蒲璐璐, 罗金龙, 方仕茂, 等. 不同年份贵州白茶品质差异分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(18): 348−359. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080193

PU Lulu, LUO Jinlong, FANG Shimao, et al. Analysis of Quality Differences in Guizhou White Tea Across Different Years[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(18): 348−359. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080193

· 现代分析与智能检测 ·

不同年份贵州白茶品质差异分析

蒲璐璐[1], 罗金龙[1], 方仕茂[1], 杨肖委[1], 张　园[1], 尹　杰[2], 段学艺[1,*], 沈　强[1,*]

（1.贵州省茶叶研究所, 贵州贵阳 550025;
2.贵州大学农学院, 贵州贵阳 550025）

摘　要: 为探究贮藏时间对贵州白茶风味特征的影响，该研究采用高效液相色谱法、电子鼻检测和气相色谱质谱联用技术对不同贮藏年份贵州白茶进行主要滋味物质和挥发性成分分析。结果表明，白茶陈化过程中茶多酚、总黄酮、咖啡碱、游离氨基酸、可溶性糖、乳酸、L-苹果酸和儿茶素组分含量差异显著（P<0.05），水浸出物含量差异较小。电子鼻分析表明，不同年份贵州白茶的香气特征差异可能与硫化物、芳香成分和氮氧类挥发性物质有关。挥发性成分分析表明，在不同年份贵州白茶中共鉴定出 123 种挥发性物质，包括醇类 17 种、醛类 13 种、酮类 18 种、烷烃类 23 种、烯烃类 12 种、酯类 22 种、其他类 18 种。其中，2013 年生产的白茶中检测出 23 种特有挥发性成分，而 2015 年、2016 年、2020 年和 2022 年生产的白茶中仅检测出 1~3 种特有挥发性成分，且 2016 年生产的白茶中挥发性物质总量最高，2013 年生产的白茶中挥发性物质种类最为丰富。气味活性值（odor activity value，OAV）分析表明，正壬醛（OAV>20）对贮藏过程中白茶香气特征的形成具有重大贡献。该研究为贵州白茶的科学贮藏和品质提升提供了理论依据。

关键词: 白茶, 滋味物质, 挥发性成分, 贮藏, 电子鼻

中图分类号: TS272.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)18−0348−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080193　　本文网刊:

Analysis of Quality Differences in Guizhou White Tea Across Different Years

PU Lulu[1], LUO Jinlong[1], FANG Shimao[1], YANG Xiaowei[1], ZHANG Yuan[1], YIN Jie[2], DUAN Xueyi[1,*], SHEN Qiang[1,*]

（1.Guizhou Provincial Tea Research Institute, Guiyang 550025, China;
2.College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China）

Abstract: To investigate the effects of storage duration on the flavor characteristics of Guizhou white tea, this study employed high-performance liquid chromatography, electronic nose detection, and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) to analyze the major taste compounds and volatile components in Guizhou white tea from different storage years. The results revealed significant differences (P<0.05) in the contents of tea polyphenols, total flavonoids, caffeine, free amino acids, soluble sugars, lactic acid, L-malic acid, and catechin components during the aging process of white tea, whereas differences in water-extractable substances were relatively minor. Electronic nose analysis indicated that the aroma characteristics of Guizhou white tea from different vintages might be related to sulfides, aromatic components, and nitrogen–oxygen volatile substances. Volatile compound analysis revealed 123 volatile substances across the different vin-

收稿日期: 2025−08−18

基金项目: 贵州省科技厅科技计划支撑项目（黔科合支撑 [2023] 一般 063）; 贵州省农业科学院青年基金项目（黔农科一般基金 [2024]13）; 贵州省科技计划项目（黔科合成果 [2024] 一般 084）; 国家重点研发计划课题-贵州省科技厅后补项目（2021YFD1100306）; 铜仁市科技计划项目（铜市科研（2025）22 号）。

