

不同品种和工艺条件对白茶品质形成机制的影响研究进展

夏长杖¹, 杨天根², 翟精武¹, 蒲璐璐³, 刘亚兵^{3*}, 王敏³, 杨慧⁴

(1. 安顺学院/贵州省高校乡村振兴研究中心, 安顺 561000; 2. 安顺市西秀区农业农村局, 安顺 561000;
3. 贵州省茶叶研究所, 贵阳 550006; 4. 普定县农业农村局, 普定 562100)

摘要: 白茶属微发酵茶, 不同茶树品种制作工艺白茶鲜醇可口和花香浓郁的品质有所差异, 在不同工艺条件下, 茶中多酚类物质、蛋白质、游离氨基酸、生物碱和可溶性糖等内含物质发生不同程度变化, 导致白茶外形、色泽及冲泡后汤色、滋味和香气发生不同程度的变化, 进而赋予了独特的品质特征。白茶的品质形成十分复杂, 其成分的组成、含量及所表现的香气特征受茶树品种和工艺条件的不同而有所差异。鉴于此, 为推动工艺白茶产业的发展, 挖掘白茶品质形成机制, 本文综述了近几年白茶在萎凋和干燥过程中品质形成机制, 分析了不同茶树品种和工艺条件对白茶品质影响原因并进行了展望, 旨在为提升白茶品质、优化白茶加工工艺及利用和选育更多不同茶树品种供理论依据。

关键词: 白茶; 工艺条件; 茶树品种

Research progress of the impact of different varieties and process conditions on the quality of white tea quality formation

XIA Chang-Yi¹, YANG Tian-Gen², ZHAI Jing-Wu¹, PU Lu-Lu³, LIU Ya-Bing^{3*}, WANG Min³, YANG Hui⁴

(1. Anshun College, Anshun/Guizhou Provincial University Rural Revitalization Research Center, Anshun 561000, China;
2. Agriculture and Rural Bureau of Xixiu District, Anshun 561000, China; 3. Guizhou Tea Research Institute, Guiyang 550006, China; 4. Agriculture and Rural Affairs Bureau of Puding County, Puding 562100, China)

ABSTRACT: White tea belongs to micro fermented tea, and the quality of white tea produced by different tea tree varieties varies in terms of freshness, mellow taste, and strong floral aroma. Under different process conditions, polyphenols, protein, free amino acids, alkaloids and soluble sugar in the tea contain to varying degrees of effects, thereby endowing it with unique quality characteristics. The quality formation of white tea is very complex, and the composition, content, and aroma characteristics of its components vary depending on the variety and processing conditions of the tea tree. In view of this, to promote the development of the craft white tea industry and explore the mechanism of white tea quality formation, this article reviewed the quality formation mechanism of white tea during

基金项目: 安顺学院 2023 年度校级项目博士基金专项(asxybsjj202309)、贵州省科技厅科技计划支撑项目(黔科合支撑[2022]一般 144)、贵州省科技厅科技计划支撑项目(黔科合支撑[2023]一般 063)、贵州省基础研究计划项目(黔科合基础-ZK[2023]一般 166)

Fund: Supported by the Anshun College 2023 School-level Project Doctoral Fund Special Project (asxybsjj202309), the Guizhou Science and Technology Department Science and Technology Support Project (Guizhou Science and Technology Cooperation Support [2022] General 144) and (Guizhou Science and Technology Cooperation Support [2023] General 063), and the Guizhou Basic Research Program Project (Guizhou Science and Technology Cooperation Foundation-ZK [2023] General 166)

*通信作者: 刘亚兵, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为茶叶加工。E-mail: lybgz628@163.com

*Corresponding author: LIU Ya-Bing, Master, Assistant Professor, Guizhou Tea Research Institute, Guiyang 550006, China. E-mail: lybgz628@163.com

withering and drying processes in recent years, analyzed the reasons for the impact of different tea tree varieties and process conditions on white tea quality, and looks forward to it. The aim is to provide theoretical basis for improving white tea quality, optimizing white tea processing technology, and utilizing and breeding more different tea tree varieties.

KEY WORDS: white tea; process conditions; tea tree varieties

0 引言

白茶属微发酵茶,是中国六大茶类之一,主产于福建省福鼎、政和、松溪和建阳等地。白茶加工工艺精简,主要分为萎凋和干燥,因其不炒不揉的独特制法,具有满披白毫、独特口感而得名^[1]。白茶丰富内含成分具有较强的抗氧化、抗癌、抗菌、降血压、降血糖等多种生理功能^[2]。白茶多酚类含量与绿茶略相同,且多酚类物质较其他茶类更丰富,具有更强的抗氧化能力^[3]。高氨基酸含量也是白茶的一个主要特点,能有效缓解紧张情绪^[4]。另外,咖啡因和多糖也具有治疗肿瘤等功效^[5],深受广大消费者的青睐,其产销量与市场的占有率逐年上升^[6]。根据中国茶业流通协会的数据显示,截至2022年,全国白茶产量、产值和内销均有显著增长,全国白茶产量达9.45万t,产值77.93亿元,内部销售总额100.13亿元^[7]。白茶行业迅速发展,全国各地也纷纷引进本地品种进行白茶加工,随着新品种培育,新工艺白茶的出现,让白茶品种和产品种类都得到了极大的提升^[8]。

传统白茶主要以福鼎大白茶、福鼎大毫茶、政和大白茶等茶树品种为主,特定茶树品种和工艺条件共同奠定了白茶重要化学物质基础,赋予白茶独特的风味品质^[9]。目前,国内外对白茶研究多集中于加工工艺^[1]、保健功效^[10]、白茶品质化学构成^[11]等方面,对其内在物质变化机制及与之对应的生物化学组分对其品质影响尚不明确,同时对不同茶树品种及工艺条件对白茶品质形成机制的影响缺乏系统性研究。本文综述了近年国内外有关白茶在萎凋和干燥过程中白茶品质成分、不同茶树品种及工艺条件对白茶品质成分形成机制的影响,旨在为提升白茶品质、优化白茶加工工艺提供理论依据,为不同地区优质茶树品种加工白茶的利用和选育、对白茶关键工艺(如萎凋、干燥等)进行智能化监控奠定基础。

