DOI:10.12441/spyswjs.20250427002 [文章编号] 1673-1689(2026)05-0001-08

白茶与黑茶在贮藏期间香气成分及香型变化的研究进展

张娅楠[1] 何群仙[1*] 赵 熙[2] 许益娟[1] 陈东东[1] 李培红[1] 陈 鑫[1] 郑燕华[1]

(1. 深圳市深宝华城科技有限公司,广东 深圳 518063; 2. 湖南省农业科学院茶叶研究所,湖南 长沙 410125)

摘要: 白茶和黑茶具备良好的贮藏价值,适度贮藏可有效提升其品质。作者系统梳理了近年来白茶、黑茶香气成分与香型特征相关性分析的研究成果,总结了不同等级、不同形态白茶以及不同品类黑茶在贮藏过程中香型及香气成分变化的研究进展,探讨了当前白茶与黑茶香气研究存在的难点,同时对未来的研究方向进行了展望。

关键词: 白茶;黑茶;贮藏;香型;香气变化

Research Progress on the Changes of Aroma Components and Flavor Profiles in White Tea and Dark Tea During Storage

ZHANG Ya'nan[1] *HE Qunxian*[1*] *ZHAO Xi*[2] *XU Yijuan*[1] *CHEN Dongdong*[1] *LI Peihong*[1] *CHEN Xin*[1] *ZHENG Yanhua*[1]

(1. Shenzhen Shenbao Huacheng Technology Co., Ltd., Shenzhen 518063, China; 2. Hunan Tea Research Institute, Changsha 410125, China)

Abstract: For dark tea and white tea with good storage value, a moderate storage period can improve their quality. The author sorts out the research results of correlation analysis between aroma components and aroma types of white tea and black tea in recent years and summarizes the research progress in aroma type and aroma component changes of different grades and forms of white tea and different types of black tea during storage. Furthermore, this paper discusses the difficulties in the study of the aromas of black tea and white tea and makes an outlook on the future research directions.

Keywords: white tea; dark tea; storage; aroma type; aroma change

香气是评价茶叶品质的核心指标。在贮藏过程中茶叶与空气接触会发生一系列复杂的理化反应,茶叶中的脂肪酸、胡萝卜素会发生缓慢的自氧化反应,导致呈青草气、清香的不饱和脂肪醛和醇类物质含量降低,而与陈味、陈腐味相关的醇类物质及杂环化合物含量升高[1]。二氢猕猴桃内酯、β-紫罗兰酮等胡萝卜素衍生物含量在短期贮藏(贮藏期<5年)过程中呈上升趋势,其中二氢猕猴桃内酯含量呈线性增长,可作为茶叶短期贮藏的特征标志物;而长期贮藏后,此类胡萝卜素衍生物含量会显著下降[2-3]。茶叶在贮藏过程中有6种美拉德产物含量会持续上升,表明茶叶在贮藏过程中伴随着美拉德反应的发生[4]。其中,5-羟甲基糠醛作为美拉德反应的特征产物,可作为茶叶陈化的特征标志物[5]。茶叶在长期贮藏过程中,直链和支链烃类化合物被逐渐分解,同时生成短链有机酸、酰胺衍生物及含氮化合物,共同构成了贮藏茶特有的陈香和木香特征[2,6]。

白茶与黑茶具有良好的贮藏特性,适度贮藏可有效提升茶叶品质[7]。基于此,作者综述了白茶与

基金项目: 国家"十四五"重点研发计划项目(2022YFD1600804)。

通信作者: 何群仙(1972—),女,国家一级评茶师,主要从事茶叶精深加工、茶饮料工程研究。E-mail:hequnxian@hcfood.com.cn

收稿日期: 2025-04-27 **修回日期:** 2025-05-30

黑茶在贮藏期间香气品质的研究进展，旨在为白茶与黑茶的品质提升与风味调控提供参考。

1 白茶与黑茶的香型

茶叶香气特征是多种香气物质协同作用的结果，清香、花香、陈香、木香是白茶与黑茶的典型香型。作者梳理了近年来白茶、黑茶香气成分与香型相关性的研究论文，见表1。研究表明，结构相似的香气成分（如α-紫罗兰酮与β-紫罗兰酮）具有较强的协调作用，而结构差异较大的香气成分（如2-戊基呋喃与香叶基丙酮）具有较强的遮蔽作用。（*E*）-橙花叔醇可强化花香、果香和药香，而对青草香、木香具有遮蔽作用；香叶基丙酮可平衡花香、果香的香气强度，提升香气层次感[8]。雪松醇是茶叶木香的重要贡献物质，会抑制甜香的感知，甜香、蜜香则会抑制清香的感知[9]，青草香和木香会抑制毫香的感知，而花香型成分也易被其他香型的香气物质掩蔽[10]。

表1 白茶与黑茶香气成分及香型相关性汇总

Table 1 Summary of correlation analysis between aroma components and aroma types of white tea and dark tea

