成洲, 杨丽冉, 闫敬娜, 等. 宜宾茶区不同茶树品种白茶的风味品质分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(18): 370−383. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2026040391

CHENG Zhou, YANG Liran, YAN Jingna, et al. Flavor Quality Analysis of Baimudan White Tea from Different Tea Plant Varieties in the Yibin Tea Region[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(18): 370−383. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2026040391

· 现代分析与智能检测 ·

宜宾茶区不同茶树品种白茶的风味品质分析

成　洲[1], 杨丽冉[1,*], 闫敬娜[1], 单薰元[2], 罗学平[1], 王聪明[1], 刘明丽[3], 蒋　宾[1,*]

（1.宜宾职业技术学院现代农业学院, 四川 宜宾 644003;
2.云南农业大学茶学院, 云南 昆明 650201;
3.宜宾市茶产业研究院, 四川 宜宾 644100）

摘　要: 为探究宜宾茶区不同茶树品种所制白牡丹白茶的品质特点及物质基础。本研究采用定量描述分析、生化分析、高效液相色谱法和顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用等方法对‘中茶 302’（ZC302）、‘福鼎大白’（FDDB）、‘乌牛早’（WNZ）、‘川茶 2 号’（CC2）、‘福选 9 号’（FX9）、‘名山 131’（MS131）、‘中茶 108’（ZC108）和‘黄金芽’（HJY）所制白茶的感官品质和风味物质进行分析。结果表明，8 个品种白牡丹白茶均表现出良好的感官品质，但品种间差异显著。FDDB、ZC302 和 CC2 毫香显露或带花香，滋味鲜甜，叶底黄绿柔软，综合得分较高；而 WNZ 和 FX9 表现为清香带青气，滋味尚鲜醇，带生青味或酸味，得分较低。HJY 的游离氨基酸含量最高，酚氨比和水浸出物含量最低。FDDB、ZC302 和 CC2 的游离氨基酸、茶氨酸、甜味氨基酸含量更高，而茶多酚、儿茶素总量、酯型儿茶素及苦涩味指数更低。MS131 和 FX9 的茶多酚、儿茶素总量及酯型儿茶素含量显著高于其他品种，苦涩味指数最高。多元统计分析筛选出表没食子儿茶素没食子酸酯、咖啡碱、表没食子儿茶素、儿茶素、没食子儿茶素、茶多酚、茶氨酸、水浸出物和表儿茶素没食子酸酯 9 种差异滋味物质。在 3 个优势品种中鉴定出 28 种关键差异香气成分，其中芳樟醇、香叶醇、苯乙醛等在 CC2 中含量较高，赋予其突出的花香特征，而 (Z)-3-己烯醇、正己醛等青气相关物质在 FDDB 和 ZC302 中相对较低。综上所述，不同茶树品种对白茶品质特征存在影响，FDDB、ZC302 和 CC2 具有优良的白茶适制性，为宜宾白茶品种选择与品质提升提供了科学依据。

关键词: 白茶, 茶树品种, 滋味, 香气, 差异分析

中图分类号: TS272.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)18−0370−14

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2026040391

本文网刊:

Flavor Quality Analysis of Baimudan White Tea from Different Tea Plant Varieties in the Yibin Tea Region

CHENG Zhou[1], YANG Liran[1,*], YAN Jingna[1], SHAN Xunyuan[2], LUO Xueping[1], WANG Congming[1], LIU Mingli[3], JIANG Bin[1,*]

（1.College of Modern Agriculture, Yibin Vocational and Technical College,Yibin 644003, China;
2.College of Tea Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;
3.Research Institute of Tea Industry of Yibin, Yibin 644100, China）

Abstract: This study aimed to investigate the quality characteristics and chemical composition of Baimudan white teas processed from different tea cultivars in the Yibin tea region, the quantitative descriptive analysis, biochemical analysis, high-performance liquid chromatography (HPLC), and headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) to analyze the sensory quality and flavor compounds of white teas processed from

收稿日期: 2026−04−30

基金项目: 宜宾市 2026 年农业科技创新能力建设项目（2026NYKJ078）; 宜宾市科技项目（2025MZ031）; 宜宾职业技术学院科研项目（24ZRZD-11）。

作者简介: 成洲（1972−）男, 硕士, 副教授, 研究方向: 茶叶加工与综合利用研究, E-mail: 408641158@qq.com。

*** 通信作者:** 杨丽冉（1996−）女, 硕士, 讲师, 研究方向: 茶叶加工与综合利用研究, E-mail: ylrybzy@126.com。

蒋宾（1993−）男, 硕士, 讲师, 研究方向: 茶叶加工与综合利用研究, E-mail: ybzynxy@126.com。

eight cultivars, ‘Zhongcha 302’ (ZC302), ‘Fuding Dabaicha’ (FDDB), ‘Wuniuzao’ (WNZ), ‘Chuancha 2#’ (CC2), ‘Fuxuan 9#’ (FX9), ‘Mingshan 131’ (MS131), ‘Zhongcha 108’ (ZC108), and ‘Huangjinya’ (HJY). The results indicated that all eight tea varieties exhibited favorable sensory qualities, though significant differences existed among them. FDDB, ZC302, and CC2 presented a distinct tip aroma or floral fragrance, fresh and sweet taste, and soft, yellow-green infused leaves, achieving higher overall sensory scores. In contrast, WNZ and FX9 exhibited a clean and refreshing with noticeable grassy odour, along with approach fresh and mellow taste accompanied by grass or sour off-flavors, resulting in relatively lower sensory scores. HJY showed the highest free amino acid content and lowest phenol-ammonia ratio, yet it also had the lowest water extractives content. FDDB, ZC302, and CC2 displayed higher levels of free amino acids, theanine and sweet-tasting amino acids, while lower contents of tea polyphenols, total catechins, ester-type catechins, and bitterness-astringency index. Conversely, MS131 and FX9 had significantly higher levels of tea polyphenols, total catechins, ester-type catechins, and exhibited the highest bitterness-astringency index among all cultivars. Multivariate statistical analysis identified nine differential taste-related compounds, namely epigallocatechin gallate, caffeine, epigallocatechin, catechin, gallocatechin, tea polyphenols, theanine, water extractives, and epicatechin gallate. Furthermore, 28 key aroma compounds were identified in the three superior tea varieties. Among these, linalool, geraniol, and phenylacetaldehyde were more abundant in CC2, contributing to its prominent floral aroma, while green-note compounds such as (Z)-3-hexenol and hexanal occurred at relatively lower levels in FDDB and ZC302. In conclusion, tea varieties significantly influenced the quality characteristics of white tea. FDDB, ZC302, and CC2 demonstrated superior suitability for white tea production, providing a scientific basis for tea varieties selection and quality enhancement of Yibin white tea.

Key words: white tea; tea varieties; taste; aroma; analysis of differences

白茶起源于福建省福鼎市，属于中国六大茶类的微发酵茶[1−2]。中国茶叶流通协会统计发现，截至 2024 年底，白茶产量 9.38 万吨，占中国茶叶总产量的 2.68%[3]。白茶因“不炒不揉”的加工工艺和独特的品种特性，使其具有外形满披白毫、色泽银白隐绿、汤色杏黄明亮、滋味鲜爽醇和的独特品质特征，深受消费者喜爱[4−6]。近年来，随着“白茶热”的持续升温，白茶产区已从传统的福建扩展至云南[5]、浙江[7]、湖南[8−9]、山东[10] 等多地，各地充分利用本地茶树资源开展适制性研究，形成了各具地域特色的白茶产品，这既丰富了白茶市场，又极大地增加了当地的收入，同时也满足了不同消费群体对白茶品质的个性化需求[11]。现代研究表明，白茶富含茶多酚、黄酮、氨基酸等活性物质[2,4]，具有显著的抗氧化[4,12]、抗肿瘤[13]、降血脂[14]、预防糖尿病[15] 等保健功效，这些活性成分的含量与比例在不同茶树品种间的差异很大。

茶树品种是影响茶叶品质形成的核心因素之一，直接决定了鲜叶的内含物质组成与比例，进而影响茶叶的感官品质和功能特性[16−18]。采用不同茶树品种加工形成的茶叶外形、汤色、香气、滋味等方面呈现出明显的不同[19−21]。Yang 等[16] 研究发现 8 个茶树品种加工形成的川红工夫感官品质和代谢物均存在差异。采用白叶、大乌叶和鸭屎香等品种鲜叶加工而成的凤凰单枞和武夷岩茶香气类型、挥发性代谢物的种类和相对含量存在较大差异[17,22]。采用感官组学和代谢组学比较了茶树品种对红茶和绿茶品质的影响，发现茶叶品质与茶树品种显著相关[16,18,23]。白茶加工方面，景谷大白茶因茶多酚和水浸出物含量高，表现出较强的抗氧化活性[5]；福鼎大毫茶则以氨基酸含量丰富，滋味鲜爽醇厚著称[11]；而梅占、凤庆大叶种等品种制成的白茶，因挥发性化合物组成差异，呈现出独特的花香或品种香[1]。目前，各地已针对本地特色茶树品种开展白茶适制性研究，但品种间的品质差异机制仍需系统解析，尤其是同一产区特定品种的白茶品质特征尚未完全明确。宜宾气候温和、雨量充沛，拥有丰富的茶树品种资源，是中国早茶之乡。2024 年，全市茶园总面积 8.70 万公顷、干茶产量 11.45 万吨、综合产值达 360 亿元，主要生产绿茶和红茶[24]。近年来，宜宾茶区逐步尝试利用本地主栽茶树品种加工白茶，但关于该地区不同茶树品种的白茶适制性和品质差异等研究未见报道。

本研究以‘中茶 302’（ZC302）、‘福鼎大白’（FDDB）、‘乌牛早’（WNZ）、‘川茶 2 号’（CC2）、‘福选 9 号’（FX9）、‘名山 131’（MS131）、‘中茶 108’（ZC108）和‘黄金芽’（HJY）8 个宜宾茶区茶树品种鲜叶为原料制成白牡丹白茶，采用感官审评和定量描述分析（quantitative description analysis, QDA）感官品质差异，分光光度法和高效液相色谱法（high performance liquid chromatography, HPLC）对其常规成分、儿茶素组分、黄酮组分和氨基酸组分等进行测定，采用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用技术（headspace solid-phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS）对优势品种挥发性化合物的种类与含量进行测定，结合多元统计分析探明其物质基础，旨在筛选出适合宜宾茶区白茶生产的优良品种，揭示品种间品质差异的物质基础，为宜宾白茶茶树品种选择及工艺优化提供数据支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

白茶鲜叶　ZC302、FDDB、WNZ、CC2、FX9、MS131、ZC108 和 HJY 的一芽二叶茶树鲜叶于 2025

年 4 月 2 日购自宜宾市江安竹都茶业有限公司，按白茶制作工艺加工形成白牡丹白茶，铝箔袋密封保存于 4 ℃ 冰箱备用；咖啡碱、没食子酸、芦丁、杨梅素、槲皮素、木犀草素、山奈酚，四种酯型儿茶素，包括儿茶素没食子酸酯（catechin gallate, CG）、表儿茶素没食子酸酯（epicatechin gallate, ECG）、没食子儿茶素没食子酸酯（gallocatechin gallate, GCG）、表没食子儿茶素没食子酸酯（epigallocatechin gallate, EGCG），以及四种非酯型儿茶素，包括儿茶素（catechin, C）、表儿茶素（epicatechin, EC）、没食子儿茶素（gallocatechin, GC）、表没食子儿茶素（epigallocatechin, EGC）等化合物标准品　纯度≥99%，成都曼思特生物科技有限公司；天冬氨酸、谷氨酸、天冬酰胺、谷氨酰胺、茶氨酸、丝氨酸、甘氨酸、苏氨酸、丙氨酸、蛋氨酸、色氨酸、组氨酸、酪氨酸、精氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、胱氨酸、赖氨酸等氨基酸标准品　纯度≥99%，美国安捷伦公司；甲醇（色谱纯）和乙腈（色谱纯）　美国 Sigma 公司；碳酸氢钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、茚三酮、冰乙酸、福林酚、95% 乙醇　分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

