

加工工艺对桑叶茶品质形成的研究进展

梁秀华^{1,2,3} 马焕艳⁴ 张谈捷^{2,3} 李腊梅^{2,3} 林 杰¹

(1. 浙江农林大学茶学与茶文化学院, 浙江 杭州 311300; 2. 绍兴市经济作物技术推广中心, 浙江 绍兴 312000;
3. 绍兴市茶叶学会, 浙江 绍兴 312000; 4. 浙江省农业技术推广中心, 浙江 杭州 310020)

摘要:桑叶是药食同源的重要原料, 富含多种营养活性成分, 加工成的桑叶茶具有抗氧化、降血糖、降血脂、抗炎等生理功能, 已成为健康食品领域的研究热点。萎凋、杀青、发酵、干燥及胁迫处理等加工工艺会影响桑叶茶的风味品质和营养活性成分的种类与含量, 进而影响产品的营养品质与保健功效。文章重点介绍了萎凋、杀青、发酵、干燥及胁迫处理等加工工艺对桑叶茶感官品质和营养活性成分的影响, 并对桑叶茶加工工艺优化、功能性产品开发进行了展望。

关键词:加工工艺; 桑叶茶; 营养成分; 活性成分; 感官品质

Research progress on effects of processing techniques on mulberry leaf tea quality

LIANG Xiuhua^{1,2,3} MA Huanyan⁴ ZHANG Tanjie^{2,3} LI Lamet^{2,3} LIN Jie¹

(1. College of Tea Science and Tea Culture, Zhejiang A & F University, Hangzhou, Zhejiang 311300, China; 2. Shaoxing Economic Crops Technology Extension Center, Shaoxing, Zhejiang 312000, China; 3. Shaoxing Tea Society, Shaoxing, Zhejiang 312000, China; 4. Zhejiang Agricultural Technology Extension Center, Hangzhou, Zhejiang 310020, China)

Abstract: Mulberry leaves serve as important raw materials with both medicinal and edible properties, rich in a variety of nutritional active ingredients. Processed mulberry leaf tea has antioxidant, hypoglycemic, hypolipidemic, anti-inflammatory, and other physiological functions, positioning it as a hot spot of research in the health food sector. Withering, fixation, fermentation, drying, stress treatment, and other processing techniques significantly affect the flavor quality, as well as the types and content of nutritional active ingredients of mulberry leaf tea, thereby affecting the nutritional quality and health benefits of the product. This study focuses on the effects of processing techniques such as withering, fixation, fermentation, drying, and stress treatment on the sensory quality and nutritional active ingredients of mulberry leaf tea, while also outlining prospects for optimizing mulberry leaf tea processing technology and advancing the development of functional products.

Keywords: processing technique; mulberry leaf tea; nutritional components; active ingredients; sensory quality

桑叶作为药食同源的重要原料, 富含蛋白质、氨基酸、多酚、黄酮、多糖和生物碱等多种营养活性成分, 具有抗氧化、降血糖、降血脂、抗炎、抗菌等生理功能。近年来以桑叶为原料, 按制茶工艺加工而成的桑叶茶以功能性食品定位获得多国市场认可^[1]。加工工艺对桑叶茶的感官品质、营养品质及保健功效具有决定性作用。加工过

程中的萎凋、杀青、发酵、干燥及胁迫处理等核心工序, 通过调控酶活性、氧化反应进程及微生物代谢活动, 显著影响桑叶中活性物质的含量、分子结构及稳定性, 进而影响其营养价值和保健功能。科研工作者围绕桑叶茶加工工艺优化及品质调控开展了广泛研究。文章拟综述萎凋、杀青、发酵、干燥及胁迫处理等加工工艺对桑叶茶感官品

基金项目:浙江省蚕桑产业技术项目(编号:浙农科发[2024]9号)

通信作者:李腊梅(1982—), 女, 绍兴市经济作物技术推广中心高级农艺师, 硕士。E-mail: 361586565@qq.com

林杰(1985—), 男, 浙江农林大学茶学与茶文化学院副教授, 博士。E-mail: linjie@zafu.edu.cn

收稿日期:2025-04-24 **改回日期:**2025-12-29

引用格式:梁秀华, 马焕艳, 张谈捷, 等. 加工工艺对桑叶茶品质形成的研究进展[J]. 食品与机械, 2026, 42(1): 221-229.

Citation: LIANG Xiuhua, MA Huanyan, ZHANG Tanjie, et al. Research progress on effects of processing techniques on mulberry leaf tea quality[J]. Food & Machinery, 2026, 42(1): 221-229.

质与营养活性成分的影响,以期桑叶茶加工品质的提升、功能性产品开发提供理论依据。

1 桑叶的主要营养活性成分

1.1 营养物质

桑叶富含蛋白质、氨基酸、碳水化合物、脂类、维生素和有机酸等多种营养物质,具有显著的食用价值。桑叶中的蛋白质由 20 种氨基酸组成,其中谷氨酸、天门冬氨酸和亮氨酸合计约占氨基酸总量的 30%^{[2]168}。桑叶的总氨基酸比例高于鱼和牛奶^[3],非蛋白质氨基酸 γ -氨基丁酸(GABA)尤其丰富,含量比绿茶高约 10 倍^{[2]168};GABA 具有调节神经、降血压及改善睡眠等生理功能^[4]。桑叶中的碳水化合物以葡萄糖、果糖、蔗糖、麦芽糖等易消化的水溶性单、双糖为主^{[2]169}。脂类中不饱和脂肪酸约占 50%,富含亚麻酸、亚油酸、花生四烯酸^[5]。桑叶中的维生素 A、维生素 B、维生素 C 含量较高,与菠菜、包心菜相当,干桑叶的维生素 C 含量可达 4 mg/g 以上^{[2]170}。有机酸以苹果酸为主^[3]。

1.2 生物活性物质

桑叶中的多酚以酚酸为主,主要包括绿原酸、新绿原酸、隐绿原酸、咖啡酸和没食子酸等^[6],其中绿原酸的质量分数可达 4.38%^[7]。桑叶的黄酮含量占干物质质量的 1%~3%^[8],已鉴定出 60 余种黄酮类化合物^[9],主要以游离苷元(如槲皮素、山奈酚等)和糖苷(如槲皮素糖苷、山奈酚糖苷等)两种形态存在^[10]。桑叶的生物碱含量占干物质质量的 0.06%~1.13%^[11]。其中 1-脱氧野尻霉素(DNJ)是桑叶特有且关键降血糖成分,质量分数可达 0.39%^[12]。DNJ 为 α -葡萄糖苷酶强效抑制剂,通过抑制双糖吸收、调节脂质代谢、改善氧化应激和胰岛素抵抗等多途径、多靶点降血糖^[13],其效果与阿卡波糖相当且副作用小^[14]。DNJ 在嫩叶中含量较高,其含量显著受品种、采收季节及加工方式影响^[15]。桑叶多糖为水溶性非淀粉多糖,质量分数为 3.26%~3.89%^[16],目前已从桑叶中分离鉴定出 33 种多糖类化合物^[9],主要由葡萄糖、半乳糖、果糖、阿拉伯糖等单糖构成^[17]。其生理活性与糖苷键类型、空间构象及支链结构密切相关^[11]。