香型	研究对象	香气成分	参考文献
青草香	2015—2019年的茯砖茶	（*E*,*E*）-2,4-壬二烯醛*、（*E*）-2-辛烯醛*、（*E*）-2-壬醛*、（*E*,*E*）-2,4-庚二烯醛*、苯甲醇*	[11]
	60份茯砖茶	（*E*,*E*）-2,4-庚二烯醛*、己醛*、（*E*,*E*）-2,4-壬二烯醛*、胡薄荷酮*、甲基庚烯酮*、3,5-辛二烯-2-酮*、2-正戊基呋喃*、1-辛烯-3-醇*、3-辛烯-2-酮*、萘*、1-甲基萘*、β-紫罗兰酮*、香叶基丙酮*、α-紫罗兰酮*、二氢-α-紫罗兰酮*	[12]
清香	36份贮藏时间为0~15年的一级白牡丹茶	芳樟醇**、苯乙醇**、香叶醇* 、水杨酸甲酯**、水杨酸乙酯**、9-十六碳烯酸乙酯*、六氢假紫罗酮*	[13]
	9份白牡丹茶、1份白毫银针茶	2-戊基呋喃*	[9]
	12份贮藏时间为2~8年的一级白牡丹茶	正己醛* 、芳樟醇氧化物II*、橙花醚*、α-法尼烯*、顺-2-戊烯-1-醇*、芳樟醇*、正己醛*、水杨酸甲酯*、青叶醇*、苯乙醇*	[14]
	32份贮藏时间为0~15年的一级白牡丹茶	反式-橙花叔醇*	[15]
毫香	32份贮藏时间为0~15年的一级白牡丹茶	反式-橙花叔醇*	[15]
甜香	36份贮藏时间为0~15年的一级白牡丹茶	芳樟醇*、香叶醇*	[13]
	32份贮藏时间为0~15年的一级白牡丹茶	反式-橙花叔醇*	[15]
花香	36份贮藏时间为0~15年的一级白牡丹茶	芳樟醇**、苯乙醇**、香叶醇**、水杨酸甲酯**、水杨酸乙酯**、9-十六碳烯酸乙酯*、六氢假紫罗酮*	[13]
	12份贮藏时间为2~8年的一级白牡丹茶	α-法尼烯*、顺式芳樟醇氧化物*、芳樟醇氧化物II*、水杨酸甲酯*、橙花醚* 、芳樟醇* 、顺-2-戊烯-1-醇*、正己醛*、水杨酸乙酯*	[14]
	9份白牡丹茶、1份白毫银针茶	苄腈**、邻香豆素酸**、芳樟醇*、反式芳樟醇-3,7-氧化物*、苯甲醛*、苯乙醇*、δ-辛内酯**、顺式-1-甲基双环癸烷-2,10-二酮*、3,4-脱氢-β-紫罗兰酮*	[9]
	茯砖初制样品	芳樟醇*、苯乙酮*、水杨酸甲酯*	[16]
果香	2015—2019年的茯砖茶	苯甲醇*、（*E*,*E*）-2,4-庚二烯醛*、（*E*,*E*）-2,4-壬二烯醛*、（*E*）-2-壬醛*、（*E*）-2-辛烯醛*	[11]
陈香	60份茯砖茶	α-松油醇*	[12]
	36份贮藏时间为0~15年的一级白牡丹茶	α-松油醇*	[13]
木香	60份茯砖茶	α-松油醇*	[12]
	2015—2019年的茯砖茶	甲基庚烯酮*、芳樟醇*、α-紫罗兰酮*、香叶基丙酮*、β-紫罗兰酮*、雪松醇*	[11]
药香	12份贮藏时间为2~8年的一级白牡丹茶	4-异丙基甲苯*	[14]
蜜香	36份贮藏时间为0~15年的一级白牡丹茶	棕榈酸乙酯*	[13]
	12份贮藏时间为2~8年的一级白牡丹茶	4-异丙基甲苯*	[14]
梅子香	36份贮藏时间为0~15年的一级白牡丹茶	α-松油醇*	[13]
	12份贮藏时间为2~8年的一级白牡丹茶	顺式芳樟醇氧化物*	[14]
枣香	12份贮藏时间为2~8年的一级白牡丹茶	芳樟醇氧化物II*、橙花醚*	[14]
菌花香	茯砖初制样品	芳樟醇*、苯乙酮*、水杨酸甲酯*	[16]
	2015—2019年的茯砖茶	甲基庚烯酮*、芳樟醇*、α-紫罗兰酮*、香叶基丙酮*、β-紫罗兰酮*、雪松醇*	[11]

