

加工工艺对绿茶儿茶素类化合物影响的研究进展

袁方正¹ 隗 玉¹ 李凤玲¹ 杜学慧² 史海传¹ 高艾英^{1,3}

(1. 泰安市食品药品检验检测研究院(泰安市纤维检验所), 山东 泰安 271000; 2. 泰安市质量技术检验检测研究院(泰安市特种设备检验研究院), 山东 泰安 271000; 3. 西北农林科技大学葡萄酒学院, 陕西 咸阳 712100)

摘要: 儿茶素类化合物(catechins)是赋予绿茶苦涩滋味的关键物质, 其结构与含量的变化对绿茶风味品质具有重要影响。文章通过整理目前儿茶素类化合物相关研究成果, 对摊放、杀青、揉捻、干燥等绿茶主要加工过程中儿茶素类化合物的变化进行了综述, 并探讨了儿茶素类化合物在加工过程中的主要变化机制及对苦涩滋味的影响。

关键词: 绿茶; 儿茶素类化合物; 加工工艺; 滋味物质

Research progress in the effects of processing techniques on catechins in green tea

YUAN Fangzheng¹ WEI Yu¹ LI Fengling¹ DU Xuehui² SHI Haichuan¹ GAO Aiyi^{1,3}

(1. Tai'an Institute for Food and Drug Control (Tai'an Fiber Inspection Institute), Tai'an, Shandong 271000, China; 2. Tai'an Quality Technical Inspection and Testing Institute (Tai'an Special Equipment Inspection and Research Institute), Tai'an, Shandong 271000, China; 3. College of Enology, Northwest A & F University, Xianyang, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Catechins are the key substances that endow green tea with a bitter and astringent taste, and the changes in their structures and content have an important effect on the flavor quality of green tea. By collating the current research results related to catechins, this paper summarizes the changes of catechins during the main processing steps including withering, de-enzyming, rolling, and drying of green tea, and explores the main mechanisms of changes in catechins during processing and their effects on the bitterness and astringency of green tea.

Keywords: green tea; catechins; processing techniques; taste-related compounds

绿茶为不发酵茶^[1], 其茶汤颜色清透, 具有滋味鲜爽、甘醇, 香气浓郁等特质^[2]。在绿茶茶汤中, 氨基酸主要赋予绿茶鲜爽滋味, 而儿茶素类化合物、咖啡碱和黄酮醇苷类等物质为绿茶苦涩味的重要来源^[3]。作为茶叶中的天然黄烷-3-醇类物质^[4], 儿茶素类化合物是滋味物质茶多酚的主体成分, 也是赋予绿茶独特的苦涩口感的关键物质^[3]。绿茶的风味品质取决于其鲜叶质量和加工工艺, 而加工工艺的作用至关重要^[5]。为更全面地理解儿茶素类化合物对绿茶滋味的影响, 文章拟对儿茶素类化合物在摊放、杀青、揉捻、干燥等主要阶段的相关研究进行归纳与讨论, 为优化绿茶加工工艺及改善滋味品质提供依据。

1 绿茶儿茶素类化合物概述

儿茶素类化合物具有 2-苯基苯并吡喃的 C6-C3-C6 基本构型^[6], 其结构如图 1 所示。B 环上羟基的数量和 C 环上没食子基团的存在与否决定了各种儿茶素单体在结构和功能上的差异^[7], 依据 C 环 3 位上有无没食子酸基团的连接^[8], 儿茶素类化合物可分为酯型儿茶素和非酯型儿茶素。非酯型儿茶素为简单儿茶素, 其滋味醇和, 收敛性弱, 主要有表儿茶素(EC)、儿茶素(C)、表没食子儿茶素(EGC)和没食子儿茶素(GC); 酯型儿茶素为复杂儿茶素, 其与绿茶的苦涩味关联性高, 主要有表儿茶素没食子酸

基金项目: 泰安市科技创新发展项目(编号: 2023NS097)

通信作者: 高艾英(1977—), 女, 泰安市食品药品检验检测研究院(泰安市纤维检验所)高级工程师, 西北农林科技大学在读博士研究生。E-mail: aygao@126.com

收稿日期: 2024-11-20 **改回日期:** 2025-06-17

引用格式: 袁方正, 隗玉, 李凤玲, 等. 加工工艺对绿茶儿茶素类化合物影响的研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 219-225.

Citation: YUAN Fangzheng, WEI Yu, LI Fengling, et al. Research progress in the effects of processing techniques on catechins in green tea [J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 219-225.

