Food SciencTech Journal, 2019, 1(1): 1.
- [9] 彭斌, 李红艳, 邓泽元. 食品中花青素在热加工中的降解及其机制研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(10): 3851-3858.
PENG B, LI Y H, DENG Z Y. Degradation of anthocyanins in foods during heating process and its mechanism[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2016, 7(10): 3851-3858.
- [10] TORRES A, AGUILAR -OSORIO G, CAMACHO M, et al. Characterization of polyphenol oxidase from purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L. Lam) and its affinity towards acylated anthocyanins and caffeoylquinic acid derivatives [J]. Food Chemistry, 2021, 356: 129709.
- [11] ÖZKAN M, YEMENICIOĞLU A, CEMEROGLU B. Degradation of various fruit juice anthocyanins by hydrogen peroxide [J]. Food Research International, 2005, 38(8/9): 1015-1021.
- [12] 宋会歌, 刘美艳, 董楠, 等. 食品中花色苷降解机制研究进展[J]. 食品科学, 2011, 32(13): 355-359.
SONG H G, LIU M Y, DONG N, et al. Research progress on degradation mechanisms of anthocyanins in foods[J]. Food Science, 2011, 32(13): 355-359.
- [13] GUO Y Y, ZHANG H, SHAO S, et al. Anthocyanin: A review of plant sources, extraction, stability, content determination and modifications[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(12): 7573-7591.
- [14] TAN C, DADMOHAMMADI Y, LEE M C, et al. Combination of copigmentation and encapsulation strategies for the synergistic stabilization of antho-

- cyanins[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(4): 3164–3191.
- [15] ZHANG R, YE S X, GUO Y, et al. Studies on the interaction between homological proteins and anthocyanins from purple sweet potato (PSP): Structural characterization, binding mechanism and stability[J]. *Food Chemistry*, 2023, 400: 134050.
- [16] YANG P Q, WANG W X, XU Z Z, et al. New insights into the pH dependence of anthocyanin–protein interactions by a case study of cyanidin–3–O–glucoside and bovine serum albumin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 140: 108649.
- [17] ZANG Z, TANG S, LI Z, et al. An updated review on the stability of anthocyanins regarding the interaction with food proteins and polysaccharides[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(5): 4378–4401.
- [18] LI Q, GUO A X, RAO L, et al. Tunable interactions in starch–anthocyanin complexes switched by high hydrostatic pressure[J]. *Food Chemistry*, 2024, 436: 137677.
- [19] 陈文峻, 崩本科. 植物叶绿素的降解[J]. *植物生理学通讯*, 2001, 37(4): 336–339.
- CHEN W J, KUAI B K. Chlorophyll degradation in plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 2001, 37(4): 336–339.
- [20] VERGARA–DOMÍNGUEZ H, ROCA M, GANDUL–ROJAS B. Characterisation of chlorophyll oxidation mediated by peroxidative activity in olives (*Olea europaea* L.) cv. Hojiblanca [J]. *Food Chemistry*, 2013, 139(1/2/3/4): 786–795.
- [21] 张学杰, 蔡同一. 绿色蔬菜在贮存, 加工过程中绿色损失的机制, 途径及其控制[J]. *食品工业科技*, 1999, 20(5): 19–21.
- ZHANG X J, CAI T Y. Mechanism, way and control of green loss in storage and processing[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 1999, 20(5): 19–21.
- [22] GINSBURG S, SCHELLENBERG M, MATILE P. Cleavage of chlorophyll–porphyrin (requirement for reduced ferredoxin and oxygen)[J]. *Plant Physiology*, 1994, 105(2): 545–554.
- [23] VIERA I, PÉREZ–GÁLVEZ A, ROCA M. Green natural colorants[J]. *Molecules*, 2019, 24(1): 154.
- [24] NGAMWONGLUMLERT L, DEVAHASTIN S, CHIEWCHAN N. Natural colorants: Pigment stability and extraction yield enhancement via utilization of appropriate pretreatment and extraction methods[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(15): 3243–3259.
- [25] BEDNARCZYK D, TAKAHASHI S, SATOH H, et al. Assembly of water–soluble chlorophyll–binding proteins with native hydrophobic chlorophylls in water–in–oil emulsions [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)–Bioenergetics*, 2015, 1847(3): 307–313.
- [26] CAO J R, LI F W, LI Y Y, et al. Hydrophobic interaction driving the binding of soybean protein isolate and chlorophyll: Improvements to the thermal stability of chlorophyll[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106465.
- [27] BAINES D, SEAL R. *Natural food additives, ingredients and flavourings* [M]. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd., 2012: 76–99.
- [28] PAYASI A, SANWAL G G. *Biochemistry of fruit ripening*[J]. *Indian Journal of Agricultural Biochemistry*, 2005, 18(2): 51–60.
- [29] GUO X, SCHWAB W, HO C T, et al. Characterization of the aroma profiles of oolong tea made from three tea cultivars by both GC–MS and GC–IMS[J]. *Food Chemistry*, 2022, 376: 131933.
- [30] ZHANG S L, FANG X J, WU W J, et al. Effects of negative air ions treatment on the quality of fresh shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) during storage [J]. *Food Chemistry*, 2022, 371: 131200.
- [31] ZHAO L, WANG Y T, WANG S Y, et al. Inactivation of naturally occurring microbiota in cucumber juice by pressure treatment[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2014, 174: 12–18.
- [32] CAO X M, ZHANG Y, ZHANG F S, et al. Effects of high hydrostatic pressure on enzymes, phenolic compounds, anthocyanins, polymeric color and color of strawberry pulps [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(5): 877–885.
- [33] LIU F, GRAUWET T, KEBEDE B T, et al. Comparing the effects of high hydrostatic pressure and thermal processing on blanched and unblanched mango (*Mangifera indica* L.) nectar: Using headspace fingerprinting as an untargeted approach[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7: 3000–3011.
- [34] SINGH B, SURI K, SHEVKANI K, et al. Enzymatic browning of fruit and vegetables: A review[M]//

