

六堡茶香气与滋味成分及评价方法研究进展

许皓¹, 欧行畅¹, 欧阳建¹, 肖虹菲¹, 刘仲华^{1,2*}, 黄建安^{1,2*}

(1. 湖南农业大学茶学教育部重点实验室, 国家植物功能成分利用工程技术研究中心, 湖南长沙 410128)

(2. 植物功能成分利用省部共建协同创新中心, 农业农村部园艺作物基因资源评价利用重点实验室, 湖南长沙 410128)

摘要: 六堡茶是我国广西特有的黑茶产品, 鲜明的地方特色与独特的保健功效造就了其广阔的市场前景, 近年来六堡茶产业蓬勃发展, 相关研究也逐渐深入。六堡茶具有“红、浓、陈、醇”的品质特征, 香气与滋味成分对六堡茶的风味形成起着重要作用。文章通过整理汇总目前六堡茶品质特征研究的相关成果, 归纳总结了六堡茶香气与滋味成分的评价方法, 对六堡茶香气研究中重要化合物进行了详细阐述, 梳理了不同滋味成分对六堡茶滋味形成的作用, 同时对当前研究存在的问题进行总结并对未来研究的重点进行了展望。以期六堡茶品质特征评价及改善提升六堡茶香气滋味品质提供理论依据。

关键词: 六堡茶; 香气成分; 滋味成分; 评价方法; 研究进展

文章编号: 1673-9078(2025)01-381-392

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.1.1302

Research Progress on Aroma and Taste Components and Evaluation Methods of Liupao Tea

XU Hao¹, OU Xingchang¹, OUYANG Jian¹, XIAO Hongfei¹, LIU Zhonghua^{1,2*}, HUANG Jian'an^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Tea Science of Ministry of Education, National Research Center of Engineering and Technology for Utilization of Botanical Functional Ingredients, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

(2. Co-Innovation Center of Education Ministry for Utilization of Botanical Functional Ingredients, Key Laboratory for Evaluation and Utilization of Gene Resources of Horticultural Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Liupao tea is a unique dark tea product in Guangxi, China. Its distinctive local characteristics and unique health benefits have created broad market prospects. In recent years, the Liupao tea industry has been flourishing, and the related research has also gradually deepened. Liupao tea has the quality characteristics of 'vibrant redness, thickness, aging aroma, and purity', and the aroma and taste components play important roles in the flavor formation of the Liupao tea. This article overviews the relevant results of the current research on the quality characteristics of Liupao tea, and summarizes the

引文格式:

许皓,欧行畅,欧阳建,等.六堡茶香气与滋味成分及评价方法研究进展[J].现代食品科技,2025,41(1):381-392.

XU Hao, OU Xingchang, OUYANG Jian, et al. Research progress on aroma and taste components and evaluation methods of Liupao tea [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(1): 381-392.

收稿日期: 2023-10-30

基金项目: 广西六堡茶“八新双增”关键技术研究产业化示范(桂科AA20302018-15); 国家茶叶产业技术体系(CARS-19); 中国茶产业高质量发展战略研究(2023-XY-29)

作者简介: 许皓(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 茶叶加工理论与新技术, E-mail: 707578491@qq.com

通讯作者: 刘仲华(1965-), 男, 博士, 教授, 中国工程院院士, 研究方向: 茶叶深加工及功能成分化学、茶与健康, E-mail: zhonghua-liu-ms@hunau.edu.cn; 共同通讯作者: 黄建安(1964-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 茶叶加工与品质化学, E-mail: Jian7513@hunau.edu.cn

evaluation methods of its aroma and taste components, elaborates the important compounds in the studies investigating its aroma, and sorts out the roles of different taste components in the taste formation of Liupao tea. In the meantime, this article summarizes the problems of current research and presents prospects for future research, in order to provide theoretical basis for the evaluation of Liupao tea's quality characteristics and the improvement of its aroma and taste quality.

Key words: Liupao tea; aromacomponents; tastecomponents; evaluation method; research progress

六堡茶属黑茶类,是我国名茶,原产于广西梧州六堡镇,具有悠久历史^[1]。六堡茶以苍梧县群体种、广西大中叶种以及它们分离选育的品种、品系茶树 [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze]鲜叶为原料经特定工艺加工而成,产生了具有独特品质特征的黑茶产品^[2]。目前,六堡茶按工艺不同可分为传统工艺六堡茶和现代工艺六堡茶(见图1);根据是否压制成型分为散茶和紧压茶;根据感官品质特征及理化指标分为特级、一级至四级共五个等级^[3]。

近15年,六堡茶产业规模快速发展,从2007年到2014年,六堡茶产量增幅达128.26%^[4]。“十三五”期间,六堡茶市场产销两旺、量价齐升;2020年品牌价值达26.4亿元,跃居广西第一,全国黑茶类第三^[5];2021年实现产值破百亿元的历史性跨越^[6],2022年,梧州六堡茶区域茶叶品牌价值达到32.34亿元,在全国区域茶叶品牌中排名第25位,荣获“2021年中国茶叶发展最具实力品牌”称号^[7]。独特且丰富的茶树品种与加工工艺使广西六堡茶更具地理、资源、品牌和产业集聚等优势,产能和产值拥有巨大的提升空间。

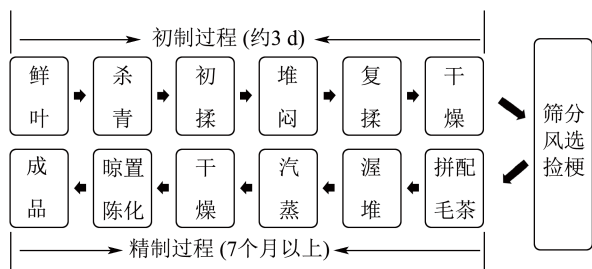


图1 六堡茶加工流程图

Fig.1 Liupao tea processing flow chart

1 六堡茶品质特征

六堡茶具干茶色泽黑褐光润,汤色红浓明亮似琥珀,茶汤香气带明显槟榔香,滋味醇和具有陈味,叶底呈红褐或黑褐色等独特的品质特征,素以“红、浓、陈、醇”四绝而闻名^[8]。特定的茶树品种、加工工艺与微生物菌群等共同奠定了六堡茶重要的化

学物质基础,赋予了六堡茶独特的风味品质和保健功效^[9]。

后发酵过程是六堡茶品质特征形成的关键环节,微生物在整个过程中都发挥着重要作用,六堡茶中许多化学成分在微生物的作用下发生巨大转变。渥堆是黑茶品质形成的关键工序,初制经过堆闷工艺,茶叶在湿热条件下转变为黄棕色,青草气逐渐散失,浓醇滋味初显^[10];传统工艺六堡茶不进行二次发酵,现代工艺六堡茶采用独特的冷水发酵工艺,在胞外酶和微生物的共同推动下,茶叶转变为红褐色,以草木、泥土味为主的香气向陈腐、木质味转变,茶汤滋味醇厚甘甜^[11]。陈化是六堡茶的储存过程,也是使其内含物质进一步转化从而提高茶叶质量的必要过程,茶叶最终转变为黑褐色,异味消失,陈香浓郁,融合了木香、花果香的槟榔香韵形成,茶汤持续向红浓转变,苦涩味降低,醇厚顺滑的口感突出^[12]。

