DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260122003
引用格式: 王梦娇, 刘志达, 李祖云, 等. 原料等级与季节对‘秧塔大白茶’白茶感官品质、生化及挥发性成分的影响分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(16): 58–69.
Wang Mengjiao, Liu Zhida, Li Zuyun, et al. Analysis of the effects of raw material grade and season on the sensory quality, biochemistry and volatile components of ‘Yangta Dabaicha’ white tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(16): 58–69. (in Chinese with English abstract).

原料等级与季节对‘秧塔大白茶’白茶感官品质、生化及挥发性成分的影响分析

王梦娇[1,2], 刘志达[2], 李祖云[2], 刘顺航[2], 戚亚辉[2], 方崇业[1*]
(1. 云南农业大学食品科学技术学院, 昆明 650201; 2. 云南天士力帝泊洱生物茶集团有限公司, 普洱 665000)

摘 要: 目的 探究不同原料等级(月美人、月光白和月光寿)与季节对‘秧塔大白茶’白茶风味品质的影响。**方法** 采用感官审评、超高效液相色谱法(ultra performance liquid chromatography, UPLC)结合顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法(headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)对其感官品质、主要生化指标、挥发性成分进行分析。**结果** 不同原料等级与季节所制‘秧塔大白茶’白茶品质存在明显差异, 其中月美人总得分相对较高, 且在不同季节所制‘秧塔大白茶’白茶感官品质较为稳定。春季生产的‘秧塔大白茶’白茶中水浸出物含量相对较高; 月美人的茶多酚含量高于其他品种; 月光白的氨基酸总量最高; 在同一季节月美人的酚氨比、咖啡碱含量最高。在‘秧塔大白茶’白茶中共检测出 71 种挥发性物质和 14 种共有挥发性成分。以相对气味活力值(relative odor active value, rOAV)和变量投影值(variable importance in the projection, VIP)大于 1 为筛选标准, 鉴定出 7 种差异香气活性成分, 包括芳樟醇、芳樟醇氧化物 II、芳樟醇氧化物 III、β-紫罗兰酮、芳樟醇氧化物 I、二氢猕猴桃内酯和苯乙醛。**结论** ‘秧塔大白茶’白茶具有显著的品种特异性, 表现为极高的水浸出物和丰富的单萜醇类香气。月美人以其稳定的芳樟醇、苯乙醛和 β-紫罗兰酮组合, 在不同季节均展现出优异的毫香与甜香特征, 是该品种标准化生产的首选原料等级。本研究结果可为‘秧塔大白茶’白茶风味品质物质基础研究提供理论参考。

关键词: ‘秧塔大白茶’; 感官品质; 主要生化成分; 挥发性成分
中图分类号: TS272.5 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)16–0058–12

Analysis of the effects of raw material grade and season on the sensory quality, biochemistry and volatile components of ‘Yangta Dabaicha’ white tea

WANG Meng-Jiao[1,2], LIU Zhi-Da[2], LI Zu-Yun[2], LIU Shun-Hang[2], QI Ya-Hui[2], FANG Chong-Ye[1*]
(1. *College of Food Science and Technology*, *Yunnan Agricultural University*, *Kunming* 650201, *China*; 2. *Yunnan Tasly Deepure Biological Tea Group Co*., *Ltd*. , *Pu’er* 665000, *China*)

收稿日期: 2026-01-22
第一作者: 王梦娇(1990—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为茶叶深加工。E-mail: 2424608519@qq.com
***通信作者:** 方崇业(1979—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为云南省食药同源资源开发与利用。E-mail: ffccyy2@163.com

ABSTRACT: Objective　To investigate the flavor quality of ‘Yangta Dabaicha’ white tea made from different raw material grade (Yuemeiren, Yuanguangbai and Yuanguangshou) across various seasons. **Methods**　The sensory quality, main biochemical indicators and volatile components were analyzed by sensory evaluation, ultra performance liquid chromatography (UPLC) and headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). **Results**　Significant differences in the quality of ‘Yangta Dabaicha’ white tea made from different raw material grade across various seasons. Among them, the Yuemeiren obtained the highest total sensory score, and the sensory quality of ‘Yangta Dabaitea’ produced in different seasons was relatively stable. Analysis of biochemical components revealed that ‘Yangta Dabaicha’ white tea harvested in Spring had a higher content of water-soluble extracts. Specifically, the Yuemeiren contained higher tea polyphenol content than other varieties; the Yueguangbai variety had the highest total amino acid content; within the same season, the Yuemeiren showed the highest phenol-to-amino acid ratio and caffeine content. The 71 kinds of volatile substances and 14 kinds of common volatile components were detected in the ‘Yangta Dabaicha’ white tea. Using relative odor activity value (rOAV) and variable importance in projection (VIP) greater than 1 as screening criteria, 7 kinds of differential aroma-active compounds were identified, including linalool, linalool oxide II, linalool oxide III, *β*-ionone, linalool oxide I, dihydrochalcone and phenylacetaldehyde. **Conclusion**　‘Yangta Dabaicha’ white tea exhibits distinct varietal characteristics, featuring exceptionally high water-soluble extracts and abundant monoterpene alcohol aromas. The Yuemeiren, with its stable combination of linalool, phenylacetaldehyde and *β*-ionone, demonstrates outstanding downy and sweet fragrance profiles across different seasons, making it the preferred raw material grade for standardized production of this variety. These findings provide a theoretical references for understanding the flavor quality characteristics of ‘Yangta Dabaicha’ white tea. The results of this study can provide theoretical references for the research on the material basis of the flavor and quality of ‘Yangta Dabaicha’ white tea.

KEY WORDS: ‘Yangta Dabaicha’; sensory quality; major biochemical components; volatile components

0　引　言

白茶作为中国传统六大茶类之一, 以其独特的轻微发酵工艺而闻名, 其品质形成深受茶树品种和采摘季节的影响[1–2]。白茶的加工过程相对简单, 主要包括萎凋和干燥, 这使得茶叶的天然生物活性物质得以最大限度地保留, 赋予其独特的风味和健康益处[3–4]。近年来, 随着消费者对健康和天然饮品需求的增长, 白茶的市场关注度持续上升, 但其品质的复杂性和多变性也为标准化生产和质量控制带来了挑战[5]。‘秧塔大白茶’是原产于云南省景谷傣族彝族自治县民乐镇大村秧塔寨的乔木型茶树品种。该品种植株高大, 芽叶肥硕披覆浓密白毫, 成茶具有外形壮硕重实、汤色清亮、回甘持久的特征。2023年通过国家非主要农作物品种登记, 成为普洱市首个国家级无性系茶树新品种[6]。

白茶的品质特征与内含的丰富生化成分有关, 这些成分的种类和含量受到多种因素的综合调控[2,7]。原料是决定茶叶生化组成的基础。例如, ‘政和大白茶’‘福安大白茶’和‘福鼎大毫茶’这些茶树品种加工所制的白牡丹茶在化学成分和感官品质上存在显著差异[5]。不同原料所制白茶中的儿茶素、氨基酸、挥发性化合物等关键物质含量各不相同, 这些差异直接影响了白茶的口感、香气和营养价值[8–10]。此外, 加工工艺塑造白茶的风味。在烘干、烘干和晒干处理下的汝城白毛茶白茶感官存在明显差异, 其中烘干样品具有更强烈的花香和草香, 烘干样品表现出更明显的新鲜和白毫香气, 晒干样品表现出独特的日晒气味[11]。室内萎凋、在萎凋罐或在阳光下萎凋的白茶品质也存在明显区别[12]。白茶香气采摘季节也是影响白茶品质的关键因素[2]。茶树在不同生长季节所处的环境条件, 如温度、光照、降水等, 都会对其体内生化物质的合成和积累产生显著影响[13–14]。通常认为, 春季采摘的茶叶品质最佳, 这与春季气温适中, 茶树生长缓慢, 有利于茶多酚、氨基酸和咖啡因等风味物质的积累有关[15–16]。西南地区两种茶树品种所制白茶的研究表明, 春茶在挥发性化合物和生化成分上表现出与夏茶和秋茶显著不同的特征, 这直接影响了其感官品质[2]。一些研究也证实, 与夏茶相比, 春茶往往具有更高的茶氨酸和咖啡因含量, 以及更低的儿茶素含量, 这些因素共同塑造了春茶更醇厚、鲜爽的口感[16–17]。尽管已有研究分别探讨了茶树品种和采摘季节对茶叶品质的影响[5,14,16], 但针对不同原料等级与不同季节交互作用下‘秧塔大白茶’白茶品质差异仍有待深入研究。