1 白茶的品质形成机制

传统白茶制作只需经过一段较长的萎凋过程,然后进行干燥即得到白茶成品,因此萎凋和干燥过程是影响白茶品质的关键步骤。然而,目前国内外对白茶品质形成机制研究还很缺乏。萎凋作为白茶品质形成的关键工艺,在萎凋过程中鲜叶不断蒸发水分,伴随着一系列如氧化、水解、合成等生理生化变化,这些变化都会逐步促进白茶独特品质特性形成^[12]。干燥过程中,受高温的影响,茶叶中

酶活被破坏,酶促氧化作用停止,从而导致茶叶内含成分的热化学变化,形成白茶独特茶叶品质。但干燥对内含品质成分形成影响不大,对挥发性成分变化幅度相对较大,因此干燥过程是影响白茶香气形成的关键步骤^[13]。

1.1 萎凋过程中白茶品质的形成

1.1.1 萎凋过程中多酚类的形成

多酚类物质具有苦味和强烈的刺激性,是构成白茶风味主要成分。在萎凋过程中茶叶不断失水,伴随多酚类物质发生呼吸分解、酶促氧化,导致其含量逐渐减少^[14]。研究显示,白茶在制作过程中,多酚总量和儿茶素总量在萎凋初期呈缓慢下降趋势,而萎凋后期呈快速下降趋势^[15-16]。陈勤操^[17]探究白茶萎凋过程中主要滋味品质成分的变化规律发现,大部分儿茶素和二聚儿茶酚组分在萎凋中前期基本不变,而在萎凋中后期明显下降。另外,在萎凋期间,儿茶素、黄酮(醇糖苷)也参与部分酚类物质的转化和合成,如原花青素、聚酯型儿茶素、酚酸类物质呈降低趋势,而茶黄素类含量增加;黄酮(醇糖苷)组分在白茶中含量很高,是区别于其他茶叶的一种特有物质,在不同部位含量呈现出不同规律变化^[11]。

有研究发现,在萎凋过程中表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG)、表没食子儿茶素(epigallocatechin, EGC)含量逐渐减少,而没食子儿茶素没食子酸酯(gallocatechin gallate, GCG)、没食子儿茶素(gallocatechin, GC)含量升高^[18],同时儿茶素合成相关的关键基因则基本出现下调^[19-20],推测GCG、GC含量增加,与EGCG和EGC的异构化有关,而不是合成增强。张应根等^[21]研究表明鲜叶在失重前期(0%~20%),总茶多酚含量逐渐减少,至中期(20%~30%)逐渐上升,至晚期(50%~70%)急剧下降,至近70%时达高峰;而EGCG与总儿茶素的变化趋势基本一致。萎凋过程中由于黄酮醇类发生氧化,黄酮苷类逐步发生水解,导致黄酮含量不断积累,可达鲜叶的16.2倍^[22],随着萎凋时间增加,主要黄酮苷类化合物含量逐渐降低,黄酮苷元和水溶性糖类含量增加^[11],推测可能是黄酮(醇)糖苷合成得以加强。可见在萎凋过程中把握好多酚类物质变化,可促进白茶品质的形成。

1.1.2 萎凋过程中色素类物质含量的形成

白茶色素类物质主要包括叶绿素、胡萝卜素、叶黄素及茶色素等^[23]。色素类物质变化不仅影响白茶色泽,还影响汤色和滋味。研究表明,白茶萎凋前期,随叶内水分散

失及当胞内液体浓度升高,酶活力增加,叶绿素会被酶催化分解,萎凋中期受到邻醌的耦合氧化而被降解,叶绿素在细胞内酸性条件下转变为脱镁型叶绿素,导致叶片表现为深绿色。与此同时胡萝卜素、叶黄素、茶色素等成分加入,使得白茶呈现出“灰绿中带银毫”的色泽^[23]。而随着萎凋,叶绿素a与b的比例逐渐降低,在萎凋过程中茶色素明显增加^[22]。袁弟顺等^[18]研究发现在萎凋过程中,茶黄素增加 37.50%~89.20%,茶红素增加 14.30%~28.10%,茶褐素增加 53.66%~55.40%。可见在萎凋过程中控制色素类物质的变化,有利于白茶色泽及汤色等形成。

1.1.3 萎凋过程中蛋白质与游离氨基酸的形成

白茶氨基酸含量居六大名茶之首,已有研究表明,白茶加工过程氨基酸累积有一定促进作用^[24]。在萎凋过程中,游离氨基酸含量逐渐升高,与小分子量蛋白质及多肽的水解有关^[15],一方面由于蛋白水解,另一方面由于生物合成的加强^[25]。游离氨基酸含量在萎凋初期呈显著上升趋势,但后期由于游离氨基酸被邻醌氧化导致呈下降趋势^[20,26]。萎凋过程中,游离氨基酸总量显著增加,但不同氨基酸却呈现多样性变化趋势,如天冬酰胺、赖氨酸、 γ -氨基丁酸、苯丙氨酸、亮氨酸等大部分氨基酸含量呈显著上升趋势,而茶氨酸、谷氨酰胺含量呈显著下降趋势,天冬氨酸和谷氨酸的含量先上升后下降^[17]。

在萎凋过程中许多差异表达的蛋白质显著下降,可能是由于氨基酸合成受到了抑制^[27]。目前,普遍认为萎凋过程中由于蛋白质水解使得游离氨基酸含量上升,但是这一点还没有被证实^[28]。张应根等^[21]研究发现减重(0%~30%)时游离氨基酸含量呈降低趋势,之后在减重(30%~50%)时呈上升趋势,但减重(50%~70%)时开始逐步下降,减重(60%~70%)时快速下降,表明萎凋减重率与游离氨基酸总量之间的呈波动变化趋势。陈佳佳等^[29]研究发现氨基酸总量在萎凋前后无显著差异,萎凋前期(0~12 h)时丝氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、酪氨酸、组氨酸、异亮氨酸、脯氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸、 γ -氨基丁酸含量上升;N-乙酰-L-谷氨酸、还原型谷胱甘肽、N- α -乙酰-L-精氨酸下降,萎凋后期(12~30 h)谷氨酸及乙酰甘氨酸含量减少;萎凋过程中蛋白质趋于降解,氨基酸合成途径相关的酶在萎凋前期(0~12 h)下调表达,氨基酸降解相关的酶在萎凋后期(12~30 h)上调表达。茶叶在新鲜茶叶中,其淀粉、蛋白可被水解为单糖及氨基酸,二者交互作用,使茶汤清新爽口;而且,茶中酚类物质很容易和一些氨基酸发生缩合反应,产生一种颜色物质,从而使茶叶呈现出杏黄色或橙色的颜色^[30]。氨基酸含量增加不仅可以提高茶汤鲜爽度,还可以促进香气物质形成,提高香气含量^[31]。因此在萎凋过程中把握蛋白质与游离氨基酸形成是提高白茶品质关键。