- KUDDUS M ed. *Enzymes in Food Technology: Improvements and Innovations*, Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018: 63–78.
- [35] 苏霞, 吴厚玖. 橙汁非酶褐变机制及控制措施[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(7): 148–151.
- SU X, WU H J. Non-enzymatic browning mechanism of orange juice and its control[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2011, 37(7): 148–151.
- [36] 夏晓霞, 薛艾莲, 寇福兵, 等. 枣加工过程中特征香气物质形成机制研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(23): 288–297.
- XIA X X, XUE A L, KOU F B, et al. Formation mechanism of characteristic aroma substances during jujube processing: A review[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(23): 288–297.
- [37] 张雅欣, 李旋, 胡佳星, 等. 水果及其制品滋味特征及调控方法研究进展[J/OL]. 食品科学, (2023–12–19)[2024–04–15]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=uyqeyU9EK6jQe5HRW5BKY_LiumsthisKiKjzpl7yJfXVdqZs9wCcldborx812a1dQQReycnGzMz_W-no40Iiy-D3EcGwf9mqKpBBus7xCP8y41bDe-NboMmEjucZQtfSDQG1G1a2dmkM=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- ZHANG Y X, LI X, HU J X, et al. Review of the research progress of the character, mechanism and regulation of fruit taste[J]. *Food Science*, (2023–12–19)[2024–04–15]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=uyqeyU9EK6jQe5HRW5BKY_LiumsthisKiKjzpl7yJfXVdqZs9wCcldborx812a1dQQReycnGzMz_W-no40Iiy-D3EcGwf9mqKpBBus7xCP8y41bDe-NboMmEjucZQtfSDQG1G1a2dmkM=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [38] 刘杨, 李保国, 程朝辉. 水果真空冷冻干燥的预处理及其联合干燥技术研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2023, 59(6): 113–117.
- LIU Y, LI B G, CHENG C H. Research progress of pretreatment and combined drying technology of vacuum freeze drying of fruits[J]. *Food and Fermentation Science & Technology*, 2023, 59(6): 113–117.
- [39] XU B, CHEN J, SYLVAIN TILIWA E, et al. Effect of multi-mode dual-frequency ultrasound pretreatment on the vacuum freeze-drying process and quality attributes of the strawberry slices[J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 78: 105714.
- [40] CAO X, ISLAM M N, ZHONG S, et al. Drying kinetics, antioxidants, and physicochemical properties of litchi fruits by ultrasound-assisted hot air-drying[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2020, 44(1): e13073.
- [41] ZHANG L H, QIAO Y, WANG C, et al. Impact of ultrasound combined with ultrahigh pressure pretreatments on color, moisture characteristic, tissue structure, and sensory quality of freeze-dried strawberry slices[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(3): e15200.
- [42] 刘淑娟, 杨拥军, 钟兴刚, 等. 降低夏秋茶苦涩味的加工技术研究进展[J]. 茶叶科学技术, 2014(2): 1–3.
- LIU S J, YANG Y J, ZHONG X G, et al. Advances in studies on processing technology for attenuating the bitter and astringency of summer-autumn tea[J]. *Tea Science and Technology*, 2014(2): 1–3.
- [43] SHAO M, LI S, TAN C P, et al. Encapsulation of caffeine into starch matrices: Bitterness evaluation and suppression mechanism[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 173: 118–127.
- [44] CAMPS C. Singular approach to penetrometry by preprocessing of digitized force-displacement curves and chemometry: A case study of 12 tomato varieties[J]. *Journal of Texture Studies*, 2018, 49(4): 378–386.
- [45] BELAY Z A, CALEB O J, OPARA U L. Enzyme kinetics modelling approach to evaluate the impact of high CO₂ and super-atmospheric O₂ concentrations on respiration rate of pomegranate arils[J]. *CyTA – Journal of Food*, 2017, 15(4): 608–616.
- [46] DUAN X W, CHENG G P, YANG E, et al. Modification of pectin polysaccharides during ripening of postharvest banana fruit[J]. *Food Chemistry*, 2008, 111(1): 144–149.
- [47] ZHANG Z Q, CHEN T, LI B Q, et al. Molecular basis of pathogenesis of postharvest pathogenic fungi and control strategy in fruits: Progress and prospect[J]. *Molecular Horticulture*, 2021, 1: 1–10.
- [48] WU W N, NI X Y, SHAO P, et al. Novel packaging film for humidity-controlled manipulating of ethylene for shelf-life extension of *Agaricus bisporus*[J]. *LWT*, 2021, 145: 111331.
- [49] PAN Y W, CHENG J H, SUN D W. Inhibition of fruit softening by cold plasma treatments: Affecting factors and applications[J]. *Critical Reviews in Food*