2 萎凋对桑叶品质的影响

萎凋作为制茶工艺的首道关键工序,通过促使鲜叶适度失水,激活内源酶活性,推动内含物的水解与氧化等化学变化,为茶叶品质的形成奠定基础^[18]。目前,桑叶茶加工中的萎凋工序,大多沿用传统茶叶的加工设备与技术,常用的萎凋方式包括自然萎凋、热风萎凋和复合萎凋(室内+日光),它们通过不同的作用机制对桑叶茶品质形成产生差异化影响。自然萎凋在室温(20~25℃)下进行,通过促使鲜叶缓慢失水,形成一种低强度胁迫,激活内源酶系,驱动物质的温和转化。该方式显著上调黄酮

类生物合成途径,抑制谷氨酸和天冬氨酸代谢,维持较低水平的糖/脂代谢与酶活性,成品的多酚与黄酮含量较高,但鲜味氨基酸与香气成分不足,茶汤苦涩味明显、醇和度不足、香气欠佳^[19-20]。热风萎凋以强制脱水的方式,凭借高温胁迫效应快速激活酶系,进而达成加速代谢反应的目的。该方式显著激活了半乳糖代谢途径,同时上调了淀粉与蔗糖代谢、甘油磷脂代谢。伴随 β -葡萄糖苷酶等酶活性的显著增强,蛋白质、黄酮苷、多糖及双糖等物质被有效水解,最终使氨基酸、黄酮类化合物、单糖、DNJ 以及挥发性成分的种类与含量均高于自然萎凋工艺^[20-21]。复合萎凋整合温和脱水与光照胁迫的双重效应,其代谢特征介于自然与热风萎凋之间:在适度激活淀粉与蔗糖代谢的同时显著上调脂质代谢,并均衡调控类黄酮、氨基酸、糖类和生物碱的代谢。成品茶滋味醇和、青气消退,花果香与酯香显著转化,GABA 含量显著提高^[20,22]。

萎凋时间与温度共同调控桑叶在萎凋过程中的理化转化与最终品质形成。时间因素通过调控酶活性持续时长与底物消耗程度,分阶段影响成分转化进程:在萎凋初期,叶片失水与呼吸作用可增强细胞膜透性,酶活性上升,促使脂肪、蛋白质、多糖类及类胡萝卜素等大分子物质降解,游离氨基酸含量提升,糖苷类结合态香气前体(如芳樟醇)与 β -糖苷酶接触增多,香气逐渐释放,此时多糖降解量低于单糖消耗,可溶性糖含量略有下降^[19];在萎凋中期,酶活性达到峰值,多糖大量降解为单糖,可溶性糖含量回升,总黄酮含量升至最高,糖苷类香气进一步水解,芳樟醇等游离态香气物质显著积累,青草气逐渐消退,花果清香开始显露,滋味趋于醇和^[19,22-24];至萎凋后期,底物逐渐耗尽,呼吸消耗大于合成,单糖含量下降,总多糖与游离氨基酸逐步转化,整体代谢活动趋缓。与此同时,温度直接影响水分蒸发速率、酶活性强度及成分转化方向:适宜的温度可促进水解反应,提高氨基酸与黄酮含量,但温度过高(如 36℃)易导致水分蒸发过快、细胞结构受损、酶活性钝化,造成物质转化不充分,成品茶滋味淡薄、品质下降;而温度过低(如 20℃)则使水分散失与生化反应缓慢,酶活性不足,品质成分含量低,色泽偏暗,甚至可能引发霉变^[19,21]。

综上所述,萎凋通过调控水分、激活酶系,驱动桑叶内含物的水解与氧化转化,奠定桑叶茶风味品质与营养活性成分的物质基础。萎凋方式、时间与温度共同调控物质转化的路径与效率,适宜的温度是保障酶活性的关键,而复合萎凋则能有效平衡各类代谢路径,进而有助于形成醇和的滋味与丰富的香气。

3 杀青对桑叶品质的影响

在桑叶绿茶加工中,杀青作为核心工序,通过高温快速钝化氧化酶活性以抑制酶促褐变,奠定“绿汤绿叶”的

品质基础。同时,其产生的热效应还能改变桑叶的理化特性,促进结合态活性物质的释放与转化。然而,不同杀青方式因热传导机制存在本质差异,对桑叶的感官品质与活性成分保留程度也呈现出显著影响(图1)。

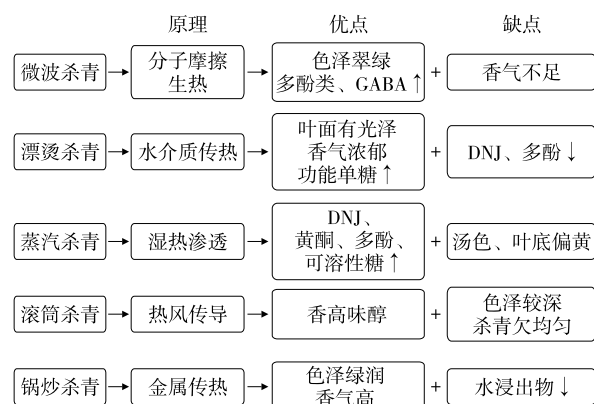


图1 杀青方式对桑叶感官和成分品质的影响

Figure 1 Effects of different fixation methods on the sensory and compositional quality of mulberry leaves