1.1.4 萎凋过程中生物碱与可溶性糖的形成

茶叶中生物碱大部分是嘌呤类生物碱,主要包括咖

啡碱、可可碱和茶碱,以咖啡碱为主。白茶中咖啡碱含量比乌龙茶、绿茶、黄茶等茶类高^[32]。萎凋过程中,茶叶碱和咖啡碱含量呈增加趋势,咖啡碱增加 10.50%~12.50%^[18],而可可碱含量降低^[33]。可能是由于萎凋过程中,RNA 被降解生成大量的嘌呤碱为咖啡碱、茶叶碱的生物合成提供了丰富的基质^[18]。萎凋过程中结合态的咖啡因向自由态转变,而随着温度的提高,其含量也随之增加^[34]。可溶性糖是白茶呈微甜型的主要成分,在萎凋过程中呈先上升后下降的趋势,而相对于鲜叶片,则有显著的上升^[35]。可溶性糖其来源于淀粉、果胶等水不溶性物质水解,还参与茶叶香气物质形成。然而,大多数与淀粉和蔗糖代谢相关的蛋白质表达却明显升高,表明这些不溶性多糖可能被降解成可溶性的单糖^[17]。综上可知,白茶萎凋对生物碱和可溶性糖形成具有一定影响。

1.1.5 萎凋过程中香气的形成

白茶的香气成分是由茶叶中的挥发性化合物构成,研究表明白茶的挥发性化合物主要分为己醛、苯甲醛、香叶醇、苯乙醇、芳樟醇及其氧化物等,主要以醇类物质为主,以己醛含量最高^[36]。在萎凋过程中,香气的合成、转化及分解依然十分剧烈,香气总量在萎凋过程中先增加后减少,在醇类、酯类、醛类、酮类等香气成分上表现较明显^[37];在萎凋前期,由于鲜叶水分被蒸发,叶细胞组织内含物浓度增加,酶活性提高,有机物质趋向于水解,多酚类化合物氧化缩合,低沸点芳香物质显著降低^[38]。随着萎凋时间增加,萎凋中期低沸点的芳香物质逐渐增加,后期随着酶活性逐渐降低,可溶性多酚类化合物与氨基酸,氨基酸与糖之间会发生反应,生成芳香物质,让白茶青草气弱,香味也随之出现^[39]。当萎凋时间达到至 48 h 时,橙花叔醇、苯乙醛等高沸点的香气成分含量明显增加^[40]。大多数内源香味物质,苯甲醇、苯乙醇、水杨酸甲酯、芳樟醇及其氧化物等均呈增加的趋势^[20,37,41]。在一定萎凋时间里,茶叶的香气指数随着萎凋时间延长而上升^[42]。可知,萎凋对白茶香气成分形成具有一定影响,大多数内源香味物质在萎凋过程中均可增加,有利于白茶香气品质形成。

1.2 干燥过程中品质成分的形成

干燥是随着多余水分蒸发,逐渐提升白茶香味和风味的一个关键环节。在高温下,茶叶中的酶活被破坏,酶促氧化作用停止,从而导致茶叶内含成分的热化学变化,形成白茶独特的茶叶品质,但目前关于干燥对白茶品质形成机制的报道较少^[43]。研究发现在 100℃左右,酶的催化功能才能被快速地破坏,80℃干燥温度无法杀死这些酶的活力,茶叶还会不断地被氧化,从而导致干制的茶叶产生红梗,对茶的风味形成有较大影响^[44]。干燥过程能有效地阻止在制品中多酚类化合物的氧化,从而达到稳定茶叶品质的目的,干燥可降低儿茶素类物质、部分黄酮(醇)糖苷、氨基酸、生物碱含量;提高大部分二聚儿茶素类物质、挥

发性成分糖苷、核苷(酸)、茶氨酸葡萄糖苷、茶红素^[18]和茶叶碱含量^[33]。醇类香气一般沸点都较低,在干燥过程中蒸发散失导致含量降低,而酮类物质、烯炔类香气含量则增加^[45]。在高温干燥时发生美拉德反应,生产大量的杂环类物质、Strecker 降解产物、含硫化合物等^[46]。但白茶干燥温度较低时,会导致白茶中杂环类香气、含硫类香气含量较少^[47]。综上可知,干燥温度的高低,对白茶品质成分具有一定的影响,在干燥过程中可通过把握温度,促进白茶品质形成。

2 不同品种对白茶品质的影响

茶树鲜叶内含生化成分是茶叶优良品质形成的关键,不同茶树品种白茶品质有所差异^[48-49]。冯花等^[50]对4种不同品种政和大白茶、福鼎大毫茶、福建水仙和梅占的白茶香气成分进行检测分析,发现香气品质特征明显有所差异,香气轮廓区别明显、筛选出13个品质差异香气成分。黄赟^[47]对6种不同品种的白茶进行生物化学成分分析,发现不同品种的白茶,其品质的分配比例和含量都有很大的差别,而且产物中的香味特性也有所差异,其中“金牡丹”和“金观音”两个新品种所制的白茶品质成分明显优于传统白茶品种,同时在香气上有新品种花香浓郁的品种特征,醇类香气化合物含量高达60%以上。研究发现3个试制乌龙茶品种在制作新白茶生化成分方面均明显优于福鼎大白茶^[51]。张春花等^[52]对5个茶树品种白茶生化成分检测发现,“福鼎大毫茶”茶多酚含量较低,氨基酸含量较高,“政和大白茶”水浸出物、黄酮和茶黄素含量最高,“政和菜茶”茶红素和茶褐素含量较高。

高健健等^[9]基于代谢组学的以9个云南白茶和6个福鼎白茶茶样为研究对象进行化学成分比较分析,发现有46个组间显著性差异化合物,云南白茶的表型儿茶素类、二聚儿茶素类、部分黄酮糖苷类(山柰酚-3-半乳糖苷、槲皮素-3-葡萄糖苷等)、酚酸类、有机酸类、脂类等化合物含量较高;福鼎白茶的表型儿茶素类、部分黄酮糖苷类(槲皮素-3-半乳糖苷、杨梅素-3-半乳糖苷等)、氨基酸类、生物碱类化合物含量相对较高。李明月^[35]对7个不同茶树品种四川白茶品质成分测定,发现四川白茶色素类含量明显优于传统白茶。周雪芳等^[53]以云南大叶种茶树品种制作的云南白茶外观条索肥壮优美,白毫满披,香气馥郁,具有熟果香及蜜香、滋味醇厚、耐泡度高的特点。梁丽云^[54]研究发现浙江省鹤溪镇宁惠白茶茶多酚含量为常规白茶的50%;研究发现“白云 0492”茶树品种制作白茶具有特有香气成分花果香的乙酸壬酯^[55]。