756CRT 型紫外可见分光光度计　上海菁华科技仪器有限公司；101A-2 电热鼓风恒温干燥箱　上海市崇明实验仪器厂；YX-6CHZ-6C 茶叶烘焙机　安溪永兴机械有限公司；LC-16 型高效液相色谱仪　岛津仪器（苏州）有限公司；DW-HL340 冰箱　中科美菱低温科技有限责任公司；HH-S28S 型数显恒温水浴锅　金坛区大地自动化仪器厂；MU-G02-0448 恒温金属混匀仪　杭州米欧仪器有限公司；BYJ1-05L-AD 超纯水机　重庆华创水处理工程有限公司；8890-7000D GC-MS 仪、DB-5MS 色谱柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）、120 μm DVB/CWR/PDMS 萃取头　美国 Agilent 公司；Hypersil BDS C_{18} 色谱柱　大连依利特分析仪器有限公司；Agela AA952505-0 venusil AA 色谱柱　天津博纳艾杰尔科技有限公司；AIRSENSE PEN3 型便携式电子鼻　北京盈盛恒泰科技有限责任公司。

1.2　实验方法

1.2.1　白茶样品制备　8 个茶树品种的一芽二叶鲜叶按照如下方式加工形成白牡丹白茶。萎凋：将鲜叶均匀不重叠铺撒在水筛上，厚度约 2 cm，置于萎凋架上在室内进行静置萎凋 18 h，在上午 10 时将萎凋叶移至室外进行日光萎凋 1.5 h 后转移到室内，如此重复 3 次后静置萎凋 26 h，萎凋使茶叶含水量下降到 60% 左右，萎凋适度即完成；并筛：待萎凋叶色变为暗绿，叶缘向背面卷曲，达到七成干时将 3 个水筛的萎凋叶并为一筛，且保持茶叶厚度在 15 cm 左右，直到茶叶达八成干时停止；初烘：采用茶叶烘焙机在 65 ℃ 下干燥至九成干后将茶叶取出，自然摊放 6 h 后采用 50 ℃ 烘笼干燥 1.5 h 至茶叶含水量在 4%~5%，干燥完成[19−21]。

1.2.2　感官审评和定量描述分析　茶叶感官审评及定量描述分析由 7 名年龄在 28~40 岁（3 名男性，4 名女性）具备二级评茶技师资质的审评人员组成审评小组，参照国家标准 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》对白茶的外形、汤色、香气、滋味和叶底进行感官品质评价。定量描述分析采用甜味、鲜味、苦味、涩味和青味来描述滋味特征，用毫香、嫩香、清香、甜香、青气和花香来描述白茶的香气特征[16,25−26]，具体评价方法如表 1 所示。毫香和嫩香分别指与白茶白毫多少和鲜叶嫩度高低相关。在评价白茶感官品质之前，对小组成员进行训练，以区分不同浓度的参考物质的香气和滋味强度特征。每个茶样由每个小组成员进行 3 次评估，每次评估间隔 5 min，以 6 名审评人员的 QDA 得分平均值作为茶样的最终得分。

表 1　白茶香气和滋味定量描述分析标准

Table 1　Standard for quantitative descriptive analysis of the aroma and taste of white tea

感官属性	参考物质	评分依据
花香	芳樟醇	从0到6进行评分，得分越高，强度越强，其中0=无，1=非常弱，2=相当弱，3=相当强，4=强，5=很强，6=非常强
青气	顺-3-己稀醛	
甜香	苯甲醛	
清香	反-2-己烯-1-醇	
甜味	葡萄糖	
鲜味	茶氨酸	
苦味	咖啡碱	
涩味	芦丁	
青味	乙醛	

1.2.3　主要生化成分含量测定　根据国家标准（GB/T 8305-2013）测定茶叶水浸出物含量；根据国家标准（GB/T 8313-2018）《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》测定茶多酚含量；根据国家标准（GB/T 8314-2013）《茶 游离氨基酸总量的测定》测定游离氨基酸含量。

1.2.4　咖啡碱、儿茶素、没食子酸和黄酮组分含量测定　根据课题组建立的方法测定白茶中的咖啡碱、儿茶素、没食子酸和黄酮组分含量。具体如下：准确称取 0.2 g（精确到 0.001 g）经 40 目筛的白茶粉于 25 mL 烧杯中，加入 70% 甲醇 15 mL，70 ℃ 水浴 25 min，用脱脂棉过滤至 25 mL 容量瓶中，用 70% 甲醇定容后过 0.45 μm 有机膜，注入进样瓶得到待测液。HPLC分析条件：高速液相色谱系统，色谱柱为 Hypersil BDS C_{18} 柱（4.6×250 mm, 5 μm）；流动相 A 为 0.261% 磷酸，5% 乙腈；流动相 B 为 0.261% 磷酸，80% 乙腈；梯度洗脱程序：0~3 min，5% B，3~22 min，5%~32% B，22~26 min，32% B，26~29 min，32%~5% B，40 min，5% B，检测波长：278 nm，柱温 43 ℃，进样量 10 μL。利用标准品的保留时间对色谱峰进行定性，采用外标法进行定量[16,27]。计算公式如式（1）：

$$C_x = \frac{S_x}{S_i} C_i \quad \text{式（1）}$$

式中：C_x 为测定物质的含量（mg/g）；S_x 和 S_i 分别为测定物质与标准物质的峰面积；C_i 为标准物质的含量（mg/g）。

$$\text{苦涩味指数} = \frac{EGCG + EGC + ECG + GC}{EC + C} \quad \text{式（2）}$$

1.2.5　氨基酸组分含量测定　根据课题组建立的方法测定白茶中氨基酸组分含量[27−28]。样品制备：准确称取 0.1 g（精确到 0.001 g）样品于 25 mL 试管中，加入 20 mL 沸水浸提 30 min（期间搅动 2~3 次使其充分提取）后过滤于 250 mL 容量瓶中，用蒸馏水定容，混匀后用 0.45 μm 有机膜过滤于进样瓶中上机测定。HPLC 分析条件：色谱柱为 Agela Venusil AA（250 mm×4.6 mm，5 μm），流动相 A 为 15.2 g 无水醋酸钠+1850 mL 水+140 mL 乙腈，pH7.2，流动相 B 相为 35% 乙腈+45% 甲醇+0.2% 乙酸。梯度洗脱程序：0~6 min，5% B→10% B；6~8 min，10% B；8~10 min，10% B→16% B；10~23 min，16% B→40% B；23~30 min，40% B→50% B；30~32 min，50% B；32~33 min，50% B→100% B；33~35 min，100% B；35~36 min，100% B→5% B；36~44 min，5% B；检测波长：338 nm，柱温：40.0 ℃，进样体积：10 μL。采用滋味活度值（taste active value，TAV）分析化合物对滋味的贡献程度[11]。计算公式如下：

$$TAV = \frac{C}{T} \quad \text{式（3）}$$

式中：C 为滋味物质的含量（mg/g）；T 为滋味物质的阈值（mg/g）。

1.2.6　电子鼻分析　使用德国 AIRSENSE PEN3 型便携式电子鼻对不同品种白茶的干茶和叶底香气成分进行测定，样品准备和分析条件与赵苗苗等[29] 相一致。干茶样品准备：称取 3 g 茶样置于检测瓶中静置 30 min，待测。叶底样品准备：每个茶样称取 5 g 置于 50 mL 锥形瓶中，用量筒量取 50 mL、100 ℃沸水冲泡 5 min 后滤出茶汤，双层膜密封，待叶底冷却到室温时检测，每个样品重复检测 3 次，电子鼻检测项目为茶叶香气 10 类成分，具体如表 2 所示。选取检测响应处于平稳的 47~53 s 的数值进行分析。

表 2　电子鼻各传感器性能

Table 2　Performance of each electronic nose sensor

传感器	性能描述
W1C	芳香成分，苯类
W5S	灵敏度大，对氮氧化合物很灵敏
W3C	对氨类、芳香成分灵敏
W6S	对氢化物有选择性
W5C	对短链烷烃、芳香成分灵敏
W1S	对甲烷类灵敏
W1W	对硫化物灵敏，对烃和硫的有机成分较灵敏
W2S	对醇类、醛酮类灵敏
W2W	对芳香成分、有机硫化物灵敏
W3S	对长链烷烃灵敏

1.2.7　挥发性化合物测定　挥发性化合物的萃取参照杨丽冉等[30] 的方法进行。色谱条件：DB-5MS 毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm），载气为高纯氦气，恒流流速 1.2 mL/min，进样口温度 250 ℃，不分流进样，溶剂延迟 3.5 min。程序升温：40 ℃ 保持 3.5 min，以 10 ℃/min 升至 100 ℃，再以 7 ℃/min 升至 80 ℃，最后以 25 ℃/min 升至 280 ℃，保持 5 min。

质谱条件：电子轰击离子源（EI），离子源温度 230 ℃，四级杆温度 150 ℃，质谱接口温度 280 ℃，电子能量 70 eV，扫描方式选择离子检测模式，质量扫描范围 m/z 35~400。将 GC-MS 检测到的数据通过 NIST 标准谱库并且结合文献的标准谱图进行检索定性，保留相似度 80% 以上的香气物质，按面积归一法对香气组分进行定量，计算所检测到的各组分相对含量，每个品种白茶样品进行 3 次重复测定。

$$X_i = \frac{V_S \times C_S}{M} \times \frac{I_i}{I_s} \times 10^{-3} \quad \text{式（4）}$$

式中：X_i 为待测香气物质 i 的相对含量（μg/g）；V_S 为加入内标物的体积（μL）；C_S 为内标物的浓度（μg/mL）；M 为白茶样品的质量（g）；I_S 为内标物的峰面积；I_i 为香气物质 i 的峰面积。

采用气味活性值（odor activity value，OAV）分析化合物对香气的贡献程度[11]。计算公式如下：

$$OAV = \frac{C_i}{T_i} \quad \text{式（5）}$$

式中：C_i 为香气成分 i 的相对含量（μg/g）；T_i 为香气成分 i 的阈值（μg/g）。

1.3　数据处理

所有实验数据均重复测定 3 次，以平均值±标准偏差表示各测定数据均值，利用 SPSS 24.0 进行单因素差异分析、显著性分析（P<0.05 表示差异显著）和相关性分析；采用 SIMCA 14.1 进行主成分分析（principal component analysis，PCA）、正交偏最小二乘判别分析（orthogonal partial least squares discriminant analysis，OPLS-DA）、变量重要性投影（variable importance in projection，VIP）分析和层序聚类分析（hierar-chical clustering，HCA）；使用 Origin 8 软件绘制柱形图，采用 TBtools 绘制热图，采用迈维代谢在线云工具绘制相关性网络图。根据文献报道和 TGSC 数据库（http://www.thegoodscentscompany.com/）对差异香气化合物进行风味注释。

2　结果与分析

2.1　不同茶树品种白牡丹白茶感官审评结果分析

茶叶感官审评是目前评价茶叶品质优劣和等级高低的常用方法[1,4]。不同品种白牡丹白茶的感官品质及得分如表 3 和图 1A 所示。由表 3 和图 1A 可知，FDDB、ZC302、CC2 所制白茶的感官总得分显

表 3 不同茶树品种白牡丹白茶感官审评结果

Table 3 Results of sensory evaluation in Baimudan white tea from different tea plant varieties