本研究运用感官评价、生化成分分析和顶空固相微萃取-气相色谱质谱法(headspace solid-phase microextraction-gas chromatography mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)对不同原料等级和季节所制‘秧塔大白茶’白茶的生化组

成、挥发性化合物和感官品质差异性进行探究。本研究为‘秧塔大白茶’白茶的标准化生产、优质优价和品牌建设提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

本研究所用茶样的鲜叶采自同一茶园(样品信息详见表 1)。需选择晴天进行, 雨天及雾天不适宜采摘; 鲜叶经室内自然萎凋, 工艺参数为: 温度 20~25 ℃, 相对湿度 60%~80%, 萎凋时间 36~72 h, 萎凋叶含水率控制在 10%~15%; 待茶叶达到七八成干后进行日晒干燥, 最终经精制加工而成。

表 1 样品信息
Table 1 Information of samples

编号	类型	茶树品种	生产时间	产地
YMRC	月美人	秧塔大白茶	2024 年春季	景谷傣族彝族自治县民乐镇
YGBC	月光白		2024 年春季	
YGSC	月光寿		2024 年春季	
YMRX	月美人		2024 年夏季	
YGBX	月光白		2024 年夏季	
YGSX	月光寿		2024 年夏季	
YMRQ	月美人		2024 年秋季	
YGBQ	月光白		2024 年秋季	
YGSQ	月光寿		2024 年秋季	

氯化钠(NaCl, 纯度 99.80%, 上海麦克林生化科技有限公司); 甲醇(色谱纯)、氧化镁(分析纯)(天津市风船化学试剂科技有限公司); 无水碳酸钠(分析纯, 天津市大茂化学试剂厂); 没食子酸(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 福林酚(分析纯, 北京索莱宝科技有限公司); 甲醇、磷酸氢二钠(分析纯, 西陇科学股份有限公司); 磷酸二氢钾(分析纯, 天津市恒兴化学试剂制造有限公司); 茚三酮(分析纯, 天津市大茂化学试剂厂); 正癸醇(纯度≥99.5%, 上海腾准生物科技有限公司); 咖啡因(纯度 99.8%, 中国计量科学研究院); 茶氨酸(纯度 99.9%, 天津阿尔塔科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

Trace1310 ISQLT气相色谱-质谱联用仪、BF51766kc-1高温电阻炉(美国赛默飞世尔科技公司); Rtx-5MS 石英毛细管柱(美国 Restek 公司); 65 μm PDMS/DVB 萃取头(美国 Supelco公司); ME204T电子分析天平(精度 0.1 mg, 德国赛多利亚公司); AL104 电子天平(精度 0.1 mg, 瑞士 Mettler Toledo 公司); E2695 高效液相色谱仪(美国沃特世公司); UV-2550 紫外分光光度计[岛津仪器(苏州)有限公司]; FED115 电热鼓风干燥箱(德国 BINDER 公司); DK-S14 电热恒温水浴锅(上海森信实验仪器有限公司); SHB-IIIA 循环水式真空泵(郑州长城科工贸易有限公司); SC-3616 低速离心机(安徽中科中佳仪器有限公司); FST-I-30 超纯水机(上海富诗特仪器设备有限公司); BJ-400A 多功能粉碎机(德清拜杰电器有限公司); RTX-5 MS 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm, 瑞思泰康科技有限公司上海分公司)。

1.3 方 法

1.3.1 感官审评

按照 GB/T 16291.1—2012《感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则》中的感官审评小组的建立与培训方法, 通过考核进一步筛选出具备中级及以上资格的 5 名评茶员作为感官审评小组。审评小组按照 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》对茶叶的外形、汤色、香气、滋味、叶底进行审评并打分, 感官审评成员对每个样品独立重复评分 3 次, 各因素占比调整为: 外形 10%、汤色 15%、香气 30%、滋味 35%、叶底 10%, 加权评分为百分制。

1.3.2 理化成分检测

水分测定参考 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》(第一法: 直接干燥法); 灰分测定参考 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》(第一法: 食品中总灰分的测定 以干物质计); 水浸出物测定参考 GB/T 8305—2013《茶 水浸出物测定》; 茶多酚测定参考 GB/T 8313-2018《茶叶中茶多酚和儿茶素含量的检测方法》(分光光度法); 咖啡因测定参考 GB 5009.139—2014《食品安全国家标准 饮料中咖啡因的测定游离氨基酸总量》(以茶氨酸计): GB/T 8314—2013《茶 游离氨基酸总量的测定》。

1.3.3 挥发性成分检测

HS-SPME 分析: 茶叶原料进行粉碎处理, 过 60 目筛, 得茶粉。取茶粉 0.5 g, 置于 20 mL 顶空瓶中, 加入配制好的 10 μL 内标溶液(正癸醇, 66.5 mg/L), 饱和NaCl溶液 6 mL, 密封顶空瓶。将样品瓶置于具有加热功能的孵化炉中, 在 70 ℃条件下平衡 5 min, 然后使用 65 μm PDMS/DVB 的萃取头吸附香气物质, 吸附时间 60 min, 然后在GC进样口将香气物质释放, 解吸附时间 3 min, 同时启动仪器收集数据。

GC 条件: 色谱柱 RTX-5 MS (30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 进样口温度 250 ℃; 恒流模式, 流量 1.0 mL/min, 载气(氦气, 纯度≥99.99%); 升温程序: 初始温度 50 ℃, 保持 3 min, 以 3 ℃/min升至180 ℃, 保持5 min, 再以 10 ℃/min升至250 ℃, 保持 5 min, 整体用时 63.33 min; 分流模式, 分流比: 50: 1。

MS 条件: 电离子方式为电子轰击离子源; 电离能量 70 eV; 接口温度为 250 ℃, 离子源温度 250 ℃, 传输线温度 250 ℃, 四极杆温度为 250 ℃; 扫描方式为全扫描; 质量扫描范围 *m/z* 35~350 amu, 溶剂延迟时间为 1 min。

1.3.4 挥发性化合物的定性定量分析

根据美国国家标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST) 20 标准质谱库检索, 筛选出匹配度大于 80%的成分, 并查阅有关文献进行定性分

析。采用内标法对挥发性化合物进行定量, 各组分含量的计算方法: 香气成分相对含量=(香气成分物质峰面积×内标物相对含量×加入内标体积)与内标物峰面积之比。

1.3.5　相对气味活力值分析

根据检测到的挥发性化合物, 搜索、查阅和比较当前报告文献中化合物的最低阈值。相对气味活力值(relative odor active value, rOAV)等于每种化合物的相对含量与其报告化合物的最小阈值之比。

1.4　数据处理

使用 Excel 2021 软件进行挥发性成分数据分析。测试结果表示为平均值±标准偏差。使用 SIMCA-P 进行主成分分析(principal component analysis, PCA)和偏最小二乘判别分析(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)。使用 Origin 2021 软件绘制百分比堆积图和含量堆积图。使用 TBtools-II 软件绘制热图。

2　结果与分析

2.1　‘秧塔大白茶’白茶感官品质分析

感官评价是茶叶品质判别的一种常用方法, 通过感官评价能够初步判断茶样的品质差异。本研究对不同原料及其不同季节所制‘秧塔大白茶’白茶进行感官审评。如表 2 和图 1 所示, ‘秧塔大白茶’品种所制白茶在感官品质存在明显差异。春季生产的白茶以“清鲜”为核心特征。YMRC、YGBC、YGSC 在香气上表现为“清香纯正”或“毫香显”, 滋味则呈现出“鲜爽”与“鲜醇”的特点。其中月美人的感官品质得分相对较高, 在不同季节总得分在 86.4~87.2 之间, 在香气上主要表现为有毫香、甜香和嫩香, 滋味上表现为鲜甜回甘, 在外形上表现为芽毫肥壮、匀整、匀净、白底褐面, 汤色上表现为黄、明亮, 叶底上表现为褐泛红、尚软嫩。在感官品质方面, 春季生产的‘秧塔大白茶’品质外形、色泽、滋味、香气以及叶底优于夏季和秋季生产的‘秧塔大白茶’。

