

番茄中功能物质的特性及不同加工方式对其品质的影响

张莉, 马彦霞, 陶兴林, 胡志峰

(甘肃省农业科学院蔬菜研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 番茄是人们餐桌上的美味之一, 受到世界范围内消费者的广泛喜爱。番茄具有很高的营养价值, 除含有常规营养素外, 番茄所含大量具有抗氧化活性的酚类和黄酮类物质于人体健康十分有益, 可以有效预防疾病的发生。番茄水分含量高, 导致采后易变质且鲜食期短, 因此多数需加工后进入市场, 但在加工过程中往往会造成番茄在外观、质地、香气和功能性物质的大量损耗。随着人们生活水平的不断提高, 番茄营养功能类物质在加工过程的大量损耗与人们追求营养健康饮食方式的诉求不符, 因此新式非传统加工方式近年来大量出现, 包括超高压处理、超声处理和脉冲电场处理等。本文系统阐述了番茄中的生物组成成分和活性成分, 根据不同活性成分所具有的潜在益生或预防疾病特性来综合分析番茄的营养特性和益生特性, 并深入探讨不同加工方式对番茄营养品质的影响。

关键词: 番茄; 功能成分; 健康特性; 加工方式; 非热处理方式

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2024)10-0883-11

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2024.10.001

Characteristics of Functional Substances in Tomatoes and the Impact of Different Processing Methods on Their Quality

ZHANG Li, MA Yanxia, TAO Xinglin, HU Zhifeng

(Institute of Vegetables, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: Tomatoes are one of the delicious foods on people's tables and are widely loved by consumers worldwide. Tomatoes have high nutritional value in addition to conventional nutrients, the large amounts of phenolic and flavonoid substances with antioxidant activity in tomatoes are very beneficial to human health and can effectively prevent disease occurrence. The high water content in tomatoes leads to post-harvest spoilage and a short fresh food period, thus mostly need to be processed before entering the market. However, during processing, there is often a significant loss of tomatoes in terms of appearance, texture, aroma, and functional substances. As people's living standards continue to improve, the significant loss of nutritional functional substances in tomatoes during processing contradicts the demand for a nutritious and healthy diet, leading to the emergence of many new non-traditional processing methods in recent years, including ultra-high pressure treatment, ultrasonic treatment and pulsed electric field treatment. In this paper, the biological and active components of tomato are systematically described, and the nutritional and probiotic properties of tomato are comprehensively analyzed according to the potential probiotic or disease-preventing properties of different active components, and the effects of different processing methods on the nutritional quality of tomatoes are deeply discussed.

Key words: Tomato; Functional component; Health characteristic; Processing method; Non-heat treatment

番茄(*Solanum lycopersicum* L.)属茄科植物番茄属, 不仅具有鲜美的味道和多种多样的颜色与形状, 而且因含有丰富的营养物质和酸甜的口感成

为广受大众喜爱的蔬菜和调味品, 是世界上最受欢迎的瓜果和蔬菜之一^[1-3]。根据 FAOSTAT(粮农组织统计数据库)的统计, 目前全球番茄年产量约

收稿日期: 2024-03-19; 修订日期: 2024-08-23

基金项目: 甘肃省重点研发计划资助项目(22YF7NA033); 甘肃省农业科学院重点研发计划资助项目(20203GAAS18); 国家自然科学基金(32060678)。

作者简介: 张莉(1987—), 女, 甘肃张掖人, 助理研究员, 硕士, 研究方向为番茄育种。Email: gaaszl1021@163.com。

通信作者: 胡志峰(1974—), 男, 甘肃陇南人, 研究员, 主要从事茄果类蔬菜育种及栽培等方面研究工作。Email: huzf@gsagr.ac.cn。

为 1.64 亿 t^[4]。过去 50 年中, 全球对番茄产品的需求量由 2760 万 t 增加到 17 100 万 t^[5]。虽然番茄产量巨大且因其优良的风味深受消费者喜爱, 但由于番茄含水量高达 940 g/kg, 在采后极易变质腐烂, 鲜果贮存期较短, 因此 50% 以上的鲜果番茄被加工成不易变质的番茄产品, 如果汁、番茄泥、番茄酱和番茄粉等。番茄在加工过程中往往需要承受高温、高压等处理, 导致番茄风味物质散失、质地变软从而导致番茄价值下降^[6]。

近年来, 越来越多的研究发现番茄不仅味道可口, 而且还具有很高的营养价值, 对人体健康有诸多益处。番茄中含有丰富的碳水化合物、膳食纤维、蛋白质和氨基酸等大部分的宏观营养化合物, 食用后可以为机体提供足够的物质和能量以维持大量代谢反应的进行^[7]。除了基础营养的供应外, 番茄还富含多种生物活性化合物, 如酚类、类黄酮、类胡萝卜素、维生素和糖苷生物碱等^[5], 该类活性化合物使番茄可以作为优质的抗氧化剂在预防人类疾病风险方面有着巨大的潜力, 对诸如肥胖、高血糖和高胆固醇血症、心血管病和癌症的预防能力在大量的体外和体内研究中都得到了证明^[8]。随着人们对于营养和活性物质的偏好和追求, 针对大量活性物质在加工过程中容易出现被破坏或失活的情况, 根据不同活性物质的敏感程度使用适合的加工方式, 最大限度地保留番茄作为抗氧化剂在人类营养中的作用, 对于番茄中活性物质的生物利用具有重要的研究意义。

番茄的加工技术对番茄的营养品质和生物活性的影响巨大, 多种活性物质可能在加工中遭到破坏, 目前番茄的加工方式为机械处理、热处理和非热处理等^[9]。机械处理是传统番茄加工方式, 虽然附加产值较低, 但其使用范围广、技术门槛低, 依然是使用最为广泛的加工手段。机械加工通常不影响番茄中营养物质的含量和活性, 但无法增加番茄的保质期和品质。热加工技术如巴氏杀菌、灭菌和无菌处理已逐渐成为仅次于机械处理的番茄加工手段, 其加工产品附加值高, 具有贮藏久、风味佳等特点, 但在加工过程破坏番茄的风味与营养物质^[10]。传统番茄热加工技术往往会对番茄产品的总体质量和稳定性造成不良影响,