微波杀青凭借内外同步升温特性,高效钝化氧化酶、激活水解酶,在保留多酚、GABA、可溶性蛋白等热敏成分,促进游离氨基酸与可溶性糖的释放,以及维持茶叶翠绿色泽方面具有显著优势^[25-27]。漂烫杀青可促进部分结合态物质溶解释放,有效去除草腥味并赋予干茶较优色泽,但长时高温处理易导致多酚、DNJ等水溶性活性成分流失,进而影响成品的功能活性^[27]。熊慧薇等^[28]研究表明,100℃漂烫5 min可使DNJ与多酚的质量分数分别下降32.58%和42.31%。蒸汽杀青能有效保护黄酮、多酚等热敏成分,显著提升DNJ含量,并促进可溶性糖的积累,赋予茶汤甘甜滋味^[26]。范作卿等^[29]研究表明,经100℃蒸汽处理2 min后,DNJ的质量分数较桑叶原料提高80.8%,推测其机制为高温湿热环境促进了结合态DNJ向游离态的转化。滚筒杀青与锅炒杀青均采用接触式传热方式,有助于形成香气浓郁、滋味醇厚的成品,锅炒杀青能有效抑制叶绿素降解,减少多酚、黄酮等热敏物质的损失^[25-26]。

综上所述,不同杀青方式在成分保留、风味形成与色泽控制方面各具优势,但也存在相应缺陷:微波杀青因短时加热导致青草味释放不充分、香气层次单一、滋味欠佳^[25-26];蒸汽杀青的高温高湿环境易加速叶绿素降解,造成汤色黄变与青草气残留,需配合及时脱水^[25];滚筒杀青易出现受热不均、干茶色泽暗沉^[25];锅炒杀青则可能因快速脱水抑制水解反应,降低水浸出物含量^[26]。未来研究可探索“汽热—微波协同^[30]”“漂烫—滚筒联

用^[31]”等组合杀青策略,通过工艺互补有效化解单一处理方式产生的矛盾效应,从而实现桑叶茶综合品质的系统性提升。

4 发酵对桑叶品质的影响

桑叶发酵工艺主要包括自然发酵与微生物接种发酵两类。自然发酵依赖桑叶内源酶(如多酚氧化酶)催化多酚氧化聚合,转化儿茶素为茶黄素等物质,但其实际应用存在显著局限:桑叶多酚含量约占桑叶干重的0.76%~3.92%^[32],远低于茶叶(占茶叶干重的18%~36%^[33]),导致内源酶活性不足;同时环境微生物随机定殖引发杂菌竞争,增加底物无效消耗,最终造成物质转化不彻底,功能成分定向累积受限,产品品质不稳定^[34]。相比之下,微生物接种发酵通过人工接种特定菌种(如真菌、乳酸菌),依托酶解—代谢重构双路径调控展现优势,已成为桑叶发酵领域的研究热点,其作用机理可概括为3个方面(图2):

① 细胞壁解构与酶促转化。微生物分泌纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶等降解细胞壁,促进胞内物质释放^[35];此过程伴随纤维素水解提升水溶性糖含量^[36],并将结合态酚类(如黄酮苷)经糖苷键水解转化为生物利用度更高的游离态苷元^[37],同时裂解蛋白质生成多肽及氨基酸^[38]。② 菌群代谢定向重构。特定功能菌株如肠膜明串球菌利用柠檬酸代谢合成香气前体^[39],冠突散囊菌经氧化还原途径使DNJ质量分数提升至9.3 mg/g,约为未发酵桑叶茶的3倍^[40],乳酸菌通过脱羧酶途径使GABA的质量分数提高951.3%^[41],红曲霉则通过聚酮合酶途径富集黄酮类物质(山奈酚与槲皮素的质量分数分别提高6.59倍和4.36倍)^[42]。③ 新的活性物质合成。微生物代谢途径合成胞外多糖、细菌素、游离氨基酸等多种功能活性物质,显著增强产品的健康功效^[43]。

微生物接种发酵中,菌种的选择直接影响桑叶发酵产品的感官品质。单菌种发酵通常代谢路径明确,如冠突散囊菌E6菌株发酵桑叶茶后,色泽墨绿,香气明显,感官接受度高^[44]。而多菌种混合发酵通过代谢互补实现风味协同优化:乳酸菌混合发酵(短乳杆菌+肠膜明串珠菌)能有效降解草腥味关键物质1-辛烯-3-醇,使其含量从5.91%降至0.23%,同时生成花果香味的酯类和醇类(如己酸乙酯、芳樟醇)^[34];米曲霉与毛霉复合发酵可使桑叶茶感官评分较自然发酵提升7.5~15.4^[36]。微生物对桑叶营养活性成分的转化呈现专一性与多样性并存的特征^[45]。单菌种发酵可通过专属酶系实现定向转化,如真菌深层发酵使总酚含量提升约2倍^[46];米曲霉激活蛋白酶体系,使游离氨基酸总量相较于未发酵样品提升了293.42%^[36]。多菌种混合发酵则通过代谢网络重构实现成分协同增效:如米曲霉+枯草芽孢杆菌+酿酒酵母+植物乳杆菌的组合发酵使可溶性蛋白和氨基态氮较发酵