2.2　‘秧塔大白茶’白茶生化成分分析

如表 3 所示, 茶叶中水浸出物的高低主要反映茶叶的内含物质丰富度。‘秧塔大白茶’样品中水浸出物在 36.2%~49.9%, 其中春季生产的茶中水浸出物含量普遍高于夏季和秋季。其次, 茶多酚和游离氨基酸是茶汤重要的滋味物质, 分别决定涩味和鲜爽味的关键成分。‘秧塔大白茶’茶多酚含量在 15.2%~24.9%, 其中月美人的茶多酚含量高于其他品种, 且夏季茶多酚的含量高于其他季节, 达 24.9%。‘秧塔大白茶’的游离氨基酸总量在 3.7%~4.9%, 月光白的氨基酸总量最高, 达 4.9%。酚氨比是反映茶叶滋味浓度与鲜度协调度的重要指标, 酚氨比较低时, 有利于白茶高鲜品质的形成。在同一季节月美人的酚氨比最高, 且夏季展现出相对较高的比值, 达 6.73。此外, 咖啡碱是影响茶叶苦味的重要物质, ‘秧塔大白茶’中咖啡碱的含量在 3.1%~3.9%, 在同一季节月美人的咖啡碱含量最高。

表 2　‘秧塔大白茶’白茶感官评价结果

Table 2　Sensory evaluation results of ‘Yangta Dabaicha’ white tea

编号	外形(10%)		汤色(15%)		香气(30%)		滋味(35%)		叶底(10%)		总分
	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	
YMRC	芽毫略瘦, 匀整、匀净, 较黄绿, 略带红褐叶片	86	黄, 亮	83	甜香, 有嫩香, 有毫香	88	醇厚, 较鲜爽	88	黄绿, 略花杂, 尚软嫩	81	86.4
YGBC	叶态自然舒展, 部分略卷曲, 有毫心, 较匀整, 较匀净, 墨绿色	84	黄, 明亮	84	甜香尚浓	85	醇厚	82	黄绿, 有红叶, 尚嫩	78	83.0
YGSC	叶态舒展, 略有毫尖, 尚匀整, 尚匀净, 红褐色	80	黄, 明	83	清香, 有甜香	84	醇厚	82	黄绿, 泛红, 欠嫩	77	82.1
YMRX	芽毫肥壮, 匀整、匀净, 白底褐面, 略偏黄	89	浅黄明亮	86	清香, 有甜香	84	鲜醇回甘	89	泛红, 尚软嫩	78	86.0
YGBX	叶态自然舒展, 毫心较显, 尚肥壮, 较匀整, 较匀净, 红褐色	82	浅黄明亮	86	甜香尚浓, 略有清香	86	纯正	81	黄泛红, 尚嫩	75	82.8
YGSX	叶态舒展, 有毫尖, 尚匀整, 尚匀净, 褐色	80	浅黄明亮	86	清香纯正	82	醇厚, 尚爽	83	红褐, 欠嫩	76	82.2
YMRQ	芽毫肥壮, 匀整、匀净, 白底褐面	90	黄, 明	82	甜香纯正, 香气高,持久	90	鲜醇回甘	89	褐泛红, 尚软嫩	77	87.2
YGBQ	叶态自然舒展, 部分略卷曲, 有毫心, 较匀整, 较匀净, 褐泛红	82	黄, 明亮	84	甜香浓, 有花香	87	浓醇	84	暗褐, 欠嫩	73	83.6
YGSQ	叶态自然, 有破张, 褐片, 少量腊片, 尚匀	71	黄, 明	82	甜香, 有花香	86	浓醇	83	暗绿, 叶张粗	71	81.3

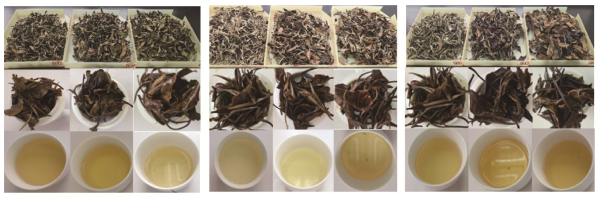


图 1 ‘秧塔大白茶’白茶外形、叶底和汤色差异

Fig.1 Differences in appearance, leaf base and soup color of ‘Yangta Dabaicha’ white tea

2.3 ‘秧塔大白茶’白茶香气成分分析

2.3.1 ‘秧塔大白茶’白茶挥发性成分分析

为探究不同原料等级与季节所制‘秧塔大白茶’白茶的香气差异, 采用 HS-SPME-GC-MS 对其挥发性成分进行检测。结果显示(表 4), 共鉴定出 71 种挥发性物质, 可分为 6 类, 包括醇类(22 种)、醛类(8 种)、碳氢化合物(9 种)、酮类(18 种)、酯类(6 种)和其他类(8 种)。如图 2A 所示, 醇类化合物是‘秧塔大白茶’白茶中的主要挥发性成分, 含量远高于其他种类化合物。于娟等[18]发现醇类对于白茶的香气具有重要的贡献, 芳樟醇、苯甲醇、苯乙醇、香叶醇等芳香醇类化合物有助于白茶显现出花蜜香和甜香。此外, 春季所制‘秧塔大白茶’挥发性化合物含量明显高于夏季和秋季(图 2B)。基于 71 种挥发性化合物的含量, 采用 PCA 对 9 个‘秧塔大白茶’白茶样品进行差异性和相似性分析。结果显示(图 2C), 春季所制‘秧塔大白茶’白茶与夏季和秋季存在明显分离。制备的‘秧塔大白茶’白茶中有 14 种共有挥发性成分, 分别为芳樟醇、芳樟醇氧化物 I、芳樟醇氧化物 II、苯乙醇、(*E*)-芳樟醇氧化物(吡喃型)、*α*-松油醇、水杨酸甲酯、咖啡因、苯乙醛、*β*-环柠檬醛、大马士酮、*β*-紫罗兰酮、螺内酯和二氢猕猴桃内酯。

春季样品中, 以芳樟醇及其氧化物为代表的花香类物质含量达到全年峰值。其中, YGBC 的芳樟醇含量高达 1001.34 μg/kg, 显著高于夏、秋两季。此外, 水杨酸甲酯在春季的富集(38.93~71.08 μg/kg)为春茶提供了特有的清凉感与辛香气息。夏季样品中苯乙醇与苯乙醛等具有甜玫瑰香气的化合物含量较春季有所上升。例如, YGSX 的苯乙醇含量从春季的 15.98 μg/kg 增长至 70.15 μg/kg, 反映了高温季节对苯丙烷类代谢途径的促进作用。秋季样品中 *β*-紫罗兰酮含量激增, YGSQ 中达到 129.23 μg/kg, 赋予了秋茶浓郁的花香。同时, 秋季样品中咖啡因含量普遍高于春夏两季, 构成了秋茶厚重的滋味与香气基础。原料等级通过改变挥发性物质的浓度, 影响感官的层次感。无论在何种季节, 月美人的总分均高于同季节其他等级。这可能与 *α*-松油醇等高级醇类物质的积累, 且二氢芳樟醇和橙花醇仅在春季月美人被检测到有关。

表 3 ‘秧塔大白茶’白茶主要生化指标

Table 3 Main biochemical indicators of ‘Yangta Dabaicha’ white tea

编号	含水量/%	水浸出物/%	茶多酚/%	咖啡碱/%	游离氨基酸总量/%	酚氨比
YMRC	10.9	49.9	22.3	3.7	4.7	4.74
YGBC	11.1	49.5	21.9	3.6	4.9	4.47
YGSC	10.3	48.8	21.7	3.5	4.5	4.82
YMRX	10.3	46.1	24.9	3.5	3.7	6.73
YGBX	11.2	42.8	22.2	3.2	3.8	5.84
YGSX	11.3	42.6	20.5	3.1	4.0	5.13
YMRQ	11.2	44.6	21.7	3.9	4.8	4.52
YGBQ	12.6	39.4	16.8	3.9	4.5	3.73
YGSQ	10.2	36.2	15.2	3.4	4.0	3.80

