

白茶香气成分及影响因素研究进展

武珊珊^{1,2}, 尤名南¹, 潘 朦¹, 王 玮¹, 郭 巧¹, 丁其欢^{1*}, 周雪芳^{3*}

(1. 滇西应用技术大学普洱茶学院, 普洱 665000; 2. 浙江大学农业与生物技术学院茶叶研究所, 杭州 310058; 3. 云南省绿色食品发展中心, 昆明 650000)

摘 要: 白茶, 作为中国六大茶类之一, 因其清香鲜甜的品质、独特的健康功效及可存储等特点受到消费者的喜爱。茶叶香气物质含量少、种类多且化学性质各不相同, 既存在于茶树鲜叶中, 也可通过茶叶加工过程转化形成新的香气物质, 是评判茶叶品质优劣的重要依据。白茶香气成分的组成、含量及所呈现的香气特征因茶树品种、生长生态环境、生长季节、原料采摘等级、加工工艺的不同而有所差异, 且与是否贮藏等因素密切相关。本文总结了近年来白茶香气研究中涉及的萃取、检测、分析及评价方法, 白茶香气在萎凋、干燥、形制等工序中的变化规律, 创新工艺、贮藏与陈化等处理对白茶香气的影响, 并梳理了不同类型白茶的主要香气成分, 最后对未来自白茶香气研究技术发展、香气提升等方面进行了讨论与展望, 旨在为白茶相关标准的建立提供理论参考。

关键词: 白茶; 香气; 香气成分

Advance in aroma components and influencing factors of white tea

WU Shan-Shan^{1,2}, YOU Ming-Nan¹, PAN Meng¹, WANG Wei¹,
GUO Qiao¹, DING Qi-Huan^{1*}, ZHOU Xue-Fang^{3*}

[College of Tea (Pu'er), West Yunnan University of Applied Sciences, Pu'er 665000, China; 2. Tea Research Institute, College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Yunnan Green Food Development Center, Kunming 650000, China]

ABSTRACT: White tea, as one of the six major tea categories in China, is popular among consumers for its fragrant and sweet quality, unique health effects and storable property. The volatile compounds of tea have the characteristic of low content, various types, and different chemical properties, which can exist in the fresh leaves of tea plants and can also be transformed into new aroma substances through tea processing, form the basis of the quality judgements of tea. The composition, content and aroma characteristic of aroma components of white tea vary with cultivars of tea plant, growing ecological environment, growing season, picking grade, processing technology, and are closely related to storage and other factors. This paper summarized the extraction, detection, analysis and evaluation methods involved in the study of white tea aroma in recent years, the change law of aroma in withering, drying, shaping and other processes, the influence of innovate

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目(2022J1045)、滇西应用技术大学应用基础研究项目(2018XJKY0006)、滇西应用技术大学普洱茶学院基础研究项目(2021CXY05)

Fund: Supported by the Scientific Research Fund of Yunnan Provincial Department of Education (2022J1045), the Applied Basic Research Project of West Yunnan University of Applied Sciences (2018XJKY0006), and the Basic Research Project of Pu'er Tea College, West Yunnan University of Applied Sciences (2021CXY05)

*通信作者: 丁其欢, 讲师, 主要研究方向为茶叶加工与质量检验。E-mail: 1932216447@qq.com

周雪芳, 助理农艺师, 主要研究方向为农产品质量安全, 茶产业发展与技术推广等。E-mail: 4430450@qq.com

*Corresponding author: DING Qi-Huan, Lecturer, College of Tea (Pu'er), West Yunnan University of Applied Sciences, No.68, Foliashan Road, Pu'er 665000, China. E-mail: 1932216447@qq.com

ZHOU Xue-Fang, Assistant Agronomist, Yunnan Green Food Development Center, No.156, Chuanjin Road, Panlong District, Kunming 650000, China. E-mail: 4430450@qq.com

processes, storage and aging on white tea aroma, and sorted out the main aroma components of different types of white tea, and finally discussed and prospected the future development of white tea aroma research technology and improve strategies, aiming to provide theoretical references for the establishment of white tea related standards.

KEY WORDS: white tea; aroma; aroma components

0 引言

茶叶香气是评判茶叶品质优劣的重要因子。茶叶芳香物质是一类含量少、种类多、化学性质不同的挥发性成分的组合。迄今为止,已从茶叶中鉴定出 700 多种挥发性化合物^[1]。茶叶中的香气化合物有醇类、醛类、酮类、酸类、酯类、碳氢类等,根据代谢途径可分为萜类、苯丙烷类/苯环型化合物、脂肪酸衍生物、糖苷结合型香气化合物^[2-3]。因茶树品种、环境因子、加工工艺、年份等不同,茶叶香气成分的构成及含量有所差异,茶叶也因此呈现不同的香型^[4]。而香气萃取、检测技术因其原理的不同,萃取的香气化合物种类、含量也有差异^[5-6]。

白茶是中国六大茶类之一,其加工工艺为萎凋及干燥,属于微发酵茶类,不同于以白化茶树品种鲜叶为原料按照绿茶工艺制作的安吉白茶^[7]。白茶不炒不揉的工艺形成了其白毫显露、香气清鲜、滋味甘醇的品质,深受消费者的青睐。白茶按照工艺不同可分为传统白茶(白毫银针、白牡丹、贡眉、寿眉)、新工艺白茶及白茶紧压茶 3 类^[8]。研究表明,白茶中富含茶多酚、茶多糖、氨基酸、咖啡碱等内含成分,被证实具有抗癌、降血脂、护肝、抗糖尿病、神经保护、抗炎、抗细菌、抗氧化、肾脏保护等功效^[9]。

福建省是中国白茶的发源地和主产地,近年,由于其鲜甜的品质特征及独特的保健功效,云南、贵州、陕西等省份的白茶产量也在日益增加^[10]。据中国茶叶流通协会统计,白茶的产量、产值及内销额增幅明显,截至 2022 年,白茶产量为 9.45 万 t,产值为 77.93 亿元,内销额为 100.53 亿元。不同地域白茶的涌现、茶树新品种的培育、新工艺白茶的兴起不断丰富着白茶的花色品种及产品类型。随着香气检测分析技术的发展,香气组分可用于茶叶产地^[11]、等级^[12]、季节^[13]、真伪^[14]判定,还可用于在线监测不同茶类制作过程中的杀青程度^[15]、闷黄程度^[16]、发酵程度^[17]等。国内外关于白茶的综述多聚焦在加工方式比较、健康功效^[9,18-19]等方面,而系统研究白茶香气成分及其形成影响因素的综述较为欠缺。本文整理了近年来国内外白茶香气成分的研究进展,归纳了白茶香气研究的萃取、检测及分析方法,阐述了原料采摘等级、茶树品种及环境生态因子等因素对白茶香气成分的影响,及白茶香气成分在加工及储存过程中的变化规律,并就典型白茶的香型及相应关键香气成分进行了总结,以期为白茶加工的规范化、白茶贮藏条件优化、白茶质量判定、白茶风味化学研究、白茶标准制定等提供理论参考。

1 白茶香气研究技术

茶叶香气研究中主要萃取技术有同时蒸馏萃取

(simultaneous distillation extraction, SDE)^[20]、减压蒸馏萃取(vacuum distillation extraction, VDE)^[6]、搅拌磁子吸附(stir bar sorptive extraction, SBSE)^[21]、顶空-固相微萃取(head space-solid phase micro-extraction, HS-SPME)^[22]、超临界 CO₂ 萃取法(supercritical fluid extraction, SFE)^[23]等。不同萃取技术存在各自的优缺点,如 SDE 操作简单,但萃取量低,VDE 能较好反映茶汤香气,但提取率及回收率均较低,SBSE 灵敏度高,但萃取时间长,SFE 萃取效率及纯度高,但对设备要求较高,而 SPME 虽吸附量少,但因操作简单、灵敏度高、不受试剂干扰等优点在茶叶香气成分的萃取中广泛应用^[24]。值得注意的是,茶叶香气组成复杂、含量少、易挥发,在萃取过程中易发生氧化、聚合、缩合、基团转移等,这对于香气组分的定性及定量造成了一定挑战^[1]。采用不同萃取方法萃取同一样品检测到的香气成分的类型及数量均可能不同,如 SPME 主要捕捉低沸点的醇类、醛酮类和弱极性的烃类,SDE 因连续加热提取,还可萃取到高沸点的酸类、酯类等^[25]。有研究采用 SPME 和水蒸汽蒸馏萃取法(water steam distillation extraction, WDE)分别提取福建白茶中香气挥发性物质,SPME 提取的香气种类稍少,但获得的芳香醇含量更高^[5]。

茶叶中挥发性成分的分离与检测技术主要有气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)^[26]、气相色谱-质谱-嗅闻法(gas chromatography-olfactory-mass spectrometry, GC-O-MS)^[27]、气相色谱-离子迁移谱法(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)^[28]、质子传递反应-飞行时间质谱法(proton transfer reaction-time of flight-mass spectrometry, PTR-TOF-MS)^[29]、电子鼻技术^[30]等。在以上检测技术中,GC-MS 结合了气相色谱对样品香气成分的分离及质谱在鉴定化合物中的分辨能力,可同步实现多组分的定性、定量分析,在茶叶香气检测中的应用最为常见。但是,GC-MS 作为间接的测量方法,无法确定某个风味活性物质对整体风味贡献的大小。目前,多维色谱技术的发展使复杂有机物的分离得到极大进步,如全二维气相色谱(two-dimensional gas chromatography, GC×GC)可提高分离系统的分辨率与灵敏度。气相色谱-嗅觉测量法(gas chromatography-olfactometry, GC-O)将气相色谱的分离能力与人类鼻子敏感的嗅觉相联,可从复杂的挥发组分中选择和评价气味活性物质^[31]。事实上,多个分离检测技术联合可更全面地表征茶叶的香气品质研究,如 GC-MS 结合电子鼻^[32]、电子鼻结合 GC-IMS^[33]、二维气相色谱-飞行时间质谱法(two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry, GC×GC-TOF-MS)与 GC-O-MS 联合等^[34]。

传统的茶叶香气评价方法主要是感官审评法(GB/T

23776—2018《茶叶感官审评方法》), 还有在此基础上展开的定量描述分析法(quantitative descriptive analysis, QDA)等^[35]。电子鼻技术主要通过气体传感器对应的图谱识别各个样品的挥发性成分, 并应用数据处理系统对整体的香气成分进行分析和评价^[36]。茶叶样品经萃取、检测及定量后, 可通过香气活度值(odor activity value, OAV)或相对香气活度值(relative odor activity value, rOAV)结合主成分分析(principal components analysis, PCA)、判别分析(discriminant analysis, DA)等化学计量方法进行香气评价。香气活性成分指对样品整体香气起重要作用的挥发性成分, OAV 值即该香气活性成分的含量与该化合物阈值的比值。通常认为, 当 OAV>1 时, 该化合物对整体香气特征有显著贡献^[37]。香气特征影响值(aroma character impact value, ACI)主要表征某香气成分的香气特征影响值, OAV 值及 ACI 值越大表明对样品香气的贡献越大^[38]。值得注意的是, 茶叶中某一香气成分含量高, 并不能直接表明该化合物对样品整香气的贡献率高, 这在一定程度上是由其香气阈值决定的, 这一说法在福建白茶及云南白茶的香气研究中均得到证实^[39-40]。

本文整理了近年来白茶香气研究中涉及的萃取、检测技术, 及香气的定性、定量方法及香型评价方法(表 1)。由表 1 可知, HS-SPME 是白茶香气研究中采用的主流萃取技术; GC-MS 是主要的分离检测技术; 而香气化合物定量多采用外标法, 其中癸酸乙酯是最常采用的标准品; PCA 与 DA 是香气品质评价中主要采用的化学计量法, 而 GC-O-MS、OAV 值、ACI 值是鉴定白茶中关键呈香成分的主要方法。笔者认为, 白茶的香气萃取技术选择首先应考虑是否能最大限度地保留样品香气组分, 而分离检测技术则应在确保样品组分充分分离并经质谱对化合物辨认的基础上, 结合嗅闻或电子鼻技术对样品的风味活性香气物质进行强度分析, 并通过 OAV 值结合化学计量法等对香气进行综合表征。

2 白茶香气影响因素

茶树体内的香气前体物质是香气的物质基础, 茶树的生长环境、生长季节、茶树发育阶段、茶树品种、加工工艺乃至贮藏陈化年份等因素均能影响香气前体物质的转化, 从而影响茶叶产品的香气种类、香气组成比例及含量等^[4]。