- Science and Nutrition, 2021, 61(12): 1935–1946.
- [50] ZHU Z W, WU X W, GENG Y, et al. Effects of modified atmosphere vacuum cooling (MAVC) on the quality of three different leafy cabbages [J]. LWT, 2018, 94: 190–197.
- [51] LI G J, ZHU S S, WU W X, et al. Exogenous nitric oxide induces disease resistance against *Monilinia fructicola* through activating the phenylpropanoid pathway in peach fruit [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97 (9): 3030–3038.
- [52] 胡筱, 潘浪, 丁胜华, 等. 1-MCP 作用机理及其在果蔬贮藏保鲜中的应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 304–309.
- HU X, PAN L, DING S H, et al. Research progress on the mechanism of action of 1-MCP and its application in postharvest fruits and vegetables storage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(8): 304–309.
- [53] 徐海山, 丁胜华, 周辉, 等. 采后果蔬软化机制及调控方法研究进展 [J]. 激光生物学报, 2019, 28 (6): 504–512.
- XU H S, DING S H, ZHOU H, et al. Advances in mechanism and regulation methods of postharvest fruits and vegetable softening [J]. ACTA Laser Biology Sinica, 2019, 28(6): 504–512.
- [54] BUTOT S, CANTEGANI F, MOSER M, et al. UV-C inactivation of foodborne bacterial and viral pathogens and surrogates on fresh and frozen berries [J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 275: 8–16.
- [55] GONZALEZ M E, BARRETT D M. Thermal, high pressure, and electric field processing effects on plant cell membrane integrity and relevance to fruit and vegetable quality [J]. Journal of Food Science, 2010, 75(7): R121–R130.
- [56] AGUILAR-ROSAS S F, BALLINAS-CASARRUBIAS M L, NEVAREZ-MOORILLON G V, et al. Thermal and pulsed electric fields pasteurization of apple juice: Effects on physicochemical properties and flavour compounds [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(1): 41–46.
- [57] MIGLIO C, CHIAVARO E, VISCONTI A, et al. Effects of different cooking methods on nutritional and physicochemical characteristics of selected vegetables [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(1): 139–147.
- [58] ABBASPOUR-GILANDEH Y, KAVEH M, FATEMI H, et al. Combined hot air, microwave, and infrared drying of hawthorn fruit: Effects of ultrasonic pretreatment on drying time, energy, qualitative, and bioactive compounds' properties [J]. Foods, 2021, 10(5): 1006.
- [59] SAHARI M A, BOOSTANI F M, HAMIDI E Z. Effect of low temperature on the ascorbic acid content and quality characteristics of frozen strawberry [J]. Food Chemistry, 2004, 86(3): 357–363.
- [60] 胡中海, 孙谦, 龙勇, 等. 水果速冻保鲜技术研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(2): 242–247.
- HU Z H, SUN Q, LONG Y, et al. Advances in research on technology of quick-freezing fruits [J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41 (2): 242–247.
- [61] 赵凤, 梅潇, 张焱, 等. 超高压和热杀菌对枸杞汁品质的影响 [J]. 中国食品学报, 2018, 18(3): 169–178.
- ZHAO F, MEI X, ZHANG Y, et al. Effect of high hydrostatic pressure and heat sterilization on the quality of *Lycium barbarum* juice [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(3): 169–178.
- [62] YANG P Q, RAO L, ZHAO L, et al. High pressure processing combined with selected hurdles: Enhancement in the inactivation of vegetative microorganisms [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(2): 1800–1828.
- [63] HOU Z Q, ZHAO L, WANG Y T, et al. Effects of high pressure on activities and properties of superoxide dismutase from chestnut rose [J]. Food Chemistry, 2019, 294: 557–564.
- [64] 刘野, 赵晓燕, 胡小松, 等. 超高压对鲜榨西瓜汁杀菌效果和风味的影响 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 370–376.
- LIU Y, ZHAO X Y, HU X S, et al. Effect of high hydrostatic pressure on microorganism and flavor of fresh watermelon juice [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 370–376.