表 4 ‘秧塔大白茶’白茶挥发性物质分析

Table 4 Analysis of volatile substances of ‘Yangta Dabaicha’ white tea

类别	化合物	保留时间/min	CAS	化学式	含量/(μg/kg)								
					YMRC	YGBC	YGSC	YMRX	YGBX	YGSX	YMRQ	YGBQ	YGSQ
醇类	4-甲基-5-己烯-2-醇	6.96	71228-22-3	$C_7H_{14}O$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	1.52
	3-甲基-2-己醇	7.42	2313-65-7	$C_7H_{16}O$	#N/A	#N/A	2.53	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	3.22	17.59
	2-庚醇	7.43	543-49-7	$C_7H_{16}O$	#N/A	1.66	#N/A	0.40	1.61	1.84	#N/A	#N/A	#N/A
	1-辛烯-3-醇	10.55	3391-86-4	$C_8H_{16}O$	#N/A	#N/A	4.89	9.70	2.29	#N/A	#N/A	1.87	#N/A
	1-己烯-3-醇	10.56	4798-44-1	$C_6H_{12}O$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	0.14
	芳樟醇氧化物 I	14.68	5989-33-3	$C_{10}H_{18}O_2$	114.15	106.02	95.58	81.42	70.92	51.92	37.97	41.97	32.46
	芳樟醇氧化物 II	15.41	34995-77-2	$C_{10}H_{18}O_2$	239.36	293.90	251.87	189.70	143.96	117.13	90.37	74.36	55.61
	芳樟醇	15.95	78-70-6	$C_{10}H_{18}O$	709.58	1001.34	812.94	592.47	440.28	288.66	475.45	315.32	251.78
	二氢芳樟醇	16.17	29957-43-5	$C_{10}H_{16}O$	39.91	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	2,6-二甲基-1,7-辛二烯-3,6-二醇	16.17	51276-33-6	$C_{10}H_{18}O_2$	#N/A	42.83	#N/A	41.80	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	2,4-二甲基环己醇	16.32	69542-91-2	$C_8H_{16}O$	9.62	13.01	14.21	10.24	10.90	9.24	7.66	10.64	13.58
	苯乙醇	16.70	1960/12/8	$C_8H_{10}O$	16.18	18.40	15.98	49.25	57.93	70.15	87.12	71.96	44.07

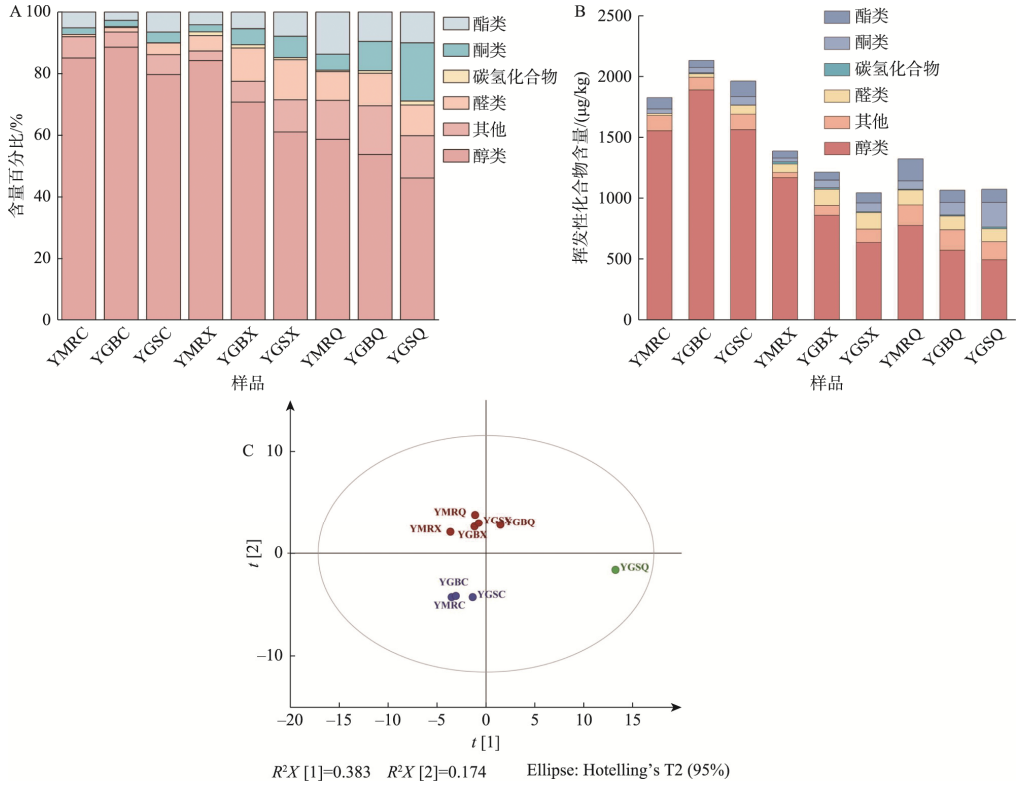
表 4(续)

类别	化合物	保留时间/min	CAS	化学式	含量/(μg/kg)								
					YMRC	YGBC	YGSC	YMRX	YGBX	YGSX	YMRQ	YGBQ	YGSQ
醇类	(*E*)-芳樟醇氧化物(吡喃型)	19.42	39028-58-5	$C_{10}H_{18}O_2$	237.75	292.53	245.05	131.34	94.79	74.21	47.03	41.45	40.72
	(*Z*)-芳樟醇氧化物(吡喃类)	19.61	14009-71-3	$C_{10}H_{18}O_2$	#N/A	0.09	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	α-松油醇	20.16	98-55-5	$C_{10}H_{18}O$	149.32	65.53	50.51	51.15	29.13	16.23	24.86	9.23	7.59
	2-(3,3-二甲基双环[2.2.1]庚-2-亚基)乙醇	20.64	2226/5/3	$C_{11}H_{18}O$	#N/A	#N/A	#N/A	4.79	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	(2*R*,5*R*)-2-甲基-5-丙烷-2-基双环[3.1.0]己烷-2-醇	21.91	17699-16-0	$C_{10}H_{18}O$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	0.32
	2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-呋喃-3-醇	22.00	14049-11-7	$C_{10}H_{18}O_2$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	0.95
	香叶醇	23.26	106-24-1	$C_{10}H_{18}O$	#N/A	#N/A	#N/A	0.07	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	2*Z*,6*E*-金合欢醇	23.29	3790-71-4	$C_{10}H_{18}O$	#N/A	#N/A	#N/A	0.09	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	橙花醇	23.36	106-25-2	$C_{10}H_{18}O$	0.04	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	4,8-二甲基-1,7-壬二烯-4-醇	24.21	17920-92-2	$C_{11}H_{20}O$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	0.63	#N/A	2.48	12.39
其他	2-正戊基呋喃	11.02	3777-69-3	$C_9H_{14}O$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	3.45
	6-氮杂双环[3.2.1]辛烷	12.63	279-85-6	$C_7H_{13}N$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	2.06	4.95	#N/A
	N-乙基琥珀酰亚胺	17.77	2314-78-5	$C_6H_9NO_2$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	2.03	#N/A	1.29	1.05
	Edulan II	23.18	41678-30-2	$C_{13}H_{20}O$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	3.32	#N/A	#N/A	2.84	5.05
	Edulan I	25.71	41678-29-9	$C_{13}H_{20}O$	8.16	#N/A	#N/A	0.56	5.27	5.04	2.59	5.28	2.86
	5-苯基戊酸	25.71	2270-20-4	$C_{11}H_{14}O_2$	#N/A	#N/A	1.21	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	茶螺烷	25.73	36431-72-8	$C_{13}H_{22}O$	#N/A	2.73	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	咖啡因	46.33	1958/8/2	$C_8H_{10}N_4O_2$	117.95	101.91	126.34	41.46	73.42	102.27	162.83	153.69	134.01
醛类	苯甲醛	9.77	100-52-7	C_7H_6O	#N/A	#N/A	#N/A	2.17	2.75	2.63	1.11	0.99	0.28
	苯乙醛	13.39	122-78-1	C_8H_8O	10.3	12.54	13.15	50.02	62.02	72.66	72.91	50.65	23.95
	壬醛	16.17	124-19-6	$C_9H_{18}O$	#N/A	#N/A	40.54	#N/A	39.17	36.9	31.28	34.34	34.12
	藏红花醛	20.59	116-26-7	$C_{10}H_{14}O$	#N/A	9.99	9.28	#N/A	5.33	5.77	0.54	3.76	4.73
	癸醛	20.86	112-31-2	$C_{10}H_{20}O$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	0.77
	2-(4-甲基-3-环己烯-1-基)丙醛	21.39	29548-14-9	$C_{10}H_{16}O$	1.10	#N/A	#N/A	1.38	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	β-环柠檬醛	21.55	432-25-7	$C_{10}H_{16}O$	3.84	7.23	10.57	15.62	21.98	17.95	17.89	22.88	36.73
	桃醛	27.92	104-67-6	$C_{11}H_{20}O_2$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	0.40	6.49
碳氢化合物	1,4-二甲基-2-十八基环己烷	12.75	55282-02-5	$C_{26}H_{52}$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	2.16	#N/A
	2-荜烯	21.91	464-17-5	$C_{10}H_{16}$	#N/A	7.12	#N/A	17.46	11.12	5.26	3.94	1.02	#N/A
	十四烷	29.33	629-59-4	$C_{14}H_{30}$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	0.70	#N/A	0.78	1.15	4.26
	3-甲基十五烷	36.14	2882-96-4	$C_{16}H_{34}$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	1.89
	正十九烷	37.28	629-92-5	$C_{19}H_{40}$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	1.18	#N/A	1.52	4.80	7.35
	3-乙基-5-(2-乙基丁基)十八烷	37.28	55282-12-7	$C_{26}H_{54}$	#N/A	#N/A	#N/A	0.74	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	十六烷	37.30	544-76-3	$C_{16}H_{34}$	#N/A	0.70	1.09	#N/A	#N/A	1.57	#N/A	#N/A	#N/A
	十五烷	33.39	629-62-9	$C_{15}H_{32}$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	1.87
	十八烷	44.49	593-45-3	$C_{18}H_{38}$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	0.36
酮类	甲基庚烯酮	10.91	110-93-0	$C_8H_{14}O$	#N/A	#N/A	0.70	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	0.72
	3,4-二甲基-1,5-二氢-2H-吡咯-2-酮	12.75	4030-22-2	C_6H_9NO	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	0.16	#N/A	#N/A
	2,2,6-三甲基环己酮	12.93	2408-37-9	$C_9H_{16}O$	#N/A	#N/A	#N/A	0.89	0.89	1.58	#N/A	1.63	3.30
	7-亚甲基二环[3.2.0]庚-3-烯-2-酮	13.54	119487-76-2	C_8H_8O	1.62	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	异佛尔酮	14.10	78-59-1	$C_9H_{14}O$	#N/A	#N/A	0.61	#N/A	#N/A	0.67	#N/A	2.43	6.00
	5-乙基-6-甲基庚-3-烯-2-酮	18.15	57283-79-1	$C_{10}H_{18}O$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	3.67