2.1 生态环境因子

海拔作为重要的生态环境因子, 其高度变化会导致光照、温度、湿度的差异, 从而影响茶树的生长发育、次级物质代谢^[55]。研究表明, 中、高海拔(500 m、1000 m)生长的茶树鲜叶所制的政和白茶香气清纯, 而低海拔(200 m)茶树鲜叶所制白茶则花香显, 2-甲基丁醛、3-萜烯和萜品油烯可作为鉴别不同海拔高度生长的茶树鲜叶所制白茶的特征挥发性成分^[41]。温度影响茶树生长和光合作用, 进而影响茶树代谢及物质的形成、转化和积累。有研究通过设置 0、5、10、15℃ 4 个昼夜温差(difference between day and night temperature, DIF), 模拟“福云六号”茶树的生长生态环境, 发现 DIF 的增加可提高茶鲜叶中醛类物质含量, DIF 为 15℃ 时, 正己醛相对含量最高, 青叶醇含量则随 DIF 的增大而降低^[56]。光照作为一种能源物质和外源信号, 影响叶片的生理代谢过程^[57]。一般认为, 较高的光照强度和较大的日照量, 有利于碳代谢, 而短期遮阴则可通过调节碳氮代谢, 在一定程度上改善茶叶品质^[58]。研究显示, 遮阴处理后, 茶树可激活叶绿素生物合成, 并抑制茶叶的类黄酮素和木质素生物合成^[59]。茶林间作造成的生态遮光或人为覆盖遮光可改善茶园小气候, 调节茶树次级物质代谢, 改善茶叶香气^[60]。研究显示, 遮阴处理后, 夏茶叶片中芳樟醇、香叶醇等游离香气含量明显增加, 可使夏茶香气品质得到提升^[61]。适度遮阴可改善茶叶的香气, 应与遮阴后

表 1 白茶香气研究中的萃取、检测技术及评价方法

Table 1 Extraction, detection technology and evaluation methods in the study of white tea aroma

编号	萃取技术	分离检测技术	定量方法	评价方法	研究对象
1	HS-SPME	GC-MS	内标法(4-叔丁基环己醇);	PCA、PLS-DA、OAV;	政和白茶 ^[41]
			同位素内标法(芳樟醇、峰面积归一化法);	PCA、OPLS-DA、HCA、rOAV;	紫娟白茶 ^[42]
		ATD-GC-MS	峰面积归一化法	PCA、CA	乌龙种白茶 ^[43]
			内标法(癸酸乙酯)	CA; PCA、OAV	建阳白茶 ^[44]
2	SDE	GC×GC-TOF-MS、GC-O-MS;	外标法	GC-O-MS; PLS-DA、GC-O-MS	白牡丹 ^[45]
			绝对定量	PCA、O2PLS-DA、HCA	贡眉 ^[34]
		PTR-TOF-MS	内标法(癸酸乙酯)、峰面积归一化法;	-; PCA、LRA; -;	福鼎白茶 ^[46]
			内标法(癸酸乙酯)、峰面积归一化法; 内标法(癸酸乙酯); 内标法(环己酮)	QDA、OAV、GC-O-MS	建阳白茶 ^[47]
3	SAFE	GC-MS	外标法; 内标法(癸酸乙酯)	PCA、OPLS-DA、OAV、ACI;	福鼎白茶 ^[48]
			-	QDA、OAV	白牡丹 ^[49]
4	热水浸提	电子鼻	-	PCA、LDA	云南白茶 ^[50]
			-	-	速溶白茶 ^[51]
					梅占白茶 ^[38]
					政和白茶 ^[52]
					福鼎白茶 ^[53-54]

注: 聚类分析(cluster analysis, CA); 偏最小二乘法判别分析(partial least-square-discriminant method, PLS-DA); 线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA); 正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA); 双向正交偏最小二乘-判别分析(two-way orthogonal partial least squares-discriminant analysis, O2PLS-DA); 层次聚类分析(hierarchical cluster analysis, HCA); 高真空溶剂辅助蒸发提取法(solvent assisted flavor evaporation, SAFE); 线性回归分析(liner regression analysis, LRA); -表述文献中未提及。

香气物质及其前体的种类和含量改变有关,茶树经遮阴处理 3 周后,茶鲜叶中的苯丙素/苯类化合物含量显著增加,莽草酸等上游代谢物降低,而其关键前体 *L*-苯丙氨酸等大多数氨基酸含量显著增加^[62]。

2.2 茶树生长季节

生长季节是影响茶树鲜叶香气前体物质及成品茶香气化合物的因素之一。不同生长季节的“楮叶种”茶树鲜叶的糖苷类香气物质组成及含量差异较大,从春季到秋季,顺-3-己烯醇和水杨酸甲酯糖苷的含量逐渐提高,芳樟醇和香叶醇糖苷的含量逐步减少^[63]。2019—2021 共计 3 个年度的不同季节生长的“福鼎大毫茶”茶树鲜叶所制白茶的香气结果显示,春季白茶的沙宾烯、(2*E*,4*E*)-2,4-辛二烯醛等物质含量显著高于秋季,应是春季白茶具有更强的花香、清香和甜香的原因^[64]。春、夏、秋 3 个不同季节的云南“紫娟”白茶,其香气化合物种类虽然相同,但含量差异较大,春茶香气最优,而夏茶香气最劣^[65]。综上可知,春季白茶香气品质较秋季白茶较优的原因,应与春季茶鲜叶中醇类及酯类等具花香的香气物质含量较秋茶高有关^[66]。

2.3 茶树品种

茶树品种是影响茶叶香气品质的关键因素。茶树中香气成分的组成及含量存在明显的品种特异性特征^[66-68]。不同品种茶树鲜叶的香气前体物质^[69-70]、香气合成相关酶活性^[71]及各香气成分^[66,68,72]差异是造就成品茶香气类型不同的主要原因。

传统的白茶以大白茶、水仙或群体种的茶树品种鲜叶为原料制成,香气以毫香、嫩香为主(GB/T 22291—2017《白茶》)。不同茶树品种制作的白茶,香气化合物类型、组成比例及含量均有较大差异。研究显示,“政和大白茶”所制白牡丹含有较高的醛类和醇类化合物,“福鼎大毫茶”白茶含有较丰富的醇类化合物,“福云 6 号”白茶含有较高的醛类和碳氢化合物,“九龙大白茶”和“福云 595”白茶含有较高的醇类和碳氢化合物,其中,正己醛、壬醛、癸醛、苯甲醇、芳樟醇、1-戊醇和 β -紫罗兰酮是 5 个传统茶树品种所制白茶共有的主要香气贡献成分^[45]。对比不同茶树品种制作的白牡丹的香气发现,“政和大白茶”白茶呈现清香带花香,“福鼎大毫茶”白茶呈现嫩香、毫香显,“福建水仙”白茶呈现花香显,“梅占”白茶呈现花香浓且持久的香气特征^[73]。以传统适制茶树品种为对照,研究乌龙茶茶树品种所制白茶的香气,发现传统品种白茶的碳氢化合物含量较高,呈现清新带毫香的特征,而乌龙茶品种白茶富含醇类、醛类、酮类及酯类等花香型化合物^[74]。以“福鼎大毫茶”为对照,研究“肉桂”、“黄玫瑰”及“瑞香”3 个乌龙茶茶树品种制作的秋季白茶香气,发现“肉桂”及“瑞香”白茶在花香型及果香型的香气成分的种类及含量均优于“福鼎大毫茶”白茶^[75]。

云南白茶发展起步较晚,“景谷大白茶”“雪芽 100”“云抗 10 号”“长叶白毫”等云南大叶种茶树品种制作的云南白茶,具有玫瑰香香气特征,滋味甜醇^[76]。“景谷大白茶”制成的云南白茶的香气成分主要为芳樟醇、十六烷酸、芳樟醇氧

化物、二氢猕猴桃内酯、2,6,10,14-四甲基十五烷、植酮、水杨酸甲酯和橙花叔醇等^[77]。而另外一项关于月光白茶的香气研究表明,其香气成分主要是芳樟醇、十三烷、二氢猕猴桃内酯、2,2',5,5'-四甲基-1,1'-联苯基、芳樟醇氧化物等^[78]。2-庚醇、1-辛烯-3-醇、芳樟醇、香叶醇、苯乙醛、 β -蒎烯是“南涧群体种”白茶香气贡献挥发性成分^[40]。“云茶香 1 号”白茶具有花香及果香的香气特征,橙花醇、亚油酸甲酯、乙酸叶醇酯、亚麻酸等化合物是主要贡献者^[79]。以“紫娟”品种制作的云南白茶,香气化合物以醇类、酯类、杂环化合物为主,其中,1-辛烯-3-醇、 α -紫罗兰酮、苯乙醛、 β -紫罗兰酮、苯甲醛、环氧- β -紫罗兰酮、水杨酸甲酯、*Z*-橙花叔醇、己醛是其香气形成的关键香气化合物^[42]。

综上,原料采摘季节、采摘等级及加工工艺等影响因素一致的情况下,品种对于白茶香气的形成有重要的影响,体现在香气成分种类与含量的差异(表 2)。福建白茶主要分布在闽东茶区(福鼎、福安等)及闽北茶区(政和、建阳等)^[10],传统适制品种以“福鼎大毫茶”“福安大白茶”“福云 6 号”为主,香气特征以清香、毫香为主,对应香气化合物类型为醇类、醛类及碳氢类等;而以乌龙品种(“黄观音”“梅占”“肉桂”等)制作的白茶,主要呈现花香及果香的香气特征,对应主要香气化合物类型为醇类、醛类、酮类、酯类等。云南白茶产区主要是景谷等地,传统适制品种为“景谷大白茶”,呈现花香特征,对应香气化合物类型主要为醇类、碳氢化合物等;而其他云南大叶种如“南涧群体种”“紫娟”等制作的白茶以花香、果香为主,对应醇类、烃类、酯类等香气化合物类型。代谢组学研究表明,福建白茶与云南白茶在非挥发性化学成分方面也有显著性差别,其中表型儿茶素类、二聚儿茶素类、部分黄酮糖苷类、酚酸类、脂类等化合物在云南白茶中含量较高,非表型儿茶素类、部分黄酮糖苷类、氨基酸类、生物碱类化合物在福鼎白茶中含量相对较高,推测应与茶树品种和干燥工艺有关^[80]。

2.4 原料采摘等级

白茶根据原料要求的不同,可分为白毫银针、白牡丹、贡眉、寿眉 4 种,每种产品又可分为不同等级(GB/T 22291—2017)。原料等级不仅影响白茶的感官品质及香气前体含量^[80-82],还影响其香气品质。白毫银针和白牡丹的香气成分组成比例和种类、含量较为接近,且 β -芳樟醇及其氧化物、香叶醇、水杨酸甲酯、苯乙醇、苯甲醇等是两种白茶香气的主要成分^[83]。不同等级白茶香气研究显示,白毫银针与白牡丹的香气组分较为接近,且含有较高的花果香型的醇类物质,而寿眉则含有较高的醛类、酮类、酯类、内酯类成分,进一步对各等级白茶的特征性香气成分的研究发现,白毫银针为苯乙醇、顺-茉莉酮等,白牡丹为 β -雪松烯、 β -榄香烯等,寿眉为橙花基丙酮、紫罗兰酮等^[84]。另外一项研究表明,高比例的醇类和醛类物质构成了福建白茶清新香气特征的基础,苯乙醇、 γ -壬内酯、反式- β -紫罗兰酮、反式氧化芳樟醇(呋喃类)、 α -紫罗兰酮和顺-3-己烯基丁酸酯是造成不同等级白茶香气特征差异的关键香气物质^[48]。而不同等级的白茶香气的组成与含量不同,

表 2 不同茶树品种制作的白茶香气特征及主要香气化合物
Table 2 Aroma characteristic and main volatile compounds of white tea by different tea cultivars