酯(EGC)、儿茶素没食子酸酯(CG)、表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)和没食子儿茶素没食子酸酯(GCG)^[8]。依据 C 环 2,3 位同分异构体,儿茶素类化合物可分为表型(顺式)与非表型(反式)。EGCG 在绿茶中含量最高,是绿茶苦味的主要贡献物之一,不同儿茶素单体具有不同的滋味阈值,相同浓度下,不同儿茶素单体呈现出不同的苦味与涩味强度^[3]。表型与非表型儿茶素互为同分异构体,但存在着呈味差异,表型儿茶素对苦味和涩

味的影响更大^[9-10]。有研究表明,随着儿茶素单体浓度的增大,其苦涩滋味逐渐增强^[11],在茶汤中,儿茶素类化合物的呈味表现还受到咖啡碱、谷氨酸钠、Ca²⁺等其他物质作用的影响^[3]。儿茶素类化合物具有苦涩滋味,但能带来诸多健康益处,可作为绿茶中强有力的抗氧化剂,也可抑制自由基的形成及脂质过氧化^[12],在抗病毒、预防癌症、心脏保护、神经保护等疾病预防与治疗方面拥有巨大潜力^[12-15]。

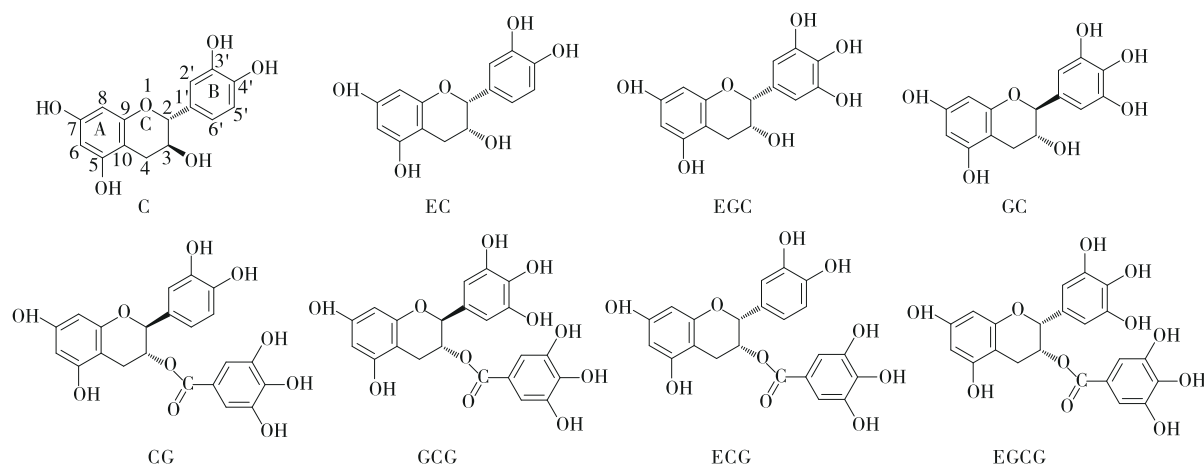


图 1 茶叶中 8 种儿茶素单体结构

Figure 1 Structures of 8 catechin monomers in tea

2 加工工艺对绿茶儿茶素类化合物及滋味品质的影响

2.1 摊放

摊放是绿茶加工的第一道工序,采摘的鲜叶在一定的温度、湿度和光照环境下被均匀摊开。摊放过程中叶片水分持续降低,为了适应脱水胁迫,鲜叶生理结构发生改变以维持代谢平衡,叶片组织细胞液浓度增加,蛋白质理化特性发生改变,氧化酶和水解酶活性增加,大分子化合物被氧化水解为简单化合物^[16]。近年来,众多研究探索了摊放期间儿茶素类化合物的变化情况,一般认为,摊放时酯型儿茶素可发生水解反应^[17],进行脱没食子化形成非酯型儿茶素和没食子酸,表现出苦涩味的酯型儿茶素含量下降,醇和收敛的非酯型儿茶素含量上升,同时在摊放中儿茶素类化合物被多酚氧化酶部分氧化^[16],有利于茶叶苦涩味的减弱。

摊放过程中儿茶素类化合物的变化趋势受到温度、湿度、时间、酶活性、干物质消耗等方面的综合影响,通过合理控制摊放条件,可对茶叶中儿茶素类化合物的转化进行调控,从而优化最终茶汤的滋味品质。时间是影响摊放的重要因素之一,尹军峰等^[18-19]发现,摊放过程中随着鲜叶水分含量的降低,儿茶素类化合物总量前期下降