六堡茶品质特征的评价主要采用感官审评法,通过对外形、汤色、香气、滋味及叶底五项指标对六堡茶进行评价打分,以外形条索紧实,色泽黑褐油润,汤色深红明亮,香气纯陈,滋味陈醇为优。该方法能及时反应茶叶品质^[13],具直观、方便、快捷等特点,但具有很强的主观性,会导致结果的不一致性和不可预测性。定量描述分析(Quantitative Descriptive Analysis, QDA)如今被广泛运用于茶叶品质研究中,通过线性尺度对感官属性的强度进行量化评价,确定并对比不同样品的感官特征,能提高感官审评的客观性与可控性^[14]。此外,随着计算机视觉系统、光谱技术、电子鼻、电子舌等新兴技术的应用,茶叶品质特征的研究得到进一步发展,但相关研究在六堡茶中鲜有报道^[15]。

2 六堡茶香气成分研究进展

六堡茶的香气成分研究主要是对挥发性物质进行检测分析,本文对现有六堡茶香气成分研究相关文献进行了整理统计见表1,研究对象包括

不同香气类型，不同加工方式，不同贮存时间等六堡茶。

茶叶中的挥发性成分按照其有机化学结构的不同可分为醇类、醛类、碳氢类、酯类、内酯类、酮类、杂氧类、酸类、酚类、含硫化合物、吡咯类及其衍

生物和芳胺类等。本文对现有的六堡茶香气研究进行汇总见表2，图2、3，将出现频次大于5的挥发性物质进行整理，共得到68种挥发性物质，包括醇类(15)、醛类(13)、碳氢类(13)、酯类(5)、内酯类(1)、酮类(12)、杂氧类(8)、酸类(1)。

表1 六堡茶挥发性成分研究汇总

Table 1 Summary of volatile components of Liupao tea

研究对象	香型	富集方法	萃取纤维类型	检测方法	定量分析	化合物数量	文献
10批六堡茶	槟榔香	挥发油提取法		GC-MS	峰面积归一化	44	[16]
		超声波提取法				34	
		HS-SPME				26	
		ITEX				40	
农家六堡茶与精制六堡茶		SDE		GC-MS	内标法	100	[17]
六堡茶		HS-SPME	PDMS/DVB	GC-MS	峰面积归一化	67	[18]
6个不同干燥方式六堡茶		HS-SPME	PDMS/DVB	GC-MS	峰面积归一化	38	[19]
51个六堡茶	陈香	HS-SPME		GC-MS	峰面积归一化	68	[20]
4个不同年份六堡茶	槟榔香	HS-SPME	PDMS/DVB	GC-MS	峰面积归一化	66	[21]
不同堆闷程度六堡茶		HS-SPME	PDMS/DVB	GC-MS	峰面积归一化	49	[22]
6个有代表性六堡茶		SDE		GC×GC-TOFMS	峰面积归一化	307	[23]
50个六堡茶	槟榔香与非槟榔香	ITEX		GC-MS	峰面积归一化	258	[24]
六堡茶		HS-SPME	DVB/CAR/PDMS	GC-MS	内标法	45	[25]
六堡茶		SBSE	PDMS	Es-GC-MS	内标法	116	[26]
10个有代表性六堡茶	陈香	HS-SPME	PDMS/DVB	GC-MS	峰面积归一化	81	[27]
传统工艺与现代工艺六堡茶		HS-SPME	PDMS/DVB	GC-MS	峰面积归一化	49	[28]
不同去仓味方法六堡茶		HS-SPME	DVB/CAR/PDMS	GC-MS	峰面积归一化	40	[29]
六堡茶渥堆过程样		HS-SPME	PDMS/DVB	GC-MS	峰面积归一化	46	[30]
六堡茶	陈香	HS-SPME	DVB/CAR/PDMS	GC-MS	外标法	82	[3]
不同烘烤温度六堡茶	陈香	ITEX		GC-IMS	峰面积归一化	42	[31]
六堡茶	陈香参香	HS-SBSE	DVB/CAR/PDMS	GC-MS	峰面积归一化	40	[32]
六堡茶		SDE		GC-MS	峰面积归一化	31	[33]
六堡茶		HS-SPME		GC-MS	内标法	36	[34]
不同贮存时间六堡茶		HS-SPME	PDMS/DVB	GC-MS	峰面积归一化	39	[35]
不同香气类型六堡茶	陈香 槟榔香 真菌香	HS-SPME	PDMS/DVB	GC-MS	内标法	102	[36]
六堡茶		HS-SPME	DVB/CAR/PDMS	GC-MS	内标法	46	[37]

表2 六堡茶共有挥发性物质汇总

Table 2 Summary of volatile substances in Liupao tea

化合物类型	化合物名称	检出频次	CAS 号	香气描述
醇类	芳樟醇	23	78-70-6	木香、花香、萜香、清香、水果香
	脱氢芳樟醇	11	20053-88-7	辛香及类似薰衣草气味
	芳樟醇氧化物 I	17	34995-77-2	花香、木香、泥土味
	芳樟醇氧化物 II	13	5989-33-3	具桉叶油素、樟脑等弱木香型香气
	α -松油醇	21	98-55-5	类似花果气味
	α -雪松醇	19	77-53-2	温和的淡雪松木质气味
	香叶醇	6	106-24-1	柑橘花香、甜香
	橄榄醇	5	500-66-3	—
	植物醇	5	150-86-7	花香、蜡味
	苯甲醇	6	100-51-6	令人愉快的果香和强烈熏烤味
	苯乙醇	9	60-12-8	清甜的玫瑰韵花香
	1-辛醇	6	104-76-7	类似柠檬香气
	2-壬烯醇	5	5921-73-3	清香、甜瓜香及油脂味
	1-辛烯-3-醇	12	3391-86-4	类似蘑菇的气味及清香
	4-萜烯醇	7	562-74-3	木香
	醛类	苯甲醛	18	100-52-7
苯乙醛		9	122-78-1	类似风信子的香气
藏红花醛		14	116-26-7	木香、辛香、药香
壬醛		14	124-19-6	脂肪、柑橘类气味
癸醛		9	112-31-2	肥皂味、柑橘味
辛醛		5	124-13-0	甜橙、蜂蜜样香气
己醛		11	66-25-1	生油脂和青草气及苹果味
(E)-2-己烯醛		6	6728-26-3	甜果香
(E)-2-壬烯醛		5	18829-56-6	脂肪味、黄瓜味及从青草气
(E)-2-辛烯醛		5	2548-87-0	辛甜
β -环柠檬醛		14	432-25-7	杏仁、芒果等水果样的果香及青香
2-庚烯醛		6	57266-86-1	具有油脂香、青香、果香
(E,E)-2,4-庚二烯醛		7	4313-03-5	类似新鲜带甜香的黄瓜味
碳氢		萜	12	91-20-3
	1-甲基萜	10	90-12-0	类似萜，带樟脑气味
	2-甲基萜	9	91-57-6	花香、木香，带烟熏或烧焦气味
	1,6-二甲基萜	5	575-43-9	—
	β -愈创木烯	5	88-84-6	木香、甜香
	β -罗勒烯	5	344298-81-3	—
	α -法尼烯	8	502-61-4	木香、花香
	α -雪松烯	12	11028-42-5	木香
	β -柏木烯	6	546-28-1	—
	δ -杜松烯	6	483-76-1	水果气味
	柠檬烯	10	138-86-3	新鲜柠檬、橙子香气
	月桂烯	5	123-35-3	具有清淡的香脂香气
	茶香螺烷	5	36431-72-8	具有类似松木的木香、薄荷脑气味