因此对高效的新型非热加工技术的需求日益增长, 以克服感官特性的不良变化, 保留更多的生物活性化合物, 同时在所需的储存期内主要保持产品的微生物稳定性。在过去的 10 年中, 新的非热技术, 如高压(HP)、超声波(US)和高强度脉冲电场技术(HIPEF)已经在食品工业中建立起来^[11], 尽管这些技术仍然不完善, 在安全性、成本控制和实际应用中仍存在诸多难题, 但依然在番茄产业的升级和优化中占据了重要的作用。鉴于此, 我们从番茄中功能物质的特性及不同加工技术方面着手, 系统阐述番茄中的生物组成成分和活性成分, 根据不同活性成分所具有的潜在益生或预防疾病特性, 综合分析番茄的营养特性和益生特性, 并深入探讨不同加工方式对番茄营养品质的影响。

1 番茄主要营养物质

番茄作为在营养膳食消费中具有重要意义的水果蔬菜, 其营养物质含量十分丰富, 按功能上分类, 主要分为生物组成成分和生物活性成分(图 1), 其中多酚类物质是目前公认的番茄主要活性成分, 可发挥抗氧化、抗衰老和抗癌等多种功效, 而其他组成成分如蛋白质和糖苷生物碱类则作为番茄的主要组成成分和活性成分共同发挥作用^[8]。

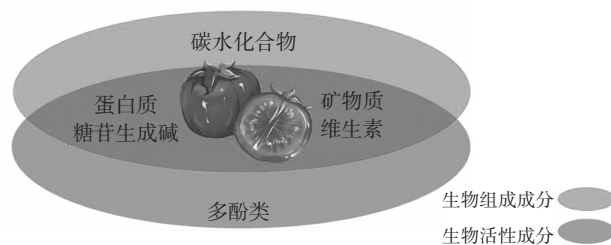


图 1 番茄中的主要组成和功能成分

1.1 生物组成成分

1.1.1 碳水化合物 碳水化合物是番茄的主要组成成分, 主要包括可溶性糖和非可溶性膳食纤维两大部分^[12]。可溶性糖主要是葡萄糖和果糖, 番茄及其相关产品中的碳水化合物, 特别是可溶性糖含量往往对味道和质地有较大影响, 果糖会给人以愉悦感, 是人们食用偏好的控制因素。膳食纤维包含纤维素、半纤维素、木质素和果胶等物质, 在诸多研究中已经被证明对人体消化道有诸多益处, 且非可溶性膳食纤维是构成果肉骨架的

主要成分, 是番茄重要的组成成分。在不同的工业加工阶段, 番茄渣中中性纤维和总糖的平均组成分别为 59.03% 和 25.73%^[13]。

1.1.2 蛋白质和氨基酸 番茄种子作为新鲜番茄的重要组成部分, 具有十分重要的价值。番茄种子中粗蛋白质含量约占 24.5%, 其中谷氨酸和天冬氨酸含量最高^[14]。最近的研究表明, 在番茄种子中发现的蛋白质含量可以与其他植物相媲美, 其含量比例几乎是小麦的两倍, 番茄和以番茄为基础的食物中的特定蛋白质含量占干重 21.9% 以上^[15]。此外, 番茄中的蛋白质显示出对人体健康具有重要作用。例如, 在对金色叙利亚雄性仓鼠进行的实验中发现, 食用含有丰富蛋白质的脱脂番茄种子, 有降低胆固醇的效果^[16]。氨基酸具有多种生物学功能, 包括调节肌肉蛋白质代谢、控制生长和免疫、降低脂肪、提高食物利用率等, 因此在生物生长方面具有重要意义^[17]。据报道, 番茄种子蛋白质中必需氨基酸的比例为 39.5%^[18]。此外, 赖氨酸、组氨酸、天冬氨酸、谷氨酸、精氨酸等亲水性氨基酸和丙氨酸、缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸等疏水性氨基酸的比例分别为 41.6% 和 26.4%, 是番茄生长发育和维持基础功能代谢的物质基础^[19]。

1.2 生物活性成分

1.2.1 多酚类物质 酚类化合物是水果、蔬菜和谷物等植物中发现的主要化学活性成分之一, 其合成是植物在正常发育过程中合成的次生代谢物, 主要是植物应对不良环境如受到伤害、紫外线辐射、热、干旱和盐等胁迫条件的响应, 不属于植物组成的必需部分^[20]。酚类化合物, 又称多酚类, 是人类饮食的重要组成部分, 而番茄果实中总酚含量根据品种不同从 98.00 ~ 230.00 mg/kg^[21], 生番茄中的主要酚类物质可分为类黄酮和酚酸两部分, 其中类黄酮包括芦丁、柚皮素、山奈酚和槲皮素等。柚皮素是合成多种高级类黄酮结构的前体物质, 同时也是糖基化反应的底物, 是酚类化合物合成的重要物质, 有研究发现在热加工过程中, 由于柚皮素的分解或滤出, 总酚类化合物会大量流失^[22]。番茄果实中含有大量的酚类化合物和类黄酮。其中柚皮苷查尔酮 (Naringenin chalcone) 是番茄中含量最多的酚类化合物, 含量达到 3.097

g/kg (干重)。其次是 3-咖啡酰奎宁酸 (3-caffeoylquinic acid) 和槲皮素-3-芦丁苷 (quercetin-3-rutinosid), 分别为 717.00 mg/kg (干重) 和 600.00 mg/kg (干重)。在黄酮类化合物中, 芦丁含量最高 (3.70 ~ 181.16 mg/kg 鲜重), 其次是柚皮苷 (6.50 ~ 11.90 mg/kg 鲜重)、槲皮素 (0.48 ~ 1.41 mg/kg 鲜重) 和杨梅素 (0.17 ~ 2.86 mg/kg 鲜重)^[23]。此外, 番茄中酚类化合物含量最高的是绿原酸, 约为 7.50 ~ 1.3.80 mg / kg 鲜重。酚类物质的含量在番茄的不同部位含量不同, 例如果皮、果肉和种子中存在显著差异, 其中番茄外皮和种子的多酚含量是果肉中的 2.2 倍^[24]。