一般来说,适合白茶的品种需要具有高的蛋白质、氨基酸、可溶性糖和挥发性香味物质,并含有大量的内在物质,从而满足白茶的外形与品质要求。综上可知,不同茶

树品种对加工白茶品质具有一定影响,但不同品种加工得到的白茶都各具特色,具有一定品种优势,如乌龙茶品种加工白茶在香气及生化成分含量明显优于传统品种,可结合不同品种的品质特征加工白茶,满足不同消费者的需求。

3 工艺条件对白茶品质的影响

3.1 不同萎凋方式对白茶品质的影响

白茶萎凋工艺条件以室内自然萎凋、复式萎凋、加温萎凋和发光二极管(light-emitting diode, LED)灯光萎凋等为主。其优缺点如表1所示,自然萎凋工艺制成的白茶品质虽然不错,但易受环境影响耗时耗力。复式萎凋是指在自然状态下,配合适当的阳光照射,以加速其转化过程,但是它也受到天气状况的限制,并且受到环境的温、湿度的影响^[56]。加温萎凋一般是在室内采用热风、空调等来提高室内温度的一种方式,这种加热方式比较均匀温和^[57]。

研究表明自然萎凋促进白茶外形叶底均匀性,复式萎凋促进白茶形成丰富的滋味和香气特征^[58]。LED灯光萎凋主要利用光源、光强、光质和光周期等作为一种信号分子,在萎凋过程中影响鲜叶的物理反应,生理代谢及化学变化,从而促进茶叶品质形成^[59]。自然萎凋过程中茶多酚是先升高后降低,复式萎凋则出现呈现出一高一低的波动,加温萎凋则茶多酚含量不断降低^[60]。复式萎凋和自然萎凋氨基酸含量均高于鲜叶,呈上升趋势,而连续化加温萎凋使氨基酸含量呈下降趋势^[61]。加温萎凋(30℃)处理后,类黄酮在16 h内迅速积累,峰值显著高于自然萎凋和复式萎凋,而在16 h后,类黄酮含量显著下降,24 h后下降到与自然萎凋相近,复式萎凋和自然萎凋方式一样^[61]。王子浩等^[62]和潘玉华等^[63]均研究表明,可溶性糖含量由高到低排序为室内自然萎凋、复式萎凋和加温萎凋,与林章文^[64]研究一致。

赵爱凤^[65]根据模糊综合评判方法得到白茶生化品质排序为复式萎凋、自然萎凋和加温萎凋。而且不同萎凋方式的白茶氨基酸含量呈现高低起伏的变化,与鲜叶相比,复式萎凋和自然萎凋成茶氨基酸含量增加0.004%,而加温萎凋成茶氨基酸含量则减少0.015%^[60],但在萎凋时间一致时,复式萎凋水浸出物含量相对较高,且复式萎凋显著提高白茶中挥发性化合物的总含量^[66]。加温萎凋比自然萎凋白茶香气总量高,香气化合物种类多^[67],醇类和醛类香气化合物的总和较高,香气更为丰富^[68-69]。研究表明LED灯光萎凋对白茶的外观、香气和口感具有显著影响,光照组品质明显优于对照组,LED灯光萎凋提高茶叶水浸出物含量,其中蓝光组茶多酚含量较低,氨基酸以红光组氨基酸较高^[70]。

综上,不同萎凋工艺对白茶品质成分具有一定影响,可结合生产条件选择合适的萎凋工艺;受到产地及气候影响,也可采用多种萎凋方式相互结合,促进白茶品质形成。

表 1 不同萎凋工艺优缺点
Table 1 Advantages and disadvantages of different withering processes

萎凋工艺	优点	缺点
自然萎凋	促进白茶外形叶底均匀性, 茶多酚、儿茶素、可溶性糖含量较高, 香气以清香和果香为主	对光照和气温要求较高, 不利于大规模生产
复式萎凋	促进鲜叶内含物质变化, 提高香气物质的积累, 和对提高成茶香气和茶汤的甜醇度都会起到积极的作用	操作烦琐, 技术不易掌握, 还易出现色泽花杂
加温萎凋	白茶香气总量较高, 香气化合物种类较多; 有利于缩短白茶萎凋时间, 降低白茶的苦涩味	不利于游离氨基酸的积累, 影响白茶的鲜味
LED 灯光萎凋	香气更持久、香气物质的含量比例增加	成本高、耗电、耗能

3.2 不同干燥方式对白茶品质的影响

干燥是白茶最后一道工序, 主要分为低温(60℃以下)与高温(60℃以上)两种, 通常低温干燥方法有风干、烘干和炭焙; 高温干燥以高温烘箱法进行为主^[7,71]。不同干燥工艺有优缺点如表 2 所示, 经低温烘干的白茶, 色泽呈灰白色, 但由于温度过低, 茶叶中氨基酸含量变化不完全, 导致氨基酸含量偏低, 烘烤后香气不够浓郁, 有一丝青气。风干可以减少叶绿素的破坏, 让茶叶外形变得更白、更亮, 但物质转化速度很慢, 导致氨基酸、总糖量、香味等化学质量成分下降, 并且通常还会带青气; 烘干的白茶品质内质较优、显花香但毫色容易发黄; 炭焙白茶品质佳、炭香、毫香、花香、持久悠长、深受消费者喜爱, 但炭焙效率低、产量低, 并且原材料成本、人力成本、工艺难度都较高; 高温干燥利于白茶滋味甘醇度提升, 但会使白茶颜色变黄, 同时使白茶中的氨基酸、酚类和碳水化合物发生充分的转化和异构化, 使得白茶的香味更加浓烈^[72]。

卓敏等^[73]研究表明提高烘干温度, 丹霞白茶水浸出物总量缓慢降低, 茶多酚、游离氨基酸、可溶性糖总量和咖啡碱含量均呈现出降—升—降的变化趋势; 谷兆骢^[33]研究表明低温干燥有利于白茶清鲜特点的保留, 而高温干燥则有利于白茶滋味甘醇度的提升。研究表明炭焙白茶香气品质明显优于电焙白茶, 且萜类、醇类和酯类香气成分是形成炭焙白茶的天然花果香、清香或甜香香气的物质基础^[74]。研究发现电焙成品茶的儿茶素总量和水浸出去含量