表 4(续)

类别	化合物	保留时间/min	CAS	化学式	含量/(μg/kg)								
					YMRC	YGBC	YGSC	YMRX	YGBX	YGSX	YMRQ	YGBQ	YGSQ
酮类	Beta-大马酮	23.19	35044-68-9	$C_{13}H_{20}O$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	2.57	#N/A	#N/A
	紫罗兰酮	24.10	8013-90-9	$C_{13}H_{20}O$	0.21	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	大马士酮	28.76	23726-93-4	$C_{13}H_{18}O$	12.82	5.51	6.10	16.46	27.76	29.98	30.44	24.37	9.49
	4-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-3-丁烯-2-酮	30.08	1203-08-3	$C_{13}H_{18}O$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	0.49	#N/A	#N/A	#N/A
	α-紫罗兰酮	30.56	127-41-3	$C_{13}H_{20}O$	#N/A	0.94	#N/A	#N/A	0.78	1.52	#N/A	5.69	14.15
	4-(2,6,6-三甲基-2-环己烯-1-基)-3-丁烯-2-酮	30.56	6901-97-9	$C_{13}H_{20}O$	#N/A	#N/A	1.38	0.12	#N/A	#N/A	0.75	#N/A	#N/A
	香叶基丙酮	31.61	3796-70-1	$C_{13}H_{22}O$	#N/A	#N/A	0.96	#N/A	#N/A	0.14	#N/A	0.19	#N/A
	6,10-二甲基-5,9-十一双烯-2-酮	31.62	689-67-8	$C_{13}H_{22}O$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	0.06	12.49
	β-紫罗兰酮	32.96	79-77-6	$C_{13}H_{20}O$	23.29	36.8	46.14	14.42	29.07	33.15	25.73	60.13	129.23
	顺-1-甲基双环癸烷-2,10-二酮	34.56	83406-41-1	$C_{11}H_{16}O_2$	#N/A	#N/A	13.10	#N/A	4.57	5.32	9.31	6.85	22.15
	3-(2-戊烯)-1,2,4-环戊三酮	34.85	54644-27-8	$C_{10}H_{12}O_3$	#N/A	#N/A	#N/A	0.15	0.09	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	植酮	46.06	502-69-2	$C_{18}H_{36}O$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	1.51
酯类	1-甲基-4-(1-甲基乙烯基)环己醇乙酸酯	12.62	10198-23-9	$C_{12}H_{20}O_2$	0.8	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	乙酸十一烯基酯	14.11	106251-09-6	$C_8H_{14}N_2$	#N/A	#N/A	#N/A	0.85	1.75	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	螺内酯	26.36	1952/1/7	$C_{24}H_{32}O_4S$	41.36	8.69	55.21	31.16	23.69	28.17	151.08	42.44	15.19
	二氢猕猴桃内酯	34.66	17092-92-1	$C_{11}H_{16}O_2$	51.71	48.83	72.60	25.23	40.71	53.96	30.18	59.47	75.53
	甲基丙烯酸正己酯	13.97	142-09-6	$C_{10}H_{18}O_2$	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	13.76
	水杨酸甲酯	20.34	119-36-8	$C_8H_8O_3$	38.93	54.70	71.08	8.15	8.93	8.37	7.07	1.15	3.07

注: #N/A 表示该化合物在茶样中未被发现。表 5 同。



注: A. 种类百分比堆积图; B. 含量堆积图; C. 挥发性成分 PCA。

图 2 ‘秧塔大白茶’白茶挥发性成分分析

Fig.2 Analysis of volatile components in ‘Yangta Dabaicha’ white tea

2.3.2　‘秧塔大白茶’白茶香气活性成分筛选

风味学家认为在茶叶中检测到的挥发性成分仅有一小部分对茶香气形成有贡献, 把这一部分挥发性成分称为香气活性成分[5,19]。气味活力值(odor active value, OAV)是目前茶叶中检测香气活性成分常用的方法之一, 通常认为OAV>1 的挥发性化合物对茶香气形成具有贡献, OAV>50 对茶香气形成具有突出贡献[1]。OAV 的大小通常与香气活性物质的阈值有着紧密的联系, 然而目前文献已报道的阈值大小不一。例如, Xiao 等[20]和 Pang 等[21]在使用正己醛的阈值时分别用 0.005 μg/kg 和 10 μg/kg, 相差 20000 倍; 蒋容港等[22]和 Kang 等[23]在使用苯乙醛的阈值时, 分别使用 0.04 μg/kg 和 4 μg/kg, 相差 100 倍。可见, 阈值大小选择的不同, 会导致香气活性物质的遗漏。为尽可能减少香气活性物质的遗漏, 通过查找文献并进行比对, 确认出 37 种化合物相对较小的阈值。通过 rOAV 计算, 从 37 种挥发性物质中筛选出 22 种气味活性物质。结果显示, 9 个白茶样品中 rOAV 均大于 1 的物质有 10 种(表 5): 芳樟醇、芳樟醇氧化物 I、芳樟醇氧化物 II、*α*-松油醇、水杨酸甲酯、苯乙醛、*β*-环柠檬醛、大马士酮、*β*-紫罗兰酮和二氢猕猴桃内酯, 这些气味活性物质对‘秧塔大白茶’总体香气贡献度较大。