续表 2

化合物类型	化合物名称	检出频次	CAS 号	香气描述
酯类与内酯类	邻氨基苯甲酸甲酯	6	134-20-3	具有果香、花香、葡萄香
	苯甲酸甲酯	5	93-58-3	丁香油香
	邻苯二甲酸二丁酯	5	84-74-2	—
	(Z)-己酸-3-己烯酯	5	31501-11-8	类似梨的果香
	水杨酸甲酯	17	119-36-8	具有冬青油香味
	二氢猕猴桃内酯	17	17092-92-1	木香及似香豆素的辛香
酮类	苯乙酮	6	98-86-2	具愉快的芳香气味
	二氢-β-紫罗兰酮	8	1203-08-3	果香、木香
	异佛尔酮	6	78-59-1	发霉的皮革、烟草味
	α-紫罗兰酮	15	127-41-3	类似β-紫罗兰酮的花香气味,木香更为突出
	β-紫罗兰酮	20	79-77-6	紫罗兰、覆盆子味及花香
	2, 3-环氧-β-紫罗兰酮	5	—	—
	7, 8-环氧-α-紫罗兰酮	5	—	—
	香叶基丙酮	13	689-67-8	玫瑰香、叶香、果香
	2-十一酮	7	112-12-9	油脂气、类似芸香的香气
	6-甲基-5-庚烯-2-酮	10	110-93-0	新鲜清香
	(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮	9	30086-02-3	呈果香带青草气
	2, 6, 6-三甲基环乙烷酮	6	—	—
	杂氧	1, 2, 3-三甲氧基苯	19	634-36-6
1, 2-二甲氧基-4-乙基苯		13	5888-51-7	泥土味、类似芥末的辛辣味
1, 2-二甲氧基苯		17	91-16-7	霉味、类似奶油的甜味
1, 2-二甲氧基-4-甲基苯		10	494-99-5	—
1, 2, 3-三甲氧基-5-甲基苯		9	6443-69-2	—
1, 2, 4-三甲氧基苯		8	135-77-3	陈香
3, 4-二甲氧基甲苯		5	494-99-5	陈香
2-正戊基呋喃		10	3777-69-3	具豆香、果香及清香
酸类		壬酸	5	112-05-0

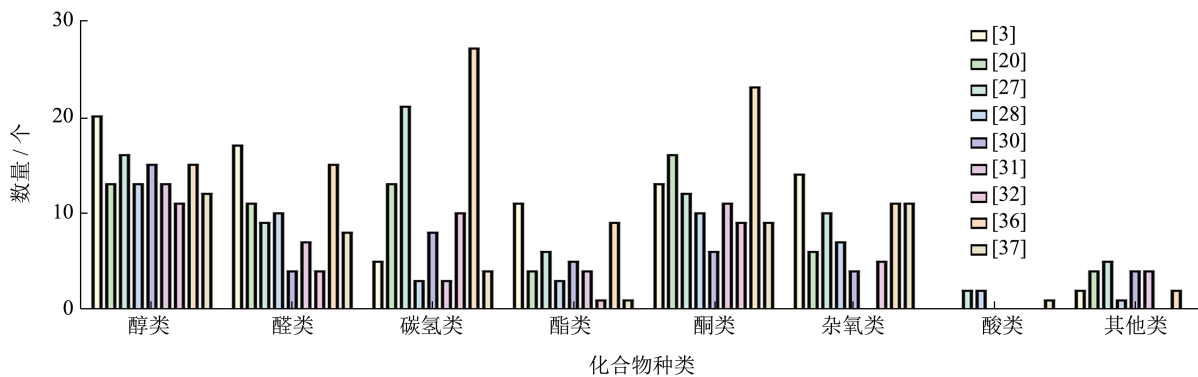


图 2 近 5 年六堡茶研究各类香气化合物数量汇总

Fig.2 Summary of the number of various types of aroma compounds in the last 5 years of Liupao tea research

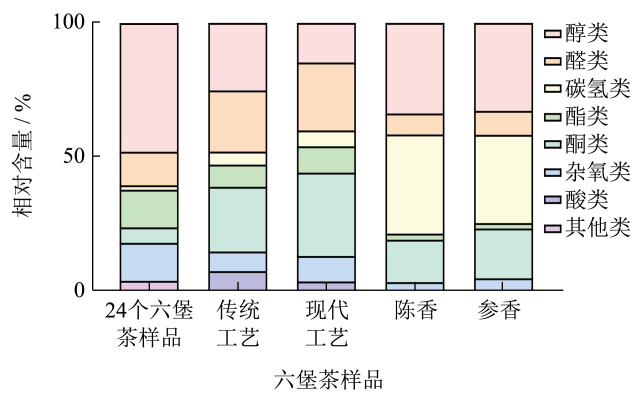


图3 近5年六堡茶研究各类香气化合物相对含量汇总

Fig.3 Summary of the relative contents of various types of aroma compounds in the last 5 years of Liupao tea research

2.1 醇类化合物

醇类物质是六堡茶中含量最高的一类物质，其中检出频次最多的是芳樟醇（23）、 α -松油醇（21）、 α -雪松醇（19）、芳樟醇氧化物 I（17）、芳樟醇氧化物 II（13）、1-辛烯-3-醇（12）等。芳樟醇是醇类化合物中相对含量最丰富的化合物，也是茶叶中相对含量较高的香气物质之一，具有木香、花香、清香、果香等馥郁香气。芳樟醇在六堡茶渥堆过程中伴随着茶堆内的酶促反应而氧化、异构，含量大幅度减少，生成芳樟醇氧化物和橙花叔醇等物质^[22]，且随着六堡茶贮存时间的增加而降低^[35]。芳樟醇氧化物有四种立体异构体，其中芳樟醇氧化物 I 与芳樟醇氧化物 II 为呋喃型，在大多数文献中被检出，而吡喃型只在少量文献中被检出。 α -松油醇具有类似花果气味，是六堡茶中含量较高的醇类化合物，在渥堆过程中大量生成^[30]，在气相色谱嗅闻联用（Gas Chromatography-Olfactometry, GC-O）中表现出较高强度，被认为是陈香型六堡茶的关键香气化合物，对陈香的形成有很大贡献^[27]。芳樟醇、松油醇等花果香型化合物的组成与含量比例差异可能是陈香与槟榔香六堡茶感官上存在差异的重要原因^[21]。 α -雪松醇是一种具温和木质气味的倍半萜醇，由微生物糖苷酶作用形成，对黑茶的香气品质起重要作用，有研究表明其是槟榔香型六堡茶最重要的特征性香气成分^[38]。1-辛烯-3-醇也是茶叶中常见的重要挥发性成分，主要通过脂肪酸与脂氧合酶氢过氧化物的氧化产生，表现为类似蘑菇的气味及清香，是六堡茶中的香气活性值（Odor Activity Value, OAV） >10 ^[36]，对六堡茶香气特征的形成具有重要贡献。苯甲醇呈果香和强烈熏烤味，苯乙醇具有清