作者简介: 蒲璐璐（1995−）, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 茶叶加工及综合利用, E-mail: 1002539192@qq.com。

*** 通信作者:** 段学艺（1986−）, 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 茶叶精深加工, E-mail: 312718161@qq.com。
沈强（1981−）, 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 茶叶加工及综合利用、茶叶机械, E-mail: 40908712@qq.com。

tages of Guizhou white tea, including 17 alcohols, 13 aldehydes, 18 ketones, 23 alkanes, 12 alkenes, 22 esters, and 18 other compounds. Among these, 23 unique volatile compounds were detected in white tea from 2013, whereas only 1~3 unique volatile compounds were identified in tea from 2015, 2016, 2020, and 2022. Additionally, white tea produced in 2016 presented the highest total volatile content, while that from 2013 contained the most diverse array of volatile compounds. Odor activity value (OAV) analysis indicated that nonanal (OAV>20) significantly contributed to the formation of the characteristic aroma of white tea during storage. This study provides a theoretical basis for the scientific storage and quality enhancement of Guizhou white tea.

Key words: white tea; flavor substances; volatile components; storage; electronic nose

贵州拥有丰富的茶树种质资源，其茶园种植面积多年位居全国第一[1]。白茶作为贵州生产加工的传统茶类之一，属于微发酵茶，滋味甜美醇厚，具有抗氧化[2]、抗糖尿病[3]、抗肥胖[4]、降血脂[5]和抗菌消炎[6]等保健功能。

白茶的风味特征由茶多酚、氨基酸、咖啡碱等滋味成分和挥发性物质共同决定，并受茶树品种、加工工艺和贮藏时间等多种因素的影响[7−8]。有研究表明，在贮藏过程中，白茶滋味和香气成分会随着贮藏时间的增加发生一系列复杂变化，从而形成不同年份白茶独特的风味特征[9]。NING 等[10]检测了不同贮藏时间白茶中没食子酸、咖啡因、儿茶素和氨基酸含量的变化趋势，结果表明，随着贮藏时间增加，没食子酸含量升高，儿茶素和氨基酸含量降低。谢明威等[11]对不同贮藏年份的白毫银针和寿眉进行了代谢组学分析，结果表明，随着贮藏时间增加，白毫银针中生物碱、氨基酸及其衍生物的含量整体上升高，而寿眉中主要表现为降低。FAN 等[12]通过代谢组学分析发现类黄酮、单宁和氨基酸在储存过程中降低，而酚酸和有机酸的总量增加。金阳等[13]采用气相-离子迁移谱技术（GC-IMS）分析了不同年份贮藏福鼎白牡丹的挥发性物质变化，结果表明，随着贮藏时间增加，芳樟醇、水杨酸甲酯、苯甲醛等物质含量逐渐降低。尽管已有研究探讨了贮藏时间对白茶品质的影响，然而，以贵州沿河县千年古茶树鲜叶为原料制成的白茶，其在贮藏过程中主要滋味物质与香气特征的变化规律尚缺乏系统认知。

本研究通过主要滋味物质和挥发性成分检测，并结合电子鼻与相对气味活性值分析，比较了 5 种不同年份贵州白茶的风味特征差异，旨在探究白茶陈化过程中主要滋味物质和挥发性成分的变化规律，以期阐释贮藏时间对白茶风味特征的影响，为贵州白茶科学贮藏和品质提升提供数据支持。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