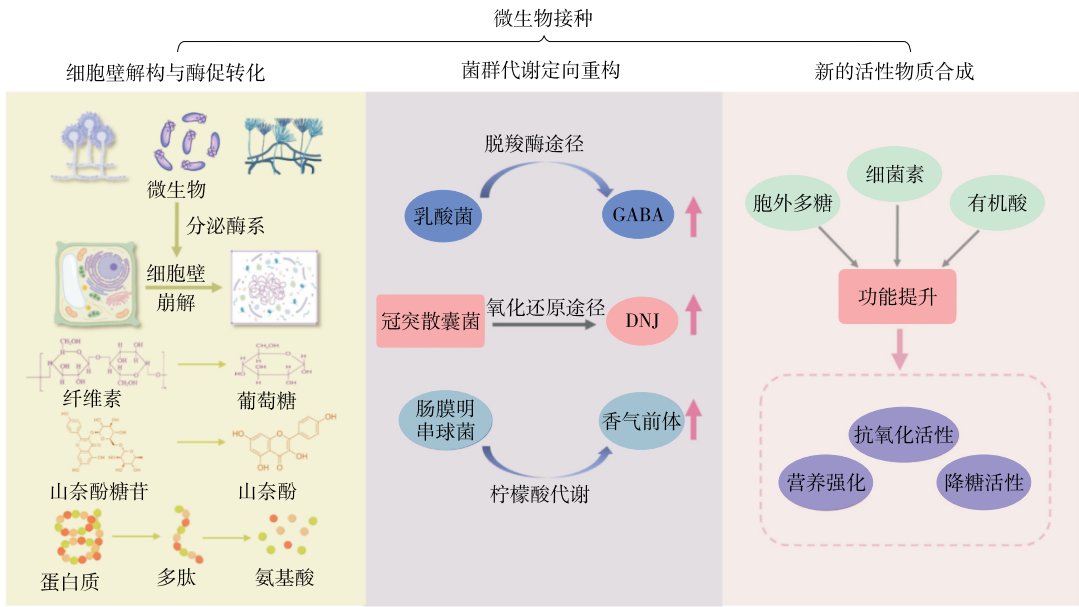


图2 微生物接种发酵的作用机理

Figure 2 Mechanism of action for microbial inoculation and fermentation

前分别提升了 176.52% 和 546.34%^[38]。然而,微生物转化的多样性导致代谢路径复杂性(表 1):① 同种物质可被不同菌株差异化转化。如日本根霉单菌发酵使黄酮含量提高 5.82%,而日本根霉+绿色木霉+黑曲霉混合发酵反致黄酮含量下降 16.73%($P<0.01$)^[53]。② 底物竞争引发级联效应,如鼠李糖乳杆菌与短乳杆菌可能存在碳源竞争,间接抑制糖苷酶活性,使黄酮苷元转化率显著降低^[55]。这种复杂的生物转化网络表明,桑叶中的活性物质转化相互关联,在微生物多酶系的交互作用下,串联成一个动态的转化链条。

工艺参数的协同调控对桑叶发酵品质具有决定性影

响,含水率、温湿度、发酵时长及接种量等共同驱动成分释放与转化进程^[36-37,48]。如接种体积分数 16.55% 黑曲霉的桑叶在 30℃ 下发酵 5 d,温度与时间的交互效应使感官评分最高,达到 90^[37];棘孢曲霉、青霉与日本根霉的多菌种体系,通过优化发酵条件(棘孢曲霉:青霉:日本根霉配比 2:1:1,接种量 3.1×10^7 CFU/100 g,发酵温度 30℃,发酵时间 4.6 h),可同步提高滋味品质及黄酮、DNJ、多糖、多酚等生物活性成分含量^[50]。此外,原料预处理方式直接影响发酵基质特性:鲜叶发酵利于保留热敏物质,但高含水率导致发酵过程稳定性差,干叶复水发酵工艺可控性强,但复水后的再干燥过程可能引发热敏成分降解。

表 1 微生物发酵对桑叶中生物活性成分的影响[†]

Table 1 Effects of microbial fermentation on bioactive ingredients in mulberry leaves

接种微生物/成分含量变化	对照	黄酮	多糖	多酚	生物碱	DNJ	粗蛋白	游离氨基酸	参考文献
黑曲霉	桑叶绿茶	↑ 14.39%	↑ 12.67%	↑ 2.90%	—	—	—	↑ 3.46%	[37]
黑曲霉	鲜桑叶	↑ 14.30%	↑ 11.46%	↑ 2.67%	—	↓ 16.54%	—	↑ 3.62%	[47]
植物乳杆菌	自然发酵	↑ 29.56%	无显著影响	—	↑ 26.53%	—	—	—	[48]
植物乳杆菌、产朊假丝酵母、康宁木霉、蜡状芽孢杆菌	自然发酵	↑ 86.00%	—	↑ 30.00%	—	—	—	—	[49]
棘孢曲霉、青霉、日本根霉	自然发酵	↑ 4.13%	↓ 10.63%	↑ 6.56%	—	↑ 11.20%	—	—	[50]
肠膜明串珠菌、短乳杆菌	未发酵	↓ 8.01%	↓ 22.44%	↑ 14.07%	—	—	—	—	[51]
黑曲霉、日本根霉、绿色木霉	自然发酵	↑ 1.16%	↓ 6.78%	↑ 1.68%	—	↑ 6.43%	—	—	[52]
日本根霉	自然发酵	↑ 5.82%	无显著影响	↓ 8.06%	—	↑ 10.63%	—	—	[53]
枯草芽孢杆菌、植物乳杆菌	未发酵	↓ 62.02%	—	—	—	—	↑ 23.27%	—	[54]

[†] ↑ 表示含量上升; ↓ 表示含量下降。

5 干燥对桑叶品质的影响

干燥是制茶工艺的最后工序,通过调控桑叶的物理结构、酶活性及化学反应路径,显著影响其感官品质与营养活性物质。不同干燥方式因干燥温度、持续时间和水分迁移速率的差异,导致桑叶在色泽、风味及功能性成分保留方面呈现显著差异(表2)。

冷冻干燥可有效抑制叶绿素降解,较好地保留蛋白质与多糖的结构完整性与功能活性;形成的多孔结构也有助于提升蛋白质的溶解性^[56,59,61-62]。然而,该工艺的低温环境可能会抑制相关酶的活性及生物转化途径,显著减少桑叶中多酚与黄酮等成分的合成与积累。赵慧玲等^[60]的研究显示,经冷冻干燥处理的桑叶,其多酚与黄酮含量分别仅为自然晾干样品的16.09%和53.94%;秦樱瑞等^[57]的对比研究也发现,冷冻干燥产品的总黄酮与DNJ含量均低于微波干燥和热风干燥。微波干燥利用短时高温快速脱水,减少叶绿素损失与非酶褐变,同时,破坏细胞壁结构,促进结合态DNJ与多糖溶出^[57],并丰富氨基酸组成^[58],是兼顾色泽维持、活性成分浸出与风味提升的高效方式。然而,该技术存在载物量敏感度高、设备与运行成本高的缺点,缺乏规模效益。热风干燥过程表现出典型的热力双向调控效应:高温在引起蛋白质变性的同时,也能通过降解与结构重塑提高其消化率与溶解性^[59]。在65~75℃下,该工艺可在脱水效率与活性成分保留之间实现有效平衡,不仅使多酚与黄酮含量显著高于冷冻干燥(如65℃处理下多酚含量较冷冻干燥提高103.72%),还能较好地维持DNJ与多糖的保留水平,适配规模化生产^[57,60]。热泵干燥创造的温和热环境(如55℃下)有利于细胞壁多糖溶出,有效抑制美拉德反应,使可溶性糖含量显著高于微波真空干燥与冷冻干燥,鲜味氨基酸总量和相对含量分别达微波干燥的1.33倍和1.99倍,蛋白质保留率接近冷冻干燥^[56,58]。然而,其持久的热作用易导致叶绿素降解与产品色泽稳定性下降。日晒干燥因长时间高温露天处理,易导致蛋白质降解变性、叶绿素破坏较多、细胞塌陷及组织硬化,对品质产生显著负面影响^[56]。自然晾干的温和脱水过程能够维持叶肉细胞活性并诱导