而后期逐渐上升,在摊放前期儿茶素类化合物的氧化降解导致含量降低,而随着摊放时间的延长,叶片含水量下降,呼吸作用消耗碳水化合物,内含物质消耗,随着酶活性及叶片干物质含量下降,儿茶素类化合物相对含量后期上升。此外,温度与湿度会影响酶活性及干物质的变化,如高温低湿环境下,摊放时间缩短,酶活性较强,儿茶素类化合物含量降低;低温高湿环境下,摊放时间延长,酶活性较弱,同时干物质消耗大,儿茶素类化合物含量升高^[18]。摊放期间,儿茶素类化合物的生物合成也在持续进行,但受脱水胁迫影响,茶叶风味化合物的基因表达发生变化,儿茶素类化合物含量水平受到合成过程相关基因抑制的影响^[20-21]。据 Wang 等^[20]报道,涉及儿茶素类化合物和黄酮醇生物合成相关的差异表达基因(DEGs)在摊放过程中显著下调,摊放 12 h 后,C、GC、EC 和 EGC 生物合成相关的无色花青素还原酶(LAR)和花青素还原酶(ANR)基因受到明显抑制。虞昕磊^[22]研究表明,低温处理可以起到延缓儿茶素类化合物合成基因下调表达的作用,使其降低幅度比自然摊放时略低。

2.2 杀青

杀青是决定绿茶品质的关键工艺,杀青的主要作用是在高温下使茶叶中的多酚氧化酶和过氧化物酶活性快

速钝化^[23],酶促作用停止,一定程度上阻止了儿茶素类化合物的氧化转化,此外杀青过程中部分低沸点香气成分散失,叶片内含物质进一步分解为简单产物^[24]。

杀青对儿茶素类化合物及其苦涩味的影响主要体现在高温高湿及有氧环境下,儿茶素类化合物发生异构化、氧化、分解等变化,酯型儿茶素与非酯型儿茶素比例发生变化,表型儿茶素向非表型儿茶素转变,苦涩味得到改善。杀青温度、时间及方式共同决定了儿茶素类化合物的转化程度和茶汤滋味品质。温度是杀青的关键因素,杀青前期,在温度未使酶活性大部分失效前,多酚氧化酶依然可以催化氧化部分儿茶素类化合物,有助于缓解绿茶苦涩味^[25]。儿茶素类化合物在不同杀青温度下的转化与差向异构化有关,杀青温度的升高可能导致表型儿茶素在热作用下在C-2位置发生异构反应,形成非表型儿茶素^[26]。Shan等^[26]研究发现,随着杀青温度的升高,顺式儿茶素EC含量降低,3种反式儿茶素含量升高,EC与儿茶素二聚体含量的降低可能是使龙井茶苦涩味明显减轻的原因。

绿茶杀青方式主要有热风、蒸汽、锅炒、微波、电磁、远红外及组合式杀青工艺^[23,27-28]。不同杀青方式主要反映在其热量传递介质及瞬时传导的温度及速度不同^[29],由此导致杀青时间及儿茶素类化合物保留和转化的差异。蒸汽杀青和锅炒杀青分别表现为湿热作用和干热作用,滚筒杀青则兼具之。齐桂年等^[28]研究发现,蒸汽杀青时间较锅炒及滚筒杀青时间短,儿茶素类化合物被较多地保留,EGCG发生氧化水解而含量降低,C、EC含量升高,而锅炒杀青持续时间较长,EGCG、EGC、EGC均参与氧化水解等反应导致含量降低,蒸汽杀青感官品质得分较高,对夏秋茶的滋味品质有改进作用。微波杀青具有传热迅速、热效率高、杀青时间短的特点。刘梦圆等^[30]发现,采用微波杀青,多酚氧化酶被快速钝化,与滚筒杀青相比,能更多地保留儿茶素类化合物,同时酯型儿茶素含量与儿茶素类化合物总量之比显著降低,苦涩味减轻,能较好地实现秋季绿茶的保绿降苦。宋宪颖等^[24]对比了微波、热风、蒸汽、锅炒4种杀青方法对绿茶品质的影响,其中微波杀青绿茶简单儿茶素和氨基酸含量最高,且茶多酚与氨基酸比值(酚氨比)和酯型儿茶素含量与儿茶素类化合物总量比值最小,感官评分最高,滋味醇爽。Yu等^[31]研究了一种电磁滚筒—热风—蒸汽三重组杀青工艺(ERHSF),与传统杀青处理相比,ERHSF处理促进了茶多酚和酯型儿茶素的降解,酚氨比、酯型儿茶素含量与简单儿茶素含量之比分别降低了11.0%,3.2%,显著降低了夏秋绿茶的苦涩味。

2.3 揉捻

绿茶鲜叶经过摊放和杀青后,通常进入揉捻阶段。揉捻的作用一方面会破碎茶叶细胞,促使茶汁外溢,增加茶汤中浸出物含量;另一方面,茶叶在揉、搓等外力作用下芽叶卷紧,形成条索状等形状,对绿茶内质、外形都有重要影响^[32]。