更高, 但电焙与炭焙成品茶的主要挥发性物质总体一致^[75]。相比电焙, 炭焙滋味更加醇厚, 感官综合得分更高^[76]。

综上所述, 不同工艺对白茶品质特征的影响不同, 低温干燥促进白茶清鲜特点的保留, 而高温干燥则促进白茶滋味甘醇度的提升, 在生产过程中, 结合品种特征选择合适的干燥工艺, 同时也可将多种方式相互结合, 发挥不同工艺的特点, 提高白茶品质成分。

4 结束语

白茶在加工过程中其品质形成是多酚类物质、蛋白质、游离氨基酸、色素类、生物碱、可溶性糖和香气等各种成分协同效应的体现, 影响白茶干茶的外形与色泽及冲泡后汤色、滋味、香气和叶底表现。近几年, 伴随着“白茶”热潮的兴起, 科学技术和检测技术的飞速发展, 使得茶叶的品质化学研究重大的发展。但是, 白茶的品质化学成分形成十分复杂, 受到鲜叶原料和工艺条件等诸多因素影响。萎凋是决定白茶质量的关键步骤, 在一定的条件下, 随着水分逐渐流失和各种酶活性的变化, 引起茶叶内部成分相互作用发生一系列变化; 而干燥是稳定茶叶品质, 提升香气的重要工序, 在高温条件下, 茶叶中的酶活被破坏, 酶促氧化作用停止, 从而导致茶叶内含成分的热化学变化, 形成白茶独特的香气特征。特定的茶树品种和工艺条件共同奠定了白茶重要的化学物质基础。而白茶品质成分的组成、含量及所表现的香气特征受茶树品种、工艺条件的不同而有所差异。

表 2 不同干燥工艺优缺点^[7,71-73]
Table 2 Advantages and disadvantages of different drying processes^[7,71-73]

干燥工艺	优点	缺点
低温 (60℃以下)	风干	减少叶绿素破坏, 使白茶毫色发白银亮
	烘干	内质较优、显花香
	炭焙	白茶品质佳、炭香、毫香、花香、持久悠长、深受消费者喜爱
高温 (60℃以上)	高温烘烤	利于白茶滋味甘醇度的提升, 香气更加浓郁
		物质转化率较低, 降低氨基酸和总糖量等化学品质成分及香气, 且一般带有青气
		毫色容易发黄
		炭焙效率低、产量低, 并且原材料成本、人力成本、工艺难度都较高
		高温干燥会破坏白茶中的活性酶, 不利于白茶的后期转化, 颜色变黄

本文通过综述白茶的品质形成机制, 阐述了萎凋过程中及干燥过程中白茶品质形成, 还介绍了不同茶树品种及不同工艺条件对于白茶品质机制形成的影响, 旨在为提升白茶品质、优化白茶加工工艺提供理论依据参考, 为不同地区优质茶树品种加工白茶的利用和选育、对白茶关键工艺(如萎凋、干燥等)进行智能化监控奠定基础, 从而全面推动白茶产业的发展。当前白茶的开发建设和开发只是其中的一小部分, 更多优质白茶产区及优质茶树品种推广, 在不断扩展着茶叶的升级嬗变之路, 朝着标准化、机械化、自动化、智能化、规模化发展。白茶无论是在产量上, 还是在质量上、规模上、效益上都处于领先地位, 并已呈现出一个良好的发展态势。要想在将来保持并超过它, 就必须要有完善的标准体系, 使茶企能够迅速地提高自身的质量, 保证自己的产品质量安全, 并且把科技和文化更好地融入到茶产业和茶产品之中, 以满足更多的消费者。白茶的竞争, 或许只是一个开始, 但随着商业模式的不断探索, 品牌的知名度越来越高, 产品也越来越多, 在这场碰撞中, 白茶的未来, 将会更加欣欣向荣。