代谢胁迫,激活次生代谢通路,有利于多酚、黄酮等热敏性功能成分的保留,并提升其DPPH自由基清除能力等活性^[60]。然而,该方式存在生产效率低下和生产条件受制约的问题。

综上所述,单一干燥工艺均存在局限性:冷冻干燥活性成分积累不足;微波干燥成本高、规模化难;热泵干燥周期长、色泽稳定性差;自然晾干效率低;日晒干燥对品质不利。未来研究可探索复合干燥技术的组合序列与参数调控,如远红外辐射结合热空气对流,通过工艺协同实现活性成分保留、色泽稳定性及功能活性的同步提升^[61]。

6 胁迫处理对桑叶品质的影响

在桑叶加工中,通过引入气调(厌氧/低氧)、机械损伤(如做青/摇青)及低温等胁迫条件,可激活植物逆境响应机制,定向调控代谢途径以优化感官品质并富集功能成分。

当前研究聚焦胁迫处理对桑叶GABA的富集效应,揭示不同胁迫条件通过特异性途径激活谷氨酸脱羧酶(GAD),驱动GABA高效合成:厌氧/低氧环境抑制线粒体电子传递链,导致胞质酸化,直接激活GAD,显著提升GABA含量,如鲜桑叶经N₂或真空处理12 h后,GABA增幅达436%~472%^[62];红茶揉捻后厌氧8 h,GABA含量达6.55 mg/g^[63]。机械损伤(如摇青)破坏细胞区隔化,使GAD接触底物,并加速无氧呼吸协同降低pH值,促进GABA生成,交替厌氧/好氧结合摇青处理效果尤佳^[64]。低温胁迫通过逆境信号间接激活GAD通路。研究表明,通过精准调控工艺参数,桑叶的GABA含量可达1.75~3.18 mg/g^[23],显著超越功能性GABA茶标准阈值(>1.5 mg/g)^[63],为高附加值桑叶制品的开发提供科学依据。

不同胁迫条件对桑叶感官品质及其他活性成分产生差异性影响。摇青工艺消除青草气,促进正己醛、β-紫罗兰酮等花果香物质生成,赋予甜香风味^{[33]251}。机械损伤通过加速蛋白质与多糖水解,增加游离氨基酸与可溶性糖,提升茶汤鲜爽度与回甘^[64]。气调处理(V_{N₂}:V_{CO₂}:V_{O₂}=8:1:1)能提高水浸出物及游离氨基酸含量^[26]。适度厌氧处理(如绿茶8 h、红茶2 h)可改善风味,分别呈现甜香豆香和

表2 不同干燥方式对桑叶品质的影响

Table 2 Effects of different drying methods on the quality of mulberry leaves

干燥方式	作用原理	感官和成分的变化	参考文献
冷冻干燥	冰晶升华脱水	色泽鲜亮翠绿,蛋白质、多糖含量较高,DNJ、多酚、黄酮含量较低	[56-57]
微波干燥	分子摩擦生热	色泽较绿,蛋白质、氨基酸、DNJ、多糖含量较高	[56-58]
热风干燥	热空气除湿	色泽较绿,蛋白质含量较低,DNJ、多酚、黄酮、多糖含量较高	[57,59-60]
热泵干燥	热泵除湿	多糖、鲜味氨基酸含量较高	[56,58]
日晒干燥	阳光直射脱水	色泽灰暗、蛋白质含量较低,总体品质欠佳	[56]
自然晾干	室温缓慢脱水	DNJ、多酚、黄酮较高	[60]

豆香带花香^[65]。但需注意过度厌氧的负面效应:激活多酚氧化酶,加剧褐变与茶汤浑浊(长时/高温处理尤甚)^[62];导致多酚及黄酮显著氧化损耗(红茶厌氧 8 h 黄酮降至 23.14 mg/g)^[65];并引起可溶性糖、总酚同步下降,蛋白质等基础成分则保持稳定^[62]。有研究^[23]表明,组合工艺在提升桑叶品质上具有协同潜力,如自然萎凋+做青+浸泡组合可协同优化红茶感官品质,冷冻萎凋+做青+浸泡组合可显著提升 GABA 含量,而其香气却相对不足。

综上所述,胁迫处理可定向提升桑叶 GABA 含量及风味品质,但需规避过度厌氧引发的褐变及活性成分损失问题。未来可通过创新工艺组合与参数优化,构建增效减损协同机制。

7 展望

桑叶作为重要的药食同源资源,其营养活性成分的构成及加工过程中的代谢转化规律与茶叶存在本质差异。单纯借鉴传统茶叶制作工艺难以充分展现桑叶独特的风味特质与健康优势,因此对桑叶茶加工工艺的改进与创新显得尤为迫切。其中,桑叶茶发酵工艺有望成为未来研究的热点。通过深化对发酵机制的基础研究,结合代谢组学、蛋白质组学等前沿生物技术手段,系统解析桑叶茶加工过程中成分的动态变化及风味物质的形成机制,将为桑叶茶品质的提升提供坚实的理论支撑。

同时,应加强对桑叶茶特征风味成分和营养活性成分(如 1-脱氧野尻霉素、 γ -氨基丁酸等)的研究与开发利用。借助现代分析与检测技术,精准鉴定和量化桑叶中的特征活性成分,阐明其化学结构特征及生物活性作用机制,并深入研究其合成代谢途径、高效提取工艺、分离纯化技术以及在加工和贮藏过程中的稳定性等关键问题。此外,通过细胞模型、动物试验及临床试验,探索桑叶茶活性成分对代谢性疾病相关信号通路及肠道微生物群落的调节作用,验证其健康功效及安全性,进一步拓展桑叶在食品工业、医药保健等领域的应用潜力,为开发多样化、功能显著的健康产品提供科学依据。

参考文献

- [1] JAN B, PARVEEN R, ZAHIRUDDIN S, et al. Nutritional constituents of mulberry and their potential applications in food and pharmaceuticals: a review[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2021, 28(7): 3 909-3 921.
- [2] 余茂德. 桑树学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
YU M D. Mulberry arboriculture[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016.
- [3] ABBAS Z, TONG Y C, WANG J Y, et al. Potential role and mechanism of mulberry extract in immune modulation: focus on chemical compositions, mechanistic insights, and extraction techniques[J]. International Journal of Molecular Sciences,

2024, 25(10): 5 333.