1.2.2 类胡萝卜素 类胡萝卜素是由植物和微生物合成的脂溶性色素的统称, 是许多水果和蔬菜呈现黄色、橙色和红色的原因^[25]。迄今为止, 已有 750 多种天然类胡萝卜素被鉴定, 然而在人类血液和组织中却只发现了 20 种^[26]。类胡萝卜素在结构上可分为环状类胡萝卜素和线性类胡萝卜素两大类, 环状的类胡萝卜素包括 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素, 而线性的类胡萝卜则统称为番茄红素, 如叶黄素、玉米黄质和 β -隐黄质等^[27]。类胡萝卜素是具有抗氧化特性的植物化学物质, 是维生素 A 的重要膳食来源。类胡萝卜素与人类健康有关, 在功能上可以与其他抗氧化剂协同保护细胞和组织免受氧化损伤, 当存在于人类饮食中时, 这些生物活性化合物可作为心血管疾病预防剂、抗癌剂和免疫系统调节剂^[28]。由于类胡萝卜素对人体健康的重要作用, 番茄加工时建议采摘后立即提取或进行适当保存, 以减少损失^[25]。

1.2.3 番茄红素 番茄红素是类胡萝卜素家族中的一种, 主要由植物合成, 定位于染色体中的天然色素。它是成熟番茄中最丰富的类胡萝卜素, 占类胡萝卜素总量的 80% ~ 90%^[29]。因为人体无法合成类胡萝卜素, 因此通过饮食摄取成为人体获得番茄红素的最佳途径, 而番茄和番茄制品由于其含量高且天然无害, 提供了人体 85% 的番茄红素需求量^[30]。不同部位的番茄红素含量差异较大, 在成熟果实中番茄红素的浓度为 31.00 ~ 77.00 mg/kg, 且具有较高的生物活性^[31]。在结构上, 番茄红素是一种脂肪族烃, 具有 11 个碳碳共轭双键, 这赋予了它独特的红色, 使其具有脂溶性。番茄红

素是一种多不饱和直链分子，光、化学反应和热都能诱导番茄红素产生顺反异构化^[32]。制药、化妆品和食品行业对番茄红素的需求量都很高，从番茄中获得天然番茄红素由于在加工过程中存在损失，市售价格昂贵，因此需要优化加工条件，提高番茄红素的提取率，具有十分重要的意义。

1.3 矿物质和维生素

番茄中含有大量的矿物质和维生素，因此可以作为人体微量营养素的重要来源，包括维生素 A、B、E 以及钾、钠、镁、硫等矿质元素^[33]。新鲜番茄中最丰富的矿物质是钾 (237 mg/kg)，其次是磷 (24 mg/kg)、镁 (11 mg/kg) 和钠 (5 mg/kg)。此外在番茄加工的废弃物中也包含丰富的矿物，其中钾元素在番茄废弃物中的含量最高，达到 2 238 mg/kg，其次是硫、镁、钠，分别依次为 135、134、132 mg/kg^[34]。

番茄还是食物中维生素 C 含量最高的水果蔬菜之一，维生素 C 具有水溶性并可以贮存在体内，是人类维生素 C 最重要的来源。维生素 C 的生物活性高度依赖于番茄的基因型、品种、果实发育和环境条件等因素，新鲜番茄中维生素 C 的含量介于 80 ~ 163 mg/kg (鲜重)，并具有高生物活性^[35]。维生素 C 作为一种有效的抗氧化化合物，表现出许多与健康相关的作用。维生素 E 是一种脂溶性化合物，由不同的化学结构组成，包括 4 种生育酚 (α-, β-, γ-和δ) 和 4 种生育三烯醇 (α-, β-, γ-和δ)^[36]。α-生育酚作为人类血浆中存在的唯一形式的维生素 E，被定义为维生素 E 膳食摄入量中的标准物质。由于人体缺乏合成维生素 E 的能力，维生素 E 在日常饮食中非常重要^[37]。

1.4 脂肪酸

脂肪主要存在于番茄果皮和种子中，新鲜番茄的总脂肪重量约为 0.200 g/kg，而番茄渣中脂肪含量丰富，番茄种子中脂肪含量约为 120 ~ 180 g/kg，且其含油量约为 20%^[38]。番茄果皮和种子中脂肪酸的组成与低亚麻酸豆油相似，番茄中大约 75% ~ 85% 的脂肪可以很容易地用溶剂提取^[39]。番茄废弃物中脂肪酸含量最多的是不饱和脂肪酸，约为 77.04%；饱和脂肪酸占比为 22.72%。此外，番茄中存在的主要脂肪酸是亚油酸，占总脂肪的 51.91%；其次是油酸和棕榈酸，分别占 18.5% 和

16.32%^[40]。而番茄废弃物中多不饱和脂肪酸 n-6 : n-3 的比值为 12.56 : 1，处于相对适中的比例，对人体健康有益^[40]。

1.5 糖苷生物碱类

糖生物碱常指茄科植物的次生代谢物，可形成番茄碱和茄碱两种化合物，这些代谢物的主要功能是保护植物，并可在动物和人类中发挥重要作用^[41]。番茄碱主要由 α-番茄碱和脱氢番茄碱组成，主要存在于未成熟番茄中 (500.00 mg/kg 鲜重)，而红果番茄中这些化合物的含量较低 (5.00 mg/kg 鲜重)。相反，成熟的番茄含有更高水平的番茄皂苷 A，含量达到 90.00 ~ 530.00 mg/kg 鲜重^[42]。此外，也有研究表明品种和农艺条件等因素会影响番茄果实中 2 种糖生物碱化合物的含量。

2 番茄对人体健康的影响

越来越多的研究证明食用番茄对人体的健康有益，例如食用番茄和番茄制品可以降低患心血管疾病和各种癌症的比例，这些有益的特性归功于类胡萝卜素和酚类化合物的抗氧化活性。番茄种子中的低聚糖对健康有益，可以改善肠道菌群的失调，而番茄素则可以预防结肠癌 (图 2)。不同的活性物质在膳食中起到不同的作用，共同增进人体健康。

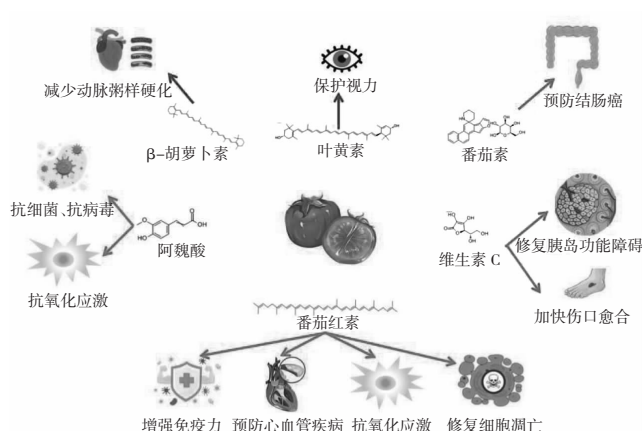


图 2 番茄功能成分的健康益生作用

2.1 类胡萝卜素的抗氧化特性

氧化损伤是造成人体多种慢性疾病的罪魁祸首，体内自由基，或其他活性氧或含氮物质会引起严重的氧化损伤^[43]。由于自由基稳定性低，在细胞空间的时空分布复杂，参与的反应范围广，使相关研究成为生物学中最动态、最复杂的领域之一。饮食因素，如矿物质、维生素、多酚和类