品种	外形(25%)		汤色(10%)		香气(25%)		滋味(30%)		叶底(10%)		总评分(分)
	评语	得分(分)	评语	得分(分)	评语	得分(分)	评语	得分(分)	评语	得分(分)	
ZC302	绿白毫显露, 芽头肥壮	92.31±0.24^{a}	嫩黄明亮	91.37±0.16^{a}	毫香, 持久	91.28±0.52^{a}	鲜甜	90.31±0.34^{a}	黄绿柔软, 芽叶肥壮	90.58±0.37^{a}	91.19±0.11^{a}
FDDB	翠绿白毫显, 芽叶连枝	93.22±0.16^{a}	浅黄明亮	92.42±0.25^{a}	毫香, 持久	93.37±0.31^{a}	鲜甜	91.24±0.23^{a}	黄绿较柔软	91.62±0.50^{a}	92.42±0.18^{a}
WNZ	暗绿带毫, 芽叶连枝	83.32±0.23^{d}	黄明亮	79.39±0.31^{d}	清香, 较持久	80.28±0.28^{c}	尚鲜醇带生青味	80.08±0.18^{d}	黄绿尚柔软	84.34±0.46^{c}	81.30±0.22^{c}
CC2	灰绿, 芽叶连枝	89.28±0.29^{b}	浅黄明亮	93.08±0.23^{a}	毫香带花香, 持久	93.34±0.30^{a}	鲜甜	91.46±0.26^{a}	黄绿较柔软	87.25±0.62^{b}	91.13±0.43^{a}
FX9	深绿, 芽叶连枝	83.35±0.42^{d}	黄亮	82.43±0.54^{c}	清香, 较持久	83.52±0.26^{c}	较鲜醇, 有青、酸味	82.42±0.52^{d}	黄绿较柔软	85.34±0.54^{c}	83.22±0.51^{c}
MS131	灰绿稍暗, 芽叶连枝	88.41±0.31^{b}	杏黄较明亮	89.36±0.39^{b}	清香, 带毫香, 持久	87.38±0.36^{b}	鲜尚甜醇	88.38±0.39^{b}	黄绿较柔软杂	83.23±0.33^{c}	87.72±0.48^{b}
ZC108	灰绿较暗, 芽叶连枝	86.27±0.43^{c}	杏黄明亮	88.41±0.46^{b}	清香稍带甜香, 较持久	88.47±0.41^{b}	较鲜醇	85.62±0.54^{c}	黄绿较柔软	80.31±0.46^{d}	86.24±0.16^{b}
HJY	棕黄, 芽叶连枝	83.34±0.56^{d}	杏黄明亮	87.51±0.28^{b}	清香带甜香, 较持久	87.26±0.26^{b}	鲜甜, 有酵味	92.39±0.29^{a}	黄柔软, 花杂	84.34±0.27^{c}	87.55±0.53^{b}

注: 同列不同小写字母代表差异显著(P<0.05), 相同代表差异不显著(P>0.05); 表3~表4同。

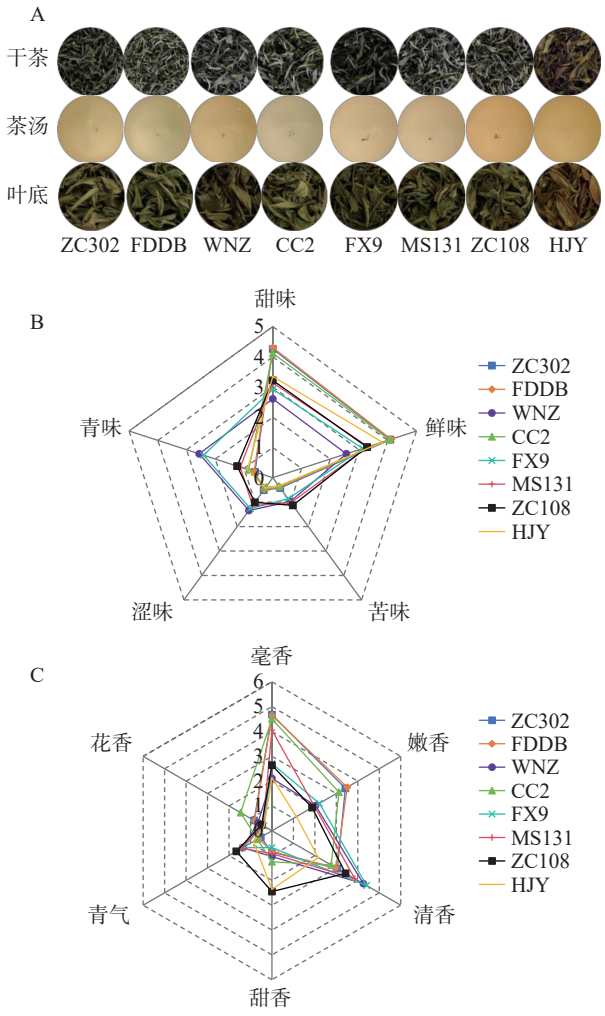


图 1 不同品种白牡丹白茶感官审评差异

Fig.1 Difference of sensory evaluation of Baimudan white tea from different tea plant varieties

注: A. 干茶、茶汤和叶底差异; B. 滋味 QDA 分析结果; C. 香气 QDA 分析结果。

著高于其他品种白茶(P<0.05), WNZ 和 FX9 的感官总得分显著低于其他品种白茶(P<0.05)。8 个品种之间的各项审评因子存在差异, 表现为: 在外形上, FDDB 翠绿白毫显, 芽叶连枝, 得分最高, ZC302 的芽头较为肥壮, 色泽绿白毫显, CC2 灰绿, MS131 和 ZC108 灰绿、暗, 而黄金芽为棕黄色, 得分低于除 WNZ 外的其他白茶; 在汤色上, 8 个品种白茶均以黄色为主, 但其深浅度存在差异, CC2、FDDB 和 ZC302 得分显著高于其他品种白茶(P<0.05)。在香气和滋味方面, CC2 毫香带花香、滋味鲜甜, FDDB 和 ZC302 毫香, 滋味鲜甜, FX9 和 ZC108 清香较鲜醇, MS131 清香带毫香, 鲜尚甜醇, HJY 清香稍带甜香鲜甜, 有酵味, 而 WNZ 表现为清香、尚鲜醇带生青味, 评分显著低于其他品种白茶(P<0.05)。除 WNZ 的叶底为黄绿尚柔软, HJY 叶底色泽为黄、花杂外, 其余 6 个不同品种白茶茶样的叶底嫩度均较高, 主要为黄绿柔软。8 种白牡丹白茶在感官上产生差异的主要原因可能是由于不同茶树品种所含有的物质基础差异所导致的[1,4]。感官审评结果表明, FDDB、ZC302 和 CC2 三个茶树品种的白牡丹白茶在感官品质上具有良好的适制性。

茶树品种对白牡丹白茶的滋味和香气品质影响较大, 为了消除传统感官审评中人为因素带来的误差, 根据课题组前期建立的 QDA 分析方法[16], 采用甜味、鲜味、苦味、涩味和青味对不同品种白牡丹白茶的滋味品质进一步分析, 结果如图 1B 所示。8 个品种白茶的苦味和涩味相似, 但它们的甜味、鲜味和青味却有显著差异(P<0.05)。ZC302、FDDB 和 CC2 的甜味和鲜味显著高于其他品种白茶(P<0.05), WNZ 的甜味和鲜味得分最低, FX9 和 WNZ 的青味得分分别为 2.56 分和 2.41 分, 显著高于其余 6 个品种白茶(P<0.05)。此外, 用毫香、嫩香、清香、甜香、青气和花香对香气品质进行比较, 结果如图 1C 所示。8 个品种白牡丹白茶香气主要以毫香、嫩香和清香为主, 其中, ZC302、FDDB 和 CC2 的毫香和嫩香得分最高, WNZ 和 FX9 的清香, 以及 ZC108 和 HJY 的甜香得分高于其余 6 个品种。此外, WNZ、FX9、ZC108 和 MS131 的青气得分分别为 1.36、1.38、1.41 和 1.66 分, 高于其他品种, CC2 的花香得分为 1.46 分, 显著(P<0.05)高于其余 7 个品种白牡丹白茶。上述结果表明 ZC302、FDDB 和 CC2 更适合制作白茶。

2.2　不同茶树品种白牡丹白茶常规生化成分分析

茶树品种是影响白茶生化成分含量和品质差异的关键原因[11,20]。水浸出物是指白茶中能够溶于水的一切物质的总称，其含量高低与白茶滋味品质高低直接相关[5,30]。由表 4 可知，8 个茶树品种白牡丹白茶的水浸出物含量范围为 40.67%~48.55%，均满足白茶国家标准中>30% 的规定[5]，其中，HJY 的水浸出物含量最低，为 40.67%，其余 7 个品种白茶含量差异不显著（P>0.05）。

茶多酚作为白茶茶汤中苦涩味的主要呈味物质，也是白茶中主要的活性成分[31]。不同品种白茶茶多酚含量为 23.59%~32.66%，ZC302、FDDB 和 HJY 的含量差异不显著（P>0.05），但显著低于其他品种白茶（P<0.05）。结合感官审评结果，WNZ 的茶多酚含量最高，滋味表现“尚鲜醇”的品质特点，得分最低。

游离氨基酸已被证实对白茶茶汤的鲜甜味有重要贡献，其对于提高茶汤的鲜爽度，降低苦涩味物质对口腔的刺激具有重要作用[5,31−32]。8 个白牡丹白茶的游离氨基酸含量范围为 3.15%~6.14%，其中 HJY 的含量显著高于其他品种白茶（P<0.05），ZC302、FDDB 和 CC2 的含量也显著高于其余四种白茶（P<0.05）。结合感官审评结果，HJY、ZC302、FDDB 和 CC2 白茶的游离氨基酸总量含量较高，滋味表现“鲜甜”的口感。

酚氨比是茶汤鲜爽度的衡量指标之一，酚氨比值越低，说明茶汤越柔和、越鲜爽[16,31]。8 个白牡丹白茶的酚氨比为 4.02~10.57，与前人研究结果得出白茶中酚氨比范围结果一致[4−5]，表明本研究所制白茶符合传统白茶的品质要求。统计分析发现 MS131 中的酚氨比最高，为 10.57，HJY、ZC302 和 FDDB 的酚氨比较低，表明 MS131 的苦涩味最重，HJY、ZC302 和 FDDB 的苦涩味较低，而鲜爽度较高，与感官审评和 QDA 分析结果相一致。

没食子酸（Gallic acid，GA）属于酚酸类物质，对茶汤的酸味及涩味有一定贡献[5,31]。8 个白牡丹白茶的 GA 含量为 1.81~4.99 mg/g，其中 FX9 的含量显著高于其他品种白茶（P<0.05），与其滋味表现为“较鲜醇，有酸味”相对应。

咖啡碱（Caffeine，CAF）等生物碱是茶汤苦味的主要贡献者，其与白茶滋味感官得分密切相关[31,33]。HJY 中的 CAF 含量最低，仅为 21.56 mg/g，MS131 含量最高，达 47.52 mg/g，其次是 ZC108，为 47.13 mg/g，与 QDA 分析发现 MS131 和 ZC108 苦味得分最高相一致。

2.3　不同茶树品种白牡丹白茶儿茶素和黄酮组分含量分析

儿茶素和黄酮类是茶叶中的主要功效成分，也是茶汤苦涩味的主要呈味物质[11,31]。8 个品种白茶的酯型儿茶素包括儿茶素没食子酸酯（Catechin gallate，CG）、表儿茶素没食子酸酯（Epicatechin gallate，ECG）、没食子儿茶素没食子酸酯（Gallocatechin gallate，GCG）和表没食子儿茶素没食子酸酯（Epigallocatechin gallate，EGCG）和非酯型儿茶素包括儿茶素（Catechin，C）、表儿茶素（Epicatechin，EC）、没食子儿茶素（Gallocatechin，GC）和表没食子儿茶素（Epigallocatechin，EGC））含量测定结果如图 2 所示。