注：“*”表示与该香型呈显著正相关；“**”表示与该香型呈极显著正相关。

1.1 青草香、清香与毫香

新制茶叶常带有青草香，与青草香显著相关的香气成分约20种，这类物质主要来源于脂肪酸降解，普遍具有双重气味特征：低浓度时呈现愉悦的清香，高浓度时则表现为青草味或青臭味。傅海峰等[17]对6种香型的白茶进行聚类分析，发现粽叶香、枣香、药香型白茶聚为一类，清香、花香、毫香型白茶聚为另一类。2-戊基呋喃为美拉德反应产物，通常呈烘焙香，但黄创盛[9]的研究表明，该物质可呈现青豆味和黄油味，与清香呈显著正相关。该物质也是菌花香型茯砖茶的香气贡献成分[12]。毫香是白毫银针典型的香型，通过对比白毫银针的白毫和去白毫的银针香气组分发现，烷类、醇类及部分芳香化合物在茶毫中含量较高时，是白茶毫香形成的物质基础[18]。

1.2 甜香、花香、果香、陈香、木香与药香

甜香、花香、果香是茶叶中最常见的香型。研究表明，甜香、花香、果香三者之间互为显著正相关，木香则与陈香、药香之间呈显著正相关[19]。雪松醇与α-松油醇是陈香、木香香型中检出频率较高的香气成分。其中，雪松醇通常呈木香，是陈年白茶、茯砖、普洱的特征香气成分，其含量随着贮藏年份的延长呈增加趋势[20]。普洱茶、安化黑茶、陈香型六堡茶、菌花香型六堡茶、陈年白茶的关键香气成分为α-松油醇，是在氧气和高温下，柠檬烯和芳樟醇等萜烯类物质通过双键水合、酯类脱水、环化与水解等一系列反应产生的[1]。

1.3 枣香、梅子香、蜜香、槟榔香与菌花香

蜜香、梅子香、枣香是白茶在贮藏过程中转化而来的香型。作者统计发现，仅有芳樟醇氧化物II、橙花醚与枣香呈显著正相关；而在普洱熟茶中，藏红花醛是调控枣香的关键挥发性代谢物[21]。醛类化合物在枣香型普洱茶中占据主导地位：壬醛和癸醛因香气阈值较低，奠定了枣香的主体香调，而苯甲醛、苯乙醛、(*E*)-2-壬烯醛等醛酮类成分通过协同作用丰富了枣香的香气层次[22]。与梅子香显著相关的香气成分仅有α-松油醇、顺式芳樟醇氧化物。张灵枝[13]研究发现，在贮藏9年的白牡丹茶样本中，棕榈酸等酸类物质含量大幅上升且维持在较高水平，推测其是造成陈年白茶梅子香形成的主要原因。石碧滢等[14]研究表明，顺式芳樟醇氧化物、α-法尼烯对梅子香的形成也具有重要的调控作用。也有研究指出，梅子香的生成可能与芳樟醇氧化物大量减少密切相关[23]。与蜜香呈显著正相关的物质为棕榈酸和4-异丙基甲苯。目前蜜香型白茶的研究较少，而在普洱毛茶中，芳樟醇氧化物II、*D*-柠檬烯、橙花叔醇、芳樟醇、β-紫罗兰酮和α-萜品醇是花蜜香型普洱毛茶香气的主要贡献成分[24]。有研究者将2-蒎烯与2-环己烯-1-酮作为六堡茶槟榔香的关键标志物，两者通过松木香与烘焙香的协同作用塑造了其独特的风味轮廓[25]。不同香型六堡茶的香气组分存在明显差异：陈香型六堡茶以陈香、烘烤香、木香属性的香气成分为主，槟榔香型六堡茶以薄荷香、烟熏香和辛香属性的香气成分为主，菌花香型六堡茶以薄荷香、木香、花香、果香和青气属性的香气成分为主[26]。金友兰[12]对不同菌花香型茯砖茶香气成分进行了对比分析，发现菌花香型茯砖茶以果香、花香、樟脑香属性的香气成分为主，熟菌香型茯砖茶以木香、青气、泥土气属性的香气成分为主，清菌香型茯砖茶以青气、蘑菇香属性的香气成分为主。该结论与前期研究的结果一致，证实菌花香是由多种香气共同形成的复合香型[27]。

2 白茶在贮藏期间香气及品质变化

2.1 白茶香气及成分在贮藏过程中的变化规律

白茶因其特殊的香气特征与药理价值而备受关注。研究表明，醇类、醛类物质是白茶的主体香气成分，高含量的醇类、醛类物质是构成新制白茶新鲜、清香、毫香的物质基础[2,28]，但也有研究表明，醇类、酯类物质是白茶的主要挥发性化合物[15,19]。随着贮藏时间的延长，白茶中醇类物质呈下降趋势。芳樟醇、氧化芳樟醇、香叶醇、苯乙醇作为新制白茶的特征香气成分，其含量随贮藏时间的延长逐渐降低，导致陈年白茶的清香、花香、毫香等典型风味逐渐减弱甚至消失[14]。同时，二氢猕猴桃内酯、2-甲基萘、雪松烯等物质含量的升高，构成了白茶陈香风味的物质基础，且在苯甲醛、α-紫罗兰酮、β-紫罗兰酮和香叶酮的协同作用下，丰富了贮藏白茶的香型，形成了陈香带枣香、酸梅子香的风味特征[15]。Wang等[19]对贮藏1~16年的紧压寿眉进行研究，发现在贮藏前5年，醇类是其主要的香气化合物；贮藏7~13年时，香气组