白茶类型	主要茶树品种	香型	主要香气成分类型	主要香气化合物
福建白茶	传统品种 福鼎大毫茶、福安大白茶、福云 6 号、九龙大白茶、福云 595 ^[45] 、政和大白茶、福鼎大毫茶 ^[73] 、福鼎大毫茶、福安大白茶、福云 6 号 ^[74] 、福鼎大毫茶 ^[75]	花香、果香; 嫩香、毫香, 清香带花香; 清新带毫香; 清香	醇类、醛类、碳氢类; 醇类、碳氢类、酯类和酮类; 碳氢类; 醇类、醛类、酯类、碳氢类	正己醛、壬醛、癸醛、苯甲醇、芳樟醇、1-戊醇和 β-紫罗兰酮; 香叶醇、左旋-β-蒎烯、苯乙醇、水杨酸甲酯、(E)-香叶酸、芳樟醇等; 3-甲基十二烷、庚基环己烷、(E)-2-十四烯和 5-甲基十四烷; 正己醛、正己醇、1-戊烯-3-醇、顺-2-戊烯醇、香叶醇、左旋-β-蒎烯、水杨酸甲酯、芳樟醇、苯乙醇、3-萜烯等;
	乌龙品种 福建水仙、梅占 ^[73] 、茗科 1 号、黄观音、黄棪、奇兰、梅占 ^[74] 、肉桂、黄玫瑰及瑞香 ^[75]	花香; 花香; 花果香、清香	醇类、碳氢类、酯类和酮类; 醇类、醛类、酮类及酯类; 醇类、醛类、酯类及酮类	1-辛烯-3-醇、甲基庚烯酮、2,2,6,6-三甲基-6-乙炔基四氢-2H-咪喃-3-醇、2,3-二氢-2,2,6-三甲基苯甲醚和 α-紫罗兰酮; 香叶醇、反式-橙花叔醇、(Z)-己酸-3-己烯酯、苯乙醇、(E,E)-2,4-庚二烯醛、顺-2-戊烯醇等
云南白茶	传统品种 景谷大白茶 ^[77-78]	花香	醇类、碳氢化合物、酮类; 碳氢类和醇类	芳樟醇、十六烷酸、芳樟醇氧化物、二氢猕猴桃内酯、2,6,10,14-四甲基十五烷等;
	其他品种 南涧群体种 ^[40] 、紫娟 ^[42] 、云茶香 1 号 ^[79]	花香、毫香; 果香、花香、辛香; 果香、花香、清香	醇类、烯烃类、醛类; 醇类、酯类、杂环及芳香族类; 杂环类、酯类、醛类及醇类等	芳樟醇、水杨酸甲酯、苯甲醇、β-紫罗兰酮、1-辛烯-3-醇、α-紫罗兰酮等; (E)-2-己酸丁酯、癸醛、橙花醇、亚油酸甲酯、乙酸叶醇酯等

在一定程度上与茶树鲜叶的发育阶段及影响香气形成的基因表达有关。研究显示, 茶树叶片萜类化合物含量受叶片发育阶段影响, 表现为幼叶中多、老叶中少^[85]。水杨酸可在水杨酸羧甲基转移酶(salicylic acid carboxyl methyltransferase, SAMT)的作用下合成水杨酸甲酯, *CsSAMT* 基因在茶树第二叶中表达量最高, 而在老叶中表达量最低^[86]。基于不同原料等级对香气的影响, 可根据香气成分结合化学计量法对同一批茶叶进行等级划分。如可采用 SDE-GC-MS 结合主成分分析、多元回归分析筛选出 12 种对白茶香气关键性挥发组分将福鼎白茶进行香气等级划分为优、良、中、差 4 个等级^[49]。

2.5 制作工艺

传统白茶的制作工艺为: 萎凋→干燥(烘焙), 创新工艺白茶的制作工艺在此基础上可添加轻揉、做青、发花等工艺, 而云南白茶的干燥方式主要是阴干、晒干或低温烘焙等。

2.5.1 萎凋方式及萎凋因子

萎凋是形成白茶品质的关键工序, 在萎凋过程中, 糖苷键合态挥发物、脂肪酸与游离氨基酸等香气前体可分解为醇类、醛类等挥发性香气物质^[87-88]。温度、湿度、萎凋时长、光质等是影响萎凋质量、决定是否能制成优质白茶的重要因素^[89]。

白茶萎凋方式主要有自然萎凋、加温萎凋及复式萎凋 3 种, 萎凋质量与温度、湿度等环境条件密切相关^[90]。研究显示, 与室内萎凋相比, 短期的日光萎凋(15 min)能显著上调参与采后茶鲜叶香气相关代谢途径, 如萜类代谢关键基因的表达^[91]。加温萎凋与复式萎凋(自然萎凋+日光萎凋)两种方式制成的福鼎白茶, 二者的醇类等主要香气成分总体一致, 但加温萎凋制茶的芳樟醇、苯甲醇、苯甲醛、二氢猕猴桃内酯等物质相对含量高于复式萎凋制茶^[92]。李沅达等^[42]发现, 自然萎凋的“紫娟”白茶具有馥郁花果香且带毫香、辛香、药香, 主要归因于 1-辛烯-3-醇、 α -紫罗兰酮、苯乙醛、水杨酸甲酯等香气化合物, 而复式萎凋的“紫娟”白茶由于 1-辛烯-3-醇、 α -紫罗兰酮、 β -紫罗兰酮、苯甲醛等香气化合物的贡献而显示出浓郁果香且带花香、辛香的香气, 并指出 1-辛烯-3-醇和水杨酸甲酯是二者香气差异的关键化合物。自然萎凋和复式萎凋两种方式所制云南白茶的香气对比分析发现, 复式萎凋制样的橙花醇、亚油酸甲酯、乙酸叶醇酯、亚麻酸、(E)-2-己酸丁酯等香气成分含量均较高, 呈现花果香、蜜香、坚果香等香气特征, 而自然萎凋处理的白茶以清香和果香香型为主, 香气主要贡献者为 (E)-2-己酸丁酯和癸醛^[79]。自然萎凋、萎凋槽萎凋及日光萎凋 3 种萎凋方式下制作的“政和大白茶”白茶香气对比研究显示, 日光萎凋制样因香叶醇和芳樟醇的增加具有花香特征, 萎凋槽制样则因己醛的增加出现草香香气特征^[52]。

茶叶日光萎凋工序的开展极易受到天气的影响, 人工光照技术在一定程度上解决了这一问题。人工光照在茶树鲜叶采收后的应用较为广泛, 主要集中在光源、光强、光质和光周期等方面进行光补偿萎凋工艺的研究^[93]。发光二极管(light-emitting diode, LED)是一种可直接将电能转化

为光能的新一代照明光源, 具有高光效、低功耗、低发热等光电优势, 在设施农业中逐步取代传统光源的地位^[94]。研究表明, 不同光质的 LED 光源对茶树芽叶形态发育、光合能力、碳氮代谢调控等方面均有较大的影响^[95]。LED 光源可设置单光质及组合光质, 主要用于茶叶萎凋工序中的光补偿。采用 LED 光源设置红光、黄光、日光 3 种不同单色光质对福鼎大白茶鲜叶进行萎凋时发现, 与无光萎凋组相比, 黄光、红光和蓝光萎凋组的良好香气物质的含量比例增加, 其中黄光萎凋组的醛类、烷烃类、烯烃类、苯和萜类比例最高, 红光萎凋组的酮类和杂氧化合物最高, 蓝光萎凋组变化不大^[96]。LED 黄光、蓝光、红光光源萎凋处理均可显著提高“三花 1951”品种白茶的香气, 黄光组白茶香气类型为花香, 香气化合物数量和含量均为最高, 主要是芳樟醇及其氧化物、橙花醇、香叶醇、异香叶醇、 β -紫罗酮、水杨酸甲酯等^[97]。采用 LED 红光、蓝光及自然光 3 种光质萎凋处理探究对婺源白茶的影响, 感官审评显示 LED 红光所制白茶较自然光处理的香气更持久, 且香气有明显的提升^[98]。LED 单一红光光源下, 探究全程光照、前半程光照、后半程光照 3 种光照萎凋干预对福鼎白茶香气的影响, 前半程光照萎凋处理的白茶香气成分数量和含量最高, 主要是苯甲醇、苯乙醇、香叶醇、芳樟醇及其氧化物等花香型香气物质^[99]。笔者认为, 应充分利用茶鲜叶采后生理代谢规律, 结合白茶萎凋过程中的失水规律, 依据白茶的目标香型, 选择性地开展 LED 多组合光质、不同光补偿干预阶段设置等的白茶萎凋生产线的品质调控研究。

萎凋温度是决定萎凋质量的重要因素。通过设置不同萎凋温度(20、25、30℃)研究其对白茶感官品质的影响, 结果显示萎凋温度为 25℃时白茶的感官品质最优, 香气微甜带毫香^[100]。一项关于传统萎凋结合短时热风萎凋(10、30、50 s, 45℃)的贡眉白茶香气研究显示, 经变温萎凋处理(30 s, 45℃)的贡眉显现出陈年白茶特有的蜜香香气特征^[101]。亓俊然等^[102]的研究表明, 萎凋前期低温处理(5℃, 30 h)结合自然萎凋, 可提升金萱白茶香气的持久度及甜香、花香强度, 香叶醇、香叶酸甲酯、苯乙醇、苯乙醛、 α -紫罗兰酮等呈香挥发性物质的种类和含量也会显著增加。中、高温中湿(30~35℃, 相对湿度 75%)或中低温环境(25~30℃)下萎凋可通过调控茶鲜叶失水速度, 避免因高温高湿环境产生发酵香等不良香气, 制作出花香等较好香气品质的白茶^[103]。萎凋时长也可决定萎凋质量的好坏, 直接影响茶叶品质。不同程度的萎凋可通过调整萎凋时长实现, 萎凋时长不同, 茶叶中香气化合物的含量和比例也有所差异。研究发现, “邑茶 1 号”白茶的香气化合物数量和种类在萎凋过程中不断变化, 其中反式-橙花叔醇则在萎凋 3 h 后含量达到最高, 2-己烯醛及其衍生物在 12 h 含量达到最高, 萜烯类、苯丙素类/苯类、 β -紫罗酮等香气化合物含量随着萎凋进程而显著增加。从萎凋起始到结束, 香气化合物总含量和种类的增加, 被证实应与萜类化合物和亚麻酸代谢增强有关^[104]。“丹霞 8 号”茶鲜叶在萎凋 5 h 时脂肪醇、杂环化合物和萜酮含量最高, 16 h 时烃类和萜烯含量最高, 萜

醇含量则最低, 50 h 时酯类、萜醛、芳香醇、芳香醛和萜醇含量最高, 萜烯含量最低^[105]。不同萎凋时长下, “英红九号”白茶在的香气化合物组成及含量变化表明, 香气总量随萎凋时间的延长呈现先增后降趋势, 萎凋 24 h 时含量达到最高, 其中芳樟醇、水杨酸甲酯等多数化合物含量随着萎凋进行先增后降, 而苯甲醛和 β -香叶烯含量在 30 h 的萎凋过程中总体持续上升^[106]。脂氧合酶(lipoxygenase, LOX)是植物脂肪酸代谢途径的重要限速酶, 林馨颖等^[107]研究发现, “福鼎大白茶”茶鲜叶经不同萎凋时长(0~48 h)处理后, *CsLOX* 基因在萎凋 4 h 时表达量最高, 推测其参与了脂肪族类香气形成。随着萎凋时间的延长, 脂肪、多糖的水解, 谷氨酸、天冬酰胺、丙氨酸等氨基酸的不断积累, 茶叶中的香气前体及香气成分含量及比例也在发生变化^[108]。但在白茶实际生产中, 萎凋时长不是一成不变的, 应根据茶树品种、原料采摘等级、温湿度等萎凋环境因子进行灵活调整, 并结合如某类香气成分在萎凋过程中的变化规律进行萎凋终点的判定。

2.5.2 干燥方式及干燥因子

干燥是稳定茶叶品质, 提升香气的重要工序。白茶在干燥过程中, 低沸点醇醛类物质挥发或发生异构化生成清香型香气化合物, 类胡萝卜素在高温条件下发生非酶促作用降解为萜烯类香气物质, 糖类物质发生焦糖化作用或与氨基酸发生羰氨反应生成新的香气等^[108-109]。白茶的干燥方式主要有高温烘焙、低温烘焙、日光晒干及阴干等。其中, 电焙和炭焙是福鼎白茶制作中采用的两种主要的可控温烘焙方式, 电焙通过热空气来干燥茶叶, 热量集中于茶叶表面, 受热不均匀, 而炭焙利用木炭燃烧形成的红外线, 实现由内到外的热量辐射, 茶叶受热均匀^[110]。研究显示, 电焙与炭焙两种干燥方式所制福鼎白茶的主要挥发性物质总体一致, 炭焙白茶的二十烷、香叶醇与苯乙醇等烤香型的挥发性物质含量较高, 电焙白茶的 β -紫罗兰酮、 β -环柠檬醛与香叶基丙酮等花果香、清香的香气物质含量较高。而进一步研究通过采用不同温度的炭焙方式制作的福鼎白茶香气结果显示, 高温炭焙白茶的 α -柏木烯、 δ -杜松烯等与炭火、木质香气有关的物质含量更高, 而苯乙醛、橙花醇、芳樟醇以及二氢猕猴桃内酯等与花果香有关的物质含量更低^[111]。吴全金等^[39]同样指出, 炭焙白茶香气品质优于电焙白茶, 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。阴干、阴晒结合、晒干、烘干 4 种不同干燥方式所制白茶的茶香螺旋烷、反式青叶醇、己醇、2,2,3-三甲基-环丁酮、1-辛烯-3-醇、3,5-辛二烯-2-酮等物质相对含量存在明显差异, 阴干白茶清香带毫香, 晒干与晒阴结合干燥白茶带有日晒味, 烘干白茶显花香^[40]。