茶叶中的黄酮/黄酮醇及其苷类化合物具有较低的味觉阈值，对茶汤的收敛性有一定的贡献[16,31]。由图 2A 可知，WNZ、MS131、FX9 中 GC、EGC 和 C 的含量显著高于其他品种白茶。HJY 中的 EGCG 含量显著低于其他品种白茶，而 EC 和 GCG 的含量显著高于其他品种白茶，此外，ZC108 中的 ECG 和 CG 含量显著高于其他品种白茶。本次检测到的 5 种黄酮组分中，芦丁的含量最高，其次是木犀草素，两者在 MS131 中的含量均显著高于其他品种。MS131 和 FX9 的黄酮总量显著高于其他品种白茶，黄酮含量最低的是 CC2。上述结果表明，ZC302、FDDB、CC2 和 HJY 所制白茶的苦涩味较低，与感官审评结果一致。

由图 2B 可知，MS131 的儿茶素总量最高，达 186.67±1.25 mg/g，其次为 FX9（181.35±0.96 mg/g），ZC302、FDDB 和 CC2 的儿茶素总量显著低于除 HJY 外的白茶（P<0.05），但三者之间的差异不显著（P>0.05）。HJY 的儿茶素总量最低，仅为 83.40 mg/g。酯型儿茶素具有强烈的苦涩感，而非酯型儿茶素则苦味较轻，具有回甘的特征[31,34]；MS131 的酯型儿茶素含量最高，达 120.06 mg/g，FX9 和 ZC108 的酯型儿茶素也显著高于其余 5 个品种（P<0.05），但两者差异不显著（P>0.05），HJY 的酯型

表 4　不同茶树品种白牡丹白茶常规成分差异

Table 4　Difference of normal chemical compounds of Baimudan white tea from different tea plant varieties

品种	水浸出物(%)	茶多酚(%)	游离氨基酸(%)	酚氨比	没食子酸(mg/g)	咖啡碱(mg/g)
ZC302	46.35±0.43^{a}	23.65±0.19^{d}	5.19±0.08^{b}	4.56	1.81±0.09^{c}	40.38±0.25^{c}
FDDB	46.16±0.65^{a}	23.59±0.41^{d}	5.31±0.13^{b}	4.44	2.12±0.06^{b}	41.64±0.13^{bc}
WNZ	47.59±0.11^{a}	31.21±0.11^{a}	3.51±0.02^{c}	8.89	2.19±0.05^{b}	42.45±0.47^{b}
CC2	47.32±0.62^{a}	26.08±0.07^{c}	4.71±0.08^{b}	5.54	1.98±0.13^{c}	41.39±0.25^{bc}
FX9	45.86±0.25^{ab}	30.19±0.29^{b}	3.15±0.02^{c}	8.34	4.99±0.04^{a}	43.42±0.56^{b}
MS131	48.55±0.55^{a}	32.66±0.61^{a}	3.30±0.05^{c}	10.57	2.74±0.03^{b}	47.52±0.09^{a}
ZC108	45.07±0.86^{ab}	27.84±0.53^{c}	3.62±0.12^{c}	7.69	2.27±0.17^{b}	47.13±0.77^{a}
HJY	40.67±0.21^{c}	24.67±0.36^{d}	6.14±0.03^{a}	4.02	1.92±0.04^{c}	21.56±0.29^{d}

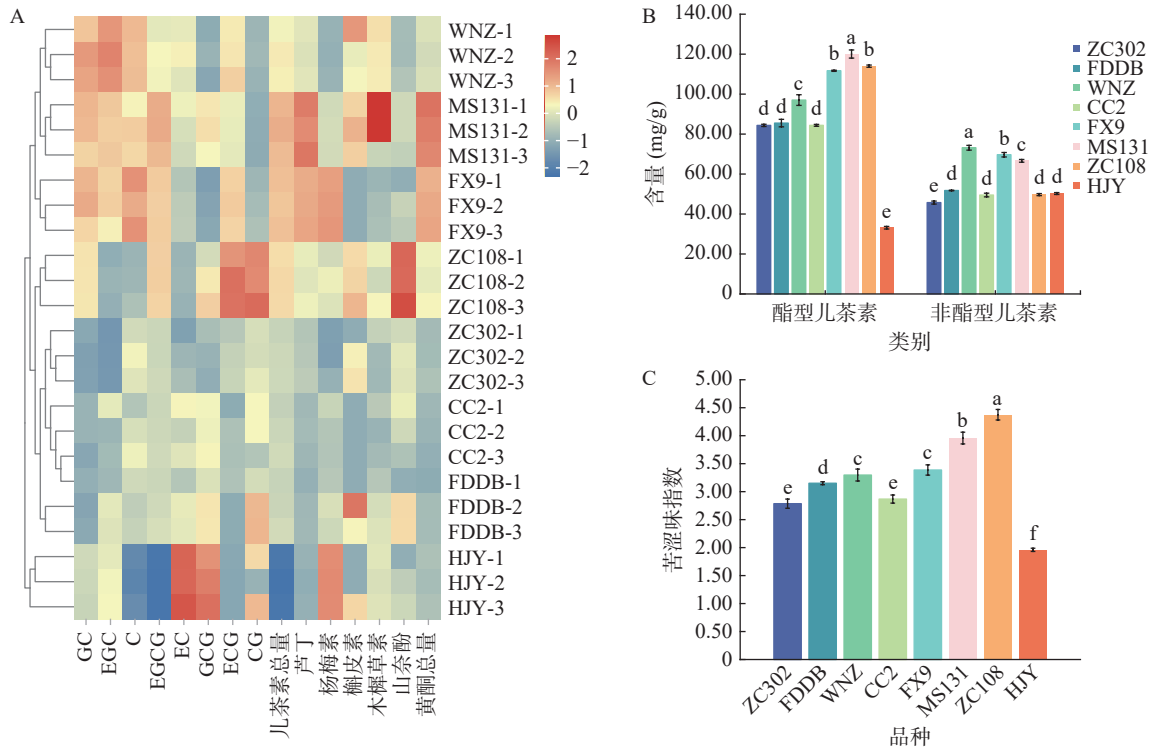


图 2　不同品种白牡丹白茶茶儿茶素、黄酮组分和苦涩味指数差异

Fig.2　Difference of catechins, flavonoids and catechin astringent index of Baimudan white tea from different tea plant varieties

注: 小写字母代表差异显著(P<0.05)。

儿茶素含量最低, 仅为 33.15 mg/g。WNZ 的非酯型儿茶素含量显著高于其他品种白茶(P<0.05), 其次是 FX9 和 MS131, FDDB、CC2、ZC108 和 HJY 的非酯型儿茶素含量差异不显著(P>0.05), 但显著高于 ZC302。儿茶素苦涩味指数常用作茶汤苦涩味程度判定的依据, 苦涩味指数越大, 茶汤苦涩味越重[35−36]。

由图 2C 可知, ZC108 的苦涩味指数显著高于其他品种白茶(P<0.05), MS131 也显著高于除 ZC108 外的 6 个品种白茶(P<0.05), ZC302 和 CC2 处于中间, 而 HJY 的苦涩味指数显著低于其他品种白茶(P<0.05)。

2.4　不同茶树品种白牡丹白茶氨基酸组分含量分析

氨基酸与茶汤的鲜爽味和香气关系密切, 对白茶滋味有重要贡献[37−38]。8 个品种白茶共检测出 20 种氨基酸, 其中 ZC302、FDDB 和 HJY 的氨基酸总量不存在统计学差异(P>0.05), 而显著高于其他品种白茶(P<0.05), MS131 的氨基酸总量显著低于其他品种白茶(P<0.05), 仅为 25.09 mg/g。根据氨基酸的呈味特征, 可将本次测定到的 20 种氨基酸划分为鲜味、甜味和苦味氨基酸[11,27], 各品种白茶中的组分含量的变化与差异如表 5 所示。尽管不同品种白茶中的氨基酸组分含量存在差异, 但不同滋味特征氨基

表 5　不同茶树品种白牡丹白茶氨基酸含量差异(mg/g)

Table 5　Difference of amino acid contents of Baimudan white tea from different tea plant varieties (mg/g)

类别	氨基酸	ZC302	FDDB	WNZ	CC2	FX9	MS131	ZC108	HJY
鲜味氨基酸	天冬氨酸	0.98±0.04^{d}	1.23±0.09^{b}	0.89±0.08^{d}	1.48±0.06^{a}	1.01±0.07^{c}	0.77±0.05^{e}	0.75±0.05^{e}	1.01±0.04^{c}
	谷氨酸	0.71±0.03^{b}	0.92±0.06^{a}	0.61±0.05^{b}	0.91±0.05^{a}	0.95±0.05^{a}	0.68±0.04^{b}	0.66±0.04^{b}	0.87±0.03^{a}
	天冬酰胺	5.15±0.05^{a}	2.96±0.02^{c}	2.93±0.08^{c}	2.44±0.06^{c}	3.63±0.04^{b}	2.86±0.08^{c}	3.81±0.52^{b}	5.84±0.23^{a}
	谷氨酰胺	2.81±0.13^{c}	2.80±0.250^{c}	1.32±0.03^{f}	4.01±0.07^{a}	2.26±0.05^{d}	1.72±0.08^{e}	2.09±0.15^{d}	3.08±0.12^{b}
	茶氨酸	17.33±0.30^{b}	18.94±0.22^{a}	12.69±0.21^{c}	14.50±0.16^{c}	10.78±0.10^{d}	8.23±0.38^{e}	11.44±1.53^{d}	17.28±0.68^{b}
	鲜味氨基酸总量	26.98±0.17^{b}	26.85±0.31^{b}	18.44±0.15^{d}	23.34±0.23^{c}	18.63±0.11^{d}	14.26±0.19^{e}	18.75±0.31^{d}	28.08±0.39^{a}
甜味氨基酸	丝氨酸	0.72±0.06^{b}	0.97±0.130^{a}	0.61±0.02^{c}	0.85±0.04^{a}	0.64±0.07^{c}	0.64±0.01^{c}	0.63±0.05^{c}	0.76±0.02^{b}
	甘氨酸	0.50±0.04^{d}	0.71±0.10^{a}	0.43±0.02^{d}	0.60±0.03^{b}	0.46±0.05^{d}	0.47±0.02^{d}	0.43±0.06^{d}	0.51±0.02^{c}
	苏氨酸	0.73±0.07^{c}	1.00±0.12^{a}	0.61±0.05^{c}	0.85±0.03^{b}	0.62±0.07^{c}	0.68±0.04^{c}	0.57±0.11^{d}	0.65±0.02^{c}
	丙氨酸	0.74±0.05^{b}	0.99±0.11^{a}	0.65±0.03^{c}	0.95±0.11^{a}	0.65±0.06^{c}	0.64±0.03^{c}	0.60±0.07^{c}	0.74±0.03^{b}
	蛋氨酸	0.06±0.00^{b}	0.09±0.04^{a}	0.09±0.04^{a}	0.09±0.04^{a}	0.06±0.00^{b}	0.11±0.08^{a}	0.06±0.00^{b}	0.09±0.00^{a}
	色氨酸	0.74±0.05^{b}	0.77±0.06^{b}	0.63±0.03^{a}	0.64±0.03^{c}	0.56±0.04^{c}	0.61±0.01^{c}	0.73±0.03^{b}	1.03±0.04^{a}
	组氨酸	0.66±0.09^{a}	0.78±0.04^{a}	0.49±0.04^{c}	0.69±0.02^{a}	0.53±0.07^{b}	0.51±0.05^{b}	0.45±0.05^{c}	0.55±0.02^{b}
	甜味氨基酸总量	4.15±0.07^{b}	5.31±0.12^{a}	3.51±0.04^{c}	4.03±0.13^{b}	3.52±0.09^{c}	3.66±0.11^{c}	3.47±0.07^{c}	4.33±0.16^{b}