胡萝卜素的摄入被认为对氧化应激引起的疾病具有预防作用。而番茄中含有多种植物化学活性物质, 包括类胡萝卜素、生育酚、类黄酮和氨基酸等均具有抗氧化能力, 具有发挥抗氧化的潜力^[8]。

番茄红素具有高度不饱和的脂肪烃结构, 具有一系列独特的生物活性。番茄红素最重要的特性之一就是就是可有效地灭活自由基, 如过氧化氢、二氧化氮、硫和磺基自由基以及具有高度破坏性的羟基自由基、脂质过氧自由基和单线态氧等^[44]。有研究表明, 每天食用番茄产品可以显著减少 Fe²⁺ 处理对 DNA 的损伤, 并提高对紫外线和过渡金属离子的抵抗力^[45]。此外, 番茄红素的抗氧化作用可以通过其他生物活性化合物的存在而增强, 如类胡萝卜素和维生素, 因为它们具有协同抗氧化活性, 番茄红素与其他生物活性化合物的相互作用之间的关系是目前番茄抗氧化活性研究的热点领域。

2.2 食用番茄与心脏健康

心血管疾病(CVD)是一类疾病的总称, 最常见的是冠心病和中风, 在世界范围内造成很高比例的死亡。导致心血管疾病的主要因素是肥胖、高血压、高胆固醇、缺乏运动和吸烟等^[46]。心血管病发生的危险因素包括可改变和不可改变的两类, 其中可改变的危险因素受代谢和生活方式的影响, 而食用具有生物活性的营养物质有助于减少心血管疾病的发生^[47]。番茄及其制品由于其抗氧化和抗炎机制而对心脏具有保护作用^[48], 这一领域需要更多的研究来证实。

2.3 食用番茄与肿瘤的预防

许多关于人类、动物和细胞的研究都致力于癌症预防。一些植物化学物质包括类胡萝卜素, 被认为是可以减少癌症风险的因素^[49]。在癌症预防方面, 类胡萝卜素的癌症预防作用研究主要集中在番茄红素^[50]。肺癌是最常见的癌症, 占癌症确诊病例总数的 13%, 其次是乳腺癌、结肠直肠癌和前列腺癌。番茄红素的抗肿瘤作用已经在了一项对香烟烟雾的研究中得到了证实, 其结果表明高剂量和低剂量番茄红素均能抑制细胞鳞状化的发生率^[51]。另外一项针对 332 名肺癌患者和 865 名对照组患者的流行病学研究表明, 摄入 3 种类胡萝卜素 (β -胡萝卜素、 α -胡萝卜素和叶黄

素)组合最高的人患肺癌的风险最低^[52]。此研究还表明, 除了番茄红素, 番茄的其他成分也可能对肺癌有保护作用^[52]。

有研究发现, 西方偏好的饮食习惯(橄榄油、红酒和番茄)与结直肠癌的发生呈现负相关, 而番茄被认为是这种饮食习惯的关键因素^[53]。而另一项关于番茄和胡萝卜汁对胃肠官腔影响的研究中发现, 在饮用含有类胡萝卜素和番茄红素的果汁 14 d 后, 在粪便中检测到类胡萝卜素水平的增加, 同时可以改变结肠癌发生的相关进程, 降低发病率^[54-55]。

3 不同加工方式对番茄品质的影响

番茄的加工包括多个步骤, 根据最终产品主要有番茄罐头、番茄酱汁、果汁和调味沙拉酱等。目前加工番茄中常用的工艺有机械处理、热处理和非热处理等, 由于机械处理对番茄保质期增加较小, 且对营养几乎无影响, 因此主要讨论热处理和非热处理导致番茄营养成分和生物利用度的变化(图 3)。

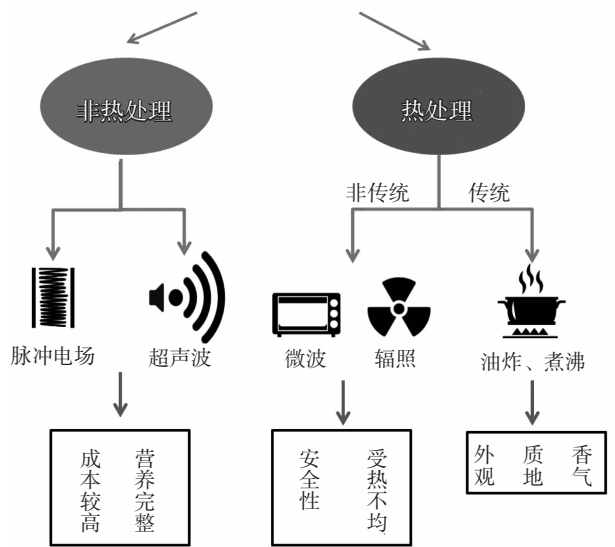


图 3 不同处理方式对番茄品质的影响

3.1 热处理对番茄营养的影响

传统的热加工对番茄制品主要在延长保质期和提高食品安全质量等方面发挥作用。在大多数情况下, 依赖于高温的方法有不同的用途, 如灭活微生物和酶, 改变番茄外观以及增加番茄产品的浓度。常用的油炸或煮沸等处理方法, 可能使番茄在外观、营养、感官和成分特性方面发生改

变,例如热处理会使造成番茄材料中 35%~78% 槲皮素结合物损失,而黄酮醇则会被降解,然后进一步分解到沸水中。热处理对番茄制品中活性成分的影响因温度的不同而不同^[56]。热加工过程中对番茄中总酚含量的影响在不同的研究中存在争论,有研究发现,将番茄匀浆加热到 88 °C 并维持 30 min 后,总酚含量并有发生变化^[57]。而其他研究发现,经过热处理的番茄泥中的酚含量发生了变化,这主要是由于番茄基质中的酚类化合物在整个过程中被释放出来,所以番茄汁中的总酚类化合物增加^[6]。