揉捻对儿茶素类化合物的影响体现在两个方面:一方面,揉捻以促进内含物质浸出的物理变化为主,随着细胞破碎,儿茶素类化合物等内含物质渗透到表面,不利于鲜醇滋味^[32]。另一方面,揉捻还伴随部分化学反应,酯型儿茶素降解为简单儿茶素,由于杀青过程中残留部分酶活性,细胞破碎后,内含物质与酶充分接触,儿茶素类化合物可继续在酶的催化下发生部分氧化反应,导致儿茶素类化合物含量降低^[33]。因此,恰当的揉捻工艺可以平衡儿茶素类化合物的释放与反应过程。揉捻过程中的压力和时间是该阶段的关键因素。崔宏春等^[34]对比了传统揉捻、轻压与重压揉捻对儿茶素类化合物含量的影响。结果表明,由于轻压揉捻对细胞组织破坏程度较小,对EGCG、ECG等儿茶素单体的保留较为有利,而重压揉捻有利于GCG、CG等儿茶素单体的保留。董晨等^[32]对鄂茶10号绿茶进行不同时长的揉捻时发现,揉捻30 min后茶叶儿茶素类化合物总量、EC和C含量最高,分别高于不揉捻处理绿茶1.76%,1.63%,13.37%;揉捻40 min会使绿茶产生苦涩感,不利于形成较好的口感。袁海波等^[35]认为热揉处理可能导致儿茶素类化合物部分降解,采用灭菌后边烘边揉及趁热揉捻工艺,茶样的酯型儿茶素总量相对较低,滋味醇爽。

2.4 干燥

干燥是绿茶关键的热加工工艺之一,干燥期间发生的复杂热化学反应对绿茶风味品质的形成具有重要贡献。除继续散失水分、固定外形外,干燥过程的热量可促进内含物质的进一步转化,在干燥过程中,儿茶素类化合物的结构变化和含量改变对绿茶苦涩味的减轻十分重要,高温状态下儿茶素类化合物参与到异构化、降解、聚合以及与茶氨酸、葡萄糖和蛋白质的相互作用等一系列化学反应中^[36]。在干燥过程的持续高温下,酯型儿茶素发生降解,Luo等^[37]研究发现,75℃干燥处理下的酯型儿茶素含量较65℃的更低,EGCG和ECG含量分别降低了96.83%和82.02%,有利于口感醇厚。在高温降解的同时,儿茶素类化合物的异构化也可能与降解同时发生^[38-39]。此外,儿茶素类化合物在加热过程中的另一重要反应为与茶氨酸反应生成N-乙基-2-吡咯烷酮取代的儿茶素类(EPSF),此类物质含量在绿茶干燥过程中上升明显^[40],茶氨酸首先发生Strecker反应转化为醛,通过环化

生成 1-乙基-5-羟基-2-吡咯烷酮, 再与儿茶素类化合物 A 环的 C6 或 C8 位结合, 形成 EPSF 类化合物, EPSF 类化合物的苦涩味阈值较 EGCG 的低, 此类化合物的生成有利于绿茶苦涩味的降低^[41-42]。

通过调整干燥工艺, 可有效调控儿茶素类化合物的组分变化, 优化绿茶滋味。绿茶传统干燥方式主要有晒干(晒青绿茶)、烘干(烘青绿茶)、炒干(炒青绿茶), 此外, 微波、滚筒、热风及远红外干燥等技术也在绿茶生产中得到应用^[43]。王辉等^[44]研究了金属、空气与波能量 3 种热导介质对绿茶品质的影响, 属于空气热导干燥的烘青绿茶更有利于儿茶素类化合物总量的积累, 获得的烘青绿茶清香持久、醇厚鲜爽, 而属于波能量热导的微波干燥的酯型儿茶素与简单儿茶素含量比值和咖啡碱含量较大, 苦涩味相对较重, 感官滋味评价略低。刘梦圆等^[45]将烘二青与烘三青工艺进行变温组合来加工秋季绿茶, 在单独变温处理下酯型儿茶素含量显著降低, 最大降幅达 12.95%, 而组合变温处理下, 简单儿茶素与酯型儿茶素含量之比显著提高, 可起到提香降苦的效果, 加工后的绿茶滋味醇厚、栗香高长。