续表 5

类别	氨基酸	ZC302	FDDB	WNZ	CC2	FX9	MS131	ZC108	HJY
苦味氨基酸	酪氨酸	0.68±0.04^{b}	1.01±0.04^{a}	0.90±0.04^{a}	0.69±0.04^{b}	0.97±0.05^{a}	0.83±0.05^{b}	0.76±0.09^{b}	0.94±0.04^{a}
	精氨酸	1.83±0.10^{a}	1.80±0.02^{a}	1.39±0.03^{c}	1.89±0.04^{a}	1.67±0.05^{b}	0.78±0.09^{e}	0.77±0.03^{e}	1.06±0.04^{d}
	缬氨酸	1.01±0.04^{b}	1.10±0.09^{b}	0.83±0.04^{c}	1.19±0.08^{b}	1.04±0.06^{b}	0.95±0.05^{c}	0.96±0.04^{c}	1.29±0.05^{a}
	苯丙氨酸	0.89±0.04^{b}	0.99±0.08^{a}	0.74±0.04^{c}	1.01±0.07^{a}	0.93±0.06^{a}	0.84±0.06^{b}	0.87±0.02^{b}	1.19±0.05^{a}
	异亮氨酸	1.40±0.05^{c}	1.44±0.01^{c}	1.25±0.04^{d}	2.16±0.03^{a}	1.71±0.05^{b}	1.24±0.08^{d}	1.57±0.15^{c}	2.33±0.09^{a}
	亮氨酸	1.17±0.04^{a}	1.22±0.07^{a}	1.01±0.03^{a}	1.04±0.01^{a}	1.15±0.06^{a}	1.08±0.06^{a}	0.97±0.13^{b}	1.21±0.05^{a}
	胱氨酸	0.58±0.38^{c}	0.10±0.02^{d}	0.56±0.33^{c}	0.07±0.03^{e}	0.66±0.44^{c}	0.58±0.31^{c}	0.81±0.05^{b}	1.04±0.04^{a}
	赖氨酸	0.82±0.04^{b}	0.93±0.07^{a}	0.71±0.04^{c}	0.90±0.07^{a}	0.82±0.05^{b}	0.86±0.06^{b}	0.79±0.09^{c}	1.02±0.04^{a}
	苦味氨基酸总量	8.38±0.07^{b}	8.59±0.12^{b}	7.39±0.04^{c}	6.89±0.13^{d}	8.95±0.09^{b}	7.16±0.11^{c}	7.50±0.07^{c}	10.08±0.16^{a}
	总量	39.50±0.56^{a}	40.74±0.62^{a}	29.33±0.11^{d}	36.94±0.35^{b}	31.08±0.37^{c}	25.09±0.91^{e}	31.08±0.79^{c}	42.47±0.58^{a}

注：不同小写英文字母表示同行数据差异显著，P<0.05。

酸在 8 个品种白牡丹白茶中的比例分布规律一致，均表现为鲜爽味氨基酸比例最高，其次是苦味氨基酸，甜味氨基酸的比例最低。茶氨酸是茶叶中主要的鲜味氨基酸，具有增强茶汤鲜爽、顺滑和醇厚口感的作用[11,31]。FDDB 中的茶氨酸含量在 8 个不同品种白茶中含量最高，为 18.94 mg/g。其次是 ZC302（17.33 mg/g）和 HJY（17.28 mg/g），MS131 的茶氨酸含量最低，仅为 8.23 mg/g。谷氨酸是鲜味类氨基酸中鲜强度最具代表性的物质之一[11,26,31]，FDDB、CC2、FX9 和 HJY 白茶中的谷氨酸含量差异不显著（P>0.05），但显著高于其他品种（P<0.05）。丙氨酸和丝氨酸是茶叶中有代表性的甜味氨基酸[31]，两者在 FDDB 和 CC2 白茶中的含量均显著高于其他品种白茶（P<0.05）。精氨酸属于苦味氨基酸，但其苦味能够被谷氨酸钠以及腺嘌呤核糖核苷酸掩饰，能够对茶汤起到提鲜的作用[11]，ZC302、FDDB 和 CC2 中的含量显著高于其他品种白茶（P<0.05）。此外，精氨酸在茶叶加工过程中还能转化为芳香类氨基酸，对白茶的香气有促进作用[11]。CC2 中的精氨酸含量最高，为 1.89 mg/g，推测可能是造成 CC2 在感官审评中具有少量花香的诱因[11]。

2.5　关键差异滋味化合物筛选及其滋味活度值分析

为了探明不同茶树品种白牡丹白茶中的关键差异滋味物质，采用 OPLS-DA 对 8 个不同品种白茶 38 种滋味物质差异进行分析。从图 3A 可以看出，除 FDDB 和 ZC302 距离较近外，8 个品种白茶在 OPLS-DA 得分图上能较好地分开，第 1 主成分的贡献率为 67.4%，第 2 主成分的贡献率为 15.5%，累计贡献率为 82.9%，说明前两个主成分充分反映了 8 个不同品种白茶中滋味物质的情况。通过 200 次置换检验验证了模型的稳定性，Q^2 截距值为−1.10，表明模型具有可靠性且未出现过拟合现象（图 3B），可用于不同品种白茶的判别分析。HCA 分析结果显示 8 个品种白茶聚为 3 簇，其中 HJY 单独为一簇，ZC302、FDDB 和 CC2 聚为一簇，ZC108、WNZ、FX9 和 MS131 聚为一簇（图 3C），说明在鲜叶原料级别和加工工艺一致的情况下，HJY 与其他品种白

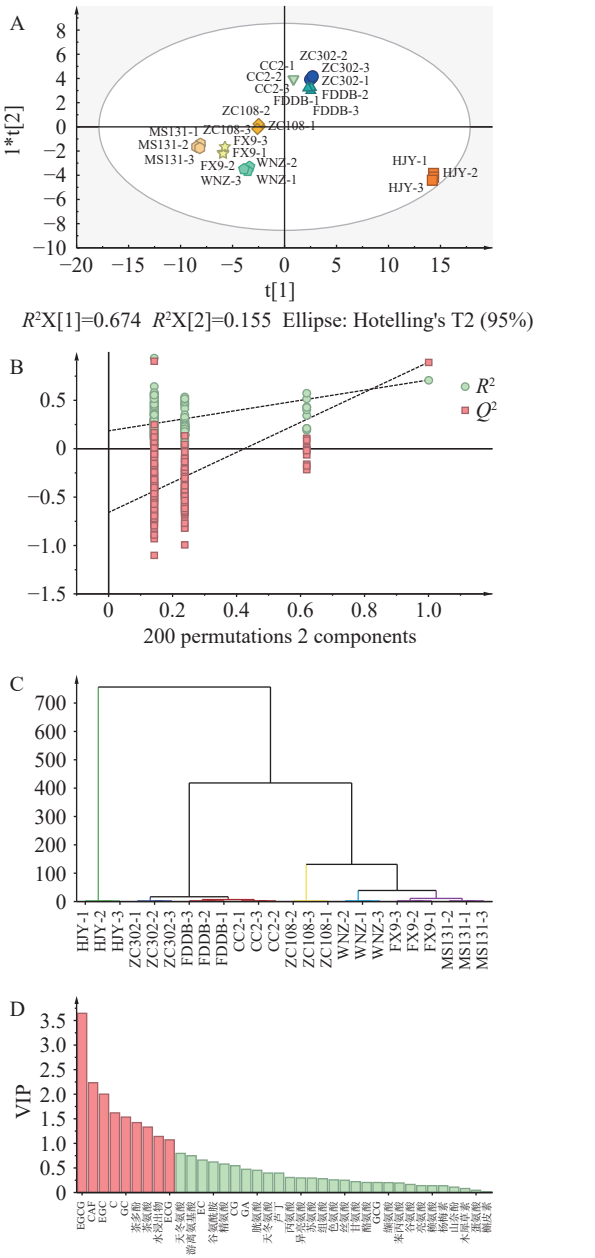


图 3　不同品种白茶滋味物质差异

Fig.3　Differences in flavor compounds in different tea plant varieties of white tea

注：A. OPLS-DA 得分图；B. 验证模型；C. HCA 树状图；D. VIP 值。

茶的滋味物质差异较大，这与黄金芽本身是黄化品种，其叶片较薄、酚类物质较少、氨基酸物质较高和水浸出物含量较低等因素相关[39]。为确定导致 8 个品种白牡丹白茶滋味差异的关键代谢物，本研究构建了 VIP 图谱，VIP>1 时，表明该变量对分类具有重要贡献，且 VIP 值越大，表明该变量在不同品种白茶间的差异就越显著[11,38]。由图 3D 可知，有 9 个滋味物质的 VIP 值>1，可作为区分不同品种白茶的标志物，分别为 EGCG、CAF、EGC、C、GC、茶多酚、茶氨酸、水浸出物和 ECG。表明这 9 个滋味物质为 8 个品种白牡丹白茶的差异滋味物质。

白茶的滋味特征与儿茶素、氨基酸和咖啡碱等的含量高低有关，TAV 是一种有效的滋味评价方法，通常用来判断茶汤中不同呈味化合物对整体口感的贡献，一般认为 TAV>1 的化合物对滋味有显著贡献，TAV 越大贡献越大[38]。根据不同品种白茶中差异化合物的含量及其对应阈值的比值，计算得到 7 种差异物质在不同品种白茶中的 TAV（表 6）。结果显示，除茶氨酸外，其余 6 种差异物质均具有苦涩味特征，且 EGCG、CAF、EGC、C、GC 和 ECG 的 TAV 值均大于 1，是白茶茶汤中贡献苦涩味的主要物质，但其在 FDDB、ZC302、CC2 和 HJY 中的 TAV 值要小于其他品种。同样，茶氨酸在 8 个品种白茶中的 TAV 值均大于 1，在 FDDB 中的 TAV 值明显高于其他品种，为 315.67，在 MS131 中最低，仅为 137.17。这可能是 FDDB 滋味鲜甜的原因，与感官审评中 FDDB 滋味呈现出鲜甜和 QDA 分析中鲜味得分最高表现一致。此外 ZC302 和 CC2 中茶氨酸的 TAV 值也较高于其他品种。基于感官品质和滋味物质分析，本研究认为 FDDB、ZC302 和 CC2 白茶的品质优于其他品种，因此，选择这 3 个优势品种白茶进行后续分析。

2.6 优势品种白茶香气成分分析

2.6.1 电子鼻分析 电子鼻对香气具有极高的敏感性，挥发性化合物的微小变化即可引发不同的传感器响应。目前，电子鼻技术已被用于评估红茶的质量等级[42]、监测乌龙茶烘焙过程中的香气变化[43]、水质对普洱茶风味品质的影响[29]，以及探究茶毫对白茶香气的贡献[44]。为了研究不同品种白牡丹白茶挥发性成分的差异，采用 FDDB、ZC302 和 CC2 三个品种白茶在 10 个传感器上的响应值绘制了雷达图和 PCA 图。如图 4A 和图 4C 所示，3 个品种白茶干茶和叶底雷达图的形状相似，但部分传感器响应值存在明显差异，说明 3 个品种白茶的挥发性物质种类大体相似，但含量上存在差异。此外，在 10 个传感器上，W1W 传感器响应值的变化最为明显，说明它对 3 个品种白茶的区分起主要作用。因此，3 个品种白茶的香气特征差异可能与硫化物相对含量差异有关。为了进一步了解 3 个品种白茶香气差异，采用主成分分析法对其干茶和叶底的电子鼻检测结果进行分析。由图 4B 和图 4D 可知，3 个品种白茶得到明显区分，说明其香气品质存在较大差异。