在工业加工过程中,加热会影响番茄和番茄制品的质量,包括颜色、粘度和风味都会有所改变^[58]。关于颜色方面的变化,主要是由于色素降解和美拉德反应,同时可以造成抗坏血酸降解。在 60~120 °C 条件下加热 1~6 h 后,番茄泥的红色强度显著下降,这是由于强热处理造成番茄红素分解并形成美拉德反应产物^[59]。此外,由于番茄红素可以分解植物细胞的纤维素结构,因此适当加热有助于通过提高番茄红素的生物利用度来灭活相关酶以保持番茄汁的颜色。因此,为了提高番茄红素在番茄制品中的颜色和生物利用度,适当加热是在应用非热处理方法之前需要考虑的一个重要预处理步骤^[60]。

有研究证实,传统的巴氏杀菌法会使番茄泥的粘度大大降低^[61]。低粘度的番茄产品无法在悬浮液中保留其固体部分,导致了果肉和果清分离,可以通过热冷交替处理来灭活果胶酶以克服这个问题。尽管高温处理可以通过使果胶酶失活而增加番茄汁的稠度,但另外一些研究报告发现高温使可溶性果胶从细胞壁中渗出,而溶出的果胶则由于长时间加热而变性造成粘度降低^[62]。

温度升高对番茄挥发性气味化合物有很大的影响。热处理会改变新鲜番茄中一些典型化合物包括饱和与不饱和 C₆ 醛、酯、酮和类胡萝卜素类的含量。番茄泥经过 60 °C 的热处理后 2-甲基-2-丁烯醛和 1-庚烯-3-酮的含量增加,这会导致番茄煮熟后散发出类似茶的气味^[63]。还有研究发现冷歇期和热歇期番茄汁的挥发性成分存在差异,后者的挥发性成分含量较低,而这些差异在番茄的浓缩过程中造成番茄风味的改变,进一步说明了

温度可以改变挥发性化合物的组成^[64]。

微波加热可作为一种常规热加工的替代方法以提高番茄汁的质量、营养品质和保质期。微波加热能够从食物基质内部产生热量,这是任何传统加热方法都无法做到的^[65]。事实证明,与传统加热技术相比,微波处理速度更快,能够更好地保持番茄的质量和营养特性(特别是维生素的保留)^[66]。研究表明,与传统热加工的番茄汁相比,微波加工的番茄汁具有更高的抗坏血酸、总类胡萝卜素和番茄红素含量。微波加热最重要的问题之一是温度分布不均匀,这可能会影响食品的安全和质量^[67]。微波处理在更短的处理时间内进行热杀菌,同时赋予产品更高的抗氧化生物活性,可以提供一种物化性质和微生物特性更稳定的番茄产品。

3.2 非热加工对番茄营养品质的影响

传统的非热加工手段如切割、均质和剥皮等步骤,往往会导致鲜切番茄组织暴露在空气中从而影响其抗氧化成分。此外,消费者在直接食用番茄时往往喜欢去掉番茄果实的特定部分,如果皮、花萼和种子等,该过程同样会对品质造成影响,同时浪费果皮和种子中的黄酮和酚类物质。因此目前出现了一系列富含科技含量的新型非热加工手段,已经成为一种潜在的替代热处理的加工方式,包括超高压、超声和电磁脉冲处理等手段,该类非热加工方法加工过程温度低,能源利用率高,具有能够保持番茄的色、香、味不变且保持较高的生物活性,同时杀灭腐败微生物和降低相关酶活等特点^[68]。

3.2.1 超高压处理(High pressure processing, HPP)

HPP 是一种利用水作为媒介传递 100~900 MPa 压力用以灭活微生物和相关酶来保存食物的技术。研究表明,与传统热处理和未加工的番茄制品相比,HPP 改善了番茄制品的颜色特性^[3]。HPP 对番茄产品营养和感官特性的影响已被广泛研究,并被证明有助于提高食物的营养物质、抗氧化活性和风味特性。与热加工的番茄泥相比,HPP 加工的番茄泥中维生素 C 含量明显更高^[69]。另外一项研究发现,当番茄泥在高温及 400 MPa 的压力下加工时,类胡萝卜素含量显著下降,而样品经过 600 MPa 处理后,类胡萝卜素含量比未经处理

组增加了 172%^[70]。此外, HPP 在 100 ~ 600 MPa 时已被证明能提高番茄汁和番茄泥中番茄红素的提取率。同时, HPP 具有激活细胞释放多种营养物质的能力, 但单独的高压处理可能存在一定的风险, 部分微生物孢子的抗性压力达到 1 200 MPa^[71]。

3.2.2 超声处理(Ultrasonic processing, US) 人类听觉的阈值为 16 kHz, 使用大于该值的声波产生的能量来处理番茄是一种新型的非热加工手段^[72]。US 灭活微生物的机理是通过物理(空化、机械效应和微机械冲击)或化学(由于声化学反应而形成自由基)手段来实现的, 该技术被认为是一种十分具有应用前景的新型非热技术, 可产生广泛的效益, 其特点在于更高的产品获得率, 更短的加工时间, 更简单的操作和更低维护成本, 同时可以改善番茄的口味, 质地, 风味和颜色, 并在较低的温度下减少病原体^[73]。据报道, US 处理番茄汁可以通过减小番茄汁的粒径使 PME 酶和 PG 酶失活来提高其流变性能, 同时有效保持番茄汁的均一性^[74]。US 处理可以使番茄汁的亮度、红度、黄度值均下降, 总色差增加, 从而改变番茄汁的颜色。不过, 有研究发现 US 处理(20 kHz, 脉冲持续时间 5 s 开和 5 s 关/30 ~ 40 °C 保持 2 min)会降解番茄汁中 30%~40%的抗坏血酸。US 加工过程中对微生物的杀伤机制主要是造成细胞壁的破裂、细胞膜的破坏和变薄以及通过自由基的产生和局部产热造成 DNA 损伤。当 US 在适当品质方面具有很大的潜力^[75]。

3.2.3 脉冲电场处理(Pulsed electric field processing, PEF) 脉冲电场技术是将短的高功率电脉冲(ms 或 μs)传递到位于电极之间的产品当中。在 PEF 处理过程中, 施加高电压会使样品中的微生物失活, 同时对食品品质造成最小的不利影响^[76]。脉冲电场处理的典型系统包括 PEF 发生器(由高压发生器和脉冲发生器组成)、处理室、产品处理系统, 监测和控制装置。中等强度脉冲电场(MIPEF)和高等强度脉冲电场(HIPEF)处理都可以应用于食品工业, 其中 HIPEF 技术(20 ~ 80 kV/cm, 1 ~ 10 μs 短脉冲)已被广泛研究作为传统热处理的替代方法^[77]。由于它能使微生物和酶失活, 同时保持液体食品的营养质量、抗氧化活性和新鲜度, 因此其应用越来越受到关注。有研究报道, HIPEF 处