干燥温度及时长是影响干燥质量的主要因素, 叶靖平等^[112]认为干燥温度对白茶香气有直接影响, 干燥温度低香气钝, 温度高不利于香气成分的固定和保留, 并建议白茶干燥温度以 60~80°C 为佳, 所制白茶香气高长带花香。随着干燥温度的增加, 白茶中的醇类、酯类相对含量呈下降趋势,

而酮类、醛类、碳氢化合物和呋喃类则呈现上升趋势^[113]。不同干燥温度同样对萎凋叶压制白茶饼的香气品质有较大影响, 研究显示, 不同干燥温度所制白茶饼的醇类物质等主要挥发性物质种类总体一致, 但各物质的比例差异较大, 其中 80°C 是干燥适宜温度, 该温度条件下所制白茶饼的十三酸甲酯、辛酸甲酯、己酸甲酯和二氢猕猴桃内酯等酯类香气物质含量显著高于 90°C 及 100°C 干燥处理所制白茶饼^[114]。

2.5.3 形制

紧压白茶是以白茶(白毫银针、白牡丹、贡眉、寿眉)为原料, 经蒸压定型等工序制成(GB/T 31751—2015《紧压白茶》)。政和寿眉散茶经过湿热压饼处理后, 水浸出物、可溶性蛋白质、茶多酚、类黄酮等含量均显著增加, 而可溶性糖、氨基酸总量等显著降低^[115]。林宏政等^[116]发现白牡丹散茶香气以嫩香为主, 压饼处理后, 香气以果香与甜香为主, 推测应与醇类组分的下降与芳樟醇氧化物、酮类、酯类、烯类和杂氧化合物香气组分含量的上升有关。而福安白茶经压饼处理后, 香气特征由青、杂香转化为陈、药香^[117]。压饼处理对陈化白茶的香气种类和含量都有着较大的影响, 散茶可由花果香特征转变为饼茶的陈香、枣香、药香等特征香型, 具体表现为芳樟醇及其氧化物、己酸甲酯与 β -紫罗兰酮等许多花果香物质减少, 而雪松醇、雪松烯、酸龙脑酯与 α -蒎烯等具有木香、药香的香气物质增加^[118]。而寿眉散茶无论采用“先压后藏”还是“先藏后压”的压制处理, 饼茶的香气均优于散茶^[119]。

2.5.4 创新工艺

传统白茶种类及品质相对单一, 无法满足消费者多样化需求。研究表明, 在传统白茶工艺(萎凋→干燥)的基础上嫁接轻揉捻、做青工序的新工艺白茶, 除了具有传统白茶的品质特征外, 还兼具花香特征^[120]。在白茶传统工艺中加入轻发酵、轻揉捻的新工艺, 或加入轻做青、轻揉捻的创新工艺, 所制白茶的香气不同于显毫香或甜香的传统白茶。例如, 以“福安大白茶”茶鲜叶为原料采用不同工艺制作白茶, 结果发现, 与传统加工工艺相比, 新工艺及创新工艺所制白茶表现出花香的香气特征^[121]。以“黄观音”茶鲜叶制作白茶, 对比分析传统白茶工艺与 3 种新工艺白茶(加摇青工艺、加揉捻工艺、加摇青与揉捻工艺)的香气成分差异, 发现新工艺处理对白茶的主要香气成分的总量、种类及构成影响显著, 摇青处理新增了反式-橙花叔醇、己酸-顺-3-己烯酯和 4-己内酯等花香香气物质, 揉捻处理提高了醛类、酸类等甜香香气物质^[122]。以秋季“丹桂”茶鲜叶为原料, 对比研究传统白茶工艺与增加摇青工艺所制白茶的香气, 发现在萎凋阶段进行适度摇青处理有利于酯类等具有花果香型香气物质的积累, 而传统白茶工艺则有利于醇类、醛类、酮类、碳氢类、杂氧类等低沸点香气物质的保留^[123]。堆青是做青后茶青厚堆的传统乌龙茶工序, 陈维等^[124]发现白茶经堆青处理后甜香增加, 可能与 β -环柠檬醛、反-2-辛烯醛和 α -紫罗兰酮的上升有关, 而鲜度下降应与正己醇、反,反-2,4-己二烯醛和辛酸含量减少有关。

为满足对白茶产品的多样化需求, 发花工艺也被用于白茶制作, 发花白茶的创制丰富了白茶的花色品种。将

冠突散囊菌人工接种于白茶后, 发花白茶的茶多酚和酯型儿茶素含量下降, 咖啡碱和部分氨基酸等含量升高, 白茶的苦涩味和粗青味降低, 呈现出更醇和的滋味^[125-126]。刘菲等^[127]发现白牡丹及寿眉经自然发花处理后, 原有的花果香型和清新香型香气降低, 具有木香和陈香的柏木烯、雪松醇含量升高。以贮藏 4 年与 8 年的寿眉为原料分别制作金花白茶, 经发花处理后, 香气中粗老气降低, 纯正度提高, 并出现明显的菌花香^[128]。而通过向寿眉喷洒发花茶叶汁进行渥堆发酵, 发现发花处理后的寿眉中(花)木香和药香的香气组分如柏木脑、 α -柏木烯和芳樟醇氧化物等含量显著升高, 而苯甲醇、 β -环柠檬醛、苯乙醛及橙花醇等表现为花果香和清凉香的香气组分含量显著降低^[129]。

2.6 贮藏与陈化

白茶因其独特的保健功效素有“一年茶, 三年药, 七年宝”之称^[130]。研究发现, 白茶在储藏过程中, 其主要生化成分茶多酚、氨基酸、可溶性糖等物质含量降低, 黄酮类等物质升高^[130-133], 年份白茶中 N-乙基-2-吡咯烷酮取代的黄烷醇类(N-ethyl-2-pyrrolidinone-substituted flavan-3-ol, EPSF)成分含量的增高也被证实与贮藏时间有关^[134]。

白茶在贮藏过程中由清香、毫香等香型转变为陈香带有枣香、梅子香等香型, 主要是由于花果香型的芳樟醇及其氧化物、香叶醇、水杨酸甲酯、苯乙醇等香气成分降低, 雪松醇、二氢猕猴桃内酯、2-甲基萜、柏木烯等含量增加^[135]。随着贮藏时间的延长, 紧压白茶香气逐渐由甜香、果香、花香向陈香、木香、草本转变, 其中醇类物质在贮藏 1~5 年时含量最高, 酯类物质在贮藏 7~13 年时含量最高, 醛类物质在贮藏 16 年时含量最高^[136]。王志华等^[28]对比不同年份紧压白茶香气发现, 柠檬烯、2-苯基乙醇、异丁酸的含量和贮藏时间呈反比, 2-乙酰基呋喃、庚醛和 E-2-辛烯醛的含量则和贮藏时间呈正比, 紧压白茶呈现出花香、清香药草味和坚果味的独特风味特征。探究“先压后藏”与“先藏后压”两种贮藏方式的不同贮藏年份(1 年、2 年、3 年)紧压白茶香气发现, 芳樟醇及其氧化物是不同贮藏方式样品间重要的差异性香气成分, 应是梅子香的主要贡献者, 其含量可随贮藏时间增加而显著减少, 并指出“先压后藏”贮藏方式可促进寿眉优异风味的形成^[119]。不同年份(1993、2010—2013)寿眉的香气研究发现, 香气总量在短期储藏(2012—2010 年)呈现下降趋势, 而 1993 年寿眉香气总量上升, 应与雪松醇、棕榈酸、三甲基硅酯棕榈酸等含量较高以及萜烯类和 β -紫罗酮等具有独特陈香的香气成分的增加有关^[48]。石碧滢等^[133]指出芳樟醇、异丁醛、 α -法尼烯、正己醛、芳樟醇氧化物 II 等 12 种挥发性化合物是造成不同贮藏时间的白牡丹茶差异特征香型的关键, 且贮藏过程中醇类挥发物的下降促进了香气由清香、花香向陈香转变。

除了长时间贮藏白茶获得陈化白茶外, 还可通过人工控制白茶陈化环境, 快速提升白茶的陈化度获得陈年白茶。研究表明, 自然陈化与快速陈化白茶在香气物质组成和含量上均存在显著差异, 自然陈化白茶以尚甜带青为主, 快速陈化白茶以甜香较浓为主, 应与己酸、2-癸酮、3-壬烯

-2-酮、4-甲基-3-戊烯-2-酮等具有甜香和果香特征的香气化合物有关^[137]。ZHU 等^[138]采用对映选择性气相色谱-质谱法研究 9 种挥发性内酯、14 种萜类化合物的对映体分布与不同贮藏时间白茶间的规律, 发现(2*S*,5*S*)-芳樟醇氧化物 A、(2*S*,5*R*)-芳樟醇氧化物 B、(2*R*,5*S*)-茶螺烷 B、*S*-芳樟醇和(1*R*,2*S*)-表茉莉酮酸甲酯的对映体比值(enantiomeric ratios, ERs)与贮藏时间(0~7 年)之间具有较高的相关系数和显著性差异, *S*-芳樟醇和 *S*/*R*-二氢猕猴桃内酯的含量随着贮藏时间的延长分别显著降低和增加, 并指出上述物质是区分新陈白茶的潜在标志物。

3 讨论与展望

白茶制作工艺简单, 能较大程度地保留茶树鲜叶中原有物质, 具有不输于其他茶类的健康功效, 受到消费者的青睐^[9]。香气是评价茶叶品质的重要因子之一, 随着现代仪器检测及分析技术的发展及对香气研究的深入, 茶叶香型、香气成分及茶叶香气前体物质的关系也逐渐清晰。不同萃取技术、检测技术及香气评价方法的结合, 使茶叶的香气研究得更全面。关键挥发性香气化合物的组成及含量等还可用于茶叶等级、地域、香型、真伪度、贮藏年份等的判定^[12,14,139-141], 但要快速、科学评判茶叶品质, 建议结合近红外光谱或高光谱技术^[142-145]、代谢组学^[146-148]等新兴技术。

白茶的典型香型有清香、毫香及花香等, 分别对应碳氢类、醇醛类等香气化合物。白茶香气因茶树品种、采摘嫩度等不同而表现出香气组分比例及含量差异, 而这种差异将因工艺不同而进一步放大。萎凋是白茶香气形成的关键工序, 萎凋过程中香气成分发生了复杂的变化, 乙酸乙酯、正戊醇、异戊醇等低沸点香气成分呈现出降-升-降的变化趋势, 而沉香醇、 α -萜品醇、橙花叔醇、苯乙醛等中高沸点香气成分显著增加^[149]。白茶在萎凋过程中, 脂肪酸、糖苷类等香气前体物质水解生成醇类、醛类等香气成分。研究表明, 在萎凋过程中选择适当的堆青处理方式, 可通过控制脂质氧化产生呈脂肪味的 2,4-二烯醛并促进清甜花香物质的释放^[150]。不同萎凋方式、萎凋环境中温湿度、光质、萎凋时长等因子极大地影响了萎凋质量, 造成香气化合物组分及含量的变化, 形成不同香气类型。传统的萎凋适度判断以在制品的叶相及色泽变化为准, 建议在白茶萎凋制作过程中, 应综合考虑生产实际, 严格控制萎凋环境因子, 建立在线萎凋监测标准, 如通过快速水分测定仪、高光谱无损检测技术监测水分含量与色泽变化等^[151], 并可考虑以萎凋时期产生的关键香气组分作为判断萎凋程度的依据。干燥方式及温度、时长等因素同样使白茶呈现出不同的香气特征, 福建白茶一般采用高温烘焙, 而云南白茶则采用阴干、晒干或低温烘干等干燥方式, 这也是造成两个不同地域白茶香气特征及对应香气成分差异的重要原因。阴干、晒干或低温烘干可使酶活性得到较多的保留, 对于后期白茶的陈化也是非常有利的。云南白茶与福建白茶, 在原料品种、干燥工艺、非挥发性理化成分及香气组分、感官品质等方面差异均较显著, 但现行国家标准是基于

福建白茶建立的, 仍有较大的优化空间。与白茶散茶相比, 紧压白茶具有方便存储等特点, 且经压制后, 原有的清香、花香型特征转变为陈香、木香等特征。白茶经长时间存储后, 香型发生了较大改变, 且“先压后藏”贮藏方式更有利于香气品质的提升。传统紧压白茶以饼型为主, 为满足消费者多元化需求, 可开发龙珠、巧克力薄片等小规格形制形式, 以达到便捷与香气快速转化的目的。创新工艺白茶可丰富白茶的花色种类一直是研究的热点。目前主要聚焦于在原传统工艺中嫁接轻揉捻、做青、发花等工艺, 此外, 还可通过鲜叶充氮厌氧处理开发果香型 γ -氨基丁酸白茶^[152]。外源酶处理^[153-154]、胁迫响应^[155]、施肥及遮阴^[61,156-157]等干预均可使香气品质发生改变, 故也可通过控制香气影响因素研发高香白茶等, 丰富现有白茶花色种类。