- [4] DING J, HOU G G, NEMZER B V, et al. Effects of controlled germination on selected physicochemical and functional properties of whole-wheat flour and enhanced γ -aminobutyric acid accumulation by ultrasonication[J]. Food Chemistry, 2018, 243: 214-221.
- [5] ADEDUNTAN S A, OYERINDE A S. Evaluation of chemical and antinutritional characteristics of obeche (*Triplochiton scleroxylon*) and some mulberry (*Morus alba*) leaves[J]. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 2009, 3(4): 681-687.
- [6] ZENI A L B, MOREIRA T D, DALMAGRO A P, et al. Evaluation of phenolic compounds and lipid-lowering effect of *Morus nigra* leaves extract[J]. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 2017, 89(4): 2 805-2 815.
- [7] 张立雯. 桑叶多组分对糖尿病及其并发肝肾损伤的改善作用与效应机制研究[D]. 南京: 南京中医药大学, 2019: 29.
ZHANG L W. Improvement effect and mechanism of mulberry leaf active components on diabetes and liver and kidney injury complicated[D]. Nanjing: Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, 2019: 29.
- [8] ZHAO Q N, YAN X H, YUE Y, et al. Improved flavonoid content in mulberry leaves by solid-state fermentation: metabolic profile, activity, and mechanism[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 84: 103308.
- [9] 林闪闪, 王梦娇, 许金国, 等. 桑叶化学成分与药理作用研究进展及其质量标志物预测分析[J]. 中草药, 2023, 54(15): 5 112-5 127.
LIN S S, WANG M J, XU J G, et al. Predictive studies of quality markers in mori folium based on chemical constituents and pharmacological mechanism[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2023, 54(15): 5 112-5 127.
- [10] 李东, 向仲怀, 何宁佳. 桑树类黄酮化合物研究现状及进展[J]. 蚕业科学, 2021, 47(5): 482-490.
LI D, XIANG Z H, HE N J. Research status and progress on flavonoids of mulberry[J]. Acta Sericologica Sinica, 2021, 47 (5): 482-490.
- [11] 符兵, 周东来, 李庆荣, 等. 桑叶及其活性物质对动物肠道微生物的调控作用研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2024, 51(6): 2 460-2 470.
FU B, ZHOU D L, LI Q R, et al. Research progress on the regulation of animal intestinal microbiota by mulberry leaves and its active substances[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2024, 51(6): 2 460-2 470.
- [12] 卢桦, 李战福, 黄先智, 等. 桑叶提取物和 1-脱氧野尻霉素对大鲵生长性能、肝脏功能及免疫能力的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(1): 584-593.
LU H, LI Z F, HUANG X Z, et al. Effects of mulberry leaf extract and 1-deoxynojirimycin on growth performance, liver function and immune ability of giant salamander (*Andrias*

- davidianus*)[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(1): 584-593.
- [13] CHEN S K, XI M M, GAO F, et al. Evaluation of mulberry leaves' hypoglycemic properties and hypoglycemic mechanisms[J]. Frontiers in Pharmacology, 2023, 14: 1045309.
- [14] 张宸瑞, 崔琛, 李莎, 等. 桑枝活性成分、药理作用及多元化利用研究进展[J]. 蚕业科学, 2022, 48(6): 546-558.
- ZHANG C R, CUI C, LI S, et al. Research progress on active components, pharmacological effects and diversified utilization of ramulus mori[J]. Acta Sericologica Sinica, 2022, 48(6): 546-558.
- [15] SHREELAKSHMI S V, NAZARETH M S, MATAM P, et al. Chemometric evaluation of functional components and anti-quorum sensing activity of mulberry leaves from Indian cultivars: a potential contribution to the food industry[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(2): 567-574.
- [16] 王明燕, 韩好奇, 付彤, 等. 桑叶的生物学功能及其在动物生产中的应用研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2022, 58(5): 53-58.
- WANG M Y, HAN H Q, FU T, et al. Research progress on biological function of mulberry leaves and its application in animal production[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2022, 58(5): 53-58.
- [17] KATAYAMA H, TAKANO R, SUGIMURA Y. Localization of mucilaginous polysaccharides in mulberry leaves[J]. Proto Plasma, 2008, 233: 157-163.
- [18] 夏涛. 制茶学[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2016: 208.
- XIA T. Tea manufacturing science[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2016: 208.
- [19] 滑金杰, 袁海波, 江用文, 等. 萎凋过程鲜叶理化特性变化及其调控技术研究进展[J]. 茶叶科学, 2013, 33(5): 465-472.
- HUA J J, YUAN H B, JIANG Y W, et al. A review on the regulation technique of withering process and the change in physical and chemical properties of leaves[J]. Journal of Tea Science, 2013, 33(5): 465-472.
- [20] HAN B L, WEI Y H, FAN R, et al. Metabolomic analysis of volatile and non-volatile compounds in mulberry leaf white tea processed with different withering methods[J]. Food Chemistry, 2025, 482: 144103.
- [21] 滑金杰, 袁海波, 王伟伟, 等. 萎凋温度对鲜叶主要生化成分和酶活动态变化规律的影响[J]. 茶叶科学, 2015, 35(1): 73-81.
- HUA J J, YUAN H B, WANG W W, et al. Effect of withering temperature on dynamic changes of main biochemical components and enzymatic activity of tea fresh leaves[J]. Journal of Tea Science, 2015, 35(1): 73-81.
- [22] 施英, 廖森泰, 刘军, 等. 加工工艺对桑叶乌龙茶品质和风味的影响[J]. 蚕业科学, 2015, 41(3): 525-533.
- SHI Y, LIAO S T, LIU J, et al. Effect of processing technique on quality and flavor of mulberry leaf oolong-tea[J]. Science of Sericulture, 2015, 41(3): 525-533.
- [23] 刘冠卉, 丁娟, 王玉, 等. 萎凋工艺对桑叶红茶 γ -氨基丁酸含量与感官品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(4): 176-178.
- LIU G H, DING J, WANG Y, et al. Effects of withering process on γ -aminobutyric acid content and sensory quality of mulberry leaf black tea[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2019, 47(4): 176-178.
- [24] 李清声, 任莹, 卢秦华, 等. 桑叶白茶加工工艺初探及品质评价[J]. 蚕桑通报, 2023, 54(2): 23-27.
- LI Q S, REN N, LU Q H, et al. Preliminary study on the processing technology and quality evaluation of mulberry white tea[J]. Bulletin of Sericulture, 2023, 54(2): 23-27.
- [25] 施英, 廖森泰, 肖更生, 等. 不同杀青方法制备桑叶茶的品质测试分析[J]. 蚕业科学, 2012, 38(2): 348-351.
- SHI Y, LIAO S T, XIAO G S, et al. A quality test and analysis to mulberry leaf tea prepared by different fixation methods[J]. Acta Sericologica Sinica, 2012, 38(2): 348-351.
- [26] 刘淑贞, 边伟, 李成龙, 等. 杀青工艺和气调处理对桑茶 γ -氨基丁酸含量及品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(24): 96-99.
- LIU S Z, BIAN W, LI C L, et al. Effects of fixation and air-conditioning treatment on γ -amino butyric acid content and quality of mulberry tea[J]. Food Science, 2014, 35(24): 96-99.
- [27] 文海朝, 张溪芸, 李红姣. 基于主成分分析法对不同杀青方式桑叶品质影响的综合评价[J]. 蚕业科学, 2022, 48(3): 247-260.
- WEN H C, ZHANG X Y, LI H J. Comprehensive evaluation of the effects of different fixation methods on mulberry leaf quality based on principal component analysis[J]. Acta Sericologica Sinica, 2022, 48(3): 247-260.
- [28] 熊慧薇, 闵华, 幸胜平, 等. 杀青方法和冷冻超微粉碎处理对桑叶品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(21): 174-179.
- XIONG H W, MIN H, XING S P, et al. Effect of green removing method and freezing superfine grinding on properties of mulberry leaves[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(21): 174-179.
- [29] 范作卿, 王娜, 朱琳, 等. 加工工艺条件对桑叶茶中1-脱氧野尻霉素含量的影响[J]. 蚕业科学, 2016, 42(6): 1 062-1 067.
- FAN Z Q, WANG N, ZHU L, et al. Effects of processing technological conditions on 1-deoxynojirimycin content in mulberry leaf tea[J]. Science of Sericulture, 2016, 42(6): 1 062-1 067.
- [30] 罗红玉, 吴全, 钟应富, 等. 0724优质桑叶茶加工关键工艺研究[J]. 西南农业学报, 2014, 27(6): 2 600-2 604.
- LUO H Y, WU Q, ZHONG Y F, et al. Study on key technology of processing mulberry leaf tea with good quality[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(6): 2 600-2 604.
- [31] 吴劲轩, 殷浩, 夏文银, 等. 不同加工工艺和反复冻融对桑叶茶活性成分含量的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(4): 57-63.