理(40 kV/cm, 57 μs)番茄汁可通过控制酶活达到比热处理更有效地保存番茄的颜色口味。此外, HIPEF 可使番茄汁中超过 80%的 PME 酶失活, 同时可以显著的增强番茄汁的粘度^[78]。

除了 HIPEF 技术外, 中等强度脉冲电场(MIPEF)技术在食品工业中也收到越来越多的关注。与 HIPEF 处理相比, 在 MIPEF 中使用的电压水平较低(小于 2 kV)。研究发现 MIPEF 处理(1 kV/cm, 4 μs)番茄显著增加了番茄汁中类胡萝卜素化合物的含量, 包括叶黄素、 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素、反式番茄红素, 而这一变化归因于 MIPEF 诱导的应激反应增强了代谢物的产生^[79]。

4 小结及展望

随着人们生活水平的不断提高, 番茄的营养价值及生物功效在未来将越来越多地受到关注, 番茄作为具有抗氧化活性的健康食品, 其膳食机理及在预防和改善代谢类疾病的具体调控机理方面的研究尚有许多空白, 全面的了解番茄的营养组成和活性成分是研究其功能的前提。确定番茄在营养方面潜力的活性化合物并如何在加工过程中保留其功能成分成为另外一个研究热点, 传统热加工被认为对番茄的营养品质破坏极大, 主要表现在多酚类和黄酮类物质的损耗, 如何改善热加工工艺以减少损耗, 可以大大地提高番茄产品的附加值, 同时有益于消费者的健康。其次, 一些非传统的热加工技术有着独特的优势, 如何进一步保证其安全性和可靠性在未来的研究中有着广阔的前景。

参考文献:

- [1] 闫文涛, 米兴旺, 李 波, 等. 不同保水剂对戈壁日光温室基质栽培番茄生长和产量及品质的影响[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(4): 342-348.
- [2] 权建华, 孙铭若, 冯丽玲, 等. 苗期低温胁迫对番茄生长及果实畸形发生的影响[J]. 寒旱农业科学, 2022, 1(1): 78-82.
- [3] 吴崇义, 王小锋, 何强强, 等. 泾河川区塑料大棚蔬菜主要栽培模式[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(9): 875-878.
- [4] SZABO K, CATOI A-F, VODNAR D C. Bioactive compounds extracted from tomato processing by-products as a source of valuable nutrients[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2018, 73: 268-277.

- [5] WANG C, LI M, DUAN X, et al. Phytochemical and nutritional profiling of tomatoes; impact of processing on bioavailability—A comprehensive review[J]. *Food Reviews International*, 2022, 39(8): 5986–6010.
- [6] JAYATHUNGE K G L R, GRANT I R, LINTON M, et al. Impact of long-term storage at ambient temperatures on the total quality and stability of high-pressure processed tomato juice[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015, 32: 1–8.
- [7] SONMEZ S, CITAK S, SONMEZ I, et al. Evaluation of mineral contents of greenhouse plant wastes in Antalya Region[J]. *Asian Journal of Chemistry*, 2008, 20: 4739–4748.
- [8] FRAGA C G, GALLEANO M, VERSTRAETEN S V, et al. Basic biochemical mechanisms behind the health benefits of polyphenols[J]. *Molecular Aspects of Medicine*, 2010, 31: 435–445.
- [9] HAYES W A, SMITH P G, MORRIS A E. The production and quality of tomato concentrates[J]. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 1998, 38: 557–564.
- [10] PENG J, TANG J, BARRETT D M, et al. Thermal pasteurization of ready-to-eat foods and vegetables: Critical factors for process design and effects on quality [J]. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 2017, 57: 2970–2995.
- [11] RAWSON A, PATRAS A, TIWARI B K, et al. Effect of thermal and non thermal processing technologies on the bioactive content of exotic fruits and their products: Review of recent advances [J]. *Food Research International*, 2011, 44: 1875–1887.
- [12] BAXTER C J, CARRARI F, BAUKE A, et al. Fruit carbohydrate metabolism in an introgression line of tomato with increased fruit soluble solids[J]. *Plant & Cell Physiology*, 2005, 46: 425–437.
- [13] PALOMO I, CONCHA-MEYER A, LUTZ M, et al. Chemical characterization and antiplatelet potential of bioactive extract from tomato pomace (byproduct of tomato paste)[J]. *Nutrients*, 2019, 22(11): 456.
- [14] PERSIA M E, PARSONS C M, SCHANG M, et al. Nutritional evaluation of dried tomato seeds[J]. *Poultry Science*, 2003, 82: 141–146.
- [15] KAUR D, WANI A A, OBEROI D P S, et al. Effect of extraction conditions on lycopene extractions from tomato processing waste skin using response surface methodology[J]. *Food Chemistry*, 2008, 108: 711–718.
- [16] SHAO D, BARTLEY G E, YOKOYAMA W, et al. Plasma and hepatic cholesterol-lowering effects of tomato pomace, tomato seed oil and defatted tomato seed in hamsters fed with high-fat diets[J]. *Food Chemistry*, 2013, 139: 589–596.
- [17] D'ESTE M, ALVARADO-MORALES M, ANGELIDAKI I. Amino acids production focusing on fermentation technologies—A review [J]. *Biotechnology Advances*, 2018, 36: 14–25.
- [18] SARKAR A, KAUL P. Evaluation of tomato processing by-products: A comparative study in a pilot scale setup [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2014, 37: 299–307.
- [19] ZHANG Y, PAN Z, VENKITASAMY C, et al. Umami taste amino acids produced by hydrolyzing extracted protein from tomato seed meal[J]. *Lwt—Food Science and Technology*, 2015, 62: 1154–1161.
- [20] LIMESTAD R, VERHEUL M. Review of flavonoids and other phenolics from fruits of different tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2009, 89:1255–1270.
- [21] P. BRAT, S. GEORGE, A. BELLAMY, et al. Daily polyphenol intake in France from fruit and vegetables [J]. *The Journal of nutrition*, 2006, 136: 2368–2373.
- [22] GEORGE S, TOURNIAIRE F, GAUTIER H, et al. Changes in the contents of carotenoids, phenolic compounds and vitamin C during technical processing and lyophilisation of red and yellow tomatoes[J]. *Food Chemistry*, 2011, 124: 1603–1611.
- [23] CHOI S H, KIM D-S, KOZUKUE N, et al. Protein, free amino acid, phenolic, β -carotene, and lycopene content, and antioxidative and cancer cell inhibitory effects of 12 greenhouse-grown commercial cherry tomato varieties [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2014, 34: 115–127.
- [24] MARTINEZ-HUELAMO M, TULIPANI S, ESTRUCH R, et al. The tomato sauce making process affects the bioaccessibility and bioavailability of tomato phenolics: A pharmacokinetic study[J]. *Food Chemistry*, 2015, 173: 864–872.
- [25] PERVEEN R, SULERIA H A R, ANJUM F M, et al. Tomato (*solanum lycopersicum*) carotenoids and lycopenes chemistry; metabolism, absorption, nutrition, and allied health claims—a comprehensive review [J]. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 2015, 55: 919–929.