2.5 其他

2.5.1 焙火 焙火是“高火功”茶如黄大茶和武夷岩茶等具有的用来改善和稳定茶叶品质的独特工序^[40], 其方式主要有木炭烘焙、烘箱烘焙、微波烘焙和远红外烘焙等^[46], 经焙火后, 茶叶水分降低, 异味去除, 高温下内含物质转变, 茶叶特有的香气和风味增加, 苦涩味降低, 保质期得以延长^[47]。研究表明, 干燥与焙火后的绿茶在化合物含量与组成方面仍存在差异^[40], 焙火处理后内含成分可进一步转化, 在焙火阶段, 儿茶素类化合物的差向异构化、降解及聚合反应等持续进行, 苦涩味的儿茶素类化合物含量减少, 滋味比未焙火绿茶更柔和^[48]。一方面, EPSF 类化合物含量由于儿茶素类化合物与茶氨酸的反应持续增加, 于帅等^[40]利用 UPLC-Q-Exactive/MS 的代谢组学法对高火功绿茶样品进行数据分析后发现, 焙火后的 3 种 EPSF 类化合物含量比干燥阶段平均增加 1 050%, 表明儿茶素类化合物在此阶段的反应高度活跃, EPSF 类化合物含量与焙火程度呈正相关, 且由焙火温度提升造成的 EPSF 类化合物增量显著高于焙火时间延长带来的效果^[41]。另一方面, 焙火温度的上升与时间的延长均可以促进儿茶素类化合物的异构化, 且由焙火时间延长引起的异构化转变比焙火温度提高引起的转变更为显著^[41]。此外, 多种聚合反应也在焙火阶段发生, 如葡萄糖可在 EGCG 的 A 环 C6/C8 上发生交联反应生成聚合物^[48], 儿茶素二聚体茶黄素-3,3'-双没食子酸酯(TFDG)含量也随焙火时间的延长而升高^[49]。

绿茶加工中加入焙火工艺, 可通过进一步促进儿茶素类化合物等内含物质的转化对贮藏及夏秋绿茶品质的改善起到重要作用。黄藩等^[50]对贮藏 5、10 个月的蒙山毛峰绿茶进行不同温度与时间的烘焙处理, 发现儿茶素类化合物总量、ECG、EGCG 含量随着烘焙温度的升高与时间的延长而降低, 最佳烘焙方式为 90℃烘焙 35 min, 烘焙后的绿茶苦涩味降低, 陈味去除, 感官品质得到提高。敖存等^[47]使用电烘箱在 100、120、140℃下对夏秋绿茶进行烘焙处理, 儿茶素类化合物在烘焙中含量逐渐降低, 下降幅度为 8%~14%, 并随着温度升高下降速率加快, 经烘焙后的绿茶香气提高, 青涩味减轻, 滋味变得醇厚。

2.5.2 外源添加 在绿茶加工中, 有时还会引入酶等外部物质来进一步调节茶叶生化成分的变化, 以改善绿茶滋味。通过酶等物质的添加, 可进一步调控儿茶素类化合物的转化, 降低绿茶苦涩味。Cao 等^[51]将单宁酶溶于水, 然后与揉捻叶混合, 发现单宁酶通过将酯型儿茶素水解为非酯型儿茶素和没食子酸, 可以改善秋茶的口感, 水解后的秋季绿茶回味甘甜, 酯型儿茶素比例降低, 苦味和涩味降低。李丽霞等^[52]发现在揉捻过程中加入鸡蛋清可使 EGC、ECG、EGCG 与儿茶素类化合物总量减少, 儿茶素类化合物的酚羟基与蛋清中蛋白质的 NH—CO、—OH、—NH、—COOH 以氢键形式形成难溶于茶汤的络合物, 绿茶苦涩味减轻。罗学平等^[53]使用风味蛋白酶处理杀青叶, 由于儿茶素类化合物与蛋白质的络合作用, 酯型儿茶素含量与儿茶素类化合物总量降低, 有助于降低苦涩味。

3 总结与展望

绿茶加工是复杂的物理化学过程。儿茶素类化合物经摊放、杀青、揉捻、干燥等主要工艺流程, 发生了异构化、降解、氧化、聚合等多种反应, 其总量基本呈下降趋势, 茶汤苦涩味逐渐降低, 在此期间, 酯型儿茶素降解为非酯型儿茶素、表型儿茶素异构化为非表型儿茶素、茶氨酸与儿茶素类化合物反应生成 EPSF 类化合物等过程作用显著, 代表着苦涩味较重的物质向苦涩味较轻的物质转变, 对降低绿茶苦涩味起到重要作用。

为更加全面地认识绿茶加工对感官品质与生化成分带来的影响, 后续可从以下方面进行深入研究: ① 当前对杀青、干燥、焙火等热加工工艺中儿茶素类化合物的研究尚不充足, 尤其是高温下儿茶素类化合物发生复杂反应的机理作用需深入探讨。② 各工艺阶段对儿茶素类化合物的影响已有较多研究, 但由于不同工艺对儿茶素类化合物等呈味物质的影响互相关联, 应更加系统优化加工工艺, 研究各工艺间的协同作用。③ 对绿茶儿茶素类化合物的研究多以不同工艺的比较及加工条件的改变为

主,再与感官评价和含量分析相结合,研究目标较为局限。后续可利用代谢组学等技术更加全面系统地阐述生化成分的差异性变化与代谢规律,进一步揭示对绿茶滋味品质的影响。④儿茶素类化合物是赋予绿茶苦涩味的重要物质,目前有关绿茶降苦作用的研究多以优化工艺条件以降低苦涩味物质含量为主。儿茶素类化合物在茶汤中的实际呈味表现复杂,与其他滋味物质间的呈味相互作用仍需深入探究,后续应加强滋味化学研究,实现对绿茶苦涩滋味的准确量化与可调化。