分以酯类为主；贮藏16年时，醛类物质含量最高。王志华等[29]研究发现，寿眉中2-乙酰基呋喃、庚醛二聚体、(*E*)-2-辛二醛的香气含量与贮藏年份呈正相关，且在贮藏16年时达到峰值。丁玎[28]对贮藏20年的寿眉茶进行分析，发现棕榈酸乙酯、三甲基硅酯棕榈酸等酸类物质含量显著升高，推测其主要原因是茶叶中不饱和脂肪酸在长期贮藏过程中发生氧化降解。

2.2 原料形态及嫩度对贮藏白茶香气品质的影响规律

按照形态，白茶可分为散茶和饼茶。散茶经压饼后香气成分发生明显变化，整体表现为醇类物质含量大幅下降，青气散失，陈香、药香特征开始显现。通过对比分析贮藏3年的散茶白茶及饼茶白茶的香气成分可知，己酸甲酯、顺式氧化芳樟醇（吡喃型）、*β*-紫罗兰酮、异甲基紫罗兰酮、二氢猕猴桃内酯等物质具有花香和清香，在压饼贮藏后含量降低甚至消失；雪松醇、雪松烯、石竹烯等物质具有木香，在压饼贮藏后含量升高。因此，饼茶在贮藏后陈香更浓郁并伴有枣香、木香、药香，而散茶贮藏后可保留更多的花果香风味。研究表明，水杨酸甲酯是构成白茶清新的物质基础，可赋予茶叶冬青香气[23]。白茶经压饼后，水杨酸甲酯含量明显下降，是由于该物质对光、热较为敏感，压饼过程的湿热条件促使水杨酸甲酯分解。随着贮藏时间的延长，水杨酸甲酯不断发生自氧化反应，含量不断降低，可作为陈年寿眉饼茶陈化的重要标志物[30]。詹冬梅等[31]对比了先压后藏、先藏后压、散茶存放3种贮藏方式下寿眉饼茶的香气变化，发现随着贮藏时间的延长，寿眉饼茶的香气品质整体优于寿眉散茶，且先压后藏处理方式更利于寿眉形成梅子香。

按照原料嫩度与等级，白茶可分为白毫银针、白牡丹、寿眉。其中，白毫银针在贮藏5年后香型变化较小，仍以清香为主；白牡丹贮藏后花果香更为突出；寿眉香型变化最为明显，贮藏后以陈香、木香为主，整体香气品质明显提升[32]。针对不同等级的饼茶香气研究发现，压饼贮藏后的白毫银针香气成分相对单一，而白牡丹、寿眉香气相对馥郁多样，且压饼贮藏更有利于提高陈年寿眉的醇化度[32-33]。

3 黑茶在贮藏期间香气及品质变化

3.1 普洱熟茶在贮藏期间的香气变化

陈香是云南普洱熟茶的特征香型，后发酵是其陈香风味形成的关键工序。甲氧基苯类物质是构成普洱熟茶陈味、霉味的核心物质，经渥堆工艺后其含量大幅增加[34]，但目前关于该类物质在贮藏期内含量的变化趋势尚未有定论。总体而言，贮藏期间甲氧基苯类物质，尤其是1,2,3-三甲氧基苯可维持较高含量[35-36]。研究表明，甲氧基苯类物质是普洱熟茶的主要香气物质，不仅奠定了其以陈香为主的香型，还可有效提升香气持久度。同时，酮类、烯类、酯类物质可以丰富普洱熟茶的香气层次[35]。若贮藏时间过长，普洱熟茶中关键香气挥发性物质减少则会导致香气减弱。

随着贮藏时间的延长，普洱熟茶因渥堆发酵带来的堆味会逐渐减弱甚至消失，甜香、木香物质则会随着时间的延长有所增加。有研究表明，普洱熟茶在贮藏1~3年内香气中带有明显的堆味和木香；贮藏3年后陈香和糖香出现，堆味和木香消失；贮藏7年以上香气以陈香为主[37]。通过对比新制普洱及贮藏6、25、30年的普洱样品发现，新茶的特征香气物质以愈创木烯为主，而陈茶以反-丁香烯为主[38-39]。也有研究表明，普洱陈茶的香气成分以*α*-雪松烯、长叶烯为主，未检测出反-丁香烯，并提出可将*α*-雪松烯含量作为普洱陈茶的特征指标[40]。