本文通过综述白茶香气研究技术, 阐述了影响白茶香气形成的多种因素, 并重点介绍了萎凋、干燥、压制等工艺对于白茶香气形成的影响, 并梳理了福建白茶及云南白茶的典型香型及对应关键香气成分, 以期在一定程度上为国家标准及相关标准的制定提供理论参考。并建议应从现有的国家及地方良种中进行白茶适制茶树品种(持嫩性强、酚氨比低、叶色淡、高香等)的筛选与繁育, 进一步系统规范白茶关键生产技术(智能监测在制品的萎凋程度、干燥程度等), 并开展多样化白茶精深加工产品研发, 充分结合白茶可存储特点, 利用新技术对白茶贮藏环境实施智能化管理等, 全面促进白茶产业的发展。

参考文献

- ZHAI XT, ZHANG L, GRANVOGL M, *et al.* Flavor of tea (*Camellia sinensis*): A review on odorants and analytical techniques [J]. *Compr Rev Food Sci F*, 2022, 21(5): 3867-3909.
- HO CT, ZHENG X, LI SM. Tea aroma formation [J]. *Food Sci Hum Well*, 2015, 4(1): 9-27.
- ZHENG XQ, LI QS, XIANG LP, *et al.* Recent advances in volatiles of teas [J]. *Molecules*, 2016, 21(3): 338.
- 王力, 林智, 吕海鹏, 等. 茶叶香气影响因子的研究进展[J]. *食品科学*, 2010, 31(15): 293-298.
WANG L, LIN Z, LU HP, *et al.* Research progress in affecting factors of tea aroma [J]. *Food Sci*, 2010, 31(15): 293-298.
- 侯冬岩, 刁全平, 李铁纯, 等. 两种方法提取白茶中挥发性化学成分研究[J]. *鞍山师范学院学报*, 2015, 17(4): 25-28.
HOU DY, DIAO QP, LI CT, *et al.* Studies on volatile constituents in white tea by two extraction methods [J]. *J Anshan Norml Univ*, 2015, 17(4): 25-28.
- 谢吉林, 肖海军, 鲍治帆, 等. HS-SPME 和 VDE 两种方法对普洱茶香气成分分析的比较研究[J]. *云南农业大学学报*, 2014, 29(6): 873-879.
XIE JL, XIAO HJ, BAO ZF, *et al.* Comparison of two analysis methods on aroma components of Pu-er tea: HS-SPME and VDE [J]. *J Yunnan Agric Univ*, 2014, 29(6): 873-879.
- 邓静, 王远兴, 丁建. 白茶与安吉白茶的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(4): 368-371, 377.
DENG J, WANG YX, DING J. Research progress in white tea and Anji white tea [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2013, 34(4): 368-371, 377.
- 危赛明. 白茶的产品特征与新的工艺始创[J]. *中国茶叶加工*, 2019, (4): 85-86.
WEI SM. The product characteristics and new technological innovation of white tea [J]. *Chin Tea Process*, 2019, (4): 85-86.
- ZHOU S, ZHANG JM, MA SC, *et al.* Recent advances on white tea: manufacturing, compositions, aging characteristics and bioactivities [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2023, 134: 41-55.
- 危赛明. 白茶的产区 and 品质特征[J]. *中国茶叶加工*, 2019, (3): 77-78.
WEI SM. The production area and quality characteristics of white tea [J]. *Chin Tea Process*, 2019, (3): 77-78.
- 罗玉琴, 韦燕菊, 林琳, 等. 基于 GC-IMS 技术的福建白茶产地判别[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(6): 264-273.
LUO YQ, WEI YJ, LIN L, *et al.* Origin discrimination of Fujian white tea using gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2021, 37(6): 264-273.
- 巢瑾, 周令欣, 银飞燕, 等. 基于香气指纹图谱和多元化学计量法对黄金茶 2 号等级的判别分析[J]. *食品科学*, 2023, 44(4): 321-328.
CAO J, ZHOU LX, YIN FY, *et al.* Grade identification of Huangjin tea 2 by aroma fingerprinting combined with multivariate chemometric analysis [J]. *Food Sci*, 2023, 44(4): 321-328.
- 王宝怡, 王培强, 李晓晗, 等. 基于电子鼻技术对不同季节山东绿茶香气的分析[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(10): 284-289, 259.
WANG BY, WANG PQ, LI XH, *et al.* Analysis of aroma of Shandong green tea in different seasons based on electronic nose technology [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2020, 36(10): 284-289, 259.
- 林杰. 茶叶香气的图谱分析及在茶叶品质真实性鉴定中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
LIN J. Analysis of aromatic profile and application on product quality authentication of tea (*Camellia sinensis*) [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- 何维, 王进, 黄九明, 等. 基于费舍尔判别法的绿茶杀青状态在线监测[J]. *农产品加工*, 2020, (24): 53-58.
HE W, WANG J, HUANG JM, *et al.* Online monitoring of tea de-enzyming state based on the fisher discriminant [J]. *Farm Prod Process*, 2020, (24): 53-58.
- 龚淑英, 周森杰, 谢雨欣, 等. 黄茶感官闷黄程度标定及不同闷黄程度莫干黄芽香气组分研究[J]. *茶叶*, 2021, 47(3): 138-146.
GONG SY, ZHOU SJ, XIE YX, *et al.* Sensory demarcation of yellowing processing and the volatile components in moganhuangya tea with different yellowing degrees [J]. *J Tea*, 2021, 47(3): 138-146.
- 何华锋, 桂安辉, 叶阳. 基于单萜类香气组分的工夫红茶发酵适度判别[J]. *茶叶科学*, 2018, 38(4): 406-409.
HE HF, GUI ANH, YE Y, *et al.* Discrimination of fermenting degree of congou black tea based on monoterpenoid [J]. *J Tea Sci*, 2018, 38(4): 406-409.
- 蔡清涛. 不同加工方式对白茶品质的影响及技术优化的研究[J]. *福建茶叶*, 2023, 45(2): 14-16.
CAI QS. Research on the influence of different processing methods on the quality of white tea and technical optimization [J]. *Tea Fujian*, 2023, 45(2): 14-16.
- 戴伟东, 解东超, 林智. 白茶功能性成分及保健功效研究进展[J]. *中国茶叶*, 2021, 43(4): 1-8.
DAI WD, XIE DC, LIN Z. Research progress of white tea's functional ingredients and health benefits [J]. *China Tea*, 2021, 43(4): 1-8.
- 陈林, 余文权, 张应根, 等. 基于 SDE 和 HS-SPME/GC-MS 的乌龙茶香气组成特征分析[J]. *茶叶科学*, 2019, 39(6): 692-704.
CHEN L, YU WQ, ZHANG YG, *et al.* Aroma profiling of oolong tea by SDE and HS-SPME in combination with GC-MS [J]. *J Tea Sci*, 2019, 39(6): 692-704.
- 赵玥, 肖成杰, 蔡宝国, 等. 气相色谱-质谱法中 4 种不同捕集方式对茶叶香气成分测定的影响[J]. *食品科学*, 2011, 32(16): 283-289.
ZHAO Y, XIAO CJ, CAI BG, *et al.* Influences of four different trap methods on GC-MS determination of aromatic components of tea [J]. *Food Sci*, 2011, 32(16): 283-289.
- 卢丹敏, 唐俊伟, 张天天, 等. 单丛茶 HS-SPME/GC-MS 指纹图谱的构建[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 241-248.
LU DM, TANG JW, ZHANG TT, *et al.* Construction of fingerprint of dancong tea using HS-SPME/GC-MS [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(21): 241-248.
- 张琪, 刘珺, 吕玉宪, 等. 超临界流体工艺萃取茶叶香气成分[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(6): 105-110.
ZHANG Q, LIU J, LV YX, *et al.* Supercritical fluid technology extraction of tea aroma components [J]. *Food Res Dev*, 2019, 40(6): 105-110.
- 王梦琪, 朱荫, 张悦, 等. 茶叶挥发性成分中关键呈香成分研究进展[J]. *食*

- 品科学, 2019, 40(23): 341-349.
- WANG MQ, ZHU Y, ZHANG Y, *et al.* A review of recent research on key aroma compounds in tea [J]. *Food Sci*, 2019, 40(23): 341-349.
- [25] 道平, 甘秀海, 梁志远, 等. 固相萃取法与同时蒸馏萃取法提取茶叶香气成分[J]. *西南农业学报*, 2013, 26(1): 131-135.
- DAO P, GAN XH, LIANG ZY, *et al.* Analysis on aroma compositions of tea by SPME and SDE [J]. *Southwest Chin J Agric Sci*, 2013, 26(1): 131-135.
- [26] 汤志飞, 周小芬, 郜秋艳, 等. 基于感官评审和 GC-MS 检测的春雨二号白茶香气成分分析[J]. *中国茶叶*, 2021, 43(7): 40-47.
- TANG ZF, ZHOU XF, GAO QY, *et al.* Aroma component analysis of "Chunyu 2" white tea based on sensory test and GC-MS [J]. *China Tea*, 2021, 43(7): 40-47.
- [27] 荣波, 蒋青香, 林诗笛, 等. 基于 GC-MS-O 结合 OAV 比较铁观音和白芽奇兰茶叶的香气品质[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(12): 351-363.
- RONG B, JIANG QX, LIN SD, *et al.* Comparison of the aroma qualities of tieguanyin and baiyaqilan teas based on GC-MS-O and OAV [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2022, 38(12): 351-363.
- [28] 王志华, 薛志慧, 朱文伟, 等. 基于 GC-IMS 的不同年份紧压白茶挥发性物质分析[J]. *食品与生物技术学报*, 2021, 40(8): 85-94.
- WANG ZH, XUE ZH, ZHU WW, *et al.* Analyses of volatile compounds in compressed white tea of different teas based on GC-IMS [J]. *J Food Sci Biotechnol*, 2021, 40(8): 85-94.
- [29] 邱晓红, 张丹丹, 韦航, 等. 基于 PTR-TOF-MS 与 GC-MS 技术的武夷水仙和武夷肉桂香气特征分析[J]. *天然产物研究与开发*, 2018, 30(7): 1195-1201.
- QIU XH, ZHANG DD, WEI H, *et al.* Analysis of aroma of different varieties of Wuyi rock tea by PTR-TOF-MS and GC-MS [J]. *Nat Prod Res Dev*, 2018, 30(7): 1195-1201.
- [30] 李爽, 万人源, 王从连, 等. 不同香型凤凰单丛茶叶香气判别与品质特征的研究[J/OL]. *食品工业科技*: 1-18. [2023-03-11]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070382
- LI S, WAN RY, WANG CL, *et al.* Study on aroma discrimination and quality characteristics of different aroma types of fenghuangdancong tea [J/OL]. *Sci Technol Food Ind*: 1-18. [2023-03-11]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070382
- [31] 施莉婷, 江和源, 张建勇, 等. 茶叶香气成分及其检测技术研究进展[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(12): 347-351.
- SHI LT, JIANG HY, ZHANG JY, *et al.* Progress on components and detection technology of tea aroma [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(12): 347-351.
- [32] 肖巧梅, 张晓宇, 王娟, 等. 勐海县不同乡镇晒青茶香气组分的差异分析[J/OL]. *食品工业科技*: 1-13. [2023-03-11]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080143
- XIAO QM, ZHANG XY, WANG J, *et al.* Comparative analysis on aroma components of sun-dried tea from different townships in Menghaicounty [J/OL]. *Sci Technol Food Ind*: 1-13. [2023-03-11]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080143
- [33] 邓静, 罗晶晶, 朱开宪, 等. 基于电子鼻和气相色谱-离子迁移谱法分析不同等级俄色绿茶香气物质差异[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(1): 236-243.
- DEN J, LUO JJ, ZHU KX, *et al.* Analysis of the difference of volatile compounds in different grades of E' se green tea based on electronic nose and gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(1): 236-243.
- [34] 刘洋, 刘雅芳, 林智, 等. 白茶贡眉的香气组成与关键呈香成分分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(24): 183-190.
- LIU Y, LIU YF, LIN Z, *et al.* Volatile components and key aroma-active compounds in gongmei white tea [J]. *Food Sci*, 2021, 42(24): 183-190.
- [35] 蒋青香, 李慧雪, 李利君, 等. 基于感官检验和气相色谱-质谱联用对白芽奇兰茶叶香气分级[J]. *食品科学*, 2021, 42(20): 98-106.
- JIANG QX, LI HX, LI JJ, *et al.* Aroma classification of Baiyaqilan tea by sensory test and gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Food Sci*, 2021, 42(20): 98-106.
- [36] 杨雪梅, 赵建锐, 王智慧, 等. 电子鼻技术及其在茶叶香气检测中的应用及展望[J]. *中国茶叶*, 2020, 42(6): 5-9.
- YANG XM, ZHAO JR, WANG ZH, *et al.* Development of electronic nose technology and its application in identification of aroma components in tea [J]. *China Tea*, 2020, 42(6): 5-9.
- [37] YIN X, HUANG JA, HUANG J, *et al.* Identification of volatile and odor-active compounds in Hunan black tea by SPME/GC-MS and multivariate analysis [J]. *LWT*, 2022, 164: 113656.
- [38] 谢关华, 陆安霞, 欧阳珂, 等. GC-MS 结合化学计量学用于探究六大茶类香气形成的差异[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(20): 260-270.
- XIE GH, LU ANX, OU YK, *et al.* Analysis of the aroma formation in six categories of teas by GC-MS combined with chemometrics [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(20): 260-270.
- [39] 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/OL]. *食品科学*: 1-10. [2023-03-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20221229.1856.005.html>
- WU QJ, ZHOU Z, QIN SY, *et al.* Key flavor substances and quality differences between charcoal roasted and electric roasted white tea [J/OL]. *Food Sci*: 1-10. [2023-03-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20221229.1856.005.html>
- [40] 黄刚骅, 李沅达, 邓秀娟, 等. 四种干燥方式云南白茶的香气组分分析[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(18): 283-292.
- HUANG GH, LI YD, DEN XJ, *et al.* Analysis of aroma compounds of Yunnan white tea by four drying methods [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(18): 283-292.
- [41] 黄琳洁, 徐凯, 周承哲, 等. 不同海拔政和白茶品质差异分析[J/OL]. *食品科学*: 1-14. [2023-03-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20221207.1548.012.html>
- HUANG LJ, XU K, ZHOU CZ, *et al.* Analysis on quality difference of Zhenghe white tea from different altitudes [J/OL]. *Food Sci*: 1-14. [2023-03-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20221207.1548.012.html>
- [42] 李沅达, 吴婷, 黄刚骅, 等. SPME-GC-MS 技术结合 rOAV 分析不同加工工艺紫娟白茶的关键香气物质[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(9): 324-332.
- LI YD, WU T, HUANG GY, *et al.* Analysis key aroma components of Zijuan white tea with different processing technology based on GC-MS combined with ROAV [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2023, 44(9): 324-332.
- [43] 陈林, 张应根, 陈键, 等. 乌龙茶品种鲜叶加工白茶过程中香气成分动态变化规律[J]. *茶叶科学*, 2020, 40(6): 771-781.
- CHEN L, ZHANG YG, CHEN J, *et al.* Aroma profiling of fresh leaves of oolong tea cultivars during white tea processing [J]. *J Tea Sci*, 2020, 40(6): 771-781.
- [44] 廖献盛, 王淑燕, 黄世建, 等. 基于 ATD-GC-MS 的建阳马当山 1 号白茶香气成分分析[J]. *茶叶学报*, 2021, 62(2): 66-72.
- LIAO XS, WANG SY, HUANG SJ, *et al.* ATD-GC-MS analysis on aromatics in Jianyangmadangshan 1 white tea [J]. *Acta Tea Sin*, 2021, 62(2): 66-72.
- [45] 邵淑贤, 王淑燕, 王丽, 等. 基于 ATD-GC-MS 技术的不同品种白牡丹茶香气成分分析[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(1): 261-268.
- SHAO SX, WANG SY, WANG L, *et al.* Analysis of aroma components of different cultivars of white peony tea based on ATD-GC-MS [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(1): 261-268.
- [46] CHEN QC, ZHU Y, YAN H, *et al.* Identification of aroma composition and key odorants contributing to aroma characteristics of white teas [J]. *Molecules*, 2020, 25(24): 6050.
- [47] 吴伟华. 基于质子转移反应时间飞行质谱(PTR-TOF-MS)结合多变量分析识别不同种类的建阳白茶[J]. *化工设计通讯*, 2022, 48(4): 110-112.
- WU WH. Different types of Jianyang white tea were identified based on the proton transfer reaction time-to-flight mass spectrometry (PTR-TOF-MS) combined with multivariate analysis [J]. *Chem Eng Des Commun*, 2022, 48(4): 110-112.
- [48] 丁玎, 宁井铭, 张正竹, 等. 不同等级和储藏时间白茶香气组分差异性研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2016, 43(3): 337-344.
- DING D, NING JM, ZHANG ZZ, *et al.* Volatile compounds of white tea of different grades and different storage times [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2016, 43(3): 337-344.