- [26] DESMARCHELIER C, BOREL P. Overview of carotenoid bioavailability determinants: From dietary factors to host genetic variations[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 69: 270–280.
- [27] SAINI R K, NILE S H, PARK S W. Carotenoids from fruits and vegetables: Chemistry, analysis, occurrence, bioavailability and biological activities[J]. Food Research International, 2015, 76: 735–750.
- [28] VIUDA-MARTOS M, SANCHEZ-ZAPATA E, SAYAS-BARBERA E, et al. Tomato and tomato byproducts. human health benefits of lycopene and its application to meat products: a review[J]. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 2014, 54: 1032–1049.
- [29] MUZOLF-PANEK M, KLEIBER T, KACZMAREK A. Effect of increasing manganese concentration in nutrient solution on the antioxidant activity, vitamin C, lycopene and polyphenol contents of tomato fruit[J]. Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess, 2017, 34: 379–389.
- [30] COYAGO-CRUZ E, CORELL M, MORIANA A, et al. Study of commercial quality parameters, sugars, phenolics, carotenoids and plastids in different tomato varieties [J]. Food Chemistry, 2019, 277: 480–489.
- [31] ROSATI C, AQUILANI R, DHARMAPURI S, et al. Metabolic engineering of beta-carotene and lycopene content in tomato fruit[J]. The Plant journal: for cell and molecular biology, 2000, 24: 413–419.
- [32] TINYANE P P, SIVAKUMAR D, SOUNDY P. Influence of photo-selective netting on fruit quality parameters and bioactive compounds in selected tomato cultivars [J]. Scientia Horticulturae, 2013, 161: 340–349.
- [33] TOMASI N, RIZZARDO C, MONTE R, et al. Micro-analytical, physiological and molecular aspects of Fe acquisition in leaves of Fe-deficient tomato plants re-supplied with natural Fe-complexes in nutrient solution[J]. Plant and Soil, 2009, 325: 25–38.
- [34] SCANO E A, ASQUER C, PISTIS A, et al. Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 77: 22–30.
- [35] MARTI R, LEIVA-BRONDO M, LAHOZ I, et al. Polyphenol and L-ascorbic acid content in tomato as influenced by high lycopene genotypes and organic farming at different environments[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 148–156.
- [36] KATHI S, LAZA H, SINGH S, et al. Vitamin C biofortification of broccoli microgreens and resulting effects on nutrient composition[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14:1145992.
- [37] BAIANO A, DEL NOBILE M A. Antioxidant compounds from vegetable matrices: biosynthesis, occurrence, and extraction systems[J]. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 2016, 56: 2053–2068.
- [38] OLUGBENGA O O, ADEBOLA S S, FRIDAY A D, et al. Effect of dietary tomato powder on growth performance and blood characteristics of heat-stressed broiler chickens[J]. Tropical Animal Health and Production, 2022, 54(1): 37.
- [39] KUMAR M, TOMAR M, BHUYAN D J, et al. Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seed: A review on bioactives and biomedical activities[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2021, 142: 112018.
- [40] NOUR V, PANAITTE T D, ROPOTA M, et al. Nutritional and bioactive compounds in dried tomato processing waste[J]. Cyta-Journal of Food, 2018, 16: 222–229.
- [41] ITO S I, IHARA T, TAMURA H, et al. alpha-Tomatine, the major saponin in tomato, induces programmed cell death mediated by reactive oxygen species in the fungal pathogen *Fusarium oxysporum*[J]. FEBS letters, 2007, 581: 3217–3222.
- [42] SALEHI B, SHARIFI-RAD R, SHAROPOV F, et al. Beneficial effects and potential risks of tomato consumption for human health: An overview[J]. Nutrition, 2019, 62: 201–208.
- [43] LEE J, KOO N, MIN D B. Reactive oxygen species, aging, and antioxidative nutraceuticals[J]. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2004, 3: 21–33.
- [44] CHOI H, LEE D G. Lycopene induces apoptosis in *Candida albicans* through reactive oxygen species production and mitochondrial dysfunction[J]. Biochimie, 2015, 115: 108–115.
- [45] CANENE-ADAMS K, CAMPBELL J K, ZARIPHEH S, et al. The tomato as a functional food[J]. Journal of Nutrition, 2005, 135: 1226–1230.
- [46] JOSEPH J J, DEEDWANIA P, ACHARYA T, et al. Comprehensive management of cardiovascular risk factors for adults with type 2 diabetes: a scientific statement from the american heart association[J]. Circulation, 2022,