3.2 普洱生茶在贮藏期间的香气变化

普洱生茶是晒青毛茶经蒸压成型制成，新茶有清香与花蜜香，其香气成分主要以具有木香、花香的萜烯类和具有新鲜青草香气的二氢猕猴桃内酯为主[41]。随着贮藏时间的延长，普洱的香气成分会不断发生变化。通过对贮藏1~19年的普洱生茶感官审评发现，贮藏不足5年的普洱生茶以清香、花香为主；随着贮藏时间的延长，花香逐渐减弱，贮藏5年左右的茶叶开始显现沉香，贮藏15年左右陈香特征尤为明显[42]。在贮藏过程中，普洱生茶清香逐渐减弱，这可能与甲苯、间异丙基甲苯等苯类物质含量的升高及1-辛烯-3-醇、芳樟醇、1-戊醇、正己酸乙酯等物质含量降低有关；而陈香的形成与*D*-柠檬烯、己醛、*α*-松油醇、4-萜烯醇、脱氢芳樟醇、橙花叔醇、1,4-二甲氧基苯、1,2,4-三甲

氧基苯、1,3-二甲氧基苯等物质的大量积累有关[43]。其中，甲氧基苯类物质及其衍生物含量的大幅增加是普洱生茶形成独特陈香的主要原因[44]。田小军等[45]采用聚类分析法对贮藏2~11年的普洱生茶进行分析，发现茶叶贮藏到第8年和第10年时，香气成分较前期发生显著变化，其中甲氧基苯类物质含量大幅提升，较贮藏7年的样本分别增加了18.6倍和66.6倍。二氢猕猴桃内酯具有香豆素香、麝香香气和清香，是普洱生茶香气的重要贡献成分之一[46]，该成分在新茶中的含量较高，会随着贮藏时间的延长逐渐降低[47]。谌滢[36]比较了未发酵茶（普洱生茶）、发酵黑茶（普洱熟茶、茯砖茶、六堡茶、青砖茶）在贮藏期间香气成分的变化，发现（2*Z*）-2-戊烯-1-醇含量在普洱生茶贮藏过程中持续上升，而在发酵黑茶贮藏过程中逐渐减少，可作为区分未发酵茶类贮藏陈化的特征物质。

贮藏环境与温度是影响普洱生茶香气的重要因素。在干冷环境下贮藏的普洱生茶，其类胡萝卜素衍生物、糖苷衍生挥发物和酚类挥发物含量更高，香气表现为花香、清香、甜香；而湿热环境会促使茶叶中积累大量甲氧基苯类物质，导致了茶叶的陈香和木香[6]。贮藏温度的升高会明显改变茶叶的呈香物质，加速生茶的陈化进程。研究表明，35 ℃下贮藏8个月的普洱生茶香气转化效果优于25 ℃贮藏的样品[48]。与普洱熟茶相比，普洱生茶在贮藏期间香气的变化更易受贮藏条件的影响，而普洱熟茶香气的变化主要受原料本身特性影响[47]。

3.3 茯砖茶香气在贮藏期间的变化

茯砖茶因其特有的发花工艺，形成了区别于其他黑茶的香气特征。经正常发花后的茯砖茶，初始香型以菌花香、青草香、木香为主，果香、薄荷香为辅；但随着贮藏时间的延长，菌花香会逐渐减弱，陈香成为主导香型。研究表明，茯砖茶贮藏期<8年时，香气以菌花香、粗青气为主；贮藏8年左右，青气基本消失，香气以菌花香为主，且陈香开始出现；贮藏20年左右，香气以陈香为主；贮藏期>30年时，陈香中略带中药香[49]。陆英等[50]对9个不同贮藏年份的茯砖茶挥发性成分进行分析，发现贮藏过程中醛类、酮类物质占总挥发性成分的比例呈下降趋势。烯醛类物质是构成茯砖茶菌花香的关键成分，在发花工艺过程中含量显著升高[51]，但随着贮藏时间的延长不断减少[52]。黄亚辉等[53]研究发现，在新制茯砖茶中可检测出烯醛类物质，而贮藏26年和55年的陈年茯砖茶中并未检测到该物质。黄怀生等[52]研究发现，随着贮藏时间的延长，茯砖茶中醇类物质含量呈增加趋势，其中贮藏31年且具有典型木香的陈年茯砖茶中*α*-雪松醇、*α*-松油醇、*α*-雪松烯含量明显高于贮藏1年和3年的茯砖茶。贮藏7年的茯砖茶香气检测结果显示，反-2,4-癸二烯醛、反,反-2,4-壬二烯醛、柠檬醛I、柠檬醛II、正己醛和水杨酸甲酯对茯砖茶的菌花香具有突出贡献，而1,2,3-三甲氧基苯对茯砖茶的陈香具有突出贡献[54]。