- [49] 张应根, 陈林, 陈泉宾, 等. 基于特征香气的白茶香气品质评价模型构建初探[J]. 茶叶学报, 2017, 58(4): 149–156.
ZHANG YG, CHEN L, CHEN QB, *et al.* Aromatics-based model for quality evaluation of white teas [J]. *Acta Tea Sin*, 2017, 58(4): 149–156.
- [50] 王圣开. 气相色谱-质谱法测定白茶挥发成分[J]. 现代食品, 2020, (12): 194–197.
WANG SK. Determination of volatile components in white tea by GC-MS [J]. *Mod Food*, 2020, (12): 194–197.
- [51] NI H, JIANG QX, LIN Q, *et al.* Enzymatic hydrolysis and auto-isomerization during β -glucosidase treatment improve the aroma of instant white tea infusion [J]. *Food Chem*, 2021, 342: 128565.
- [52] 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.
- [53] 王舒婷, 曲凤凤, 张新富, 等. 基于电子鼻技术的白茶毫香研究[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2020, 37(4): 258–263.
WANG ST, QU FF, ZHANG XF, *et al.* Research on white tea fragrance based on electronic nose technology [J]. *J Qingdao Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 2020, 37(4): 258–263.
- [54] 潘俊娟, 段玉伟, 蒋玉兰, 等. 福鼎白茶风味的电子鼻和电子舌评价[J]. 食品工业科技, 2017, 38(12): 25–30, 43.
PAN JX, DUAN YW, JIANG YL, *et al.* Evaluation of Fuding white tea flavor using electronic nose and electronic tongue [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2017, 38(12): 25–30, 43.
- [55] 王婷婷, 金心怡. 生态条件对茶叶品质的影响探析[J]. 茶叶科学技术, 2014(3): 6–12.
WANG TT, JIN XY. Effects of ecological conditions on tea quality [J]. *Acta Tea Sin*, 2014(3): 6–12.
- [56] 陈林怡, 郭豪, 陈红梅, 等. 昼夜温差对茶鲜叶挥发性及非挥发性品质成分及相关生理指标的影响[J/OL]. 热带作物学报: 1–13. [2023-04-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1019.S.20230227.1634.004.html>
CHEN LY, GUO H, CHEN HM, *et al.* Effects of temperature difference between day and night on volatile a non-volatile quality components and the related physiologic index of fresh tea leaves [J/OL]. *J Trop Crops*: 1–13. [2023-04-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1019.S.20230227.1634.004.html>
- [57] LI Q, KUBOTA C. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce [J]. *Environ Exp Bot*, 2009, 67(1): 59–64.
- [58] LI Y, JEYARAJ A, YU H, *et al.* Metabolic regulation profiling of carbon and nitrogen in tea plants [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] in Response to Shading [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(4): 961–974.
- [59] WANG Y, GAO L, SHAN Y, *et al.* Influence of shade on flavonoid biosynthesis in tea (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) [J]. *Sci Hortic-Amsterdam*, 2012, 141: 7–16.
- [60] 王晋, 刘峰, 张应香, 等. 遮阴技术对茶叶品质的影响[J]. 河南农业, 2023, (6): 43–44.
WANG J, LIU F, ZHANG YX, *et al.* The effect of shading technology on tea quality [J]. *Agric Henan*, 2023, (6): 43–44.
- [61] 董尚胜, 刘琴芳, 顾田松, 等. 遮荫和施肥对夏茶醇系香气物质的影响[J]. 中国茶叶, 2000, (1): 12–13.
DONG SS, LIU QF, GU TS, *et al.* The effect of shading and fertilization on the aroma components of tea in summer [J]. *China Tea*, 2000, (1): 12–13.
- [62] YANG Z, KOBAYASHI E, KATSUNO T, *et al.* Characterisation of volatile and non-volatile metabolites in etiolated leaves of tea (*Camellia sinensis*) plants in the dark [J]. *Food Chem*, 2012, 135(4): 2268–2276.
- [63] 张正竹, 宛晓春, 施兆鹏, 等. 茶鲜叶在不同季节及绿茶加工贮藏过程中糖苷类香气前体含量变化研究[J]. 食品与发酵工业, 2003, (3): 1–4.
ZHANG ZZ, WAN XC, SHI ZP, *et al.* Studies on the content of glycosidic tea aroma precursors in leaves of zhuye during different seasons, green tea processing and storage [J]. *Food Ferment Ind*, 2003, (3): 1–4.
- [64] ZHANG C, ZHOU CZ, XU K, *et al.* A comprehensive investigation of macro-composition and volatile compounds in spring-picked and autumn-picked white tea [J]. *Foods*, 2022, 11(22): 3628.
- [65] 许燕, 孙云南, 玉香甩, 等. 不同季节紫娟白茶香气组分探究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(11): 116–118.
XU Y, SUN YN, YU XS, *et al.* Study on aroma components of Zijuan white tea in different seasons [J]. *Hubei Agric Sci*, 2022, 61(11): 116–118.
- [66] 王润贤, 谢福灿, 曹仁勇, 等. 春秋季节不同品种茶鲜叶芳香物质成分分析[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2012, 32(6): 517–525.
WANG RX, XIE FC, CAO RY, *et al.* Analysis on the aroma components in fresh leaves of different varieties of teas in spring and autumn [J]. *J Shanxi Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 2012, 32 (6): 517–525.
- [67] 康受婷. 不同茶树品种、生产季节和加工方法对茶叶挥发性化合物的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
KANG SL. Effects of tea varieties cultivar, growing seasons and processing method on volatiles of tea leaves [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [68] 杨春, 郭燕, 周顺珍, 等. 3 个茶树品种(品系)鲜叶香气特征及萜烯指数分析[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2015, 28(4): 501–506.
YANG C, GUO Y, ZHOU SZ, *et al.* Analysis of volatile aroma components and terpene index in 3 tea varieties or strains [J]. *J Xinyang Teach Coll (Nat Sci Ed)*, 2015, 28(4): 501–506.
- [69] 陈丽, 坤吉瑞, 王静, 等. HPLC-PDA 法分析不同茶树品种胡萝卜素香气前体[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 193–198.
CHEN L, KUN JR, WANG J, *et al.* Analysis of carotenoids as aroma precursors in different varieties of tea leaves by high performance liquid chromatography with photodiode array detection [J]. *Food Sci*, 2020, 41(4): 193–198.
- [70] 廖书娟, 董华荣. 不同茶树品种脂肪酸和糖苷类香气前体分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, (8): 62–66.
LIAO SJ, TONG HR. Studies on the fatty acid and glycoside aroma precursors of different tea varieties [J]. *J Southwest Univ (Nat Sci Ed)*, 2008, (8): 62–66.
- [71] 王雨鑫, 杨慧, 刘建军, 等. 三个黔育茶树品种的主要酶活性及化学成分比较分析[J]. 茶叶通讯, 2020, 47(4): 576–581.
WANG YX, YANG H, LIU JJ, *et al.* Comparative analysis of main enzyme activities and chemical components of three tea cultivars in Guizhou [J]. *J Tea Commun*, 2020, 47(4): 576–581.
- [72] 齐冬晴. 不同茶树品种(品系)鲜叶香气及其表型差异的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
QI DQ. A study on the tea leaves aroma and phenotypic differences of different tea varieties [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015.
- [73] 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.
- [74] 陈林, 张应根, 项丽慧, 等. ‘茗科 1 号’等 5 个福建乌龙茶品种的白茶适制性鉴定[J]. 茶叶学报, 2019, 60(2): 64–68.
CHEN L, ZHANG YG, XIANG LH, *et al.* Quality appraisal on white tea processed from Fujian oolong cultivars (*Camellia sinensis*) [J]. *Acta Tea Sin*, 2019, 60(2): 64–68.
- [75] 王飞权, 冯花, 葛捷琳, 等. 不同茶树品种新工艺秋季白茶品质比较分析[J]. 茶叶通讯, 2019, 46(4): 441–447.
WANG FQ, FENG H, GE JL, *et al.* Comparative analysis on the quality of autumn white tea with different tea varieties processed by new technique [J]. *J Tea Commun*, 2019, 46(4): 441–447.
- [76] 杨建平. 不同茶树品种加工月光白的研究[J]. 蚕桑茶叶通讯, 2015, (6): 29.
YANG JP. A study on the processing of moonshine white by different tea varieties [J]. *News Ser Tea*, 2015, (6): 29.
- [77] 张晓珊, 吕世懂, 刘伦, 等. 顶空固相微萃取与气相色谱-质谱法分析月光白茶香气成分[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2014, 36(5): 740–749.
ZHANG XS, LV SD, LIU L, *et al.* Analysis of aroma components in Yueguangbai tea using headspace solid-phase microextraction coupled with GC-MS [J]. *J Yunnan Univ (Nat Sci Ed)*, 2014, 36(5): 740–749.
- [78] 晏祥文, 钟一平, 吕世懂, 等. 云南月光白茶和福建白毫银针白茶香气成分的对比研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(13): 171–177.
YAN XW, ZHONG YP, LV SD, *et al.* A comparative study of aroma components in Yunnanyueguang white tea and Fujian Baihaoyinzen white tea [J]. *Food Res Dev*, 2019, 40(13): 171–177.