- WU J X, YIN H, XIA W Y, et al. Effects of processing technique and repeated freeze-thaw on the contents of active ingredients in mulberry leaf tea[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(4): 57-63.
- [32] 郭小补, 廖森泰, 刘吉平, 等. 不同桑品种的桑叶总黄酮含量与体外抗氧化活性的相关性[J]. 蚕业科学, 2008, 34(3): 381-386.
- GUO X B, LIAO S T, LIU J P, et al. Correlation between total flavonoid content in mulberry leaves from different varieties and antioxidant activity in vitro[J]. Science of Sericulture, 2008, 34(3): 381-386.
- [33] 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- WAN X C. Tea biochemistry[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2003.
- [34] 向敏, 徐茂, 王子涵, 等. 混合乳酸菌发酵对桑叶中挥发性关键异味组分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(20): 241-248.
- XIANG M, XU M, WANG Z H, et al. Effects of mixed lactic acid bacteria fermentation on key volatile odor components in mulberry leaves[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(20): 241-248.
- [35] GUO N, ZHU Y W, JIANG Y W, et al. Improvement of flavonoid aglycone and biological activity of mulberry leaves by solid-state fermentation[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 148: 112287.
- [36] 陈永丽, 高畅, 洛桑卓玛, 等. 米曲霉发酵桑叶茶的工艺优化[J]. 食品科技, 2020, 45(1): 114-121.
- CHEN Y L, GAO C, LUOSANG Z M, et al. Process optimization of mulberry leaf tea fermented by aspergillus oryzae[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(1): 114-121.
- [37] 蔡亚洁, 乌日娜, 李煜, 等. 发酵桑叶茶工艺条件优化及其抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 187-194.
- CAI Y J, WU R N, LI Y, et al. Optimization of process conditions for fermented mulberry leaf tea and analysis of its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 187-194.
- [38] 任元元, 康建平, 黄静, 等. 复合菌种混合发酵提高桑叶蛋白利用率的研究[J]. 食品与发酵科技, 2016, 52(1): 20-23.
- REN Y Y, KANG J P, HUANG J, et al. Study on improvement of protein utilization of mulberry leaves by mixed fermentation[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2016, 52(1): 20-23.
- [39] 陈莹玉. 乳酸菌发酵型茶叶加工工艺优化及其产品生化成分的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017: 62.
- CHEN Y Y. Study on the technology and chemical compositions of lactobacillus fermented tea[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017: 62.
- [40] 郑升海, 黄丹, 罗惠波, 等. 冠突散囊菌发酵桑叶茶品质研究[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 44-48.
- ZHENG S H, HUANG D, LUO H B, et al. Study on the quality of mulberry leaf tea fermented by *Eurotium cristatum* [J]. Food Science and Technology, 2021, 46(3): 44-48.
- [41] ZHUO J, XUAN J J, CHEN Y, et al. Increase of γ -aminobutyric acid content and improvement of physicochemical characteristics of mulberry leaf powder by fermentation with a selected lactic acid bacteria strain[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 187: 115250.
- [42] WANG B, WANG C M, DUAN Y C, et al. The effects of *Monascus purpureus* fermentation on metabolic profile, α -glucosidase inhibitory action, and in vitro digestion of mulberry leaves flavonoids[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 188: 115449.
- [43] 陈善敏, 王奕, 常睿, 等. 乳酸菌的健康功效及其在发酵茶叶中的应用进展[J]. 食品科学, 2024, 45(13): 365-372.
- CHEN S M, WANG Y, CHANG R, et al. Research progress in health benefits of lactic acid bacteria and application in fermented tea[J]. Food Science, 2024, 45(13): 365-372.
- [44] 梁贵秋, 谢婷婷, 高艳芳, 等. 3 株冠突散囊菌(*Eurotium cristatum*)发酵对桑叶茶品质的影响[J]. 蚕业科学, 2020, 46(5): 614-621.
- LIANG G Q, XIE T T, GAO Y F, et al. Effects of fermentation of three *Eurotium cristatum* strains on quality of mulberry leaf tea[J]. Science of Sericulture, 2020, 46(5): 614-621.
- [45] 林登蕃, 郑志豪, 周映君, 等. 植物基食品中多酚的生物转化及生物活性研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 319-327.
- LIN D F, ZHENG Z H, ZHOU Y J, et al. Research progress in biotransformation and biological activity of polyphenols in plant-based foods[J]. Food Science, 2024, 45(14): 319-327.
- [46] CHUAH H Q, TANG P L, ANG N J, et al. Submerged fermentation improves bioactivity of mulberry fruits and leaves [J]. Chinese Herbal Medicines, 2021, 13(4): 565-572.
- [47] 杨清. 桑红茶工艺研究及其品质分析[D]. 重庆: 西南大学, 2010: 58.
- YANG Q. Process and quality analysis of mulberry black tea [D]. Chongqing: Southwest University, 2010: 58.
- [48] 梅玉立, 黄先智, 丁晓雯. 响应面法优化发酵对桑叶生物碱、黄酮和多糖含量的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(6): 1764-1772.
- MEI Y L, HUANG X Z, DING X W. Effects of optimized fermentation on the content of alkaloids, flavonoids and polysaccharides in mulberry leaves by response surface methodology[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(6): 1764-1772.
- [49] CHEN Y L, LIU C M, YANG F, et al. UPLC-QQQ-MS/MS-based widely targeted metabolomic analysis, antioxidant and α -glucosidase inhibitory activities of mulberry leaves processed by solid-state fermentation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 188: 115351.
- [50] 王一迪, 孙闯, 王雅妮, 等. 桑叶红茶二次发酵工艺优化[J].