甜的玫瑰花香，同属于芳香族醇类，它们在六堡茶的渥堆过程中含量均呈上升趋势^[30]。

2.2 醛类化合物

醛类物质是六堡茶中含量较低的一类化合物，在六堡茶贮存中表现为随着年份的增加而显著降低^[35]。其中检出频次最多的有苯甲醛（18）、藏红花醛（14）、 β -环柠檬醛（14）、壬醛（14）、己醛（11）、苯乙醛（9）、癸醛（9）等。苯甲醛和苯乙醛属于芳香族醛类化合物，苯甲醛具有苦杏仁、樱桃及坚果香，通常以糖苷的形式存在于茶中^[36]，在六堡茶中 OAV >10 ，对六堡茶的香气特征有重要贡献；苯乙醛呈类似风信子的香气，稀释后具水果的甜香气，被确认为白茶和六堡茶的主要香气化合物，有助于形成清香的气味，由苯丙氨酸通过微生物作用产生^[27]。藏红花醛和 β -环柠檬醛属于萜醛类化合物，藏红花醛具有木香、辛香、药香，是陈香型的香气物质； β -环柠檬醛具有杏仁、芒果等水果样的果香及青香，在六堡茶中 OAV >10 ，且被认为是陈香型六堡茶的区别香气化合物，含量远高于其他香型六堡茶。值得一提的是，苯乙醛、藏红花醛和呈陈味的 (E,E)-2,4-庚二烯醛，甜香及果香的庚醛、(E)-2-己烯醛、(E)-2-辛烯醛等醛类物质由于阈值低且呈香作用强被视为茯砖茶香气的重要组成部分，如：(E,E)-2,4-癸二烯醛的香气阈值仅为 0.16 $\mu\text{g/L}$ ，而呈现出强烈的油脂香；辛醛香气阈值也仅有 0.7 $\mu\text{g/L}$ ，而呈现出甜橙、蜂蜜样香气，但对六堡茶香气品质的贡献待进一步研究。壬醛、己醛、癸醛属于脂肪族醛类化合物，壬醛具脂肪、柑橘类气味，是饱和脂肪酸，在六堡茶中属于相对含量较高的醛类物质，OAV >10 ，贡献了“木香及药草香”属性，在 Lv 等^[34]对不同类型黑茶的研究中，壬醛仅在普洱茶中没有检测到，认为其可以作为区别不同类型黑茶的重要化学指标。己醛呈生油脂和青草气及苹果味，OAV >10 ，研究证明其是黑茶的主要呈香物质之一。癸醛气味与壬醛相似，它主要生成于美拉德反应，是清香型铁观音清香味的主要来源^[39]，Ma 等^[26]研究认为癸醛对六堡茶的香气品质很重要，是陈香型六堡茶的关键香气化合物。

2.3 碳氢化合物

碳氢化合物是六堡茶中含量丰富的一类香气物质，化合物数量多且相对含量较大。其中检出频次较高的有 α -雪松烯（12）、萘（12）、柠檬烯

(10)、1-甲基萘(10)、2-甲基萘(9)、 α -法尼烯(8)。 α -雪松烯、柠檬烯、 α -法尼烯属于烯烃类化合物, α -雪松烯带有木香,是六堡茶中典型的陈香物质,含量随陈化时间的增长而上升,同时被认为是槟榔香的特征香气成分。柠檬烯具有愉快的新鲜柠檬、橙子香气,在六堡茶中普遍存在且含量高, $OAV > 1$,是六堡茶重要香气组成成分,在渥堆过程中呈减少趋势^[3]。 α -法尼烯呈木香,韦柳花等^[35]研究不同贮存年份的陈香六堡茶发现 α -法尼烯随贮存时间的增加上升最显著,认为 α -法尼烯是陈香贡献率最大的成分。萘、1-甲基萘、2-甲基萘属于芳香族碳氢化合物。萘具刺鼻的樟木、焦油气味,导致了六堡茶的烟熏味,研究表明其是槟榔香型六堡茶的重要化合物。1-甲基萘气味类似萘,带樟脑气味, $OAV > 10$ 且在GC-O中表现出较高的气味强度^[27]。研究表明1-甲基萘有助于形成六堡茶的辛辣气味,还被用作评估发酵产品成熟度的潜在指标。2-甲基萘呈花香、木香,带烟熏或烧焦气味,比萘的清香气味更多,由微生物降解植物材料产生^[36],也被认为是槟榔香的区分香气化合物之一。

2.4 酯类与内酯类化合物

酯类与内酯类化合物检出频次较多的有水杨酸甲酯(17)、二氢猕猴桃内酯(17)、邻氨基苯甲酸甲酯(6)、苯甲酸甲酯(5)、邻苯二甲酸二丁酯(5)、(Z)-己酸-3-己烯酯(5)等。水杨酸甲酯具有冬青油香味,普遍存在于六堡茶中,在渥堆过程中大量增加。苯甲酸甲酯是1-苯丙氨酸的最终产物,呈丁香油香,与水杨酸甲酯同属芳香族酯类,都是槟榔香六堡茶的香气来源。邻苯二甲酸二丁酯与棕榈酸甲酯也在六堡茶中被检出,相对含量在酯类化合物中占比较高,但由于它们表现出的香气强度较弱或无气味,所以被认为对六堡茶香气的贡献不大^[40]。二氢猕猴桃内酯是含量最高的内酯类化合物,呈似香豆素的辛香及木香,已有研究表明它是普洱茶和红茶的香气活性成分^[41],在六堡茶中含量也较高。(Z)-己酸-3-己烯酯未见六堡茶中相关报道,推测其对香气贡献小。

2.5 酮类化合物

酮类化合物相对含量在六堡茶的渥堆过程中总体呈下降趋势,检出频次较多的是 β -紫罗兰酮(20)、 α -紫罗兰酮(15)、香叶基丙酮(13)、6-甲基-5-庚烯-2-酮(10)、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮(9)、二氢- β -紫罗兰酮(8)等。 β -紫罗兰酮通过双加氧

酶对 β -胡萝卜素的初级氧化裂解而产生,具有紫罗兰、覆盆子味及花香,气味阈值低, $OAV > 10$,为六堡茶提供了“菌香”属性,在渥堆过程中二次酶促氧化转化为二氢放线菌内酯和二氢- β -紫罗兰烯,相对含量呈下降趋势。 α -紫罗兰酮呈类似 β -紫罗兰酮的花香气味,但木香更为突出, $OAV > 10$,与 β -紫罗兰酮均属倍半萜酮类,是六堡茶陈香的代表物质。香叶基丙酮、6-甲基-5-庚烯-2-酮、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮都是脂肪族酮。香叶基丙酮有玫瑰香、叶香、果香,为黑茶的主要呈香物质^[42],在六堡茶相关研究中出现频次多但对其贡献鲜有报道。6-甲基-5-庚烯-2-酮具果香、清香的特点,在李建勋等^[18]对不同种类黑茶的研究中发现六堡茶中其含量显著高于普洱茶与茯砖茶。(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮呈果香带青草气,在真菌香型六堡茶中含量较高。二氢- β -紫罗兰酮具有果香、木香,已被鉴定为青砖茶的关键香气化合物之一^[43],在六堡茶渥堆过程中呈上升趋势, $OAV > 1$,在槟榔香型中具有高水平含量,因此也被认为是区别香气化合物。