- [79] 吴婷, 邓秀娟, 李远达, 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, DEN 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.
- [80] 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.
- [81] 许应芬, 李姝妍, 庞德文, 等. 不同等级白茶的生化成分及品质分析[J]. 贵阳学院学报(自然科学版), 2022, 17(4): 79-84.
XU YF, LI SY, PAN DW, *et al.* Biochemical composition and quality analysis of different grades of Fuding white tea [J]. *J Guiyang Univ (Nat Sci Ed)*, 2022, 17(4): 79-84.
- [82] 陈思彤, 赵峰, 王淑燕, 等. 不同等级白牡丹茶游离氨基酸构成分析[J]. 福建农业学报, 2019, 34(8): 965-973.
CHEN ST, ZHAO F, WANG SY, *et al.* Amino acids in white peony teas of different grades [J]. *Fujian J Agric Sci*, 2019, 34(8): 965-973.
- [83] 王力, 蔡良绥, 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.
- [84] 陈志达, 温欣黎, 陈兴华, 等. 不同等级福鼎白茶香气成分研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, 45(6): 715-722.
CHEN ZD, WEN XL, CHEN XH, *et al.* Research on aroma components in different grades of Fuding white tea [J]. *J Zhejiang Univ (Agric Life Sci)*, 2019, 45(6): 715-722.
- [85] 刘晶晶, 王富民, 刘国峰, 等. 茶树萜类香气物质代谢谱与相关基因表达谱时空变化的关系[J]. 园艺学报, 2014, 41(10): 2094-2106.
LIU JJ, WANG FM, LIU GF, *et al.* Correlation between spatiotemporal profiles of volatile terpenoids and relevant terpenoid synthase gene expression in *Camellia sinensis* [J]. *Acta Hort Sin*, 2014, 41(10): 2094-2106.
- [86] DENG WW, WANG R, YANG T, *et al.* Functional characterization of salicylic acid carboxyl methyltransferase from *Camellia sinensis*, providing the aroma compound of methyl salicylate during the withering process of white tea [J]. *J Agric Food Chem*, 2017, 65(50): 11036-11045.
- [87] CHEN QC, ZHU Y, DAI WD, *et al.* Aroma formation and dynamic changes during white tea processing [J]. *Food Chem*, 2019, 274: 915-924.
- [88] 谷梦雅, 王鹏杰, 陈雪津, 等. 茶树乙醇脱氢酶基因家族的鉴定及其在白茶萎凋过程的表达分析[J]. 茶叶科学, 2021, 41(3): 302-314.
GU MY, WANG PJ, CHEN XJ, *et al.* Identification of alcohol dehydrogenase gene family and their expression analysis in the withering process of white tea [J]. *J Tea Sci*, 2021, 41(3): 302-314.
- [89] 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 AF. Study on withering environmental factors upon the quality formation and control technique of white tea [D]. Fuzhou: Fujian Agricultural and Forestry University, 2008.
- [90] 周才碧, 张敏星, 穆瑞禄, 等. 白茶萎凋技术的研究进展[J]. 农产品加工(学刊), 2014, (2): 48-50.
ZHOU CB, ZHANG MX, MU RL, *et al.* Research progress on the technology of withering in white tea [J]. *Acad Period Farm Prod Process*, 2014, (2): 48-50.
- [91] DENG H, CHEN S, ZHOU Z, *et al.* Transcriptome analysis reveals the effect of short-term sunlight on aroma metabolism in postharvest leaves of oolong tea (*Camellia sinensis*) [J]. *Food Res Int*, 2020, 137: 109347.
- [92] 林珠稻, 陈韵杨. 不同萎凋方式对福鼎白茶品质的影响[J]. 福建茶叶, 2022, 44(3): 20-24.
LIN ZD, CHEN YY. The effect of different withering methods on the quality of Fuding white tea [J]. *Tea Fujian*, 2022, 44(3): 20-24.
- [93] 黄藩, 刘飞, 唐晓波, 等. 光照对茶叶萎凋的影响研究进展[J]. 茶叶通讯, 2019, 46(4): 402-408.
HUANG P, LIU F, TANG XB, *et al.* Research progress on the effect of light on tea withering [J]. *J Tea Commun*, 2019, 46(4): 402-408.
- [94] 徐永, 林魁. LED光调控技术在设施农业中的应用研究进展[J]. 农业工程技术, 2017, 37(13): 10-15, 20.
XU Y, LIN K. Research progress on the application of LED light control technology in facility agriculture [J]. *Agric Eng Technol*, 2017, 37(13): 10-15, 20.
- [95] 曾润康. 不同光质补光对茶树生理及生化的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
ZENG RK. Effect of different light qualities on physiological and biochemical of tea plant [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019.
- [96] 黄藩, 唐晓波, 张成, 等. 不同光质萎凋对白牡丹茶品质的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(6): 1735-1744.
HUANG P, TANG XB, ZHANG C, *et al.* Effect of different light quality on white peony teas during withering process [J]. *J Trop Crops*, 2021, 42(6): 1735-1744.
- [97] 黄藩, 唐晓波, 罗凡, 等. LED光照萎凋对三花1951白茶香气的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(4): 148-155.
HUANG P, TANG XB, LUO F, *et al.* Effects of LED light withering on aroma of sanhua 1951 white tea [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2022, 50(4): 148-155.
- [98] 胡欣, 杨航云, 杨兰, 等. 不同光质萎凋对婺源白茶品质影响[J]. 茶业通报, 2022, 44(4): 166-170.
HU X, YANG HY, YANG L, *et al.* Effect of different light quality on Wuyuan white teas during withering process [J]. *J Tea Bus*, 2022, 44(4): 166-170.
- [99] 黄藩, 王迎春, 马伟伟, 等. 不同光照时间萎凋对白茶品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(17): 141-149.
HUANG P, WANG YC, MA WW, *et al.* Effect of different lighting time during withering process on the quality of white tea [J]. *Food Res Dev*, 2022, 43(17): 141-149.
- [100] 林清霞, 项丽慧, 王丽丽, 等. 萎凋温度对茶鲜叶萎凋失水及白茶品质的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, 45(4): 434-442.
LIN QX, XIANG LH, WANG LL, *et al.* Effect of withering temperature on water loss of fresh leaves and quality of white tea [J]. *J Zhejiang Univ (Agric Life Sci)*, 2019, 45(4): 434-442.
- [101] 黄藩, 王迎春, 叶玉龙, 等. 变温萎凋技术对贡眉白茶品质的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(19): 159-164.
HUANG P, WANG YC, YE YL, *et al.* Effects of temperature-changing withering technology on the quality of gongmei white tea [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2022, 38(19): 159-164.
- [102] 亓俊然, 张龙雪, 陈新颖, 等. 鲜叶萎凋前期低温处理对金萱白茶品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 63-71.
QI JR, ZHANG LX, CHEN XY, *et al.* Effect of low temperature treatment on the quality of jinxuan white tea in the early stage of fresh leaves withering [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(18): 63-71.
- [103] 张应根, 王振康, 陈林, 等. 环境温湿度调控对茶鲜叶萎凋失水及白茶品质的影响[J]. 福建农业学报, 2012, 27(11): 1205-1210.
ZHANG YG, WANG ZK, CHEN L, *et al.* Effect of temperature and RH during withering on water loss and quality of white tea [J]. *Fujian J Agric Sci*, 2012, 27(11): 1205-1210.
- [104] 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.
- [105] 乔小燕, 陈维, 马成英, 等. 萎凋时间对丹霞8号主要生化成分和挥发性成分的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(9): 43-49.
QIAO XY, CHEN W, MA CY, *et al.* Effect of withering time on biochemical components and volatile of tea leaves from Danxia 8 [J]. *Food Mach*, 2020, 36(9): 43-49.
- [106] 陈维, 马成英, 王雯雯, 等. 萎凋时间对“英红9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.
- [107] 林馨颖, 王鹏杰, 陈雪津, 等. 茶树 LOX 基因家族的鉴定及其在白茶萎凋过程的表达分析[J]. 茶叶科学, 2021, 41(4): 482-496.