在挥发性成分方面, 茶叶的香气成分因原料差异和加工工艺的不同而有所差异。吴应奇等[19]采用 GC-MS 结合 OAV 对不同地区桂北大叶种古树白茶中挥发性成分进行分析, 发现芳樟醇、香叶醇、大马士酮等 21 种关键香气活性成分被确认为对桂北大叶种白茶香气具有突出贡献。安勤等[1]采用全二维气相色谱-飞行时间质谱法结合 rOAV 对不同品种‘汝城白茶毛茶’白茶的香气特征进行分析, 发现不同物质对‘汝城白毛茶’不同的香气特征具有贡献。此外, 不同香气物质差异造成白茶整体香型差异。其中苯甲醛对汝城白毛茶白茶的清香具有贡献, 正己醛对清香形成具有关键作用, 苯甲醛、芳樟醇氧化物 II 和芳樟醇氧化物 I 对薄荷香形成具有关键作用, 蘑菇醇、柠檬醛和顺-4-庚烯醛对毫香具有关键作用。已有研究表明, 白茶中常见的关键芳香活性化合物是 1-辛烯-3-醇、芳樟醇、苯乙醇、香叶醇、*β*-紫罗兰酮、*α*-紫罗兰酮等[24–25], 这与本研究结果相似。芳樟醇在本研究中含量相对较高, 达 251.78~1001.34 μg/kg, 且由于其相对较低的阈值, 展现出很高的 OAV (41963.24~166890.64), 与以往研究结果相一致[1,25]。此外, 芳樟醇及其氧化物(I、II)是茶叶中最为常见的单萜醇类化合物, 通常具有花香, 在多种茶类中被确认为关键香气物质[26–28]。*α*-松油醇具有清新的丁香或松木香气, 在茯砖茶中含量相对较高, 被认为是黑茶基本香气的关键成分[29–32]。水杨酸甲酯在红茶中被确认为关键香气物质, 主要赋予红茶花香和草香[31]。苯乙醛主要呈现甜香和蜂蜜香, 在 *β*-葡萄糖苷酶处理的速溶白茶香气形成中展现出至关重要的作用[33]。*β*-环柠檬醛在不同品种白牡丹茶展现出相对较高的含量, 赋予白茶花果香[34]。大马士酮具有花香和甜香, 在绿茶中具有较高的 OAV, 被确认为关键香气物质[35]。*β*-紫罗兰酮具有紫罗兰花香和果香, 在祁门红茶中其浓度与高等级茶样的花蜜香呈正相关[36]。二氢猕猴桃内酯具有木香, 在红茶中被确认为关键香气物质[37]。由于白茶香气品质可能受到其他因素的影响, 还需进一步控制变量并增加实验样品为进一步挖掘‘秧塔大白茶’的自身品质优势评定提供更好的客观依据。

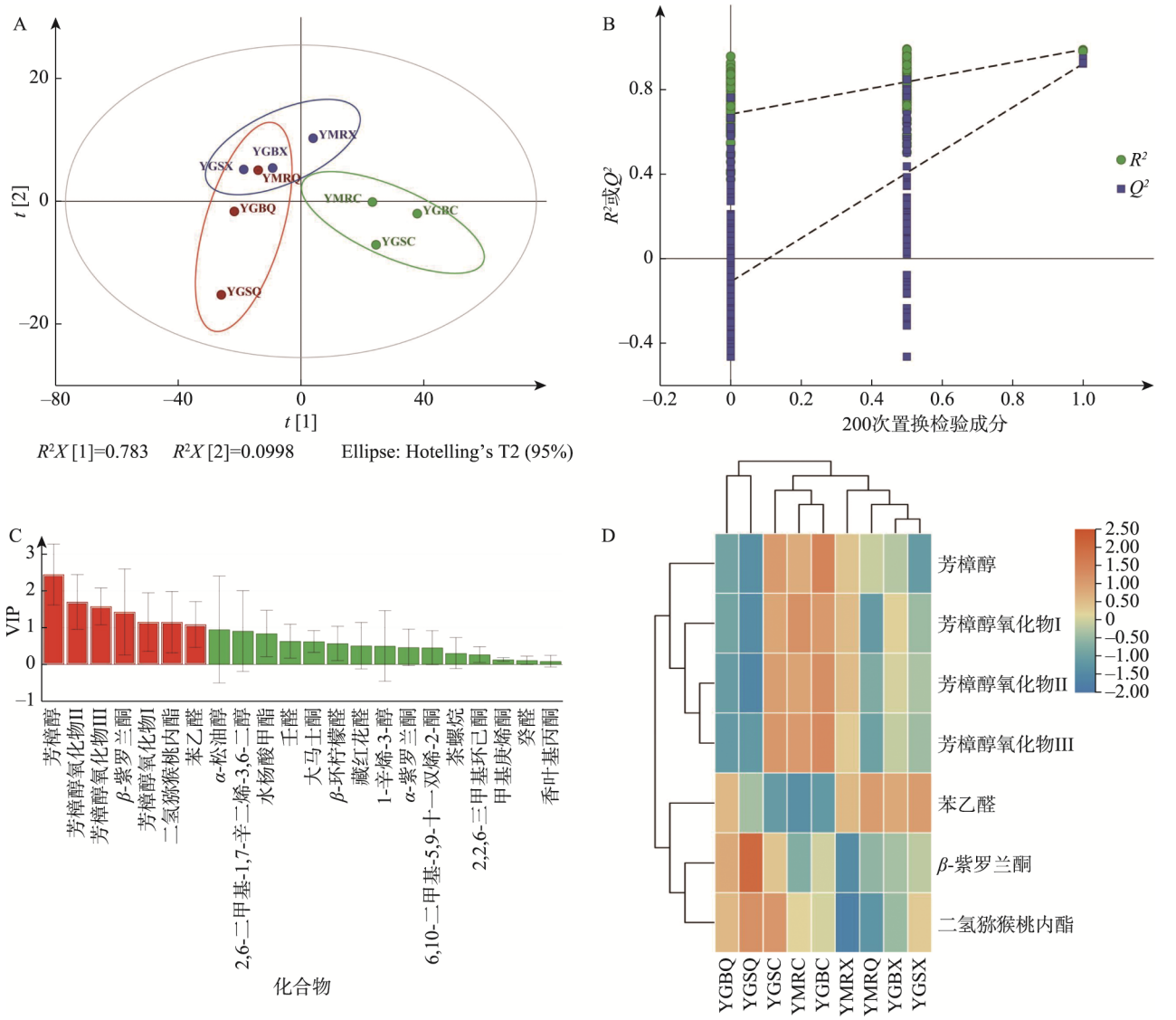
2.3.3　春季‘秧塔大白茶’白茶与其他季节香气活性成分差异性分析

根据筛选出的‘秧塔大白茶’白茶香气活性成分含量进行 PLS-DA。结果显示(图 3A、B), 春季样品的香气图谱与夏季、秋季存在显著分离, 验证了季节因素对‘秧塔大白茶’挥发性代谢谱的塑造作用。本研究发现虽然 Q^2 为负值(–0.11), 反映出模型在预测未知样本时的泛化能力受限, 但其在解释当前实验组间差异(R^2X=0.783)及筛选 VIP 特征物质方面仍具较高的参考价值。基于 VIP>1 筛选出 7 种差异香气活性成分(图 3C), 按贡献度排序依次为: 芳樟醇>芳樟醇氧化物 II>芳樟醇氧化物 III>*β*-紫罗兰酮>芳樟醇氧化物 I>二氢猕猴桃内酯>苯乙醛。基于‘秧塔大白茶’中差异香气活性成分的含量, 进一步对‘秧塔大白茶’样品作热图聚类分析(图 3D)。结果显示, 芳樟醇及其氧化物(I、II、III)在春季显著富集。这主要归功于春季温和的气候有利于萜烯类前体物质的积累, 为‘秧塔大白茶’赋予了典型的清鲜“毫香”。此外, ‘秧塔大白茶’作为乔木型大叶种, 其芽叶肥硕且表面物理特征对光、热响应剧烈。夏季强光诱导了苯丙烷类路径的下行代谢流, 通过积累茶多酚(24.9%)来发挥抗氧化及避光保护作用。在香气层面, 夏季样品中苯乙醛(甜香、蜂蜜香)含量显著上升, 作为夏季的关键差异活性成分, 有效补充了高温季节所需的甜香感知。秋季样品中 *β*-紫罗兰酮和二氢猕猴桃内酯 的含量达全年峰值。其中 *β*-紫罗兰酮赋予了秋茶浓郁的紫罗兰花香, 二氢猕猴桃内酯则贡献了温和的木香, 二者共同支撑了秋季‘秧塔大白茶’厚重、持久的香气基础。值得注意的是, 月美人等级在不同季节的总得分最为稳定(86.4~87.2), 其核心竞争力可能与香气组分的动态补偿机制有关。春季以高含量的芳樟醇及其氧化物贡献“毫香”; 通过苯乙醛与 *β*-紫罗兰酮在夏秋季节的交替富集, 抵消了春季单萜醇类流失带来的风味稀释, 使其感官上始终表现出“甜香纯正、香气高、持久”的特征。此外, ‘秧塔大白茶’作为乔木型品种, 其芽叶对环境光热条件反应灵敏。夏季高水平的茶多酚积累(24.9%)反映了其在强紫外线环境下的生理保护机制, 即通过加强苯丙烷类代谢路径合成类黄酮类物质 。虽然这导致了夏季样品的酚氨比较高(6.73), 但在挥发性代谢层面, 夏季所制月美人白茶通过维持较高的苯乙醛含量, 有效缓解了感官上的单调感。