5 份茶样　由贵州塘坝千年古茶有限公司提供，所有样品均以贵州省沿河县塘坝镇古茶树鲜叶（一芽二、三叶）为原料，通过传统白茶加工工艺制作而成，在温度低于 25 ℃、相对湿度低于 50% 的条件下统一贮藏，样品编号为 W2013、W2015、W2016、W2020 和 W2022，分别对应 2013 年、2015 年、2016 年、2020 年和 2022 年生产的茶样；儿茶素、表儿茶素、表没食子儿茶素、没食子酸、表儿茶素没食子酸酯、表没食子儿茶素没食子酸酯、咖啡碱、谷氨酸等标准品　美国 Sigma 公司；甲醇、乙腈、乙酸　色谱纯，德国 Merck 公司；三氯化铝、醋酸钠、冰醋酸、苯酚、浓硫酸、水合茚三酮、磷酸二氢钾　分析纯，西陇科学股份有限公司。

PEN3 型便携式电子鼻　德国 AIRSENSE 公司；UV-6000T 型紫外分光光度计　上海元析仪器有限公司；LC-2010AHT 高效液相色谱仪　日本岛津公司；101-0A 电热恒温鼓风干燥箱　天津市泰斯特仪器有限公司；8890A 型气相色谱仪　Agilent 公司；Pegasus BT 4D 型质谱仪　LECO 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　非挥发性成分分析　水浸出物含量参照 GB/T 8305-2013《茶水浸出物测定》进行测定；茶多酚含量参照 GB/T 8313-2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》进行测定；游离氨基酸含量参照 GB/T 8314-2013《茶游离氨基酸总量的测定》进行测定；黄酮含量采用三氯化铝比色法进行测定[14]；可溶性糖含量采用苯酚硫酸法进行测定[15]；咖啡碱、儿茶素组分和有机酸含量采用 JIANG 等[16]和沈瑜等[8]的方法进行测定。

1.2.2　电子鼻检测　电子鼻检测采用邱梦宇等[17]的方法进行。电子鼻 10 个传感器的性能描述如表 1 所示。

表 1　10 个传感器的性能描述

Table 1　Performance description of the 10 sensors

序号	传感器	传感器响应特性
R1	W1C	对芳香成分和苯类灵敏
R2	W5S	对氮氧化合物灵敏
R3	W3C	对芳香成分和氨类灵敏
R4	W6S	对氢化物灵敏
R5	W5C	对短链烷烃芳香成分灵敏
R6	W1S	对甲基类灵敏
R7	W1W	对硫化物灵敏
R8	W2S	对醇类和醛酮类灵敏
R9	W2W	对芳香成分和有机硫化物灵敏
R10	W3S	对长链烷烃灵敏

1.2.3　挥发性成分分析　色谱条件：GC×GC-TOF MS 色谱系统由 Agilent 8890A 气相色谱仪，双级喷

射调制器和分流/不分流进样模块组成，质谱系统为高分辨 TOF 质谱检测仪。高纯氦气作为载气，恒定流速为 1.0 mL/min。色谱柱 DB-Heavy Wax（30 m×250 μm×0.5 μm）：初始温度为 50 ℃，保持 2 min，然后以 5 ℃/min 的速度升至 240 ℃，保持 5 min。

质谱条件：LECO Pegasus BT 4D 质谱检测器，质谱传输线温度为 250 ℃，离子源温度为 250 ℃，采集速率为 10 spectra/s，电子轰击源为 70 eV，检测器电压为 2014 V，质谱扫描范围为 m/z 35~550。

1.2.4 挥发性物质定性定量和 OAV 分析 根据 GC-MS 分析得到的质谱数据在 NIST20 标准谱库中进行检索，以相似度大于 80% 作为物质鉴定标准。采用癸酸乙酯内标法进行定量，根据癸酸乙酯的浓度（10 μg/mL）与峰面积作为标准曲线，挥发性物质含量以其峰面积与内标癸酸乙酯的峰面积之比表示。