2.6 杂氧类化合物

杂氧类化合物是六堡茶中相对含量较高的一类化合物。文献中检出频次较高的有1,2,3-三甲氧基苯(19)、1,2-二甲氧基苯(17)、1,2-二甲氧基-4-乙基苯(13)、1,2-二甲氧基-4-甲基苯(10)、2-正戊基呋喃(10)等。前四种化合物同属甲氧基苯类化合物。甲氧基苯类化合物在杂氧化合物中含量最高且具代表性,具有陈香香韵,有助于改善六堡茶的粗臭味。Wang等^[44]研究认为,黑茶的后发酵阶段过程中儿茶素在黑曲霉等微生物作用下降解发生甲基化反应产生为黑茶赋予“陈香”与“霉味”的甲氧基苯类化合物。张芬等^[30]研究中六堡茶的渥堆原料未检出甲氧基苯类化合物;刘泽森等^[22]研究不同堆闷程度六堡茶发现,轻度堆闷样本中未能检测到杂氧化合物,而在中度与重度堆闷样本中杂氧化合物占有较高的相对含量,与前人研究结果一致。同时,在不发酵的绿茶与全发酵的红茶中检测不到甲氧基苯类物质^[45],因此认为该类化合物是黑茶独有的香气成分。2-正戊基呋喃具豆香、果香及清香,为茶叶香气中烘焙味与泥土味的主要贡献者^[46],主要在汽蒸和干燥阶段通过美拉德反应生成^[47],研究证明其促进了成熟普洱茶的陈化香气特征形成,同时在陈香六堡茶中的高含量也使其被认为是六堡茶陈香香型的区别香气化合物^[26]。

表 3 六堡茶中茶多酚类物质含量
Table 3 Content of tea polyphenols in Liupao tea

茶多酚类物质	六堡茶 ^[33]	六堡茶 ^[34]	苦型六堡茶 ^[3]	浓醇型六堡茶 ^[3]	甜醇型六堡茶 ^[3]	传统发酵六堡茶 ^[53]	罐装发酵六堡茶 ^[53]
GC	0.23 ± 0.08	2.82 ± 0.26	0.34 ± 0.20	0.52 ± 0.20	0.30 ± 0.26	/	/
EGC	3.53 ± 1.87	ND	1.73 ± 0.72	1.88 ± 0.44	1.79 ± 0.57	5.1 ± 0.1	17.1 ± 0.0
C	0.16 ± 0.05	ND	0.63 ± 0.17	0.75 ± 0.12	0.62 ± 0.22	1.2 ± 0.0	0.1 ± 0.1
EC	1.04 ± 0.33	0.44 ± 0.27	1.43 ± 0.37	2.28 ± 0.38	1.57 ± 0.61	4.1 ± 0.9	11.1 ± 1.3
EGCG	4.25 ± 2.31	1.19 ± 0.34	15.31 ± 4.99	9.99 ± 4.72	11.06 ± 3.86	0.5 ± 0.0	4.4 ± 0.1
GCG	1.75 ± 0.05	1.14 ± 0.20	2.59 ± 0.73	1.41 ± 0.50	1.39 ± 0.52	/	/
ECG	3.07 ± 1.72	1.41 ± 0.33	11.33 ± 8.50	4.11 ± 1.59	3.57 ± 1.89	0.2 ± 2.1	4.3 ± 17.6
没食子酸	1.02 ± 0.10	2.35 ± 0.47	2.74 ± 1.47	4.36 ± 1.35	3.64 ± 1.34	/	/
茶红素	/	0.97 ± 0.12	18.10 ± 6.59	13.91 ± 3.84	16.30 ± 3.73	9.6 ± 0.1	8.7 ± 0.2
茶黄素	/	0.12 ± 0.03	1.41 ± 0.67	0.85 ± 0.40	1.08 ± 0.53	1.6 ± 0.1	1.5 ± 0.1
茶褐素	/	9.96 ± 0.91	52.34 ± 9.40	76.79 ± 17.70	75.35 ± 10.32	38.0 ± 0.5	25.0 ± 0.4

2.7 酸类化合物

酸类化合物在六堡茶中检出频次较高的仅有壬酸(5)。壬酸呈淡的脂肪和椰子香气,相对含量较少,对六堡茶香气的贡献无相关报道。此外,棕榈酸虽在较少文献中检出,但在穆兵等^[23]的研究中,棕榈酸是六堡茶有机酸类化合物中最主要的成分,它也被认为是黑茶中最丰富的香气成分之一^[34]。未检出的原因推测是前处理方法和检测仪器的差异。

3 六堡茶滋味成分研究进展

目前针对六堡茶滋味品质的研究主要集中于不同加工工艺、不同贮存时间和加工过程中主要滋味成分的差异与变化^[15],而对六堡茶中低含量的小分子滋味成分研究较少。六堡茶的滋味物质多为非挥发性物质,主要分为多酚类、有机酸类、生物碱类、糖类等。本文汇总现有对六堡茶滋味成分相关研究,对各物质类别研究进行综述。

3.1 多酚类物质

多酚类主要包括儿茶素、黄酮、花青素类及酚酸类等物质,是六堡茶重要的活性功能成分,也是滋味品质形成的重要成分。目前相关研究六堡茶中的茶多酚总量在6.31%~17.8%间,六堡茶中多酚类物质含量研究结果汇总见表3,在渥堆^[48]与陈化^[49]过程中均呈下降趋势,由于渥堆过程中,微生物作用下叶温上升,湿热条件下多酚类物质氧化分解加快,形成茶褐素与其他多酚类高聚物;胡

沛然^[50]研究发现茶多酚含量在渥堆第一个月下降了2%,而从39 d到渥堆结束的最后两个月下降了6%,分析表明渥堆初期发生非酶促反应,但随着时间的推移,酶促反应逐渐进行,此时多酚氧化酶的增加导致酶活性增强,从而促进了茶多酚的氧化速度。同时不同加工方式也会对茶多酚含量产生影响,双蒸双压处理高于冷发酵处理^[51]、热风干燥含量高于传统干燥^[19]、传统工艺高于现代工艺^[28]。

3.1.1 儿茶素类

儿茶素是多酚的主体成分,属于黄烷醇类物质,其含量约占多酚总量70%~80%,对茶汤滋味中的苦味及涩味有重要贡献,EGCG已被广泛研究作为涩味的评估标准。六堡茶儿茶素组分中EGCG含量最高的,其次是ECG,余外组分含量低,酯型儿茶素含量普遍高于简单儿茶素,不同样品间酯型儿茶素差异较大,研究对比绿茶与红茶的酯型儿茶素含量普遍高于六堡茶。六堡茶发酵过程中单体儿茶素(如儿茶素、CG、EC和EGCG)的含量降至毛茶含量的7%~89%,由于在微生物胞外酶的作用下儿茶素被氧化为邻醌,进而转化为茶色素。儿茶素各单体的苦味及涩味滋味活度值(Taste Active Value, TAV)均大于1,均对六堡茶的苦涩味有显著贡献^[3]。

3.1.2 黄酮及黄酮苷类

黄酮类化合物是一类天然色素,是茶汤颜色和滋味的重要影响因子,对涩味有贡献作用。由于发酵过程中微生物胞外酶催化的糖基化作用,六堡茶中的黄酮类物质多以糖苷形式存在^[52]。舒娜^[3]对黄

酮组分进行测定, 其化合物中槲皮素-3-O-葡萄糖苷含量最高, 范围为 0.09~0.48 mg/g, 昔元(槲皮素、山奈酚、杨梅素及牡荆素)的含量较低, 变异系数大, 可能是糖苷与昔元间转化易受加工与贮藏条件的影响, 如传统发酵相比罐装发酵黄酮类化合物减少更为显著^[53]。黄酮苷类呈味阈值较低, 涩味 TAV 值高, 是六堡茶涩味的主要来源。