3.4 其他黑茶在贮藏期间的香气变化

乔小燕[55]以贮藏1~30年的康砖茶为研究对象，系统分析其香气变化规律，发现贮藏1~6年的康砖茶以粗青气为主要香气特征，反-4-庚烯醛、顺-2-庚烯醛和愈创木酚是主要的赋香成分；贮藏10年时，粗青气基本被完全转化，木（坚果）甜香显现，是康砖茶陈化的关键转折点；贮藏10~22年是陈年康砖茶香气形成的关键时期；贮藏25~30年是陈年康砖茶干果香或药香形成的关键时期。六堡茶以独特的槟榔香为标志性香气，但六堡茶需贮藏8~10年才会形成明显的槟榔香，且随着贮藏年份的增加，*α*-雪松醇、*β*-雪松烯、1,2,3-三甲氧基、*β*-芳樟醇、氧化芳樟醇等香气物质不断积累，使得槟榔香愈发浓郁纯正[56]。

4 展望

作者综述了近年来黑茶与白茶在贮藏期间香型及香气成分变化的研究进展。结合现有研究，未来可从以下3个方面开展深入研究：1）目前的研究主要集中在茶叶香气物质的定性、定量分析及关键香气成分的挖掘，对香气品质变化机理研究较为薄弱；2）现有研究多集中于贮藏时间对茶叶香气成分和感官品质的影响，对于茶叶贮藏年份判别技术的研究较为匮乏，且现有判别方法的准确度有待提升；3）目前茶叶关键香气成分的研究多依托相对气味活性值、皮尔逊相关性分析、香气重组与缺失试验等方法，但这些方法均是基于香气化合物之间不存在相互作用的前提下，实际上不同化合物之间存在掩蔽效应、协同效应等复杂的互作效应，会直接影响茶叶关键香气成分的判断结果，因此后续需加强对茶叶香气成分互作机理的探究。

参考文献

[1] Liu P P, Feng L, Xu Y Q, et al. Characterization of stale odor in green tea formed during storage: unraveling improvements arising from reprocessing by baking[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 174: 114458.

[2] Chen Q C, 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.

[3] Tao M, Xiao Z P, Huang A, et al. Effect of 1-20 years storage on volatiles and aroma of Keemun congou black tea by solvent extraction-solid phase extraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 136: 110278.

[4] Shen S S, Wu H T, Li T H, et al. Formation of aroma characteristics driven by volatile components during long-term storage of An tea[J]. Food Chemistry, 2023, 411: 135487.

[5] Pérez-Burillo S, Jiménez-Zamora A, Párraga J, et al. Furosine and 5-hydroxymethylfurfural as chemical markers of tea processing and storage[J]. Food Control, 2019, 99: 73-78.

[6] Xu S S, Zeng X S, Wu H T, et al. Characterizing volatile metabolites in raw Pu'er tea stored in wet-hot or dry-cold environments by performing metabolomic analysis and using the molecular sensory science approach[J]. Food Chemistry, 2021, 350: 129186.

[7] 宋晓月, 吴志锋, 邱慕涛, 等. 不同年份武夷岩茶水仙主要滋味物质分析与感官评价[J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 170-175, 191.
Song X Y, Wu Z F, Qiu M T, et al. Analysis of main taste substances and sensory evaluation of Shuixian Wuyi rock tea *Narcissus* in different years[J]. Food & Machinery, 2024, 40(6): 170-175, 191.(in Chinese)

[8] Zheng X X, Xie H, Fu W J, et al. Perceptual interactions of key aroma compounds in Fu brick tea: odor threshold, sensory, and E-nose analysis[J]. Current Research in Food Science, 2025, 10: 101004.

[9] 黄创盛. 白茶特征香气成分及萎凋成香代谢机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023: 49-50.

[10] 聂枞宁. 基于风味组学的茶叶香味与成分的映射关联评价研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020: 111.

[11] 彭禹熙. 湖南茯砖茶特征香气成分分析[D]. 天津: 天津科技大学, 2022: 33.

[12] 金友兰. 茯砖茶不同风味特征品质成分研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021: 50.

[13] 张灵枝. 白茶产地溯源与年份鉴别研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2023: 78.

[14] 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]. 食品科学, 2023, 44(14): 313-325.
Shi B Y, Zhou C Z, Tian C Y, et al. Differences in flavor quality between white peony tea with different storage times[J]. Food Science, 2023, 44(14): 313-325.(in Chinese)

[15] 黄维, 张灵枝, 张嘉琳, 等. 不同贮藏年份政和白茶的香气特征与挥发性成分分析[J]. 茶叶科学, 2023, 43(5): 667-680.
Huang W, Zhang L Z, Zhang J L, et al. Analysis of aroma characteristics and volatile components of Zhenghe white tea with different storage years[J]. Journal of Tea Science, 2023, 43(5): 667-680.(in Chinese)

[16] Li Q, Li Y D, Luo Y, et al. Characterization of the key aroma compounds and microorganisms during the manufacturing process of Fu brick tea[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 127: 109355.