2.6.2 优势品种白茶香气成分含量分析 3 个品种白茶样品共检测出 1489 种香气成分，包括 302 种萜类、239 种酯类、169 种酮类、148 种醇类、143 种杂环化合物、112 种醛类、84 种烃类、69 种酸类、53 种酚类、48 种胺类、45 种芳烃、34 种醚类、19 种含氮化合物、13 种卤代烃和 11 种含硫化合物（图 5A）。由图 5B 可知，ZC302 的香气化合物相对含量为 929.05 μg/g，显著高于 CC2（701.90 μg/g）和 FDDB（688.11 μg/g）（P<0.05）。各品种白茶中均为萜类化合物含量最高，然后是杂环类化合物、醇类、酮类、烃类和胺类，其在 3 个品种白茶中的相对含量均超过 30 μg/g。此外，除酯类、酸类、含氮化合物和卤代烃外，ZC302 中的其余 11 类化合物的相对含量均高于 CC2 和 FDDB。ZC302 中相对含量前 6 的化合物为萜类（384.76 μg/g）、杂环化合物（161.52 μg/g）、醇类（146.61 μg/g）、酮类（59.69 μg/g）、烃类（44.28 μg/g）和胺类（37.71 μg/g）；CC2 中萜类的相对含量最高（294.82 μg/g），其次为杂环化合物（113.11 μg/g）、醇类（80.69 μg/g）、酮类（57.10 μg/g）、烃类（36.84 μg/g）和醛类（32.03 μg/g）；FDDB 中萜类的相对含量最高（263.68 μg/g），其次为杂环化合物（127.98 μg/g）、醇类（99.09 μg/g）、酮类（53.01 μg/g）、烃类（33.43 μg/g）和醛类（30.92 μg/g）。统计分析发现，3 个品种白茶

表 6 不同茶树品种白牡丹白茶中关键差异滋味物质的 TAV 值

Table 6 TAV values of key differentiating taste substances of Baimudan white tea from different tea plant varieties

物质名称	阈值（mg/g）[40-41]	TAV值								
		ZC302	FDDB	WNZ	CC2	FX9	MS131	ZC108	HJY	滋味类型
EGCG	0.087	933.32	952.50	1066.33	937.00	1231.11	1336.49	1220.87	353.13	苦涩味
CAF	0.100	403.77	416.43	424.48	413.90	434.16	475.22	471.30	215.59	苦味
EGC	0.159	38.18	81.83	125.97	56.08	97.75	103.08	52.18	86.51	苦味
C	0.119	264.84	245.85	302.94	262.67	321.50	287.62	230.60	190.78	苦涩味
GC	0.165	33.42	36.59	82.39	37.68	77.95	76.72	68.42	53.39	涩味
茶氨酸	0.060	288.83	315.67	211.50	241.67	179.67	137.17	190.67	288.00	鲜味
ECG	0.115	17.98	8.30	30.95	14.29	33.39	25.15	48.85	7.11	苦涩味

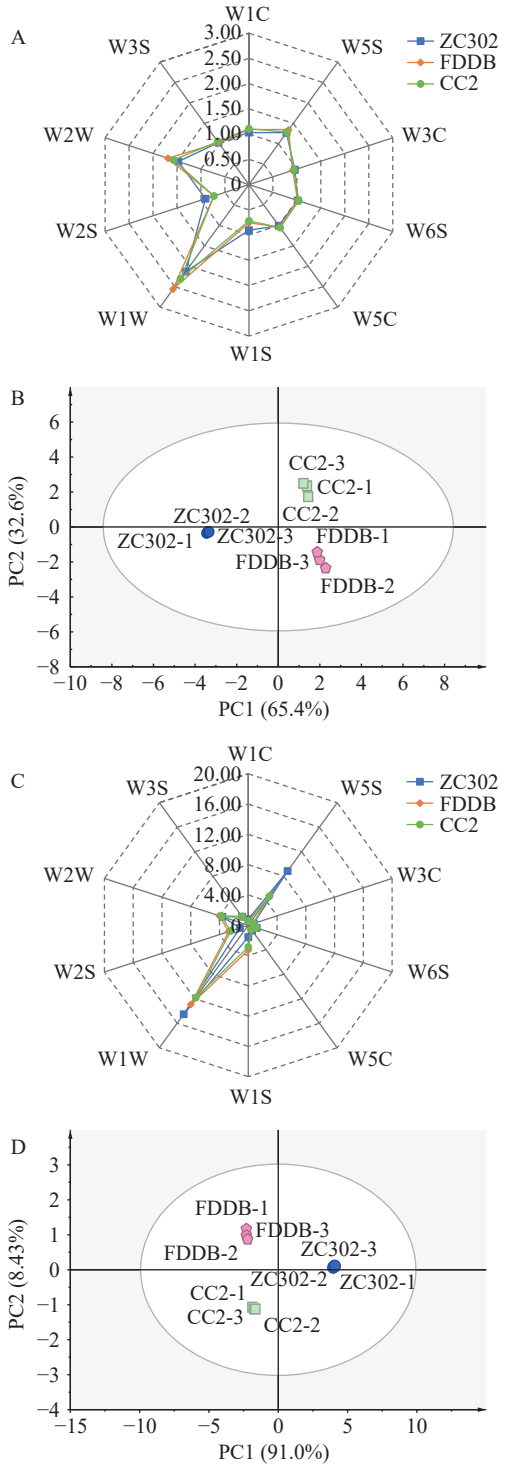


图 4　不同品种白茶电子鼻分析结果

Fig.4　Analysis results of electronic nose for different varieties of white tea

注：A. 干茶电子鼻响应值雷达图；B. 干茶电子鼻响应值 PCA 图；C. 叶底电子鼻响应值雷达图；D. 叶底电子鼻响应值 PCA 图。

中上述 6 种香气化合物的相对含量占比均超过 87%，这说明不同品种白茶之间香气差异主要由萜类化合物、杂环类化合物、醇类、酮类、烃类和胺类的相对含量差异引起。

2.6.3　优势品种白茶香气成分的多元统计分析　为了解析不同品种白牡丹白茶的代谢特征，基于不同

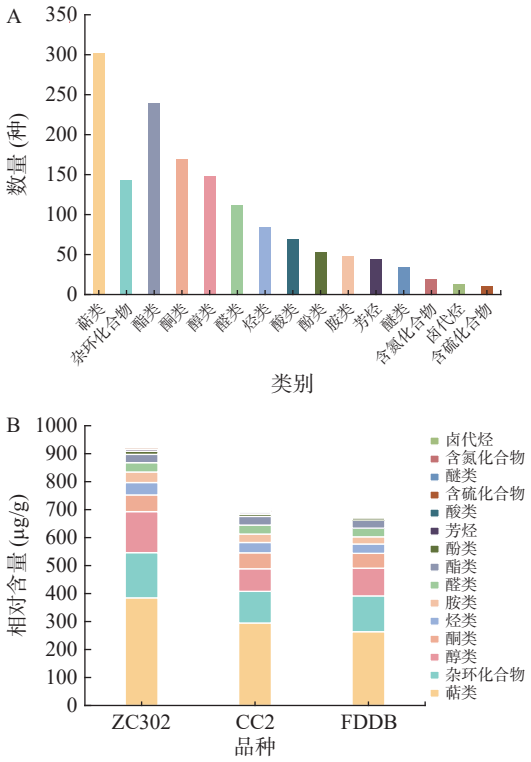


图 5　不同品种白茶香气化合物类别和含量

Fig.5　Category and content of aromatic compound of white tea from different tea plant varieties

品种白茶的 1489 种香气成分相对含量构建 PCA 和 OPLS-DA 得分图。无监督的 PCA 得分图显示（图 6A），PC1 和 PC2 的方差贡献率分别为 46.4% 和 25.1%，累计方差贡献率为 69.5%，可以较有效地反映不同品种白茶之间的香气差异。随后采用有监督的 OPLS-DA 进一步探究不同品种白茶之间的香气代谢物差异。由图 6B 可知，FDDB 分布在第二象限，CC2 分布在第三象限，ZC302 分布在横轴的正半轴上，其拟合参数为 $R^2X_{(cum)}$=0.965，$R^2Y_{(cum)}$=0.988，$Q^2_{(cum)}$=0.967，拟合结果可靠且具有较强的预测能力，表明不同茶树品种白茶的香气存在明显差异。通过 200 次置换检验验证了模型的稳定性，所得模型的 R^2 为 0.737，Q^2 为−0.837，其 Q^2 与 Y 轴相交的截距小于 0，该模型未出现过拟合现象，故模型可靠并能用于 3 个不同品种白茶香气的判别分析（图 6C）。基于 OPLS-DA 得分图提取得到的主成分进行 HCA 分析（图 6D），结果显示 3 个品种白茶样品主要分为 2 个不同的组别：ZC302 单独列为一组，FDDB 和 CC2 聚为一组，这与感官审评结果一致。

2.6.4　优势品种白茶的差异香气成分鉴定和分析　为确定导致 3 个品种白茶香气品质差异的关键香气物质，本研究基于 OPLS-DA 分析构建了 VIP 图谱。通过筛选 P<0.05 且 VIP>1.0 的香气物质，共鉴定出 47 种关键香气成分。由于香气成分含量的高低并不能直接表明其对白茶整体香气贡献程度，而是由气味阈值与含量共同决定的[11]，结合不同品种白茶

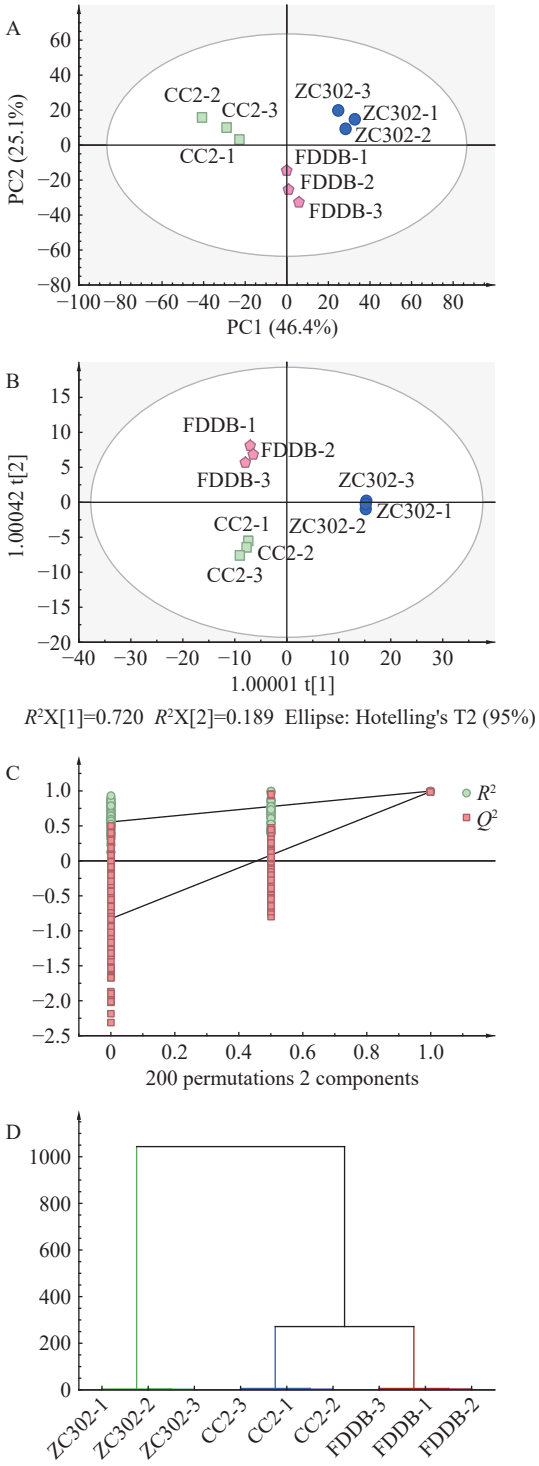


图 6　不同品种白茶香气组分的多元统计分析

Fig.6　Multivariate statistical analysis of the aroma constituents of white tea from different tea plant varieties