气味活性值（odour activity value，OAV）的计算公式为：

$$OAV = \frac{C}{OT}$$

式中：C 为挥发性成分的相对含量（ng/g）；OT 为挥发性成分的阈值（ng/g）。

1.3 数据处理

采用 GraphPad Prism 9.5 软件绘制柱状图，Origin 2021 软件绘制雷达图；通过 SPSS 26 软件进行单因素方差分析（ANOVA）和邓肯多重比较（Duncan multiple comparisons）以检验样品组间显著性（$P<0.05$）；利用迈维云平台（https://cloud.metware.cn）进行主成分分析（principal component analysis，PCA）、绘制聚类热图和筛选差异挥发性代谢物；使用 TBtools-II 软件绘制 Upset 图。所有指标进行三次重复实验，结果以“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 不同年份贵州白茶主要滋味物质分析

茶多酚、总黄酮和咖啡碱是茶汤苦涩味的主要来源，游离氨基酸和可溶性糖是决定茶汤鲜甜滋味的关键因素，水浸出物是茶汤滋味浓厚程度的重要指标，这些滋味物质的含量高低在一定程度上反映了茶叶的品质[18−19]。如图 1 所示，不同年份贵州白茶中茶多酚、总黄酮、咖啡碱、游离氨基酸、可溶性糖和水浸出物的含量发生了显著变化。茶多酚含量在 W2020 和 W2022 中显著高于其他 3 种茶样（$P<0.05$）。在贮藏过程中，茶多酚含量整体呈下降趋势。谢克孝等[20]比较了不同年份白茶饼的主要化学成分，结果表明随着贮藏年份的增长，茶多酚含量呈下降趋势。值得注意的是，白茶陈化过程中茶多酚含量的减少可能是由于儿茶素和花青素的降解[21]。总黄酮含量在 W2015 中最高，在 W2013 中最低。与 W2013 相比，W2015、W2016 和 W2020 的总黄酮含量显著增加（$P<0.05$）。