3.1.3 酚酸及缩酚酸类

酚酸是一类具羧基及羟基的芳香族化合物, 有苦味和收敛性, 已被证明与茶汤收敛性评分高度相关, 是合成黄酮醇与儿茶素的前体物质。现有研究证明, 与其他茶类相比, 六堡茶等黑茶的酚酸含量相对较低, 但存在特征性酚酸, 可能是区别黑茶的标志物^[54]。没食子酸是黑茶中含量最高的酚酸类物质^[55], 它的积累主要来源于黑茶发酵前期的湿热作用及后期的微生物酶对没食子酸儿茶素的降解, 在六堡茶的渥堆研究中, 没食子酸平均含量上升了 12.24 倍, 同时它对于区分传统发酵与罐装发酵有很大贡献^[53]。在六堡茶后发酵阶段, 没食子酸的羟基逐渐被甲基取代而形成甲氧基苯类化合物, 从而对六堡茶的香气产生影响^[44]。

3.1.4 茶色素类

茶色素从多酚类化合物衍生转化而来, 主要由茶红素, 茶黄素和茶褐素等水溶性色素组成, 其含量及比例对茶汤色泽有显著促进作用, 同时也会影响茶汤滋味。六堡茶渥堆时茶红素是茶褐素产生的物质基础, 部分多酚化合物在多酚氧化酶的催化下氧化, 聚合成茶黄素并进一步偶联双黄烷醇, 氧化产生茶红素并最终促使茶褐素产生。Cheng 等^[52]对五种黑茶研究对比, 茶褐素在普洱茶与六堡茶中含量最高, 可能是由于它们发酵程度更高所致。茶黄素亦在产生和消耗之间达到动态平衡, 舒娜^[3]研究发现茶黄素四个单体(TF、TF-3'-G、TF-3-G、TFDG)在六堡茶中含量极低, 均低于 0.1 mg/g。

3.2 有机酸类

有机酸是茶汤中一类中重要的呈味物质, 大多数属于水溶性成分, 且表现出明显酸味, 被认为是茶汤酸味的主要原因^[56]。

3.2.1 氨基酸类

氨基酸类物质是茶叶中重要的滋味品质成分, 相较于其他茶类, 黑茶经过渥堆后氨基酸含量较低, 这是因为渥堆中游离氨基酸一方面在微生物源酶的

催化氧化下脱氨脱羧, 转化为芳香物质, 还能与多酚类反应生成茶褐素, 与碳水化合物发生美拉德反应形成大分子不溶性黑色素, 另一方面氨基酸为发酵微生物提供氮源, 从而含量总体下降^[57]。同时, 蛋白质在蛋白酶催化下水解补充氨基酸, 部分氨基酸衍生物含量增加。其中茶氨酸是六堡茶中含量最高的氨基酸, 具有鲜味与涩味, 研究证明其在六堡茶中对涩味有显著贡献, 对鲜味贡献不显著, 甜味氨基酸被认为对六堡茶茶汤甜味无显著贡献, 天冬氨酸 TAV > 1, 对鲜味有重要贡献。D-(+)-焦谷氨酸具芳香气味, 由谷氨酸通过酶及非酶途径形成, 在传统发酵与罐装发酵中存在不同变异模式, 可视为不同发酵方式的特征差异产物。

3.2.2 其他有机酸类

水溶性有机酸在不同茶类间差异较大, 红茶中含量高于其他茶类。六堡茶中, 草酸含量最高, 其次是乙酸、琥珀酸、奎宁酸, 在滋味活度值研究中草酸(18.09)、乙酸(54.46)、琥珀酸(13.99)具有较高的 TAV 值, 表明其对酸味具有显著贡献, 是六堡茶茶汤酸味的主要来源, 同时琥珀酸对六堡茶茶汤鲜味也有显著贡献。此外, D-(-)-奎宁酸在传统发酵与罐装发酵中表达方式不同, 可作为区别产物, 其含量变化主要与植物中酚酸-咖啡酰奎宁酸的降解和合成有关, 苦味阈值为 10 mg/L, 可能对茶汤滋味产生影响。

3.3 生物碱及核苷类

茶叶中的生物碱以嘌呤碱类生物碱为主, 其中最重要的是咖啡碱, 是茶汤中重要的呈味物质, 表现为较强的苦味。六堡茶中咖啡碱含量较为稳定, 这是因为咖啡碱属于杂环含氮结构, 在加工过程中难以被破坏^[58], 其苦味 TAV > 400, 对六堡茶的苦味有显著贡献。次黄嘌呤是咖啡碱合成的重要前体物质, 在六堡茶渥堆过程中大量增加, 推测可能是由于其不断合成但没有进一步转化^[53]。5'-S-甲基-5'-硫代腺苷在六堡茶渥堆结束后含量几乎为零, 被认为是区分发酵茶与非发酵茶的新特征化合物。

3.4 糖类

糖类包括单糖、双糖和多糖, 能够赋予六堡茶汤甜味和黏稠度, 是构成六堡茶“甘醇”品质特征的主要因素。六堡茶渥堆前期可溶性糖作为碳源为微生物繁殖提供营养而下降, 渥堆后期微生物分泌

的胞外酶在酶促作用下粗纤维被水解以及大分子多糖分解成小分子的单糖、双糖及寡糖等物质而含量上升。

4 结语与展望

香气成分是影响六堡茶品质的重要因素之一, 科研人员对六堡茶香气的研究随着现代分析技术不断更新, 分离鉴定手段日渐成熟, 但不同的提取检测方法所得到的香气成分组成与含量也存在差异, 目前六堡茶的香气提取方法应用同时蒸馏萃取技术 (Simultaneous Distillation Extraction, SDE) 和顶空固相微萃取技术 (Headspace Solid-Phase Microextraction, HS-SPME) 较多。SDE 法对中高沸点的成分萃取回收率较高, 而对强极性和亲水性成分萃取回收率比较低, 且需要对样品进行高温加热处理, 易造成香气物质结构变化^[59]。HS-SPME 方法适用于低沸点、高挥发性成分的富集^[60], 但萃取纤维头的富集能力有限, 且对挥发性成分有选择性, 容易导致香气成分比例失衡, 给定量分析工作带来困难^[61]。香气分离检测技术主要为气相色谱-质谱联用 (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS), 是应用于食品中挥发性成分检测的重要手段, 具有分离效率高、鉴别能力强、能准确定量未知多组分的显著优势, 被广泛应用于茶叶香气成分的研究^[62], 检出大多为大分子量成分。有待利用全二维气相色谱-飞行时间质谱联用技术 (Comprehensive Two-dimensional Gas Chromatography-Time of Flight Mass Spectrometry, GC×GC-TOFMS) 等更为灵敏精确的新型检测技术提高六堡茶香气成分检测的真实性与准确性。优化提取参数、改进提取与鉴定技术, 以期对六堡茶中至今尚未分离鉴定及未被检测到的香气活性物质进行识别。六堡茶有陈香、槟榔香及真菌香三种典型香型, 不同香型六堡茶的关键香气化合物仍未明确, 不同类型化合物组成比例、香气活性化合物的呈香阈值与香气化合物间的相互作用都对茶汤香气最终的呈现有着重要影响, 挖掘引起六堡茶香气差异的关键化合物对品质控制和加工生产具有重要意义。近年来, 红茶、绿茶等关键香气化合物已被科研人员运用感官审评、GC-O、OAV 和香气重组等多种方法进行分析鉴定, GC-MS 结合 GC-O 可以在定性定量基础上鉴别特征香气成分^[63]、筛选香气活