注: A. PCA 得分图; B. OPLS-DA 得分图; C. 验证模型; D. HCA 树状图。

香气成分的相对含量, 通过相关文献和 TGSC 数据库查阅香气物质的阈值[16−17], 在一定范围内, OAV 越大, 该物质对香气形成的贡献越大[8]。在筛选的关键香气物质(P<0.05 且 VIP>1.0)基础上计算 OAV, 本次筛选到 OAV>1 的关键香气成分共有 28 种(表 7), 包括醇类 4 种、醛类 7 种、萜类 14 种、杂环化合物 2 种和酯类 1 种, 这些物质主要表现为花香、果香、甜香、清香和青气, 共同决定了不同品种白茶的香气特征。

为进一步探究这 28 种关键香气化合物在不同品种白茶之间的差异, 采用热图可视化 HCA 对其进行分析(图 7)。结果显示, 3 个品种白茶被聚类为 3 组, 表明茶叶样品组间存在显著性差异。在 ZC302 中, 一些令人愉悦的苯乙醇(果香、甜香)、(+)-二氢香芹酮(草本香)、(E)-β-罗勒烯(果香)、(E)-3-己烯醇(清香)、2,6-二甲基-5-庚醛(清香)和令人不愉悦的(Z)-3-己烯醇(青气)、3-己烯-1-醇(青气)的相对含量明显高于 CC2 和 FDDB, (E,E)-2,4-庚二醛(青气)和(E)-2-己烯醛(青气)等这些表现为令人不愉悦的香气成分, 则低于其他品种白茶。可能是造成 QDA 中 ZC302 清香得分较高而青气得分较低的原因; 在 CC2 中, 月桂烯(木质香)、芳樟醇(花香、果香)、β-罗勒烯(果香)、香叶醇(花香)、β-蒎烯(木质香)、β-水芹烯(果香)、D-柠檬烯(果香)、柠檬烯(果香)、苯乙醛(花香)、柠檬醛(柠檬香、清香)、α-水芹烯(果香)、邻伞花烃(果香)、δ-杜松烯(草本香)、2-甲基苯甲醛(花香)这些令人愉悦的香气成分高于其他品种, 一些令人不愉悦的成分, 如(Z)-3-己烯醇(青气)、正己醛(青气)和(E)-2-己烯醛(青气)低于其他品种白茶, 可能是造成感官审评中 CC2 具有花香特征及其花香得分最高而青气较低的原因。在 FDDB白茶中, 除令人愉悦的反式-芳樟醇氧化物(呋喃型, 花香)、苯甲醛(甜香)、1-辛烯-3-乙酸酯(清香)和令人不愉悦的乙烯基吡嗪(青气)、正己醛(青气)、(E,E)-2,4-庚二醛(青气)外, 其余香气物质的相对含量均低于 ZC302 和 CC2, 可能是造成其花香得分低于 ZC302 和 CC2 的重要原因。综上所述, 3 个品种白茶间香气的差异主要来源于这些关键差异香气的组成和比例差异。芳樟醇、香叶醇和苯乙醛的高表达赋予了 CC2 花香的品质特征, 而(Z)-3-己烯醇、正己醛和(E)-2-己烯醛的低表达造成其青气低于其他两个品种白茶。

表 7　不同品种白茶关键香气成分的 OAV

Table 7　OAV of key aroma components of white tea from different tea plant varieties

序号	香气成分	CAS	阈值 (μg/kg)[16−17]	OAV			香气特征[16−17]
				ZC302	CC2	FDDB	
1	苯乙醇	60-12-8	140.00	301.01	131.06	214.66	果香、甜香
2	反式-芳樟醇氧化物(呋喃型)	34995-77-2	190.00	140.34	105.79	169.25	花香
3	(+)-二氢香芹酮	5524-05-0	820.00	48.98	39.44	41.76	草本香
4	月桂烯	123-35-3	15.00	1149.67	1186.18	1016.00	木质香

续表 7

序号	香气成分	CAS	阈值（μg/kg）[16−17]	OAV			香气特征[16−17]
				ZC302	CC2	FDDB	
5	(E)-β-罗勒烯	3779-61-1	34.00	363.59	363.08	307.58	甜香
6	芳樟醇	78-70-6	6.00	2425.87	4035.51	2262.46	花香、果香
7	(Z)-3-己烯醇	928-96-1	50.00	107.74	34.76	66.31	青气
8	(E)-3-己烯醇	928-97-2	110.00	49.11	15.80	30.14	清香
9	β-罗勒烯	13877-91-3	34.00	262.94	269.96	225.32	果香
10	香叶醇	106-24-1	7.50	1052.49	2305.19	824.18	花香
11	苯甲醛	100-52-7	350.00	17.74	18.12	22.85	甜香
12	β-蒎烯	127-91-3	140.00	47.24	50.38	42.81	木质香
13	β-水芹烯	555-10-2	40.00	141.86	143.75	122.73	果香
14	乙烯基吡嗪	4177-16-6	700.00	5.75	5.67	7.20	青气
15	D-柠檬烯	5989-27-5	34.00	127.63	133.31	113.57	果香
16	柠檬烯	138-86-3	10.00	433.36	453.27	386.15	果香
17	苯乙醛	122-78-1	6.30	527.50	1020.80	462.33	花香
18	柠檬醛	5392-40-5	100.00	30.29	46.22	37.13	柠檬香、清香
19	α-水芹烯	99-83-2	40.00	70.70	71.81	61.10	果香
20	正己醛	66-25-1	5.00	284.07	233.13	587.17	青气
21	邻伞花烃	527-84-4	10.00	298.18	366.49	306.08	果香
22	1-辛烯-3-乙酸酯	2442-10-6	90.00	5.28	3.68	7.88	清香
23	2,6-二甲基-5-庚醛	106-72-9	16.00	77.30	76.87	65.54	清香
24	δ-杜松烯	483-76-1	1.50	48.01	230.58	50.73	草本香
25	2-甲基苯甲醛	529-20-4	9.60	132.31	149.33	129.62	花香
26	3-己烯-1-醇	544-12-7	70.00	5.59	1.15	2.51	青气
27	(E,E)-2,4-庚二醛	4313-03-5	56.00	5.48	12.79	13.60	青气
28	(E)-2-己烯醛	6728-26-3	3.10	103.68	84.16	174.13	青气

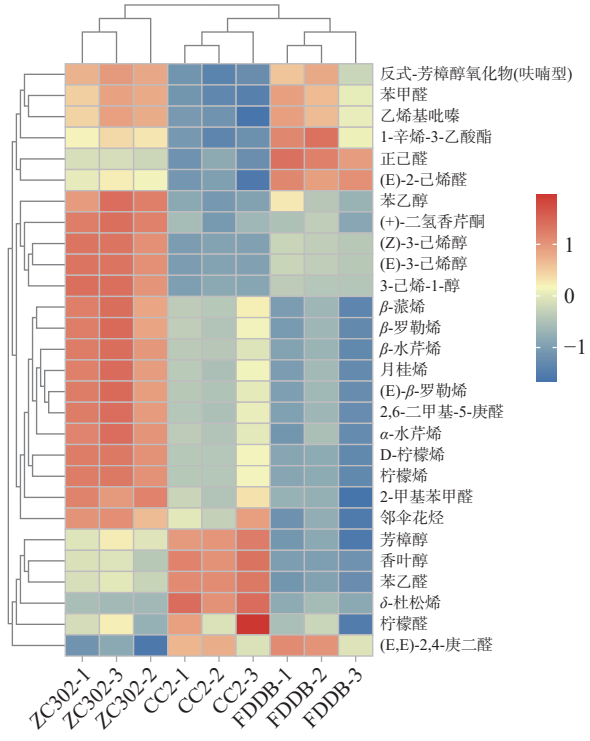


图 7　不同品种白茶香气化合物的热图

Fig.7　Heatmap of the contents of aroma components of white tea from different tea plant varieties

3　结论

本研究通过 QDA、电子鼻和代谢物组学技术，结合多元统计分析比较了宜宾茶区 8 个主栽茶树品种所制白茶的品质差异。结果表明，FDDB、ZC302 和 CC2 所制白茶毫香显露或带花香，滋味鲜甜，综合得分最高，而 WNZ 和 FX9 表现为清香带青气，滋味尚鲜醇带生青味或酸味，得分较低。此外，MS131 和 FX9 的茶多酚、儿茶素总量及酯型儿茶素含量均最高，苦涩味指数最大；HJY 的游离氨基酸含量最高，酚氨比和水浸出物含量较低。FDDB、ZC302 和 CC2 中呈苦涩味的茶多酚、酯型儿茶素的含量较低而呈鲜爽味的茶氨酸、谷氨酸等氨基酸含量较高。通过 OPLS-DA 和 TAV 分析，共筛选得到 EGCG、咖啡碱、EGC、儿茶素、没食子儿茶素、茶多酚、茶氨酸、水浸出物和 ECG 等 9 种造成 8 个品种白茶滋味差异的关键物质，其中茶氨酸在 FDDB、ZC302、HJY 和 CC2 中的 TAV 值较高，是其滋味鲜爽度较高的原因。

萜类、杂环类化合物、醇类、酮类、烃类和胺类是 FDDB、ZC302、CC2 三个优势品种白茶的主要香气物质。通过 OPLS-DA 和 OAV 分析筛选得到 28 个关键差异香气物质，CC2 的芳樟醇、香叶醇和苯乙醛等花香成分含量显著高于其他两个品种，而(Z)-3-己烯醇、正己醛和(E)-2-己烯醛等青气成分含量相对较低，这可能是 CC2 花香明显的主要原因。ZC302 中呈果香、甜香和清香的苯乙醇、(E)-β-罗勒烯、(E)-3-己烯醇等香气成分相对含量较高，但部分青气物质的相对含量较高。FDDB 中反式-芳樟醇氧化物

(呋喃型)、苯甲醛等花香成分含量较高,但整体香气化合物和令人愉悦的香气物质相对含量低于 ZC302 和 CC2。综上所述,FDDB、ZC302 和 CC2 在宜宾茶区具有良好的白茶适制性。但本研究未能揭示不同滋味和香气物质之间的相互作用及其对白茶品质形成的影响,后续应该开展这方面的研究,更好为宜宾白茶茶树品种选择及工艺优化提供理论支撑。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 缪伊雯, 周静芸, 杨春明, 等. 不同茶树品种寿眉白茶品质分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 283−294. [LIAO Yiwen, ZHOU Jingyun, YANG chunming, et al. Analysis of quality in shoumei white tea from different tea plant varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 283−294.]

[2] FU Zhouping, CHEN Liyan, ZHOU Sujuan, et al. Analysis of differences in the accumulation of tea compounds under various processing techniques, geographical origins, and harvesting seasons[J]. Food Chemistry, 2024, 430: 137000.

[3] 梅宇. 2024 年中国茶叶生产与内销形势分析[J]. 中国茶叶, 2025, 47(6): 24−30. [MEI Yu. Analysis of China's tea production and domestic sales in 2024[J]. China Tea, 2025, 47(6): 24−30.]