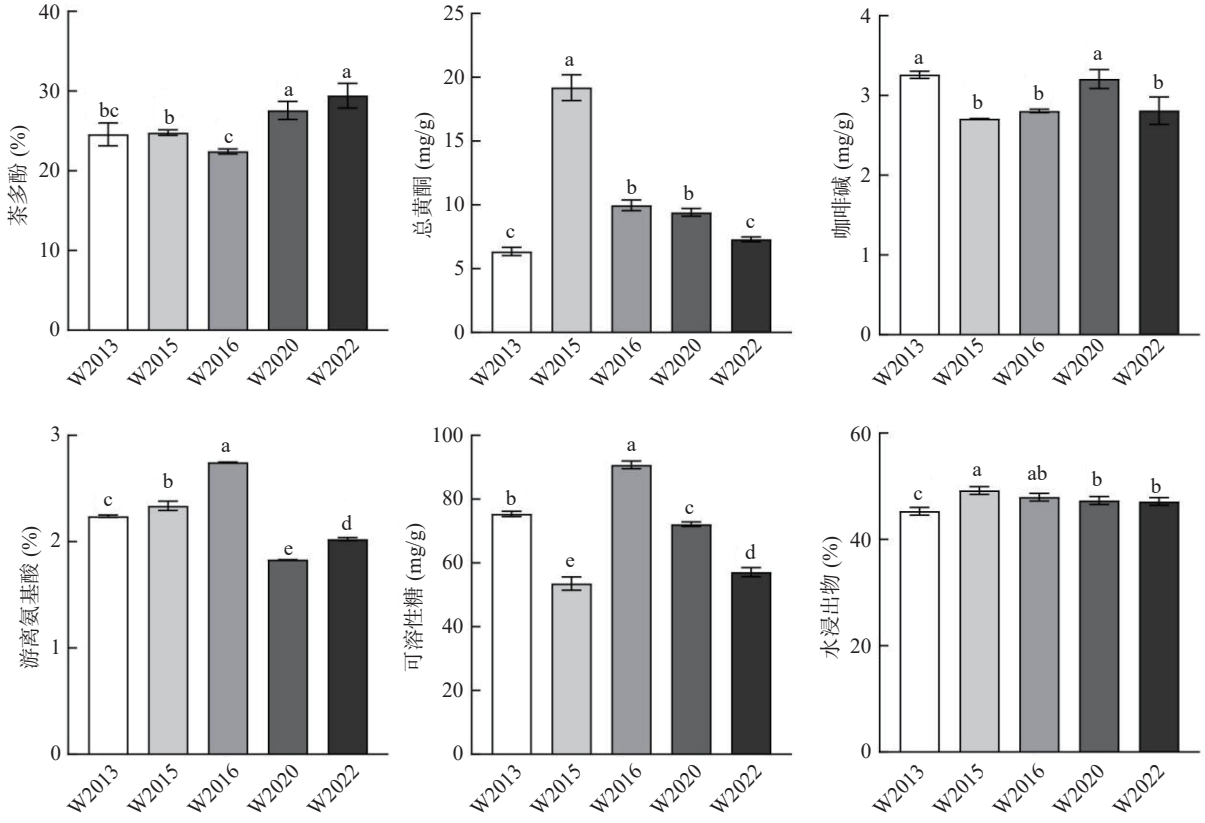


图 1 不同年份贵州白茶茶多酚、总黄酮、咖啡碱、游离氨基酸、可溶性糖含量和水浸出物的比较

Fig.1 Comparison of the contents of tea polyphenols, total flavonoids, caffeine, free amino acids, soluble sugars and water extracts in Guizhou white tea of different years

注：不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$），图 2 同。

随着贮藏年份的增长，总黄酮含量呈先上升后下降的变化趋势，这与张灵枝等[22]的研究结果一致。总黄酮含量的增加可能是相关物质发生某种转化的结果，最可能的来源之一是在贮藏过程中黄酮糖苷的水解，出现糖苷键断裂[23]。此外，W2013 和 W2020 中的咖啡碱含量显著高于其他 3 种茶样（P<0.05）。在贮藏过程中，咖啡碱含量整体上呈波浪形变化，但变化范围较小，这与赵文净等[24]的研究结果基本一致。据报道，白茶陈化过程中咖啡碱含量降低的主要原因可能是由于假单胞菌和黑曲霉将咖啡碱降解为茶碱和 3-甲基黄嘌呤[25]。W2016 中游离氨基酸和可溶性糖含量显著高于其他 4 种茶样（P<0.05）。在贮藏过程中，游离氨基酸和可溶性糖含量整体上呈先上升后下降趋势。值得注意的是，白茶陈化过程中氨基酸含量降低可能是由于自身发生氧化降解反应或美拉德反应[26]；白茶陈化过程中可溶性糖含量增加可能是由于多糖在微生物分泌的细胞外酶作用下水解为单糖或双糖[27]。此外，W2013 中的水浸出物含量显著低于其他 4 种茶样（P<0.05），表明长时间贮藏会降低白茶中水浸出物的含量，这与之前的研究结果基本一致[22,24]。

2.2　不同年份贵州白茶儿茶素组分比较

儿茶素作为茶叶中的主要酚类化合物，是茶汤苦涩味形成的关键因素[28]。对不同年份贵州白茶进行儿茶素组分含量检测，结果如图 2 所示。W2020 中的没食子酸（Gallic acid, GA）和表儿茶素没食子酸酯（Epicatechin gallate, ECG）含量显著高于其他 4 种茶样（P<0.05）。W2013 和 W2022 中的儿茶素（Catechin, C）含量显著高于其他 3 种茶样（P<0.05）。此外，W2013 和 W2016 中的表儿茶素（Epicatechin, EC）含量显著低于其他 3 种茶样（P<0.05）。W2015 和 W2020 中的表没食子儿茶素（Epigallocatechin, EGC）含量显著高于其他 3 种茶样（P<0.05）。W2016 中的表没食子儿茶素没食子酸酯（Epigallocatechin gallate, EGCG）含量显著低于其他 4 种茶样（P<0.05）。从整体上看，不同年份贵州白茶儿茶素组分中 EGCG 的含量最高，EC 的含量最低。与 W2020 相比，W2016 中儿茶素组分整体上呈较降趋势，可能是由于儿茶素类物质的结构中含有多个羟基，白茶陈化过程中易发生氧化聚合反应[29]。白茶陈化过程中 C 含量先降低后升高；ECG 含量先升高后降低；EC 含量呈先上升后下降再上升的变化趋势；GA、EGC 和 EGCG 含量呈先上升后下降再上升的变化趋势。