性成分^[64], 进一步确定香气化合物的强度及作用大小^[65]; Zheng 等^[66]通过香气重组实验成功模拟茯砖茶的整体香气特征, 然而在六堡茶中此类研究鲜少报道。同时加工过程中微生物的差异也是六堡茶有别于其他黑茶, 形成独特香气的主要因素, 深入研究微生物参与香气化合物代谢途径的调控机制是揭示六堡茶香气形成的重要环节。

滋味成分也是影响六堡茶风味品质的核心因子, 目前六堡茶滋味的研究主要还是以感官审评结合分光光度计和高效液相色谱等仪器进行检测定量主要滋味化合物的手段进行, 对于滋味的研究仍停留在大分子化合物上, 而茶汤中小分子化合物的分离鉴定报道鲜少。液相色谱-质谱联用 (Liquid Chromatograph-Mass Spectrometer, LC-MS) 因具有分离能力强、检测灵敏度高和专属性强等特点, 以高效快速、样品用量少且前处理简单等优势在化学成分分析、结构鉴定、质量控制等领域的研究中发挥重要作用, 在茶叶品质研究中被广泛的应用^[67]。近年来, 液质联用技术逐渐应用于六堡茶的研究中。刘仲华^[68]采用 UPLC-Q/TOF-MS 对五种黑茶的非挥发性物质进行比较, 从六堡茶中鉴定出了 67 种非挥发性成分, 多为绿茶、红茶中含量不高的儿茶素类衍生物、酚酸类衍生物、黄酮黄酮苷类衍生物等生理活性物质; 林小珊等^[69]和张均伟等^[70]分别采用 UPLC-Q-Exactive 分析检测技术, 从六堡茶中鉴定出了 26 种以多酚类物质为主的化合物和 29 种化合物, 其中六种化合物在黑茶中首次被检出。Wang 等^[53]采用 UHPLC-HR-MS 分析检测技术比较了传统发酵与罐装发酵六堡茶, 共鉴定出 287 种化合物, 其中 36 种化合物被认为是六堡茶加工过程中引起代谢变化的生物标志物。未来滋味的研究结合 LC-MS 等新型检测技术对茶汤中非挥发性物质的研究将成为重点。同时茶汤滋味是一个复杂的体系, 呈味成分的含量与阈值对茶汤滋味的贡献及不同成分间的协同或消减等相互作用都会对茶汤口感造成影响, 这类研究目前在六堡茶中十分少见, 有待深入研究。电子舌技术也逐渐广泛的应用于茶叶的研究中, 它能模拟人体味觉感知过程, 具有方便快捷、科学可靠的优点, 以仿生技术评价对感官审评结果进行表征, 能一定程度上弥补感官审评的缺陷, 改进和完善六堡茶滋味品质评价体系。

参考文献

- [1] 张芬,温立香,彭靖茹,等.广西六堡茶的研究进展[J].茶叶通讯,2018,45(3):13-16.
- [2] GB/T 32719.4-2016,黑茶第4部分六堡茶[S].
- [3] 舒娜.六堡茶关键风味物质研究[D].重庆:西南大学,2021.
- [4] 陈自林.六堡茶为何这么俏销[N].中国县域经济报,2022-02-10(005).
- [5] 安明霞.六堡茶何以实现从“侨销茶”变为“畅销茶”?[N].中华合作时报,2022-11-08(B01).
- [6] 于翠平,闫允诚,吴健华,等.梧州市六堡茶产业发展对策与建议[J].茶叶,2018,44(3):162-166.
- [7] 谢羲薇,唐艳.梧州六堡茶:小叶子种出强市富农大产业[J].当代广西,2021,14:52-53.
- [8] 马婉君,马士成,刘春梅,等.六堡茶的化学成分及生物活性研究进展[J].茶叶科学,2020,40(3):289-304.
- [9] 龚受基.六堡茶和茉莉花改善胰岛素抵抗功效及机制研究[D].长沙:湖南农业大学,2012.
- [10] LI Y C, HAO J, ZHOU J T, et al. Pile-fermentation of dark tea: Conditions optimization and quality formation mechanism [J]. LWT, 2022, 166(15): 113753.
- [11] FENG X Y, CHEN M, SONG H Z, et al. A systemic review on Liubao tea: A time-honored dark tea with distinctive raw materials, process techniques, chemical profiles, and biological activities [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(6): 5063-5085.
- [12] ZHANG H, WANG J J, ZHANG D D, et al. Aged fragrance formed during the post-fermentation process of dark tea at an industrial scale [J]. Food Chemistry, 2020, 342(16): 128175.
- [13] 欧伊伶,张娅楠,覃丽,等.茶叶色香味品质评价方法研究进展[J].食品工业科技,2019,40(6):342-347,360
- [14] 刘奇,欧阳建,刘昌伟,等.茶叶品质评价技术研究进展[J].茶叶科学,2022,42(3):316-330.
- [15] 石荣强,温立香,曾玉凤,等.六堡茶品质研究进展[J].中国茶叶加工,2020,2:43-47.
- [16] 黄林杰,罗达龙,钟家良,等.槟榔香六堡茶中香气成分提取方法的比较[J].食品界,2017,7:94-96.
- [17] 陈文品,陈平韬,杨洪元,等.六堡茶感官理化品质及挥发性香气分析研究[C]//中国茶叶学会.中国茶叶科技创新与产业发展学术研讨会论文集.华南农业大学园艺学院;梧州市六堡茶叶协会;广西职业技术学院;广西梧州茶叶进出口公司,2009:7.
- [18] 李建勋,杜丽平,王超,等.顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法分析黑茶香气成分[J].食品科学,2014,35(2):191-195.
- [19] 苏敏,韦柳花,吴永华,等.不同干燥方式对六堡茶品质的影响[J].广东农业科学,2015,42(7):82-86.
- [20] 温立香,张芬,何梅珍,等.陈香六堡茶品质特征及香气质量评价方法建立[J].食品工业科技,2021,42(2):230-236.
- [21] 刘泽森,邓庆森,何志强,等.槟榔香六堡茶的特征香气成分研究[J].农业研究与应用,2016,3:36-42.
- [22] 刘泽森,邓庆森,何志强,等.不同堆闷程度对六堡茶毛茶香气的影响研究[J].农业研究与应用,2016,3:57-61.
- [23] 穆兵,朱荫,马士成,等.六堡茶香气成分的全二维气相色谱-飞行时间质谱分析[J].食品科学,2017,38(22):169-177.
- [24] 黄林杰,罗达龙,钟家良.六堡茶中槟榔香气主要成分的研究[J].农业与技术,2018,38(8):12-14.
- [25] 郑鹏程,刘盼盼,王胜鹏,等.5种黑茶香气成分的比较分析[J].食品工业科技,2018,39(22):82-86,143.
- [26] MA W J, ZHU Y, SHI J, et al. Insight into the volatile profiles of four types of dark teas obtained from the same dark raw tea material [J]. Food Chemistry, 2021, 346: 128906.
- [27] 马士成,王梦琪,刘春梅,等.六堡茶挥发性成分中关键香气成分分析[J].食品科学,2020,41(20):191-197.
- [28] 黎敏,庞月兰,杨春,等.不同工艺六堡茶化学成分分析[J].安徽农业科学,2021,49(2):193-195,200.
- [29] 赵云雄,刘汉焱,冯红钰,等.不同去仓味方法对六堡茶香气成分的影响[J].食品科技,2021,46(10):82-86.
- [30] 张芬,温立香,彭靖茹,等.六堡茶渥堆过程中主要生化成分和茶汤色泽变化及其相关性研究[J].食品科技,2019,44(2):83-87.
- [31] 覃榕珍,黄丽,滕建文,等.基于GC-IMS法分析不同烘焙温度对六堡茶香气品质的影响[J].食品科技,2022,47(5):282-290.
- [32] 梁剑锋,李亚,王华,等.基于高通量测序的两种香型六堡茶微生物多样性及其特征分析[J].食品安全质量检测学报,2021,12(24):9565-9573.
- [33] 张宁.不同黑茶多酚类及特征性香气成分的分析研究[D].合肥:安徽农业大学,2015.
- [34] LV H P, ZHANG Y, SHI J, et al. Phytochemical profiles and antioxidant activities of Chinese dark teas obtained by different processing technologies [J]. Food Research International (Ottawa, Ont), 2017, 100(3): 486-493.
- [35] 韦柳花,苏敏,陈三弟,等.不同贮存时间六堡茶品质变化研究[J].西南农业学报,2015,28(1):376-380.
- [36] LI Q, HONG X, ZHENG X X, et al. Characterization of key aroma compounds and core functional microorganisms in different aroma types of Liupao tea [J]. Food Research International (Ottawa, Ont), 2022, 152: 110925.
- [37] 李灿,陈同强,廖燕芝,等.湖南安化茯砖茶与其他地区黑茶香味物质差异性研究[J].食品安全质量检测学报,2021,12(13):5449-5454.
- [38] 袁思思,柏珍,黄亚辉,等.3种黑茶的香气分析[J].食品科学,2014,35(2):252-256.
- [39] 张珍珍,杨远帆,孙浩,等.3种清香型铁观音挥发性成分及香味特征[J].集美大学学报(自然科学版),2016,21(3):175-183.
- [40] LV S D, WU Y S, LI C W, et al. Comparative analysis of puerh and Fuzhuan teas by fully automatic headspace solid-

- phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry and chemometric methods [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(8): 1810-1818.
- [41] JOSHI R, GULATI A. Fractionation and identification of minor and aroma-active constituents in Kangra orthodox black tea [J]. *Food Chemistry*, 2015, 167: 290-298.
- [42] 沈程文,邓岳朝,周跃斌,等.湖南茯砖茶品质特征及其香气组分研究[J].*茶叶科学*,2017,37(1):38-48.
- [43] 刘盼盼,郑鹏程,龚自明,等.青砖茶的香气成分分析[J].*食品科学*,2017,38(8):164-170.
- [44] WANG K B, LIU F, LIU Z H, et al. Comparison of catechins and volatile compounds among different types of tea using high performance liquid chromatograph and gas chromatograph mass spectrometer [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2011, 46(7): 1406-1412.
- [45] WANG L F, LEE J Y, CHUNG J O, et al. Discrimination of teas with different degrees of fermentation by SPME-GC analysis of the characteristic volatile flavour compounds [J]. *Food Chemistry*, 2008, 109(1): 196-206.
- [46] XU Y Q, WANG C, LI C W, et al. Characterization of Aroma-Active Compounds of Pu-erh Tea by Headspace Solid-Phase Microextraction (HS-SPME) and Simultaneous Distillation-Extraction (SDE) Coupled with GC-Olfactometry and GC-MS [J]. *Food Analytical Methods*, 2015, 9(5): 1188-1198.
- [47] FENG X Y, YANG S Y, PAN Y N, et al. Yellow tea: more than turning green leaves to yellow [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(22): 7836-7853.
- [48] 张芬,温立香,彭靖茹,等.六堡茶渥堆过程中主要生化成分和茶汤色泽变化及其相关性研究[J].*食品科技*,2019,44(2):83-87.
- [49] 梁燕妮,田春林,卓梅芳.不同年份六堡茶品质变化研究[J].*陕西农业科学*,2016,62(4):60-63.
- [50] 胡沛然.六堡茶多酚氧化酶及其产生菌对茶叶品质的应用[D].南宁:广西大学,2018.
- [51] 刘泽森,温立香,何梅珍,等.不同发酵方式对六堡茶品质的影响研究[J].*安徽农业科学*,2016,44(18):91-92,122.
- [52] CHENG L Z, WANG Y F, ZHANG J R, et al. Integration of non-targeted metabolomics and E-tongue evaluation reveals the chemical variation and taste characteristics of five typical dark teas [J]. *LWT*, 2021, 150(19): 111875.
- [53] WANG H F, TENG J W, HUANG L, et al. Determination of the variations in the metabolic profile and sensory quality of Liupao tea during fermentation through UHPLC-HR-MS metabolomics [J]. *Food Chemistry*, 2023, 404(15): 134773.
- [54] 戴宇樵,潘科,李琴,等.黑茶品质形成与功效研究进展[J].*江苏农业科学*,2021,49(10):24-29.
- [55] 刘琴.UPLC-PDA/UHPLC-Q-TOF-MS分析六大茶类中的酚酸类物质[D].合肥:安徽农业大学,2019.
- [56] 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.
- [57] 林伟东,孙威江,郭义红,等.茶叶中茶氨酸的研究与利用[J].*食品研究与开发*,2016,37(20):201-206.
- [58] 赵苗苗,严亮,张文杰,等.不同渥堆发酵方法对普洱茶品质的影响[J].*食品安全质量检测学报*,2022,13(8):2640-2648.
- [59] 徐刚,史茗歌,吴明红,等.固相微萃取的原理及应用[J].*上海大学学报(自然科学版)*,2013,19(4):368-373.
- [60] 孙彦,刘章武,邓莉.顶空固相微萃取和同时蒸馏萃取法分析精武鸭脖的风味物质[J].*中国酿造*,2012,31(12):130-135.
- [61] 余汉谋,姜兴涛,肖海鸿.旋转锥体柱技术及其在食品和香精香料行业中的应用进展[J].*食品工业科技*,2013,34(24):372-375.
- [62] 银霞,黄建安,黄静,等.基于CiteSpace可视化分析的茶叶香气研究进展[J].*茶叶科学*,2020,40(2):143-156.
- [63] 汪厚银,李志,张剑,等.基于气质联用/气相色谱-嗅觉测定技术的西湖龙井茶特征香气成分分析[J].*食品科学*,2012,33(8):248-251.
- [64] 舒畅,余远斌,肖作兵,等.新、陈龙井茶关键香气成分的SPME/GC-MS/GC-O/OAV研究[J].*食品工业*,2016,37(9):279-285.
- [65] LIN J, ROUSEFF R L. Characterization of aroma-impact compounds in cold-pressed grapefruit oil using time-intensity GC-olfactometry and GC-MS [J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2001, 16(6): 457-463.
- [66] ZHENG X X, HU T F, XIE H, et al. Characterization of the key odor-active compounds in different aroma types of Fu brick tea using HS-SPME/GC-MSO combined with sensory-directed flavor analysis [J]. *Food Chemistry*, 2023, 426: 136527-136527.
- [67] 李丹,李爱平,李科,等.液质联用技术在中药化学成分定性分析中的研究进展[J].*药物评价研究*,2020,43(10):2112-2119.
- [68] 刘仲华.黑茶化学物质组学与降脂减肥作用机理研究[D].北京:清华大学,2014.
- [69] 林小珊,黄丽,夏宁,等.六堡茶酚类物质的分析鉴定及指纹图谱研究[J].*轻工科技*,2019,35(6):8-11,18.
- [70] 张均伟,侯黎,杜昱光,等.基于高分辨质谱结合主成分分析技术评价发酵过程对六堡茶关键品质成分的影响[J].*食品科技*,2019,44(12):328-334.