- LIN YX, WAGN PJ, CHEN XJ, *et al.* Identification of LOX gene family in *Camellia sinensis* and expression analysis in the process of white tea withering [J]. *J Tea Sci*, 2021, 41(4): 482-496.
- [108] 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2003.
WANG XC. Biochemistry of tea [M]. Third edition. Beijing: China Agricultural Publishing Press, 2003.
- [109] 傅秀敏, 唐劲驰, 杨子银. 茶叶类胡萝卜素合成、代谢调控研究进展[J]. 广东农业科学, 2021, 48(5): 18-27.
FU XM, TANG JC, YANG ZY. Research progress in biosynthesis and metabolism regulation of carotenoids in tea plants [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2021, 48(5): 18-27.
- [110] 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. Metabolome study of different drying methods of Fuding white tea [J]. *Tea Fujian*, 2022, 44(3): 25-28.
- [111] 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, 79.
LIN ZW, CHEN YY. Effects of electric-roasted and charcoal-roasted on the quality of Fuding white tea [J]. *Chin Tea Process*, 2022, (2): 27-32, 79.
- [112] 叶靖平, 常玉高, 田兴泽, 等. 白茶加工试验[J]. 现代农业科技, 2020, (18): 206-207.
YE JP, CHANG YG, TIAN XZ, *et al.* White tea processing experiment [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2020, (18): 206-207.
- [113] 乔小燕, 吴华玲, 陈栋. 干燥温度对丹霞白茶挥发性成分的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(11): 171-179.
QIAO XY, WU HL, CHEN D. Effects of drying temperatures on the volatile flavor compounds in white tea [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2017, 33(11): 171-179.
- [114] 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 temperature on the quality of pressed white tea cake from withered leaves [J]. *Food Sci*, 2022, 43(15): 109-116.
- [115] 张丹, 任亨, 李博, 等. 压饼及湿热工艺对白茶品质和抗氧化活性的影响[J]. 茶叶, 2017, 43(1): 19-23.
ZHANG D, REN N, LI B, *et al.* Effect of compressing and heat-moisture treatment on the quality and antioxidation capability of white tea [J]. *J Tea*, 2017, 43(1): 19-23.
- [116] 林宏政, 李鑫磊, 周泳锋, 等. 白茶散茶与茶饼在色泽、滋味及香气组分上的差异研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(15): 207-214.
LIN HZ, LI XL, ZHOU YF, *et al.* Study on the differences of color, taste and aroma constituents in white loose tea and white tea pine [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(15): 207-214.
- [117] 李鑫磊, 林宏政, 郝志龙, 等. 白茶压饼过程理化指标与感官品质的动态变化[J]. 福建农业学报, 2017, 32(12): 1365-1369.
LI XL, LIN HZ, HAO ZL, *et al.* Changes on physical, chemical and sensory properties of compressed white tea cakes during processing [J]. *Fujian J Agric Sci*, 2017, 32(12): 1365-1369.
- [118] 陈志达, 黎攀, 陈兴华, 等. 压饼处理对白茶陈化香气的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(5): 63-69.
CHEN ZD, LI P, CHEN XH, *et al.* Effect of compressed processing on the aroma of aged white tea [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(5): 63-69.
- [119] 詹冬梅, 傅海峰, 周承哲, 等. 贮藏年份及压饼方式对寿眉风味品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(5): 81-89.
ZHAN DM, FU HF, ZHOU CZ, *et al.* Effect of storage years and pressing methods on the flavor quality of Shoumei [J]. *J Food Sci Biotechnol*, 2022, 41(5): 81-89.
- [120] 周炎花, 蔡烈伟, 杨双旭, 等. 铁观音加工白茶的工艺及品质研究[J]. 武夷学院学报, 2017, 36(9): 17-22.
ZHOU YH, CAO LW, YANG SX, *et al.* Technology and quality research of white tea processed from tieguanyin tea cultivars [J]. *J Wuyi Univ*, 2017, 36(9): 17-22.
- [121] 张磊, 吴民亿, 杨如兴. 不同加工工艺对白茶品质的影响初报[J]. 茶叶科学技术, 2010, (3): 20-23.
ZHANG L, WU MY, YANG RX. Preliminary report on the effect of different processing techniques on the quality of white tea [J]. *Acta Tea Sin*, 2010, (3): 20-23.
- [122] 王飞权, 冯花, 朱晓燕, 等. 摇青和揉捻工艺对白茶生化成分和感官品质的影响[J]. 热带作物学报, 2019, 40(11): 2236-2245.
WANG FQ, FENG H, ZHOU XY, *et al.* Effects of rolling and rocking green on the sensory quality and biochemical components of white tea [J]. *Chin J Trop Crops*, 2019, 40(11): 2236-2245.
- [123] 冯花, 王飞权, 纪子翔, 等. 不同工艺对丹桂秋季白茶品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(13): 80-88.
FENG H, WANG FQ, JI ZX, *et al.* The influence of different process on the quality of autumn white tea of Dangui [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(13): 80-88.
- [124] 陈维, 曾斌, 苗爱清, 等. 基于化学计量学分析堆青时间对白茶香气的影响[J]. 现代食品科技, 2018, 34(5): 242-250, 241.
CHEN W, ZENG B, MIAO AQ, *et al.* Effect of pile-up processing curation on the white tea aroma analyzed by chemometrics approaches [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2018, 34(5): 242-250, 241.
- [125] 刘菲, 孙威江, 黄艳, 等. 人工接种冠突散囊菌对白茶主要呈味物质的影响[J]. 菌物学报, 2016, 35(8): 975-983.
LIU F, SUN WJ, HUANG Y, *et al.* Changes of taste components during white tea fermentation by means of inoculation of *Eurotium cristatum* [J]. *Mycosystema*, 2016, 35(8): 975-983.
- [126] 薄佳慧, 宫连瑾, 叶兴妹, 等. 金花白茶加工过程中主要滋味物质的动态变化[J]. 现代食品科技, 2022, 38(1): 306-314, 20.
BO JH, GONG LJ, YE XM, *et al.* Dynamic changes of main quality components in Jinhua white tea processing [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2022, 38(1): 306-314, 20.
- [127] 刘菲, 薛志慧, 叶倩林, 等. “发花”对白茶风味品质的影响研究[J]. 茶叶科学, 2016, 36(3): 301-311.
LIU F, XUE ZH, YE QL, *et al.* Study on effect of fungal-fermentation process on flavor quality in white tea [J]. *J Tea Sci*, 2016, 36(3): 301-311.
- [128] 王伟伟, 张建勇, 王洪波, 等. 发花对寿眉品质及主要活性成分的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(24): 7892-7898.
WANG WW, ZHANG JY, WANG HB, *et al.* Study on the effect of fungal-fermentation on the quality and main active components of Shoumei [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(24): 7892-7898.
- [129] 冯晓雪, 薄佳慧, 叶兴妹, 等. 发酵处理对寿眉风味物质的影响研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(11): 92-101.
FENG XX, BO JH, YE XM, *et al.* Changes of flavor components of Shoumei during fermentation treatment [J]. *Food Res Dev*, 2022, 43(11): 92-101.
- [130] 周琼琼, 孙威江, 叶艳, 等. 不同年份白茶的主要生化成分分析[J]. 食品工业科技, 2014, 35(9): 351-354, 359.
ZHOU QQ, SUN WJ, YE Y, *et al.* Study on the main biochemical components of white tea stored at different years [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2014, 35(9): 351-354, 359.
- [131] 张灵枝, 韩丽, 欧惠算. 不同存贮时间寿眉的生化成分分析[J]. 中国茶叶加工, 2016(4): 46-49.
ZHANG LZ, HAN L, OU HS. Study on the Biochemical compounds of Shoumei tea with different storage time [J]. *Chin Tea Process*, 2016(4): 46-49.
- [132] NING JM, DING D, SONG YS, *et al.* Chemical constituents analysis of white tea of different qualities and different storage times [J]. *Eur Food Res Technol*, 2016, 242(12): 2093-2104.
- [133] 石碧滢, 周承哲, 田采云, 等. 不同贮藏时间白牡丹茶风味品质差异分析[J/OL]. 食品科学: 1-23. [2023-03-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20221125.1537.012.html>
SHI BY, ZHOU CZ, TIAN CY, *et al.* Analysis of flavor quality differences between white peony tea with different storage time [J/OL]. *Food Sci*: 1-23. [2023-03-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20221125.1537.012.html>
- [134] DAI WD, TAN JF, LU ML, *et al.* Metabolomics investigation reveals that 8-CN-ethyl-2-pyrrolidinone-substituted flavan-3-ols are potential marker compounds of stored white teas [J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(27): 7209-7218.
- [135] 刘琳燕, 周子维, 邓慧莉, 等. 不同年份白茶的香气成分[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2015, 44(1): 27-33.
LIU LY, ZHOU ZW, DEN HL, *et al.* Analysis of the aromatic components

- in white tea produced in different years [J]. *J Fujian Agric and Fore Univ (Nat Sci Ed)*, 2015, 44(1): 27–33.
- [136] WANG ZH, WANG ZH, DAI HM, *et al.* Identification of characteristic aroma and bacteria related to aroma evolution during long-term storage of compressed white tea [J]. *Front Nutr*, 2022, 9: 1092048.
- [137] 祁丹丹, 陈维, 苗爱清, 等. 气相色谱-串联质谱结合化学计量学分析快速陈化对白茶香气的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2018, 44(6): 704–710.
QI DD, CHEN W, MIAO AIQ, *et al.* Effects of rapid ageing technology on the aroma quality of white tea using gas chromatography-mass spectrometry/mass spectrometry combined with chemometrics [J]. *J Zhejiang Univ (Agric Life Sci)*, 2018, 44(6): 704–710.
- [138] ZHU Y, KANG SY, YAN H, *et al.* Enantiomeric distributions of volatile lactones and terpenoids in white teas stored for different durations [J]. *Food Chem*, 2020, 320: 126632.
- [139] 张新亭, 王梦馨, 韩宝瑜. 3 个不同地域龙井茶香气组成异同的解析[J]. *茶叶科学*, 2014, 34(4): 344–354.
ZHANG XT, WANG MX, HAN BY. Analysis on similarities and differences of aromatic composition in Longjing teas from three producing regions [J]. *J Tea Sci*, 2014, 34(4): 344–354.
- [140] 傅海峰, 林琼珍, 朱晨, 等. 6 种不同香型白茶香气成分的 GC-MS 分析[J]. *食品与生物技术学报*, 2020, 39(10): 91–97.
FU HF, LIN QZ, ZHU C, *et al.* GC-MS analysis of aroma components of white tea with six different aroma types [J]. *J Food Sci Biotechnol*, 2020, 39(10): 91–97.
- [141] 陈书媛, 张友超, 杨杰, 等. 基于高光谱成像技术的白茶储藏年份判别[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(18): 276–283.
CHEN SY, ZHANG YC, YANG J, *et al.* Discrimination of storage time of white tea using hyperspectral imaging [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(18): 276–283.
- [142] 蔡健荣, 韩智义. 碧螺春茶叶的真伪鉴别技术-基于漫反射式高光谱成像技术[J]. *农机化研究*, 2013, 35(4): 140–143.
CAI JR, HAN ZY. Bilwchun tea's identification technology-based on diffuse reflectance hyperspectroscopy imaging technology [J]. *J Agric Mech Res*, 2013, 35(4): 140–143.
- [143] 于英杰. 基于近红外光谱及高光谱技术的茶叶判别分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
YU YJ. Identification and discriminant analysis of tea (*Camellia sinensis*) based on near-infrared spectroscopy and hyperspectral technology [D]. Fuzhou: Fujian Agricultural and Forestry University, 2014.
- [144] 艾施荣, 吴瑞梅, 吴彦红, 等. 利用高光谱图像技术鉴别庐山云雾茶产地[J]. *江西农业大学学报*, 2014, 36(2): 428–433.
AI SR, WU RM, WU YH, *et al.* Identification of geographical origins of Lushan mist tea by hyper-spectral imaging technology [J]. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2014, 36(2): 428–433.
- [145] 黄琛. 滇红(初制茶)等级快速评价的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
HUANG J. Study on rapid evaluation for grades of dianhong tea [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019.
- [146] 王哲, 赵燕妮, 陈丹, 等. 基于代谢组学研究不同花色种类云南白茶的化学成分差异[J]. *食品科学*, 2022, 43(22): 221–231.
WANG Z, ZHAO YN, CHEN D, *et al.* Metabolomics analysis of difference in chemical components among different types of Yunnan white tea [J]. *Food Sci*, 2022, 43(22): 221–231.
- [147] 春波, 吕辉, 韦玲冬, 等. 不同产地都匀毛尖茶代谢组学研究[J]. *河南农业大学学报*, 2021, 55(3): 422–428.
CHUN B, LV H, WEI LD, *et al.* Metabolomics study on duyunmaojian tea from different geographical origins [J]. *J Henan Agric Univ*, 2021, 55(3): 422–428.
- [148] 郝亚利. 基于代谢谱分析的不同光质处理对茶鲜叶品质形成的影响研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2010.
HAO YL. Metabolic profiling reveals the effects of different light qualities on the quality formation of fresh tea (*Camellia sinensis*) leaves [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019.
- [149] 蔡华春. 白茶品质形成研究概述[J]. *茶叶科学技术*, 2012, 214(1): 15–17.
CAI HC. Study summaries on quality formation of white tea [J]. *Acta Tea Sin*, 2012, 214(1): 15–17.
- [150] 项丽慧, 宋振硕, 张应根, 等. 茶鲜叶萎凋过程中摊青工艺对白茶品质的影响[J/OL]. *农业工程学报*: 1–9. [2023-04-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2047.S.20230421.1019.028.html>
XIANG LH, SONG ZS, ZHANG YG, *et al.* Effects of the leaf-spreading process on the quality of white tea during the withering of fresh tea shoots [J/OL]. *Trans Chin Soc Agric Eng*: 1–9. [2023-04-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2047.S.20230421.1019.028.html>
- [151] 戴春霞, 刘芳, 葛晓峰. 基于高光谱技术的茶鲜叶含水率检测与分析[J]. *茶叶科学*, 2018, 38(3): 281–286.
DAI CX, LIU F, GE XF. Detection and analysis of moisture content in fresh tea leaves based on hyperspectral technology [J]. *J Tea Sci*, 2018, 38(3): 281–286.
- [152] 吴婷, 李沅达, 邓秀娟, 等. 萎凋方式对 γ -氨基丁酸白茶香气成分的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(13): 4344–4351.
WU T, LI YD, DENG XJ, *et al.* Effects of withering method on the aroma composition of γ -aminobutyric acid white tea [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(13): 4344–4351.
- [153] 谢李玲, 薛婉茹, 李丹阳, 等. 外源酶对陈年武夷岩茶香气品质的改善作用[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(5): 155–164.
XI W LL, XUE WR, LI DY, *et al.* Exogenous enzymes improve the aroma quality of Wuyi rock tea [J]. *Food Res Dev*, 2023, 44(5): 155–164.
- [154] 邱丽玲. 外源酶对白茶品质的影响及高香型白茶产品研发[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
QIU LL. Influence on the quality of white tea by exogenous enzyme and researching white tea production of high aroma [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012.
- [155] ZENG LT, WATANABE N, YANG ZY. Understanding the biosynthesis and stress response mechanisms of aroma compounds in tea (*Camellia sinensis*) to safely and effectively improve tea aroma [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2019, 59(14): 2321–2334.
- [156] 赵芹, 童启庆, 屠幼英, 等. 肥培对茶鲜叶 β -葡萄糖苷酶活性及醇系香气的影响[J]. *浙江林学院学报*, 2000, (1): 30–33.
ZHAO Q, TONG QQ, TU YY, *et al.* Effect of temperature and organic fertilizer on β -glucosidase activity and contents of alcoholic aroma in fresh tea leaves [J]. *J Zhejiang A F Univ*, 2000, (1): 30–33.
- [157] 袁祖丽, 李蕴贞, 韩莹, 等. 不同施氮量及定量氮、磷、钾配比对茶叶香气成分及其形成的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2012, 46(6): 631–636.
YUAN ZL, LI YZ, HAN Y, *et al.* Effects of different nitrogen amounts and nitrogen, phosphorus and potassium combination on the aroma components and its formation in tea shoots [J]. *J Henan Agric Univ*, 2012, 46(6): 631–636.

(责任编辑: 郑丽 张晓寒)

作者简介



武珊珊, 研究实习员, 主要研究方向为茶叶品质化学, 茶树栽培与分子育种等。
E-mail: wss923@163.com



丁其欢, 讲师, 主要研究方向为茶叶加工与质量检验。
E-mail: 1932216447@qq.com



周雪芳, 助理农艺师, 主要研究方向为农产品质量安全, 茶产业发展与技术推广等。
E-mail: 4430450@qq.com