参考文献

- [1] ZHOU S, ZHANG JM, MA SC, *et al.* Recent advances on white tea: Manufacturing, compositions, aging characteristics and bioactivities [J]. *Trend Food Sci Technol*, 2023, 134: 41–55.
- [2] ABIRI B, AMINI S, HEJAZI M, *et al.* Tea's anti-obesity properties, cardiometabolic health-promoting potentials, bioactive compounds, and adverse effects: A review focusing on white and green teas [J]. *Food Sci Nutr*, 2023, 11(10): 5818–5836.
- [3] ZHOU BX, WANG ZH, YIN P, *et al.* Impact of prolonged withering on phenolic compounds and antioxidant capability in white tea using LC-MS-based metabolomics and HPLC analysis: Comparison with green tea [J]. *Food Chem*, 2022, 368: 130855.
- [4] WANG JT, SHI J, ZHU Y, *et al.* Insights into crucial odourants dominating the characteristic flavour of citrus-white teas prepared from *Citrus reticulata* blanco 'Chachiensis' and *Camellia sinensis* 'Fudingdaba' [J]. *Food Chem*, 2022, 377: 132048.
- [5] JACOBSON KA, GAO ZG, MATRICON P, *et al.* Adenosine A2A receptor antagonists: From caffeine to selective non-xanthines [J]. *Br J Pharmacol*, 2022, 179(14): 3496–3511.
- [6] 张道钰. 福鼎白茶国际竞争力研究[J]. *福建茶叶*, 2023, 45(2): 37–41.
ZHANG DY. Research on the international competitiveness of Fuding white tea [J]. *Tea Fujian*, 2023, 45(2): 37–41.
- [7] 武珊珊, 尤名南, 潘朦, 等. 白茶香气成分及影响因素研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(12): 1–14.
WU SS, YOU MN, PAN M, *et al.* Research progress on aroma components and influencing factors of white tea [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(12): 1–14.
- [8] 缪伊雯, 周静芸, 杨春明, 等. 不同茶树品种寿眉白茶品质分析[J/OL]. *食品工业科技*: 1–18. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080168
MIAO YW, ZHOU JY, YANG CM, *et al.* Analysis of quality in Shoumei white tea from different tea plant varieties [J/OL]. *Sci and Technol Food Ind*: 1–18. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080168
- [9] 高健健, 陈丹, 彭佳莹, 等. 基于代谢组学的云南白茶与福鼎白茶化学成分比较分析[J]. *茶叶科学*, 2022, 42(5): 623–637.
GAO JJ, CHEN D, PENG JK, *et al.* Comparison on chemical components of Yunnan and Fuding white tea based on metabolomics approach [J]. *J Tea Sci*, 2022, 42(5): 623–637.
- [10] MA BS, WANG JC, ZHOU BX, *et al.* Impact of harvest season on bioactive compounds, amino acids and in vitro antioxidant capacity of white tea through multivariate statistical analysis [J]. *LWT*, 2022. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113655
- [11] DENG XM, SHENG H, CHEN JJ, *et al.* Metabolomics combined with proteomics provide a novel interpretation of the changes in flavonoid glycosides during white tea processing [J]. *Foods*, 2022, 11(9): 1226.
- [12] MAULANA H, PRAWIRA AMI, SHA B, *et al.* Changes of chemical contents during the withering process of white tea [J]. *Iop Conf Ser Earth Environ Sci*, 2020, 443: 012023.
- [13] HONGYU C, XINGMIN Z, RONGGANG J, *et al.* Characterization of aroma differences on three drying treatments in Rucheng baimao (*Camellia pubescens*) white tea [J]. *LWT*, 2023, 179(8): 114659.
- [14] WANG T, WANG YQ, ZHAO JM, *et al.* Identification, characterization and expression profiling of the RS gene family during the withering process of white tea in the tea plant (*Camellia sinensis*) reveal the transcriptional regulation of CsRS8 [J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 24(1): 202.
- [15] 刘谊健, 郭玉琼, 詹梓金. 白茶制作过程主要化学成分转化与品质形成探讨[J]. *福建茶叶*, 2003, (4): 13–14.
LIU YJ, GUO YQ, ZHAN ZJ. Discussion on the transformation of main chemical components and quality formation in the making process of white tea [J]. *Tea Fujian*, 2003, (4): 13–14.
- [16] 陈静. 白茶萎凋过程差异基因的分离与儿茶素类物质代谢关键酶基因的表达分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
CHEN J. Expression of genes encoding key enzymes in biosynthesis pathways of catechins in the withering process of white tea [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.
- [17] 陈勤操. 代谢组学联合蛋白组学解析白茶的品质形成机理[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
CHEN QC. Study on formation mechanism of white tea characteristics based on metabolomics and proteomics analysis [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.
- [18] 袁弟顺, 林丽明, 岳文杰, 等. 自然萎凋白茶的品质形成机理研究: 2008 茶学青年科学家论坛[C]. 中国湖南长沙: 20089.
YUAN DS, LIN LM, YUE WJ, *et al.* Research on the quality formation mechanism of naturally withered white tea: 2008 tea science young scientists forum [C]. Changsha, Hunan, China: 20089.
- [19] ZHOU CZ, ZHU C, LI XZ, *et al.* Transcriptome and phytochemical

- analyses reveal the roles of characteristic metabolites in the taste formation of white tea during the withering process [J]. *J Int Agric*, 2022, 21(3): 862–877.
- [20] WANG Y, ZHENG PC, LIU PP, *et al.* Novel insight into the role of withering process in characteristic flavor formation of teas using transcriptome analysis and metabolite profiling [J]. *Food Chem*, 2019, 272: 313–322.
- [21] 张应根, 陈林, 陈泉宾, 等. 白茶自然萎凋过程中风味形成的动态研究[J]. *茶叶学报*, 2016, 57(2): 80–84.
- ZHANG YG, CHEN L, CHEN QB, *et al.* Flavor formation of white tea during natural withering [J]. *J Tea Sci*, 2016, 57(2): 80–84.
- [22] DAI WD, XIE DC, LU ML, *et al.* Characterization of white tea metabolome: Comparison against green and black tea by a nontargeted metabolomics approach [J]. *Food Res Int*, 2017, (96): 40–45.
- [23] 宛晓春. 茶叶生物化学. 第三版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- WAN XC. *Biochemistry of tea*. Third edition [M]. Beijing: China Agricultural Publishing Press, 2003.
- [24] 杨伟丽, 肖文军, 邓克尼. 加工工艺对不同茶类主要生化成分的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2001, (5): 384–386.
- YANG WL, XIAO WJ, DENG KN. Effects of processing technology of different teas on the main biochemistry components [J]. *J Hunan Agricultural Univ (Nat Sci Ed)*, 2001, (5): 384–386.
- [25] CHEN QC, SHI J, MU M, *et al.* Metabolomics combined with proteomics provides a novel interpretation of the changes in nonvolatile compounds during white tea processing [J]. *Food Chem*, 2020, 332: 127412.
- [26] YE YL, YAN JN, CUI JL, *et al.* Dynamic changes in amino acids, catechins, caffeine and gallic acid in green tea during withering [J]. *Sub Plant Sci*, 2018, 66: 98–108.
- [27] WU ZJ, MA HY, ZHUANG J. iTRAQ-based proteomics monitors the withering dynamics in postharvest leaves of tea plant (*Camellia sinensis*) [J]. *Mol Genet*, 2018, 293(1): 45–59.
- [28] YAO LH, LIU X, JIANG YM, *et al.* Compositional analysis of teas from Australian supermarkets [J]. *Food Chem*, 2006, 94(1): 115–122.
- [29] 陈佳佳, 朱陈松, 朱文伟, 等. 白茶萎凋过程中氨基酸类物质代谢分析[J]. *茶叶科学*, 2021, 41(4): 471–481.
- CHEN JJ, ZHU CS, ZHU WW, *et al.* Analysis of the metabolism of amino acids during the withering of white tea [J]. *J Tea Sci*, 2021, 41(4): 471–481.
- [30] 刘东娜, 罗凡, 李春华, 等. 白茶品质化学研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(4): 79–91.
- LIU DN, LUO F, LI CH, *et al.* Research progress on quality chemistry of Chinese white tea [J]. *J Agric Sci Technol*, 2018, 20(4): 79–91.
- [31] FANG X, LIU YN, XIAO JY, *et al.* GC-MS and LC-MS/MS metabolomics revealed dynamic changes of volatile and non-volatile compounds during withering process of black tea [J]. *Food Chem*, 2023, 410: 135396.
- [32] GUO SJ, ZHU QQ, YANG BC, *et al.* Determination of caffeine content in tea based on poly(safranin T) electroactive film modified electrode [J]. *Food Chem*, 2011, 129(3): 1311–1314.
- [33] 谷兆骢. 浙江省主栽茶树品种加工白茶的品质与工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- GU ZQ. Research on the quality and processing of white tea from in Zhejiang Province [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [34] 周才碧, 陈文品. 白茶品质形成的研究进展[J]. *蚕桑茶叶通讯*, 2013, (6): 17–19.
- ZHOU CB, CHEN WP. Research progress on the quality formation of white tea [J]. *Newsl Ser Tea*, 2013, (6): 17–19.
- [35] 李明月. 四川白茶加工技术及品质评价研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
- LI MY. Research on processing technology and quality evaluation of Sichuan white tea [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2015.
- [36] CHEN QC, ZHU Y, YAN H, *et al.* Identification of aroma composition and key odorants contributing to aroma characteristics of white teas [J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2020, 25(24): 6050.
- [37] 陈维, 马成英, 王雯雯, 等. 萎凋时间对“英红九号”白茶香气的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(18): 138–143.
- CHEN W, MA CY, WANG WW, *et al.* Effects of withering duration on the aroma profile of Yinghong No.9 white tea [J]. *Food Sci*, 2017, 38(18): 138–143.
- [38] 叶乃兴. 白茶科学-技术与市场[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- YE NX. *White tea science, technology and market* [M]. Beijing: China Agricultural Publishing Press, 2010.
- [39] 邓静, 王远兴, 陈赞喆, 等. 顶空-三重串联四极杆气-质联用测定靖安白茶香气成分[J]. *食品科学*, 2013, 34(22): 115–118.
- DENG J, WANG YX, CHEN YZ, *et al.* Analysis of aroma components in Jingan white tea by HS-GC-QQ-MS [J]. *Food Sci*, 2013, 34(22): 115–118.
- [40] 王力, 蔡良媛, 林智, 等. 顶空固相微萃取-气质联用法分析白茶的香气成分[J]. *茶叶科学*, 2010, 30(2): 115–123.
- WANG L, CAI LS, LIN Z, *et al.* Analysis of aroma compounds in white tea using headspace solid-phase micro-extraction and GC-MS [J]. *J Tea Sci*, 2010, 30(2): 115–123.
- [41] 项丽慧, 王丽丽, 陈林, 等. 白茶加工过程中糖苷类香气成分的代谢变化[J]. *茶叶学报*, 2021, 62(2): 60–65.
- XIANG LH, WANG LL, CHEN L, *et al.* Changes on aromatic glycosides metabolism of white tea during processing [J]. *Acta Tea Sin*, 2021, 62(2): 60–65.
- [42] YU XL, LI YC, HE C, *et al.* Nonvolatile metabolism in postharvest tea (*Camellia sinensis* L.) leaves: Effects of different withering treatments on nonvolatile metabolites, gene expression levels, and enzyme activity [J]. *Food Chem*, 2020, 327: 126992.
- [43] 杨贤强, 王岳飞, 陈留记. 茶多酚化学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.
- YANG XQ, WANG YF, CHEN LJ. *Chemistry of tea polyphenols* [M].

- Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2003.
- [44] 林冬纯, 魏子淳, 谭艳娉, 等. 不同干燥温度对萎凋叶压制白茶饼品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 109–116.
- LIN DC, WEI ZC, TAN YP, *et al.* Effect of drying temperatures on the quality of pressed white tea cake from withered leaves [J]. Food Sci, 2022, 43(15): 109–116.
- [45] WANG C, LV SD, WU YS, *et al.* Study of aroma formation and transformation during the manufacturing process of Biluochun green tea in Yunnan province by HS-SPME and GC-MS [J]. J Sci Food Agric, 2016, 96(13): 4492–4498.
- [46] HO CT, ZHENG XY, LI SM, *et al.* Tea aroma formation [Z]. 2015.
- [47] 黄赞. 福建白茶化学成分与感官品质研究初报[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- HUANG Y. Studies on chemical composition and sensory qualities of Fujian white tea [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.
- [48] 李子平, 赵云雄, 陈远权, 等. 黔茶1号白茶和福鼎大毫白茶品质差异分析[J]. 中国热带农业, 2021, (5): 82–86.
- LI ZP, ZHAO YX, CHEN YQ, *et al.* Analysis of quality difference between Qiancha No.1 white tea and Fuding Dahao white tea [J]. China Trop Agric, 2021, (5): 82–86.
- [49] MA CQ, MA BS, WANG JC, *et al.* Geographical origin identification of Chinese white teas, and their differences in tastes, chemical compositions and antioxidant activities among three production regions [J]. Food Chem: X, 2022, 16(7): 100504.
- [50] 冯花, 王飞权, 张渤, 等. 不同茶树品种白牡丹茶香气成分的HS-SPME-GC-MS分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(12): 252–264, 251.
- FENG H, WANG FQ, ZHANG B, *et al.* Analysis of aroma components of Baimudan tea from different tea plant varieties using HS-SPME-GC-MS [J]. Mod Food Sci Technol, 2021, 37(12): 252–264, 251.
- [51] 刘萍萍, 黄茜, 庞霖, 等. 乌龙茶适制品种制作新工艺白茶品质对比及生化分析[J]. 茶叶, 2023, 49(3): 157–160.
- LIU PP, HUANG H, PANG L, *et al.* Comparison of white teas made by new processing procedure using materials from Oolong tea cultivars [J]. J Tea, 2023, 49(3): 157–160.
- [52] 张春花, 李灿香, 颜学行, 等. 福建茶区不同茶树品种“白牡丹”茶的品质差异分析[J]. 茶叶通讯, 2023, 50(1): 76–82.
- ZHANG CH, LI CX, YAN XX, *et al.* Effects of aroma components in white peony by post fermented of the raw tea with bifenthrin pesticide residues [J]. J Tea Commun, 2023, 50(1): 76–82.
- [53] 周雪芳, 武珊珊, 阮朝帅, 等. 云南白茶与福建白茶对比研究[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(2): 177–179.
- ZHOU XF, WU SS, RUAN CS, *et al.* Comparative study of Yunnan white tea and Fujian white tea [J]. J Anhui Agric Sci, 2020, 48(2): 177–179.
- [54] 梁丽云. 白茶在萎凋及贮藏中茶多酚变化的研究[J]. 贵州茶叶, 2017, 45(2): 5.
- LIANG LY. Research status on the change of tea polyphenols in the wilting and storage of white tea [J]. J Guizhou Tea, 2017, 45(2): 5.
- [55] 梁子钧, 俞滢, 张磊, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析茶树新品系‘白云0492’白茶香气特征成分[J]. 食品科学, 2023, (1): 1–108.
- LIANG ZJ, YU Y, ZHANG L, *et al.* Analysis of the aroma characteristic components of the new tea strain ‘Baiyun 0492’ white tea based on HS-SPME-GC-MS [J]. Food Sci, 2023, (1): 1–108.
- [56] JIA XL, ZHANG Q, CHEN MH, *et al.* Analysis of the effect of different withering methods on tea quality based on transcriptomics and metabolomics [J]. Front Plant Sci, 2023, 14: 1235687.
- [57] 吴婷, 邓秀娟, 李沅达, 等. 云茶香1号不同萎凋工艺白茶的化学品质研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(24): 9530–9538.
- WU T, DENG XJ, LI YD, *et al.* Study on the chemical quality of white tea with different withering processes of *Camellia sinensis* vs Yunchaxiang 1 [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(24): 9530–9538.
- [58] 邓仕彬, 方舒娜, 林金来. 萎凋工艺对福鼎白茶品质影响研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(13): 77–83.
- DENG SB, FANG SN, LIN JL. Effect of withering process on the quality of Fuding white tea [J]. Food Res Dev, 2021, 42(13): 77–83.
- [59] 林家正. 红光光照对茶鲜叶萎凋中代谢产物的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- LIN JZ. Effect of red light on the metabolites of fresh tea leaves withering [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [60] 李金辉. 不同处理对白茶氨基酸及主要生化成分含量影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
- LI JH. Effects of different treatments on white tea of amino acids and the main biochemical components [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010.
- [61] 李金辉, 袁弟顺, 岳文杰, 等. 复式萎凋、加温萎凋对白茶品质的影响: 2009年中国茶叶科技创新与产业发展学术研讨会[C]. 中国重庆: 200910.
- LI JH, YUAN DS, YUE WJ, *et al.* Effects of compound withering and heating withering on the quality of white tea: 2009 China tea science and technology innovation and industrial development academic seminar [C]. Chongqing, China: 200910.
- [62] 王子浩, 刘威, 尹鹏, 等. 三种萎凋方式对信阳群体种白茶成分及品质影响分析[J]. 陕西农业科学, 2018, 64(6): 19–21.
- WANG ZH, LIU W, YIN P, *et al.* Analysis of effect of three withering ways on components of white tea population and quality [J]. J Shanxi Agric Sci, 2018, 64(6): 19–21.
- [63] 潘玉华, 高树英, 黄先洲, 等. 白茶萎凋温度对内含生化成分变化的影响[J]. 蚕桑茶叶通讯, 2013, (3): 24–30.
- PAN YH, GAO SY, HUANG XZ, *et al.* Effect of wilting temperature on the changes of contained biochemical components in white tea [J]. Newsl Ser Tea, 2013, (3): 24–30.
- [64] 林章文. 不同萎凋方式对寿眉白茶品质影响研究[J]. 福建茶叶, 2021, 43(7): 22–23.
- LIN ZW. Effect of different wilting methods on the quality of Shoumei