表 5 ‘秧塔大白茶’白茶挥发性化合物 rOAV 分析

Table 5 rOAV analysis of volatile compounds in ‘Yangta Dabaicha’ white tea

化合物	阈值/(μg/kg)	气味描述	rOAV								
			YMRC	YGBC	YGSC	YMRX	YGBX	YGSX	YMRQ	YGBQ	YGSQ
2-庚醇	425	油味, 似蔬菜气	#N/A	<1	#N/A	<1	<1	<1	#N/A	#N/A	#N/A
1-辛烯-3-醇	0.04	青气, 油味	#N/A	#N/A	122.32	242.40	57.26	#N/A	#N/A	46.71	#N/A
芳樟醇氧化物 I	0.32	甜香, 花香	356.71	331.32	298.69	254.44	221.62	162.24	118.66	131.15	101.42
芳樟醇氧化物 II	0.19	甜香, 花香	1259.78	1546.82	1325.64	998.42	757.69	616.45	475.61	391.36	292.67
芳樟醇	0.006	甜香, 花香	118262.88	166890.64	135490.21	98745.37	73380.05	48109.33	79241.33	52552.60	41963.24
二氢芳樟醇	110	花香, 果香	<1	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
2,6-二甲基-1,7-辛二烯-3,6-二醇	1	木香	#N/A	42.83	#N/A	41.80	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
苯乙醇	390	玫瑰花香	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
芳樟醇氧化物 III	50	木香	4.76	5.85	4.90	2.63	1.90	1.48	<1	<1	<1
α-松油醇	0.3	愉悦的花香	497.73	218.44	168.37	170.50	97.10	54.09	82.86	30.77	25.31
水杨酸甲酯	0.04	青气	973.35	1367.49	1776.94	203.86	223.34	209.34	176.77	28.74	76.63
香叶醇	1.1	玫瑰花香,甜香	#N/A	#N/A	#N/A	<1	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
橙花醇	0.3	花香, 甜香	<1	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
2-正戊基呋喃	5.8	青气, 果香	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	<1
Edulan I	100	似玫瑰花香	<1	#N/A	#N/A	<1	<1	<1	v1	<1	<1
茶螺烷	0.2	蜂蜜香	#N/A	13.65	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
十五烷	13000000	烷烃类	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	<1
咖啡因	177000	#N/A	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
苯甲醛	3	果香	#N/A	#N/A	#N/A	<1	<1	<1	<1	<1	<1
苯乙醛	0.04	甜香, 蜂蜜香	257.52	313.39	328.69	1250.45	1550.40	1816.49	1822.71	1266.37	598.86
壬醛	1	花香, 青气	#N/A	#N/A	40.54	#N/A	39.17	36.90	31.28	34.34	34.12
藏红花醛	0.7	木香, 药香	#N/A	14.28	13.25	#N/A	7.61	8.25	<1	5.37	6.76
癸醛	0.1	脂肪气	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	7.69
β-环柠檬醛	3	药香	1.28	2.41	3.52	5.21	7.33	5.98	5.96	7.63	12.24
十四烷	10000	烷烃类	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	<1	#N/A	<1	<1	<1
正十九烷	10000000	烷烃类	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	<1	#N/A	<1	<1	<1
十六烷	300000	烷烃类	#N/A	<1	<1	#N/A	#N/A	<1	#N/A	#N/A	#N/A
十八烷	20	烷烃类	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	<1
甲基庚烯酮	0.05	果香	#N/A	#N/A	13.99	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	14.45
2,2,6-三甲基环己酮	0.1	蜂蜜香	#N/A	#N/A	#N/A	8.93	8.89	15.82	#N/A	16.30	33.04
异佛尔酮	11	果香, 甜香,木香	#N/A	#N/A	<1	#N/A	#N/A	<1	#N/A	<1	<1
大马士酮	0.002	花香, 甜香	6411.78	2756.02	3051.67	8231.35	13882.18	14991.44	15220.62	12183.17	4746.03
α-紫罗兰酮	0.4	紫罗兰花香,甜香	#N/A	2.35	#N/A	#N/A	1.95	3.80	#N/A	14.22	35.36
香叶基丙酮	0.06	似玫瑰花香, 青气	#N/A	#N/A	15.98	#N/A	#N/A	2.28	#N/A	3.14	#N/A
6,10-二甲基-5,9-十一双烯-2-酮	0.06	似玫瑰花香, 青气	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	<1	208.17
β-紫罗兰酮	0.004	花香, 甜香	5822.10	9199.49	11533.90	3605.80	7266.88	8287.08	6432.06	15032.43	32307.81
二氢猕猴桃内酯	0.5	木香	103.42	97.65	145.20	50.46	81.42	107.92	60.37	118.94	151.07



注：A. PLS-DA; B. 置换检验; C. VIP; D. 热图聚类分析。

图 3　‘秧塔大白茶’白茶差异香气活性成分分析

Fig.3　Analysis of differential aroma active components in ‘Yangta dabaicha’ white tea

3　结　论

‘秧塔大白茶’产于云南省，该品种植株高大，芽叶肥硕披覆浓密白毫，成茶具有外形壮硕重实、汤色清亮、回甘持久的特征。本研究采用感官评价、主要生化成分分析和挥发性成分分析对不同原料等级与季节所制‘秧塔大白茶’白茶的感官品质进行探究。感官评价结果表明，‘秧塔大白茶’白茶品质受季节影响显著，春季品质优于夏、秋季。月美人等级表现出最优且最稳定的感官特性。主要生化成分分析结果表明，春季生产的‘秧塔大白茶’白茶中水浸出物含量相对较高；月美人品种加工的‘秧塔大白茶’白茶的茶多酚含量高于其他品种；月光白品种加工的‘秧塔大白茶’白茶氨基酸总量最高；在同一季节月美人品种所制‘秧塔大白茶’白茶酚氨比最高；在同一季节月美人的咖啡碱含量最高。此外，在不同原料等级与季节所制的‘秧塔大白茶’白茶中共检测出 71 种挥发性物质，春季所制‘秧塔大白茶’白茶挥发性化合物含量明显高于夏季和秋季，其中芳樟醇、芳樟醇氧化物 I、芳樟醇氧化物 II、(*E*)-芳樟醇氧化物(吡喃型)、*α*-松油醇、水杨酸甲酯相对于夏季和秋季的展现出较高的含量。基于 rOAV>1，筛选出 22 种气味活性物质，其中，芳樟醇及其氧化物是支撑月美人“毫香”的核心成分，而苯乙醛与 *β*-紫罗兰酮的季节性波动则是其“甜香”的基础。总之，‘秧塔大白茶’白茶具有显著的品种特异性，表现为极高的水浸出物和丰富的单萜醇类香气。月美人等级以其稳定的芳樟醇、苯乙醛和 *β*-紫罗兰酮组合，在不同季节均展现出优异的毫香与甜香特征，是该品种标准化生产的首选原料等级。‘秧塔大白茶’作为乔木型品种，其丰富的生化内含物和以单萜醇类为主的香气构型，为其标准化

生产和优质优价提供了客观依据。

参考文献

[1] 安勤, 鲍肃都, 陈宏宇, 等. 基于 GC×GC-QTOF-MS 分析不同品种汝城白毛茶白茶的香气特征[J]. 食品科学, 2025, 46(4): 163–171.
An Qin, Bao Sudu, Chen Hongyu, et al. Analysis of key aroma compounds in three varieties of Rucheng white tea by comprehensive two-dimensional gas chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry [J]. Food Science, 2025, 46(4): 163–171.

[2] Huang Fan, Wu Haijun, Luo Fan, et al. Effect of harvest seasons on biochemical components and volatile compounds in white teas from two cultivars [J]. Foods, 2025, 14(10): 1795.

[3] Xiang Lihui, Zhu Chen, Qian Jiajia, et al. Positive contributions of the stem to the formation of white tea quality-related metabolites during withering [J]. Food Chemistry, 2024, 449: 139173.

[4] Chen Qincao, Zhu Yin, Dai Weidong, et al. Aroma formation and dynamic changes during white tea processing [J]. Food Chemistry, 2019, 274: 915–924.