参考文献

- [1] TANG G Y, MENG X, GAN R Y, et al. Health functions and related molecular mechanisms of tea components: an update review[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20 (24): 6 196.
- [2] 王胜鹏, 龚自明, 陈勋, 等. 近五年茶鲜叶杀青工艺研究进展及展望[J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(11): 2 008-2 011.
WANG S P, GONG Z M, CHEN X, et al. Research and prospects on fresh tea leaves fixing process in recent five years [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(11): 2 008-2 011.
- [3] 张英娜. 绿茶茶汤主要儿茶素呈味特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016: 65-66.
ZHANG Y N. Study on the taste characteristics of the main catechins in green tea infusion[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2016: 65-66.
- [4] ZEEB D J, NELSON B C, ALBERT K, et al. Separation and identification of twelve catechins in tea using liquid chromatography/atmospheric pressure chemical ionization-mass spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 2000, 72(20): 5 020-5 026.
- [5] HAN Z X, RANA M M, LIU G F, et al. Green tea flavour determinants and their changes over manufacturing processes [J]. *Food Chemistry*, 2016, 212: 739-748.
- [6] 邓洪燕, 毛静春, 毛建富, 等. 普洱茶中儿茶素研究进展[J]. *农学学报*, 2024, 14(1): 83-89.
DENG H Y, MAO J C, MAO F J, et al. Research progress of catechin in Pu'er tea[J]. *Journal of Agriculture*, 2024, 14(1): 83-89.
- [7] ISHII T, MORI T, ICHIKAWA T, et al. Structural characteristics of green tea catechins for formation of protein carbonyl in human serum albumin[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2010, 18(14): 4 892-4 896.
- [8] 叶玉龙. 萎凋/摊放对茶叶在制品主要理化特性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2018: 3-4.
YE Y L. Effects of withering on the main physical and chemical properties of manufactured tea leaves[D]. Chongqing: Southwest University, 2018: 3-4.
- [9] 韦雅杰, 高彦祥. 茶汤滋味物质及其调控研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(11): 189-197.
- WEI Y J, GAO Y X. Taste-related compounds in tea infusion and the regulation: a review[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(11): 189-197.
- [10] THORNGATE J H, NOBLE A C. Sensory evaluation of bitterness and astringency of 3R(-)-epicatechin and 3S(+)-catechin[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1995, 67(4): 531-535.
- [11] NARUKAWA M, KIMATA H, NOGA C, et al. Taste characterisation of green tea catechins[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2010, 45(8): 1 579-1 585.
- [12] MUSIAL C, KUBAN-JANKOWSKA A, GORSKA-PONIKOWSKA M. Beneficial properties of green tea catechins[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(5): 1 744.
- [13] XU J, XU Z, ZHENG W M. A review of the antiviral role of green tea catechins[J]. *Molecules*, 2017, 22(8): 1 337.
- [14] HUANG H T, CHENG T L, LIN S Y, et al. Osteoprotective roles of green tea catechins[J]. *Antioxidants*, 2020, 9(11): 1 136.
- [15] MAK J C W. Potential role of green tea catechins in various disease therapies: progress and promise[J]. *Clinical and Experimental Pharmacology & Physiology*, 2012, 39(3): 265-273.
- [16] 尹军峰, 许勇泉, 袁海波, 等. 名优绿茶鲜叶摊放过程中主要生化成分的动态变化[J]. *茶叶科学*, 2009, 29(2): 102-110.
YIN J F, XU Y Q, YUAN H B, et al. Dynamic change of main biochemical components of premium green tea fresh leaves during spreading[J]. *Journal of Tea Science*, 2009, 29(2): 102-110.
- [17] 程启坤. 茶化浅析[M]. 杭州: 中国农业茶叶研究所情报资料研究室, 1982: 174.
CHEN Q K. A brief analysis of tea[M]. Hangzhou: Information and Data Research Office of China Agricultural Tea Research Institute, 1982: 174.
- [18] 尹军峰, 闵航, 许勇泉, 等. 摊放环境对名优绿茶鲜叶茶多酚及儿茶素组成的影响[J]. *茶叶科学*, 2008, 28(1): 22-27.
YIN J F, MIN H, XU Y Q, et al. Effects of spreading environment on tea polyphenols and catechin components in tea fresh leaves of high quality green tea[J]. *Journal of Tea Science*, 2008, 28(1): 22-27.
- [19] 尹军峰. 名优绿茶鲜叶摊放过程主要化学成分变化规律及环境影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 29-30.
YIN J F. Variation of main chemical components as well as influencing factors in fresh leaves of famous and excellent green-tea during spreading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 29-30.
- [20] WANG Y, ZHENG P C, LIU P P, et al. Novel insight into the role of withering process in characteristic flavor formation of