Research Status and Trends in Quality Control during the Storage and Processing of Fruit, Vegetable and Tea

Zhao Liang¹, Tian Shiping², Gao Haiyan³, Wan Xiaochun⁴, Sheng Jun⁵, Shan Yang^{6*}

¹College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, National Engineering Research Centre for Fruit and Vegetable Processing, Key Laboratory of Fruit and Vegetable Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing Key Laboratory for Food Non-thermal Processing, Beijing 100083

²Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093

³Food Science Institute, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021

⁴Anhui Agricultural University, State Key Laboratory of Tea Plant Biology and Utilization, Hefei 230036

⁵Yunnan Agricultural University, Key Laboratory of Pu-er Tea Science, Ministry of Education, Kunming 650201

⁶Hunan Agricultural Products Processing Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Dongting Laboratory, Changsha 410125)

Abstract The fruit, vegetable and tea industry is an important part of China's modern agricultural industry system and national economy. However, it faces challenges such as high post-harvest losses, low added value of products, and low levels of comprehensive utilization, which restrict the high-quality development of the industry. Quality control during the storage and processing of fruit, vegetable, and tea is key to reducing losses and increasing value. This article reviewed the current state of research on the control of color, aroma, taste, texture, and nutritional quality during the storage and processing of fruit, vegetable, and tea. It identified key scientific issues from three aspects; The biological basis for the quality deterioration during storage, the theoretical basis for quality control by green processing technologies, and the mechanisms for enhancing the bioavailability and health effects of nutrients. The article pointed out new directions, concepts, and trends in multidimensional analysis of quality control mechanisms, integrated innovation in green technologies of storage and processing, and interdisciplinary and intelligent approaches. This article provided an important theoretical basis for research related to quality control during the storage and processing of fruit, vegetable, and tea and for the high-quality development of the industry.

Keywords fruit, vegetable and tea; storage; processing; quality control; molecular mechanisms