2.3　不同年份贵州白茶有机酸含量分析

有机酸能够赋予饮料独特的酸味或口感[30]。使用高效液相色谱法在不同年份贵州白茶中共鉴定出 9 种有机酸。由表 2 可知，W2015 中检测出 9 种有机酸，W2020 中检测出 7 种有机酸，W2013、W2016 和 W2022 中仅检测出 5 种有机酸。从整体上看，L-苹果酸的含量范围为 3.29~29.31 mg/g，其中 W2022 的 L-苹果酸含量显著高于其他 4 种茶样（P<0.05）；乳酸的含量范围为 19.47~66.49 mg/g，其中 W2016 的乳酸含量显著高于其他 4 种茶样（P<0.05）。此外，

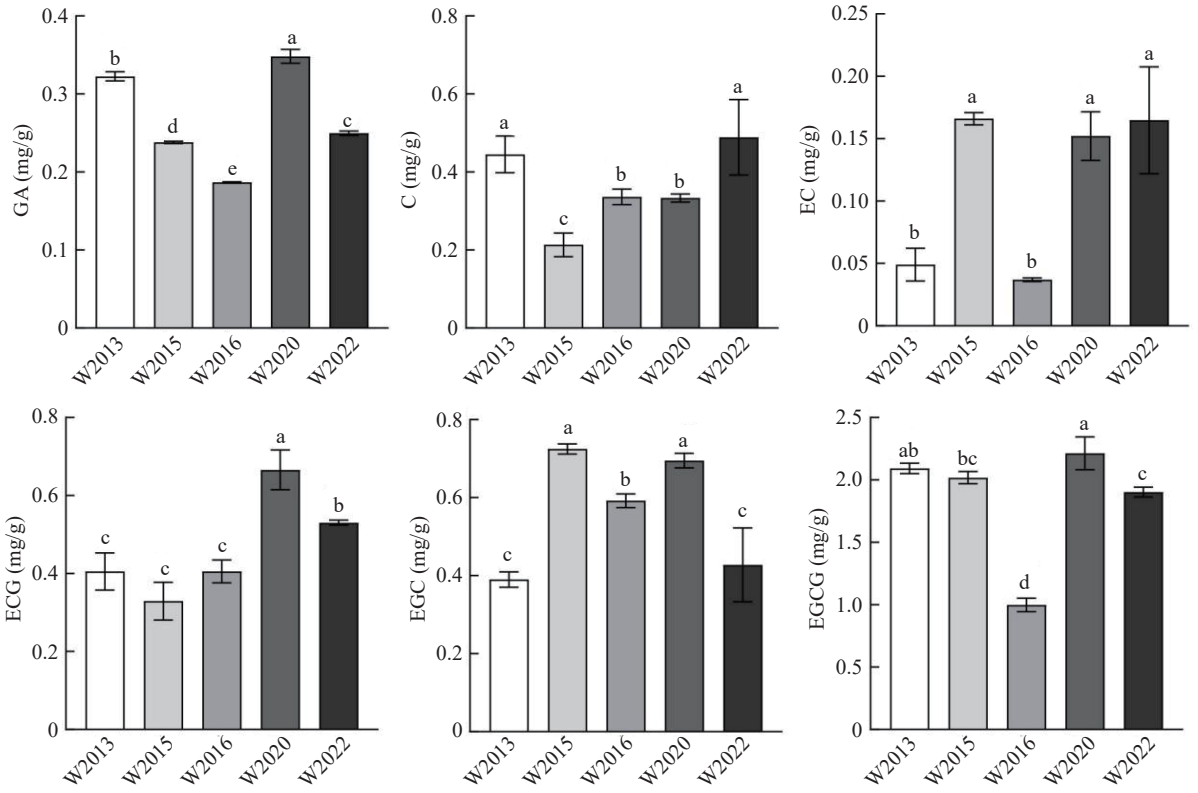


图 2　不同年份贵州白茶的儿茶素组分

Fig.2　Catechin components of Guizhou white tea from different years

表 2 不同年份贵州白茶有机酸含量差异(mg/g)

Table 2 Difference in organic acid content of Guizhou white tea in different years (mg/g)

样品	W2013	W2015	W2016	W2020	W2022
L-苹果酸	12.33±0.80^{b}	5.60±0.24^{d}	3.29±0.24^{e}	8.40±0.31^{c}	29.31±0.50^{a}
D-苹果酸	–	1.86±0.08^{b}	–	15.16±0.48^{a}	–
乳酸	26.03±0.50^{d}	48.50±0.91^{c}	66.49±0.50^{a}	19.47±0.68^{e}	60.50±0.54^{b}
琥珀酸	–	1.90±0.10	–	–	–
奎尼酸	0.01±0.00^{d}	0.03±0.00^{c}	0.12±0.00^{a}	0.05±0.00^{b}	0.05±0.00^{b}
富马酸	0.07±0.00^{d}	0.11±0.00^{b}	0.05±0.00^{e}	0.14±0.00^{a}	0.08±0.00^{c}