- white tea [J]. *Tea Fujian*, 2021, 43(7): 22–23.
- [65] 赵爱凤. 萎凋环境因子对白茶品质形成的影响及控制技术探讨[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.
- ZHAO AIF. Study on withering environmental factors upon the quality formation and control technique of white tea [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2008.
- [66] LI YD, WU T, DENG XJ, *et al.* Characteristic aroma compounds in naturally withered and combined withered γ -aminobutyric acid white tea revealed by HS-SPME-GC-MS and relative odor activity value [J]. *LWT*, 2023, 176: 4467.
- [67] 周有良. 萎凋、造型工艺对白茶化学成分含量及品质的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
- ZHOU YL. Effect of withering and shaping techniques on the chemistry and quality of chemical of white tea [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010.
- [68] 李凤娟. 白茶的滋味、香气和加工工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- LI FJ. Study on the taste, aroma and processing of white tea [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [69] WU HT, CHEN YY, FENG WZ, *et al.* Effects of three different withering treatments on the aroma of white tea [J]. *Foods*, 2022, 11(16): 2502.
- [70] MU LD, LI TY, TANG JJ, *et al.* Effects of LED light withering on the quality of white tea [J]. *Iop Conf Ser Earth Environ Sci*, 2021, 792(1): 012018.
- [71] 张玉琴. 福鼎白茶不同干燥方式的代谢组研究[J]. *福建茶叶*, 2022, 44(3): 25–28.
- ZHANG YQ. On the effect of different drying processes on the quality of white tea [J]. *Tea Fujian*, 2022, 44(3): 25–28.
- [72] 张玉琴. 论不同干燥工艺对白茶品质的影响[J]. *福建茶叶*, 2022, 44(1): 10–12.
- ZHANG YQ. Effect of different drying processes on the quality of white tea [J]. *Tea Fujian*, 2022, 44(1): 10–12.
- [73] 卓敏, 乔小燕, 操君喜, 等. 丹霞系列白毛茶新品种(系)加工白茶的感官品质比较[J]. *广东农业科学*, 2013, 40(16): 98–100.
- ZHUO M, QIAO XY, CAO JX, *et al.* Comparative study of sensory qualities of new Danxia series white-hair tea species(families) processed white tea [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2013, 40(16): 98–100.
- [74] 吴全金, 周喆, 漆思雨, 等. 炭焙和电焙白茶的关键风味物质和品质差异[J]. *食品科学*, 2023, 44(18): 259–267.
- WU QJ, ZHOU Z, QI SY, *et al.* Differences in key flavor substances and quality between charcoal-roasted and electrically baked white tea [J]. *Food Sci*, 2023, 44(18): 259–267.
- [75] 林章文, 陈韵扬. 电焙与炭焙干燥对福鼎白茶品质的影响[J]. *中国茶叶加工*, 2022, (2): 27–32.
- LIN ZW, CHEN YY. Effects of electric-roasted and charcoal-roasted on the quality of Fuding white tea [J]. *China Tea Proc*, 2022, (2): 27–32.
- [76] 周庆雅. 浅析炭焙工艺对福鼎白茶品质的影响[J]. *福建茶叶*, 2023, 45(5): 23–26.
- ZHOU QY. Effect of charcoal roasting process on the quality of Fuding white tea [J]. *Tea Fujian*, 2023, 45(5): 23–26.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介

夏长杓, 博士, 研究员, 讲师, 主要研究方向为茶文化和茶科学。
E-mail: 2538882300@qq.com

刘亚兵, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为茶叶加工。
E-mail: lybgz628@163.com