- teas using transcriptome analysis and metabolite profiling[J]. Food Chemistry, 2019, 272: 313-322.
- [21] WU Z J, MA H Y, ZHUANG J. iTRAQ-based proteomics monitors the withering dynamics in postharvest leaves of tea plant (*Camellia sinensis*) [J]. Molecular Genetics and Genomics, 2018, 293(1): 45-59.
- [22] 虞昕磊. 鲜叶堆放方式对绿茶色、香、味品质成分代谢的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020: 126-127.
- YU X L. Effects of different withering methods on components metabolism related to color, aroma and taste quality in green tea[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020: 126-127.
- [23] 葛庆丰, 张聪, 于海, 等. 绿茶的微波—热风联合杀青工艺研究[J]. 食品科学, 2011, 32(24): 196-199.
- GE Q F, ZHANG C, YU H, et al. Green tea fixation by simultaneous microwave and hot air treatment[J]. Food Science, 2011, 32(24): 196-199.
- [24] 宋宪颖, 黄艳梅, 崔俪丹, 等. 杀青方法对紫色芽叶加工绿茶品质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(11): 19-27.
- SONG X Y, HUANG Y M, CUI L D, et al. Effects of different fixation methods on the quality of green tea processed by purple bud leaves[J]. Food & Machinery, 2021, 37(11): 19-27.
- [25] 祝冬青. 绿茶加工中的酶学研究与应用[J]. 蚕桑茶叶通讯, 2001(1): 5-8.
- ZHU D Q. Enzymatic study and application in green tea processing[J]. Newsletter of Sericulture and Tea, 2001(1): 5-8.
- [26] SHAN X J, DENG Y L, NIU L C, et al. The influence of fixation temperature on Longjing tea taste profile and the underlying non-volatile metabolites changes unraveled by combined analyses of metabolomics and E-tongue[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 191: 115560.
- [27] 王文明, 宋志禹, 陈巧敏, 等. 我国茶叶杀青机研究进展分析[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(2): 86-91.
- WANG W M, SONG Z Y, CHEN Q M, et al. Research progress of tea smashing machine in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(2): 86-91.
- [28] 齐桂年, 刘勤晋. 不同工艺杀青对绿茶中儿茶素组分含量影响的研究[J]. 中国食品学报, 2001(2): 1-4.
- QI G N, LIU Q J. Studies on the components of catechin in green tea treated by different de-enzyming processes[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2001(2): 1-4.
- [29] 吴雅丽. 利用杀青技术改善夏秋茶品质探析[J]. 南方农业, 2017, 11(8): 124, 126.
- WU Y L. Study on improving the quality of summer and autumn tea by using fixing technology[J]. South China Agriculture, 2017, 11(8): 124, 126.
- [30] 刘梦圆, 崔俪丹, 项希, 等. 微波杀青工艺对秋季绿茶的保绿降苦作用[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(7): 2 151-2 157.
- LIU M Y, CUI L D, XIANG X, et al. Effects of microwave fixation process on preserving green color and reducing bitterness in autumn green tea[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(7): 2 151-2 157.
- [31] YU Y Y, ZHU X Z, OUYANG W, et al. Effects of electromagnetic roller-hot-air-steam triple-coupled fixation on reducing the bitterness and astringency and improving the flavor quality of green tea[J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100844.
- [32] 董晨, 曲凤凤, 艾仄宜, 等. 揉捻时间对鄂茶 10 号优质绿茶品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(16): 83-87.
- DONG C, QU F F, AI Z Y, et al. Effect of rolling time on quality of green tea E-Cha No. 10[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2018, 57(16): 83-87.
- [33] ZHOU H C, LIU Y Q, WU Q, et al. The manufacturing process provides green teas with differentiated nonvolatile profiles and influences the deterioration of flavor during storage at room temperature[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101371.
- [34] 崔宏春, 余继忠, 张建勇, 等. 加工工艺对绿茶儿茶素组分和茶多酚保留率的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(4): 209-212.
- CUI H C, YU J Z, ZHANG J Y, et al. Effects of processing technology on catechin components and tea polyphenol retention in green tea[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(4): 209-212.
- [35] 袁海波, 尹军峰, 邓余良, 等. 原料茶揉捻工艺对绿茶饮料品质的影响[J]. 茶叶科学, 2014, 34(1): 29-35.
- YUAN H B, YIN J F, DENG Y L, et al. Effect of raw tea processing with different rolling technology on the quality of green tea beverage[J]. Journal of Tea Science, 2014, 34(1): 29-35.
- [36] WANG H J, CHEN L, XU A N, et al. Thermochemical reactions in tea drying shape the flavor of tea: a review[J]. Food Research International, 2024, 197: 115188.
- [37] LUO H Y, WANG Y, CHANG R, et al. Effects of yellowing and drying treatment temperatures on the taste of autumn green tea[J]. Drying Technology, 2024, 42(2): 358-371.
- [38] DONLAO N, OGAWA Y. The influence of processing conditions on catechin, caffeine and chlorophyll contents of green tea (*Camellia sinensis*) leaves and infusions[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 116: 108567.
- [39] WANG R, ZHOU W B, JIANG X H. Reaction kinetics of degradation and epimerization of epigallocatechin gallate (EGCG) in aqueous system over a wide temperature range[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(8): 2 694-2 701.
- [40] 于帅, 许继业, 胡争艳, 等. 基于代谢组学的绿茶热加工过程