[5] Zheng Yucheng, Zhang Yuping, Zou Yun, et al. Chemical profiling and sensory analysis reveal quality differentiation in baimudan white tea processed from three major Fujian tea cultivars [J]. Horticulturae, 2025, 11(10): 1196.

[6] 云南省农业科学院茶叶研究所. 秧塔大白茶选育成功[J]. 云南科技管理, 2023, 36(2): 65.
Tea Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences. Breeding of Yangta Dabai tea successfully [J]. Yunnan Science and Technology Management, 2023, 36(2): 65.

[7] Li Jia, Wang Jiaqin, Yao Yuefeng, et al. Phytochemical comparison of different tea (*Camellia sinensis*) cultivars and its association with sensory quality of finished tea [J]. LWT, 2020, 117: 108595.

[8] 王若娴, 黄翔翔, 李勤, 等. 不同类型白茶儿茶素、香气成分与感官品质比较[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 315–321.
Wang Ruoxian, Huang Xiangxiang, Li Qin, et al. Comparison of catechins, aroma components and sensory quality of different types of white tea [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5): 315–321.

[9] 童慧霖, 范方媛, 田宇倩, 等. 白茶感官滋味特征属性及相关贡献组分研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 286–293.
Tong Yilin, Fan Fangyuan, Tian Yuqian, et al. Taste-characteristic attributes and related contribution compounds of white tea [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(7): 286–293.

[10] 戴浩民, 张灵枝, 梁轶琳, 等. 乌龙茶茶树品种制白茶的风味特征及特征组分分析[J]. 食品科学, 2024, 45(2): 229–239.
Dai Haomin, Zhang Lingzhi, Liang Yilin, et al. Analysis of flavor characteristics and characteristic components of white tea made from oolong tea cultivars [J]. Food Science, 2024, 45(2): 229–239.

[11] Chen Hongyu, Zhang Xingmin, Jiang Ronggang, et al. Characterization of aroma differences on three drying treatments in Rucheng Baimao (*Camellia pubescens*) white tea [J]. LWT, 2023, 179: 114659.

[12] Wu Huiting, Chen Yuyu, Feng Wanzhen, et al. Effects of three different withering treatments on the aroma of white tea [J]. Foods, 2022, 11(16): 2502.

[13] Kumar A, Chawla V, Sharma E, et al. Comparative transcriptome analysis of Chinary, Assamica and Cambod tea (*Camellia sinensis*) types during development and seasonal variation using RNA-seq technology [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 37244.

[14] Benti T, Debela A, Bekele Y, et al. Effect of seasonal variation on yield and leaf quality of tea clone [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] in South West Ethiopia [J]. Heliyon, 2023, 9(3): e14051.

[15] 王新超, 马春雷, 姚明哲, 等. 影响绿茶季节间品质差异的生化因子探析[J]. 西北植物学报, 2011, 31(6): 1229–1237.
Wang Xinchao, Ma Chunlei, Yao Mingzhe, et al. Biochemical components affected the seasonal differences of green tea quality [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31(6): 1229–1237.

[16] Dai Weidong, Qi Dandan, Yang Ting, et al. Nontargeted analysis using ultraperformance liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry uncovers the effects of harvest season on the metabolites and taste quality of tea (*Camellia* sinensis L.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(44): 9869–9878.

[17] Liu Chengshun, Li Jianlong, Li Hanxiang, et al. Differences in the quality of black tea (*Camellia sinensis* var. Yinghong No.9) in different seasons and the underlying factors [J]. Food Chemistry, 2023, 20: 100998.

[18] 于娟, 黄媛, 曹媚, 等. 不同干燥温度与干燥时间对云南白茶香气的影响研究[J]. 茶叶通讯, 2025, 52(2): 214–221.
Yu Juan, Huang Yuan, Cao Mei, et al. Study on the effects of different drying temperatures and drying times on the aroma of Yunnan white tea [J]. Tea Communication, 2025, 52(2): 214–221.

[19] 吴应奇, 陈婷, 黎敏, 等. 不同地区桂北大叶种古树白茶感官及品质成分分析[J]. 食品科技, 2025, 50(2): 105–112.
Wu Yingqi, Chen Ting, Li Min, et al. Sensory and quality composition analysis of Guibei large-leaf ancient tree white tea from different regions [J]. Food Science and Technology, 2025, 50(2): 105–112.

[20] Xiao Zuobing, Cao Xueying, Zhu Jiancai, et al. Characterization of the key aroma compounds in three world-famous black teas [J]. European Food Research and Technology, 2022, 248(9): 2237–2252.

[21] Pang Xueli, Yu Weisong, Cao Changdai, 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.

[22] 蒋容港, 黄燕, 金友兰, 等. 不同原料等级黄茶特征香气成分分析[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 89–98.
Jiang Ronggang, Huang Yan, Jin Youlan, et al. Analysis of characteristic aroma components of different grades of yellow tea [J]. Food Science, 2021, 42(16): 89–98.

[23] Kang S, Yan Han, Zhu Yin, et al. Identification and quantification of key odorants in the world's four most famous black teas [J]. Food Research International, 2019, 121: 73–83.

[24] Wang Kunbo, Liu Fang, Liu Zhonghua, 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.

[25] Ma Lijuan, Sun Yangyang, Wang Xuejiao, et al. The characteristic of the key aroma-active components in white tea using GC-TOF-MS and GC-olfactometry combined with sensory-directed flavor analysis [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(14):

7136–7152.

[26] Bao Sudu, An Qin, Yang Yuzi, et al. Tea plant varieties influence the aroma characteristics of Zhenghe white tea: based on Zhenghe Dabaicha and Fuan Dabaicha [J]. Food Research International, 2025, 208: 116278.

[27] Wang Yujie, Huang Lunfang, Deng Guojian, et al. The shaking and standing processing improve the aroma quality of summer black tea [J]. Food Chemistry, 2024, 454: 139772.

[28] Zhu Yin, Lv Haipeng, Shao Chenyang, et al. Identification of key odorants responsible for chestnut-like aroma quality of green teas [J]. Food Research International, 2018, 108: 74–82.

[29] Nie Congning, Zhong Xiaoxue, He Li, et al. Comparison of different aroma-active compounds of Sichuan Dark brick tea (*Camellia sinensis*) and Sichuan Fuzhuan brick tea using gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS) and aroma descriptive profile tests [J]. European Food Research and Technology, 2019, 245(9): 1963–1979.

[30] Wang Xin, Li Xixi, Liu Bin, et al. Comparison of chemical constituents of *Eurotium* cristatum-mediated pure and mixed fermentation in summer-autumn tea [J]. LWT, 2021, 143: 111132.

[31] Zheng Xuexue, Hong Xin, Jin Youlan, et al. Characterization of key aroma compounds and relationship between aroma compounds and sensory attributes in different aroma types of Fu brick tea [J]. Food Chemistry, 2022, 13: 100248.

[32] 肖作兵, 王红玲, 牛云蔚, 等. 基于OAV和AEDA对工夫红茶的PLSR分析[J]. 食品科学, 2018, 39(10): 242–249.
Xiao Zuobing, Wang Hongling, Niu Yunwei, et al. Analysis of aroma components in four Chinese congou black teas by odor active values and aroma extract dilution analysis coupled with partial least squares regression [J]. Food Science, 2018, 39(10): 242–249.

[33] Ni Hui, Jiang Qingxiang, Lin Qi, et al. Enzymatic hydrolysis and auto-isomerization during β-glucosidase treatment improve the aroma of instant white tea infusion [J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128565.

[34] 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 Shuxian, Wang Shuyan, Wang Li, et al. Analysis of aroma components of different cultivars of white peony tea based on ATD-GC-MS [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(1): 261–268.

[35] Guo Xiangyang, Ho C T, Schwab W, et al. Aroma profiles of green tea made with fresh tea leaves plucked in summer [J]. Food Chemistry, 2021, 363: 130328.

[36] Su Dan, He Jiaojiao, Zhou Yanzhu, et al. Aroma effects of key volatile compounds in Keemun black tea at different grades: HS-SPME-GC-MS, sensory evaluation, and chemometrics [J]. Food Chemistry, 2022, 373(Pt B): 131587.

[37] Qin Xinxue, Zhou Jingtao, He Chang, et al. Non-targeted metabolomics characterization of flavor formation of Lichuan black tea processed from different cultivars in Enshi [J]. Food Chemistry, 2023, 19: 100809.

(责任编辑: 韩晓红　曹岱琳)