- 145: 722–759.
- [47] DELGADO-LISTA J, ALCALA-DIAZ J F, TORRES-PENA J, et al. Long-term secondary prevention of cardiovascular disease with a Mediterranean diet and a low-fat diet (CORDIOPREV) a randomised controlled trial [J]. *Lancet*, 2022, 399: 1876–1885.
- [48] WOOD N, JOHNSON D R B. The relationship between tomato intake and congestive heart failure risk in periodontitis subjects [J]. *Journal of clinical periodontology*, 2004, 31: 574–580.
- [49] AYDEMIR G, KASIRI Y, BIRTA E, et al. Lycopene-derived bioactive retinoic acid receptors/retinoid-X receptors-activating metabolites may be relevant for lycopene's anti-cancer potential [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2013, 57: 739–747.
- [50] SHARONI Y, LINNEWIEL-HERMONI K, ZANGO G, et al. The role of lycopene and its derivatives in the regulation of transcription systems: implications for cancer prevention [J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2012, 96: 1173–1178.
- [51] PRZYBYLSKA S. Lycopene—a bioactive carotenoid of PRZYBYLSKA *International Journal of Food Science and Technology*, 2020, 55(1): 11–32.
- [52] LE MARCHAND L, HANKIN J H, KOLONEL L N, et al. Intake of specific carotenoids and lung cancer risk, *Cancer epidemiology, biomarkers & prevention: a publication of the American Association for Cancer Research* [J]. cosponsored by the American Society of Preventive Oncology, 1993, 2: 183–187.
- [53] FARINETTI A, ZURLO V, MANENTI A, et al. Mediterranean diet and colorectal cancer: A systematic review [J]. *Nutrition*, 2017, 43–44: 83–88.
- [54] DIXON L B, SUBAR A F, PETERS U, et al. Adherence to the USDA food guide, dASH eating plan, and mediterranean dietary pattern reduces risk of colorectal adenoma [J]. *The Journal of nutrition*, 2007, 137: 2443–2450.
- [55] SCHNAEBELE K, BRIVIBA K, BUB A, et al. Effects of carrot and tomato juice consumption on faecal markers relevant to colon carcinogenesis in humans [J]. *British Journal of Nutrition*, 2008, 99: 606–613.
- [56] STEWART A J, BOZONNET S, MULLEN W, et al. Occurrence of flavonols in tomatoes and tomato-based products [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2000, 48: 2663–2669.
- [57] DEWANTO V, WU X, ADOM K K, et al. Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2002, 50: 3010–3014.
- [58] STRATAKOS A C, DELGADO-PANDO G, LINTON M, et al. Industrial scale microwave processing of tomato juice using a novel continuous microwave system [J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 622–628.
- [59] SHI J, DAI Y, KAKUDA Y, et al. Effect of heating and exposure to light on the stability of lycopene in tomato puree [J]. *Food Control*, 2008, 19: 514–520.
- [60] JAYATHUNGE K G L R, STRATAKOS A C, CREGENZAN-ALBERTIA O, et al. Enhancing the lycopene *in vitro* bioaccessibility of tomato juice synergistically applying thermal and non-thermal processing technologies [J]. *Food Chemistry*, 2017, 221: 698–705.
- [61] GARCIA-PARRA J, GONZALEZ-CEBRINO F, DELGADO J, et al. Effect of thermal and high-pressure processing on the nutritional value and quality attributes of a nectarine puree with industrial origin during the refrigerated storage [J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76: 618–625.
- [62] FACHIN D, SMOUT C, VERLENT I, et al. Inactivation kinetics of purified tomato polygalacturonase by thermal and high-pressure processing [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2004, 52: 2697–2703.
- [63] VILJANEN K, LILLE M, HEINIÖ R L, et al. Effect of high-pressure processing on volatile composition and odour of cherry tomato puree [J]. *Food Chemistry*, 2011, 129: 1759–1765.
- [64] MIRONDO R, BARRINGER S. Improvement of Flavor and Viscosity in Hot and Cold Break Tomato Juice and Sauce by Peel Removal [J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(S): 171–179.
- [65] JAYATHUNGE K G L R, STRATAKOS A C, DELGADO-PANDO G, et al. Thermal and non-thermal processing technologies on intrinsic and extrinsic quality factors of tomato products: A review [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 49: e13901.
- [66] CHANDRASEKARAN S, RAMANATHAN S, BASAK T. Microwave food processing—A review [J]. *Food Research International*, 2013, 52: 243–261.
- [67] SOFIZADEH T, KHODAEI J, DARVISHI H, et al. Process parameters of microwave heating-assisted vacuum evaporation of tomato juice: quality, energy consumption, exergy performance, and kinetic processing [J]. *Journal*

- of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2023, 57: 203–218.
- [68] ZHANG R, CHEN J, XIAO J, et al. Pulsed electric fields system and its application in non-thermal food processing[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37: 777–786.
- [69] YAN B, MARTINEZ-MONTEAGUDO S I, COOPER-STONE J L, et al. Impact of thermal and pressure-based technologies on carotenoid retention and quality attributes in tomato juice[J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10: 808–818.
- [70] PATRAS AA, BRUNTON N, DA PIEVE S, et al. Effect of thermal and high pressure processing on antioxidant activity and instrumental colour of tomato and carrot purees[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10: 16–22.
- [71] TADAPANENI R K, DARYAEI H, KRISHNAMURTHY K, et al. High-pressure processing of berry and other fruit products: implications for bioactive compounds and food safety[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62: 3877–3885.
- [72] DELIA ALARCON-ROJO A, MANUEL CARRILLO-LOPEZ L, REYES-VILLAGRANA R, et al. Ultrasound and meat quality: A review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 55: 369–382.
- [73] PATIST A, BATES D. Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2008, 9: 147–154.
- [74] TEREFE N S, GAMAGE M, VILKHU K., et al. The kinetics of inactivation of pectin methylesterase and polygalacturonase in tomato juice by thermosonication [J]. Food Chemistry, 2009: 117: 20–27.
- [75] ADEKUNTE A O, TIWARI B K, CULLEN P J, et al. Effect of sonication on colour, ascorbic acid and yeast inactivation in tomato juice[J]. Food Chemistry, 2010, 122: 500–507.
- [76] SOLIVA-FORTUNY R, BALASA A, KNORR D. Food preservation by pulsed electric fields: An engineering perspective[J]. Food Engineering Reviews, 2011, 3: 94–107.
- [77] SOLIVA-FORTUNY R, BALASA A, KNORR D, et al. Effects of pulsed electric fields on bioactive compounds in foods: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2009, 20: 544–556.
- [78] ODRIOZOLA-SERRANO I, SOLIVA-FORTUNY R, HERNANDEZ-JOVER T, et al. Carotenoid and phenolic profile of tomato juices processed by high intensity pulsed electric fields compared with conventional thermal treatments[J]. Food Chemistry, 2009, 112: 258–266.
- [79] VALLVERDU-QUERALT A, ODRIOZOLA-SERRANO I, OMS-OLIU G, et al. Impact of high-intensity pulsed electric fields on carotenoids profile of tomato juice made of moderate-intensity pulsed electric field-treated tomatoes[J]. Food Chemistry, 2013, 141: 3131–3138.