- 中化学成分变化规律解析[J]. 食品科学, 2024, 45(12): 165-175.
- YU S, XU J Y, HU Z Y, et al. Metabolomics analysis of variations in chemical components of green tea during thermal processing[J]. Food Science, 2024, 45(12): 165-175.
- [41] 于帅. 绿茶热加工过程化学成分变化规律及EPSF强化技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2024: 6-29.
- YU S. Study on the change rule of chemical composition during thermal processing and technique for highly efficient enhancement of EPSFs of green tea[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2024: 6-29.
- [42] JIANG Z D, HAN Z S, WEN M C, et al. Comprehensive comparison on the chemical metabolites and taste evaluation of tea after roasting using untargeted and pseudotargeted metabolomics[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(3): 606-617.
- [43] 屈丽池, 王近近, 黄纯勇, 等. 绿茶加工工艺对氨基酸及风味品质形成的影响研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(5): 380-388.
- QU L C, WANG J J, HUANG C Y, et al. Research progress on effects of processing technology of green tea on formation of amino acids and flavor quality[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(5): 380-388.
- [44] 王辉, 刘亚芹, 黄建琴, 等. 不同热导介质干燥对绿茶品质成分及感官的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(2): 252-257, 266.
- WANG H, LIU Y Q, HUANG J Q, et al. Effects of different thermal conductive medium drying on quality components and sensory of green tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(2): 252-257, 266.
- [45] 刘梦圆, 项希, 李敏, 等. 变温干燥处理对秋季绿茶品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(24): 7 909-7 918.
- LIU M Y, XIANG X, LI M, et al. Effect of variable temperature drying on the quality of autumn green tea[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(24): 7 909-7 918.
- [46] 黄朕樟. 烘焙工艺和添加物对绿茶饮料原料茶品质的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2020: 3-4.
- HUANG B Z. Effect of roasting process and additives on the quality of tea used for green tea beverage production[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020: 3-4.
- [47] 敖存, 龚淑英, 张俊, 等. 烘焙技术对中对低档绿茶滋味品质改善的研究[J]. 茶叶, 2010, 36(1): 21-25.
- AO C, GONG S Y, ZHANG J, et al. Effect of baking technology on taste of middle and low quality green tea[J]. Journal of Tea, 2010, 36(1): 21-25.
- [48] MORIKAWA H, OKUDA K, KUNIHARA Y, et al. Oligomerization mechanism of tea catechins during tea roasting[J]. Food Chemistry, 2019, 285: 252-259.
- [49] LIU F, TU Z, CHEN L, et al. Analysis of metabolites in green tea during the roasting process using non-targeted metabolomics[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(1): 213-220.
- [50] 黄藩, 罗凡, 张翔, 等. 烘焙对冷藏后名优绿茶主要生化成分及感官品质的影响[J]. 茶叶学报, 2022, 63(2): 92-100.
- HUANG F, LUO F, ZHANG X, et al. Effect of baking treatments on storaged famous green tea sensory quality and major biochemical components[J]. Acta Tea Sinica, 2022, 63(2): 92-100.
- [51] CAO Q Q, ZOU C, ZHANG Y H, et al. Improving the taste of autumn green tea with tannase[J]. Food Chemistry, 2019, 277: 432-437.
- [52] 李丽霞, 钟晓雪, 蒋宾, 等. 揉捻叶中添加鸡蛋清对绿茶风味成分及感官品质的影响[J]. 南方农业, 2025, 19(1): 96-102.
- LI L X, ZHONG X X, JIANG B, et al. Effect of adding egg white to rolled leaves on flavor components and sensory quality of green tea[J]. South China Agriculture, 2025, 19(1): 96-102.
- [53] 罗学平, 李丽霞, 钟晓雪. 风味蛋白酶对绿茶风味成分和感官品质的影响[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(11): 152-159.
- LUO X P, LI L X, ZHONG X X. Effects of flavor protease on flavor components and sensory quality of green tea[J]. China Food Additives, 2023, 34(11): 152-159.