[17] 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 H F, Lin Q Z, Zhu C, et al. GC-MS analysis of aroma components of white tea with six different aroma types[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(10): 91-97.(in Chinese)

[18] 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 S T, Qu F F, Zhang X F, et al. Research on white tea fragrance based on electronic nose technology[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 2020, 37(4): 258-263.(in Chinese)

[19] Wang Z H, Wang Z H, Dai H M, et al. Identification of characteristic aroma and bacteria related to aroma evolution during long-term storage of compressed white tea[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1092048.

[20] 侯智炜, 许姗姗, 曹琼, 等. 青砖茶主要化学成分在储存及渥堆过程中代谢分析[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(4): 594-599.
Hou Z W, Xu S S, Cao Q, et al. Chemical changes of Qingzhuan tea with different storage and different pile time[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2018, 45(4): 594-599.(in Chinese)

[21] Tian D, Ma C Y, Zhou X H, et al. Reveal the influence mechanism of different storage containers on the flavor of ripe Pu-erh tea based molecular sensory science[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 214: 117073.

[22] Chen G H, Xiao W L, Lin Z C, et al. Unraveling the mysterious jujube-like aroma in Pu-erh tea: decoding the

material basis for distinctive aroma formation[J]. Food Research International,2025,214:116620.

[23] 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 L Y, Zhou Z W, Deng H L, et al. Analysis of the aromatic components in white tea produced in different years[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2015, 44(1): 27-33.(in Chinese)

[24] 孙振杰. 古茶树普洱毛茶香气检测及其花蜜香成分评鉴[D]. 杭州:中国计量大学,2020:57.

[25] Gong S J, Zhang Z R, Chen J, et al. Enhanced understanding of dark tea quality through integrated GC-IMS and E-nose analysis[J]. LWT-Food Science and Technology,2025,224:117806.

[26] 洪鑫. 不同香型六堡茶特征香气成分及核心功能微生物群落研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2022:36.

[27] 朱艳,胡腾飞,黄甜,等. 茯砖茶感官特征定量描述与风味轮构建[J]. 食品与生物技术学报,2023(9):1-9.
Zhu Y, Hu T F, Huang T, et al. Sensory characteristics of fu brick tea by quantitative descriptive analysis and construction of flavor wheel[J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2023(9):1-9.(in Chinese)

[28] 丁玎. 不同等级和储藏时间白茶主要化学品质成分分析[D]. 合肥:安徽农业大学,2016:33.

[29] 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 Z H, Xue Z H, Zhu W W, et al. Analyses of volatile compounds in compressed white tea of different years based on GC-IMS[J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2021,40(8):85-94.(in Chinese)

[30] 傅海峰. 陈年白茶压饼与贮藏研究[D]. 福州:福建农林大学,2019:54.

[31] 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 D M, Fu H F, Zhou C Z, et al. Effect of storage years and pressing methods on the flavor quality of Shoumei[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022,41(5):81-89.(in Chinese)

[32] 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 Z D, Li P, Chen X H, et al. Effect of compressed processing on the aroma of aged white tea[J]. Science and Technology of Food Industry,2020,41(5):63-69.(in Chinese)

[33] 陈志达. 白茶风味品质的物质基础与量化评价研究[D]. 杭州:浙江大学,2019:33.

[34] 陈保,徐明发,姜东华,等. 不同普洱茶原料渥堆发酵过程中香气成分的变化研究[J]. 食品安全质量检测学报,2018,9(2):284-293.
Chen B, Xu M F, Jiang D H, et al. Variation of aromatic components during Pu'er tea fermentation process of different raw materials[J]. Journal of Food Safety & Quality,2018,9(2):284-293.(in Chinese)

[35] 王志霞. 普洱茶(熟茶)陈香特征物质及关键香气成分研究[D]. 昆明:云南农业大学,2023:56.

[36] 谌滢. 黑茶陈化过程中品质转化研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2018:54.

[37] 谢吉林,张偎,陈孝权,等. 普洱熟茶贮藏过程中香气变化分析[J]. 食品科学,2015,36(10):154-157.
Xie J L, Zhang W, Chen X Q, et al. Analysis of changes in aroma constituents during storage of ripe Pu'er tea[J]. Food Science,2015,36(10):154-157.(in Chinese)

[38] 王若娴. 茯砖茶与普洱茶特征性香气成分研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2022:79.

[39] 张灵枝,王登良,陈维信,等. 不同贮藏时间的普洱茶香气成分分析[J]. 园艺学报,2007,34(2):504-506.
Zhang L Z, Wang D L, Chen W X, et al. Determination of volatiles of Puer tea stored for different lengths of time[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2007, 34(2): 504-506.(in Chinese)

[40] 陈梅春,陈峥,史怀,等. 陈年普洱茶特征风味成分分析[J]. 茶叶科学,2014,34(1):45-54.
Chen M C, Chen Z, Shi H, et al. Analysis on characteristic flavor components of aged Pu-erh tea[J]. Journal of Tea Science,2014,34(1):45-54.(in Chinese)

[41] Pang X L, Yu W S, Cao C D, et al. Comparison of potent odorants in raw and ripened Pu-erh tea infusions based on odor activity value calculation and multivariate analysis: understanding the role of pile fermentation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(47)13139-13149.