[4] 刘亚兵, 戴宇樵, 蒲璐璐, 等. 不同茶树品种制成白茶的生化成分与品质分析[J]. 贵州农业科学, 2026, 54(2): 122−131. [LIU Yabin, DAI Yuqiao, PU Lulu, et al. Biochemical composition and quality analysis of white tea produced from different tea tree varieties[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2026, 54(2): 122−131.]

[5] 武珊珊, 赵远艳, 王启, 等. 9 个云南大叶种茶树品种的白茶适制性评价[J/OL]. 分子植物育种, 1−16[2026-07-12]. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.s.20241129.1546.023. [WU Shanshan, ZHAO Yuanyan, WANG Qi, et al. Evaluation of suitability for manufacturing of white tea by nine cultivars of tea (*Camellia sinensis* var. *Assamica*)[J/OL]. Molecular Plant Breeding, 1−16[2026-07-12]. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.s.20241129.1546.023.]

[6] 陈林, 陈键, 宋振硕, 等. 白茶风味品质形成与调控技术研究进展[J]. 中国茶叶加工, 2023(4): 22−35. [CHEN Lin, CHEN Jian, SONG Zhensuo, et al. Research progress on the formation and regulation of flavor and quality of white tea[J]. Chinese Tea Processing, 2023(4): 22−35.]

[7] 徐珊珊, 史星云, 臧聪, 等. 安吉白茶品质综合评价研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(15): 214−221. [XU Shanshan, SHI Xingyun, ZANG Cong, et al. Study on the comprehensive evaluation of the quality of Anjibaicha[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(15): 214−221.]

[8] 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 Shudu, 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.]

[9] 杨玉子, 安会敏, 陈圆, 等. 靖安白茶的风味特征及其关键物质表征[J]. 现代食品科技, 2025, 41(11): 269−290. [YANG Yuzi, AN Huiming, CHEN Yuan, et al. Flavor characteristics and key substance characterization of Jing'an baicha[J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(11): 269−290.]

[10] 毛兴萍, 黄晓琴, 张丽霞, 等. 日照白茶风味品质及关键呈香物质分析[J]. 食品科学, 2025(21): 201−210. [MAO Xingping, HUANG Xiaoqing, ZHANG Lixia, et al. Analysis of flavor quality and key aroma compounds of Rizhao white tea[J]. Food Science, 2025(21): 201−210.]

[11] 周晶晶, 张雯萍, 李光发, 等. 九龙大白茶白茶风味品质的分析[J]. 食品科学, 2025(6): 201−210. [ZHOU Jingjing, ZHANG Wenping, LI Guangfa, et al. Analysis of flavor quality of Jiulong Dabaicha white tea[J]. Food Science, 2025(6): 201−210.]

[12] 黄媛, 于娟, 任玲, 等. 不同品种白茶品质及抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2023, 48(7): 64−70. [HUANG Yuan, YU Juan, REN Ling, et al. Study on the quality and antioxidant activity of different varieties of white tea[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(7): 64−70.]

[13] ANISA K, SUSI S, NURUL A, et al. Comparative study of antimicrobial potential of white tea and black tea leaf extracts from east Java-Indonesia on two species of oral streptococci[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 16: 2226−2230.

[14] MD SHAHIDULISLAM. Effects of the aqueous extract of white tea (*Camellia sinensis*) in a streptozotocin-induced diabetes model of rats[J]. Phytomedicine, 2011, 19: 25−31.

[15] THARUKA W, LIU Yongxiang, XU Baojun. New insights into chemical compositions and health benefits of white tea and development of new products derived from white tea[J]. Food Science and Human Wellness, 2025, 14(11): 9250424.

[16] YANG Liran, LUO Xueping, WANG Qi, et al. Exploring the effect of different tea varieties on the quality of Sichuan Congou black tea based on metabolomic analysis and sensory science[J]. Frontiers in Nutrition, 2025, 12: 1587413.

[17] YUE Chuan, CAO Hongli, ZHANG Shaorong, et al. Aroma characteristics of Wuyi rock tea prepared from 16 different tea plant varieties[J]. Food Chemistry, 2023, 17: 100586.

[18] FENG Wanzhen, ZHOU Huan, XIONG Zhichao, et al. Exploring the effect of different tea varieties on the quality of Lu'an Guapian tea based on metabolomics and molecular sensory[J]. Food Chemistry, 2024, 23: 101534.

[19] 梁子钧, 俞滢, 张磊, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析茶树新品系‘白云 0492’白茶香气特征成分[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 313−321. [LIANG Zijun, YU Ying, ZHANG Lei, et al. Headspace solid phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry analysis of aroma characteristics of white tea from new strain ‘Baiyun 0492’[J]. Food Science, 2023, 44(22): 313−321.]

[20] CUI Hongchun, CHENG Zhiqiang, SHI Daliang, et al. Non-volatile metabolomics analysis of heating withering method for processing white tea from Longjing 43 tea variety by UHPLC-Q-TOF/MS[J]. Frontiers in Nutrition, 2025, 12: 1735183.

[21] LI Yanping, HUANG Yibiao, ZHOU Su, et al. A newly-discovered tea population variety processed Bai Mu Dan white tea: Flavor characteristics and chemical basis[J]. Food Chemistry, 2024, 446: 138851.

[22] SHI Junxian, SUN Lingli, ZHANG Suwan, et al. GC-MS and GC-O reveal the differences in aroma quality of three typical varieties of Fenghuang Dancong tea[J]. Food Chemistry, 2026, 510: 148686.

[23] WANG Yueqi, ZHANG Yazhen, WANG Liubin, et al. Analysis of the synergistic effects of tea cultivars and regional environ-

ments on metabolic phenotypes[J]. Food Research International, 2026, 231: 118790.
[24] 刘明丽, 滕皎, 蒋宾, 等. 宜宾市主要产茶区茶园土壤养分分析及综合评价[J]. 中国农学通报, 2025, 41(34): 96−105. [LIU Mingli, TENG Jiao, JIANG Bin, et al. Analysis and comprehensive evaluation of soil nutrient in tea plantations in major tea producing areas of Yibin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2025, 41(34): 96−105.]
[25] 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.
[26] LI Zzhaoqi, CEHN Jing, ZHANG Shiyu, et al. Quality characteristics of white tea prepared from albino tea cultivars: A comprehensive study based on metabolomics and quantitative analyses[J]. Food Chemistry: X, 2025, 32: 103287.
[27] TIAN D, MA Chenyang, ZHOU Xiaohui, et al. Reveal the influence mechanism of different storage containers on the flavor of ripe Pu-erh tea based molecular sensory science[J]. LWT, 2024, 214: 117073.
[28] 罗学平, 蒋宾, 李丽霞, 等. OPA 柱前衍生化 HPLC 同时测定川红工夫红茶 20 种氨基酸含量[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2024, 42(4): 53−62. [LUO Xueping, JIANG Bin, LI Lixia, et al. Simultaneous determination of 20 amino acids in Sichuan black tea by the method of online pre-column OPA derivatization HPLC[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2024, 42(4): 53−62.]
[29] 赵苗苗, 严亮, 戴宇樵, 等. 不同水质对景迈山普洱茶风味品质的影响[J/OL]. 食品科学, 1-14[2026-07-12]. https://link.cnki.net/urlid/11.2206.ts.20251222.1411.076. [ZHAO Miaomiao, YAN Liang, DAI Yuqiao, et al. Comparative effects of water types on the flavor quality of Jingmai mountain pu-erh tea[J/OL]. Food Science, 1−14[2026-07-12]. https://link.cnki.net/urlid/11.2206.ts.20251222.1411.076.]
[30] 杨丽冉, 蒋宾, 彭康丽, 等. 基于代谢组学分析提香对川红工夫风味品质的影响[J/OL]. 食品工业科技, 1−18[2026-07-12]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025080251. [YANG Liran, JIANG Bin, PENG Kangli, et al. Analysis on the effect of flavor enhancement on the flavor quality of Sichuan gongfu black tea based on metabolomics[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1−18[2026-07-12]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025080251.]
[31] ZHANG Liang, CAO Qingqing, GRANATO Daniel, et al. Association between chemistry and taste of tea: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 101: 139−149.
[32] 蒋宾, 鄢远珍, 刘琨毅, 等. 云南和福建白茶差异比较研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 62−72. [JIANG Bin, YAN Yuanzhen, LIU Kunyi, et al. Comparison of the difference between Yunnan and Fujian white tea[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2021, 43(4): 62−72.]
[33] WANG Zhihui, LIANG Yilin, WU Weiwei, et al. The effect of different drying temperatures on flavonoid glycosides in white tea: A targeted metabolomics, molecular docking, and simulated reaction study[J]. Food Research International, 2024, 190: 114634.
[34] LU Mingxia, JIANG Yanjun, ZHAO Wei, et al. Effects of different drying methods on color difference, taste and chemical components of Yunnan Congou black tea[J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 223: 117696.
[35] 蒋宾, 罗学平, 刘琨毅, 等. 不同产地工夫红茶风味品质比较研究[J]. 食品科技, 2024, 49(11): 56−65. [JIANG Bin, LUO Xueping, LIU Kunyi, et al. Analysis of the quality differences of Congou black tea from different origin[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(11): 56−65.]
[36] 石玉涛, 陈金磊, 肖秀丹, 等. 加工工艺对香茶儿茶素组分含量的影响[J]. 食品科技, 2020, 45(5): 70−76. [SHI Yutao, CHEN Jinlei, XIAO Xiudan, et al. Effect of processing technology on the components of catechin in fragrant tea[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(5): 70−76.]
[37] CEHNG Qinghua, HE Shiqiang, DUAN Xingzhu. The flavor-related metabolites and sensory quality of white tea produced by exogenous methyl jasmonate treated tea leaves[J]. Food Chemistry, 2026, 501: 147648.
[38] 沈瑜, 朱海燕. 仓储 1~8 年间政和白牡丹茶感官品质及理化成分变化[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 371−380. [SHEN Yu, ZHU Haiyan. Sensory quality and physicochemical components changes of Zhenghe Baimudan white tea during a storage period of 1~8 years[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 371−380.]
[39] JIANG Bin, LUO Xueping, YAN Jingna, et al. Investigation of the effect of fragrance-enhancing temperature on the taste and aroma of black tea from the cultivar *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze cv Huangjinya using metabolomics and sensory histology techniques[J]. Fermentation, 2024, 10: 520.
[40] 刘忠英, 杨婷, 戴宇樵, 等. 基于分子感官科学的茶叶滋味研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 337−343. [LIU Zhongying, YANG Ting, DAI Yuqiao, et al. Research progress of tea taste based on molecular sensory science[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(4): 337−343.]
[41] 许皓, 肖虹菲, 林家威, 等. 现代工艺六堡茶渥堆过程中茶汤色泽及主要滋味品质成分动态变化[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(11): 317−326. [XU Hao, XIAO Hongfei, LIN Jiawei, et al. Dynamic changes of tea soup color and main taste quality during process of modern craft Liupao tea fermentation[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(11): 317−326.]
[42] XIA Hongling, CHEN Wei, HU Die, et al. Rapid discrimination of quality grade of black tea based on near-infrared spectroscopy (NIRS), electronic nose (E-nose) and data fusion[J]. Food Chemistry, 2024, 440: 138242.
[43] WANG Ying, DUAN Yue, SONG Huanlu. Dynamic changes in qidan aroma during roasting: Characterization of aroma compounds and their kinetic fitting[J]. Foods, 2024, 13: 1611.
[44] 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 Shuting, QU Fengfeng, ZHANG Xinfu, et al. Research on the aroma of white tea leaves based on electronic nose technology[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 2020, 37(4): 258−263.]