- 农产品加工, 2024(2): 47-51.
- WANG Y D, SUN W, WANG Y N, et al. Optimization of secondary fermentation process of mulberry leaf black tea[J]. Farm Products Processing, 2024(2): 47-51.
- [51] 向敏. 桑叶乳酸菌发酵及其品质特性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021: 63.
- XIANG M. Research on the fermentation of mulberry leaf lactic acid bacteria and its quality characteristics[D]. Chongqing: Southwest University, 2021: 63.
- [52] 肖洪, 黄先智, 丁晓雯, 等. 不同菌种比例对发酵桑叶茶生物活性成分含量的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(24): 205-208, 224.
- XIAO H, HUANG X Z, DING X W, et al. Effect of different starter rate on content of bioactive ingredient in fermented mulberry-leaf tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(24): 205-208, 224.
- [53] 肖洪, 沈以红, 黄先智, 等. 发酵桑叶茶生物活性成分变化研究[J]. 食品科学, 2013, 34(19): 176-180.
- XIAO H, SHEN Y H, HUANG X Z, et al. Comparative study of bioactive compounds of mulberry leaf tea fermented by different strains[J]. Food Science, 2013, 34(19): 176-180.
- [54] 徐丹, 唐子婷, 王雪丹, 等. 发酵桑叶生物活性成分含量变化研究[J]. 饲料研究, 2017(20): 45-49.
- XU D, TANG Z T, WANG X D, et al. Study on the change of bioactive components content of fermented mulberry leaves[J]. Feed Research, 2017(20): 45-49.
- [55] 修慧迪, 梁光月, 程磊. 基于超高效液相色谱—四极杆—飞行时间串联质谱技术分析不同乳酸菌发酵桑叶化学成分的变化[J]. 食品科学, 2024, 45(21): 236-244.
- XIU H D, LIANG G Y, CHENG L. Analysis of differences in chemical components of fermented mulberry leaves with different strains of lactic acid bacteria by ultra-high performance liquid chromatography-quadrupole-time of flight-mass spectrometry[J]. Food Science, 2024, 45(21): 236-244.
- [56] 孙小静, 刘军, 邹宇晓, 等. 干燥方式对脱水桑叶品质的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(10): 139-146.
- SUN X J, LIU J, ZOU Y X, et al. Effects of drying methods on dried quality of mulberry leaf[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(10): 139-146.
- [57] 秦樱瑞, 曾艺涛, 杨娟, 等. 干燥方式对桑叶降糖活性成分含量的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(17): 71-76.
- QIN Y R, ZENG Y T, YANG J, et al. Effects of drying methods on the contents of hypoglycemic components in mulberry leaves (*Morus alba* L.) [J]. Food Science, 2015, 36(17): 71-76.
- [58] 盛金凤, 陈坤, 王雪峰, 等. 不同干燥方式桑叶粉物理特性、氨基酸及挥发性成分分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 108-118.
- SHENG J F, CHEN K, WANG X F, et al. Analysis of physical properties, amino acids and volatile aroma components of mulberry leaf powder by different drying methods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 108-118.
- [59] 梁吉虹, 俞燕芳, 邓泽元, 等. 不同干燥方法对桑叶蛋白理化性质及营养特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(12): 1-10.
- LIANG J H, YU Y F, DENG Z Y, et al. Effects of different drying methods on the physicochemical properties and nutritional properties of mulberry leaf proteins[J]. Food Research and Development, 2023, 44(12): 1-10.
- [60] 赵慧玲, 王佳燕, 吕慧, 等. 干燥方式对桑叶主要活性成分及抗氧化活性的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(8): 191-195.
- ZHAO H L, WANG J Y, LÜ H, et al. Effects of drying methods on the main active ingredients and the antioxidant activity of mulberry leaves[J]. The Food Industry, 2020, 41(8): 191-195.
- [61] WANYO P, SIRIAMORN PUN S, MEESO N. Improvement of quality and antioxidant properties of dried mulberry leaves with combined far-infrared radiation and air convection in Thai tea process[J]. Food and Bioproducts Processing, 2011, 89(1): 22-30.
- [62] LEE S H. Development of mulberry-leaf tea containing γ -aminobutyric acid (GABA) by anaerobic treatments[J]. Korean Journal of Food Science and Technology, 2015, 47(5): 652-657.
- [63] OKADA T, SUGISHITA T, MURAKAMI T, et al. Effect of the defatted rice germ enriched with GABA for sleeplessness, depression, autonomic disorder by oral administration[J]. Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, 2000, 47(8): 596-603.
- [64] 马圣洲, 赵飞, 吴琴燕, 等. γ -氨基丁酸桑叶红茶开发研究[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(6): 393-395.
- MA S Z, ZHAO F, WU Q Y, et al. Research on the development of γ -aminobutyric acid mulberry leaf black tea[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(6): 393-395.
- [65] 石杨, 李美凤, 王家伦, 等. 厌氧时间对桑叶茶 γ -氨基丁酸等主要成分及其感官品质的影响[J]. 南方农业学报, 2022, 53(4): 1170-1176.
- SHI Y, LI M F, WANG J L, et al. Effects of anaerobic time on main mulberry leaf tea components such as γ -aminobutyric acid and sensory quality [J]. Journal of Southern Agriculture, 2022, 53(4): 1170-1176.