[42] 谌滢,欧行畅,张杨波,等. 不同储藏年份普洱生茶感官品质的分析[J]. 食品科技,2018,43(4):48-52.
Chen Y, Ou X C, Zhang Y B, et al. Organoleptic quality analysis of raw Pu-er teas in different storage years[J]. Food Science and Technology,2018,43(4):48-52.(in Chinese)

[43] 赵阳,龚加顺,王秋萍. 古树普洱茶生茶贮藏过程中香气成分的变化[J]. 食品科学,2022,43(4):241-248.
Zhao Y, Gong J S, Wang Q P. Change in aroma components of raw Pu-erh tea from ancient tea trees during storage[J]. Food Science,2022,43(4):241-248.(in Chinese)

[44] Du L P, Li J X, Li W, et al. Characterization of volatile compounds of Pu-erh tea using solid-phase microextraction and simultaneous distillation-extraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Research International, 2014, 57: 61-70.

[45] 田小军，王杰，邓宇杰，等. 不同贮藏时间普洱生茶的特征性香气成分分析[J]. 食品与发酵工业，2016，42（12）：194-202.
Tian X J, Wang J, Deng Y J, et al. Characteristic aroma components analysis of raw Pu'er tea at different storage time[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(12): 194-202.(in Chinese)

[46] 张曦，刘玲，童华荣. 普洱茶生茶挥发性成分分析[J]. 西南农业学报，2014，27（1）：94-98.
Zhang X, Liu L, Tong H R. Analysis of volatile components of Pu-erh tea[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(1): 94-98.(in Chinese)

[47] 王梦倩，盛玉泊，范怡航，等. 不同仓储条件下普洱茶关键成分分析及品质评价[J]. 食品研究与开发，2022，43（16）：35-43.
Wang M Q, Sheng Y B, Fan Y H, et al. Key components and quality evaluation of Pu-erh tea with different storage conditions[J]. Food Research and Development, 2022, 43(16): 35-43.(in Chinese)

[48] 张文彦，朱春华，周红杰，等. 普洱生茶在贮藏过程中香气成分的变化[J]. 食品科学，2010，31（12）：153-155.
Zhang W Y, Zhu C H, Zhou H J, et al. Changes in aromatic components in raw Pu-erh tea during storage[J]. Food Science, 2010, 31(12): 153-155.(in Chinese)

[49] 李适，谌滢，傅冬和，等. 不同年份茯砖茶感官品质研究[J]. 茶叶科学，2016，36（5）：500-504.
Li S, Shen Y, Fu D H, et al. Organoleptic quality analysis of Fuzhuan brick teas in different storage years[J]. Journal of Tea Science, 2016, 36(5): 500-504.(in Chinese)

[50] 陆英，陈金华，钟晓红，等. 不同年份茯砖茶的挥发性成分差异[J]. 湖南农业大学学报（自然科学版），2016，42（2）：186-192.
Lu Y, Chen J H, Zhong X H, et al. Difference of volatile constituents of Fuzhuan tea produced in different years[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2016, 42(2): 186-192.(in Chinese)

[51] Xu X Q, Mo H Z, Yan M C, et al. Analysis of characteristic aroma of fungal fermented Fuzhuan brick-tea by gas chromatography/mass spectrophotometry[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2007, 87(8): 1502-1504.

[52] 黄怀生，赵熙，粟本文，等. 不同年份安化茯砖茶香气物质分析[J]. 湖南农业科学，2015（12）：62-65.
Huang H S, Zhao X, Su B W, et al. Analysis of aromatic components of different-year Fuzhuan tea in Anhua[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2015(12): 62-65.(in Chinese)

[53] 黄亚辉，王娟，曾贞，等. 不同年代茯砖茶香气物质测定与分析[J]. 食品科学，2011，32（24）：261-266.
Huang Y H, Wang J, Zeng Z, et al. Analysis of aroma constituents of Fuzhuan tea produced in different years[J]. Food Science, 2011, 32(24): 261-266.(in Chinese)

[54] 邓见田烨，晏美红，尚铂昊，等. 基于HS-SPME-GC-MS技术分析不同种类黑茶香气成分[J]. 食品工业科技，2023，44（18）：378-386.
Deng J T Y, Yan M H, Shang B H, et al. Study on aroma components in different types of dark tea based on HS-SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 378-386.(in Chinese)

[55] 乔小燕. 康砖茶贮藏过程中品质成分变化规律及贮藏年份综合评鉴研究[D]. 长沙：湖南农业大学，2020：57.

[56] 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，2016，29（3）：36-42.
Liu Z S, Deng Q S, He Z Q, et al. Research on the characteristic aroma components of Areca-flavored Liupao tea[J]. Agricultural Research and Application, 2016, 29(3): 36-42.(in Chinese)