乙酸	–	31.14±0.66^{a}	–	21.50±0.48^{b}	–
丙酮酸	0.04±0.01^{cd}	0.03±0.00^{d}	0.07±0.00^{b}	0.05±0.00^{c}	0.22±0.00^{a}
柠檬酸	–	4.92±0.13	–	–	–

注: 同行不同小写字母表示差异显著(P<0.05), “–”为未检出; 表3同。

奎尼酸、富马酸和丙酮酸的含量范围分别为 0.01~0.12、0.05~0.14、0.03~0.22 mg/g, 其中 W2022 的丙酮酸含量显著高于其他 4 种茶样(P<0.05)。值得注意的是, D-苹果酸和乙酸仅在 W2015 和 W2020 中被检测出。琥珀酸和柠檬酸仅在 W2015 中被检测出, 含量分别为 1.90 mg/g 和 4.92 mg/g。白茶陈化过程中 L-苹果酸含量先降低后升高, 奎尼酸含量先升高后降低。整体上看, 乳酸含量最高, 在不同年份贵州白茶中均被检测出。

2.4 不同年份贵州白茶的电子鼻检测

为了研究不同年份贵州白茶挥发性成分的差异, 采用 5 种不同年份贵州白茶在 10 个传感器上的响应值绘制了雷达图和 PCA 图。如图 3A 所示, 不同年份贵州白茶雷达图的形状相似, 但部分传感器响应值存在明显差异, 说明不同年份贵州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、W2W 和 W5S 三个传感器响应值的变化最为明显, 说明它们对 5 种不同年份贵州白茶的区分起主要作用。因此, 5 种不同年份贵州白茶的香气特征差异可能与硫化物、芳香成分和氮氧类挥发性物质有关。为了进一步了解不同年份贵州白茶香气差异, 采用主成分分析法对不同年份贵州白茶的电子鼻检测结果进行分析。如图 3B 所示, PC1 和 PC2 的方差贡献率分别为 65.3% 和 24.5%, 累计方差贡献率为 89.8%, 说明可以反映不同传感器响应值的整体信息。PCA 图显示 W2013 和 W2015 存在部分重叠, 这表明它们的香气特征有相似之处。

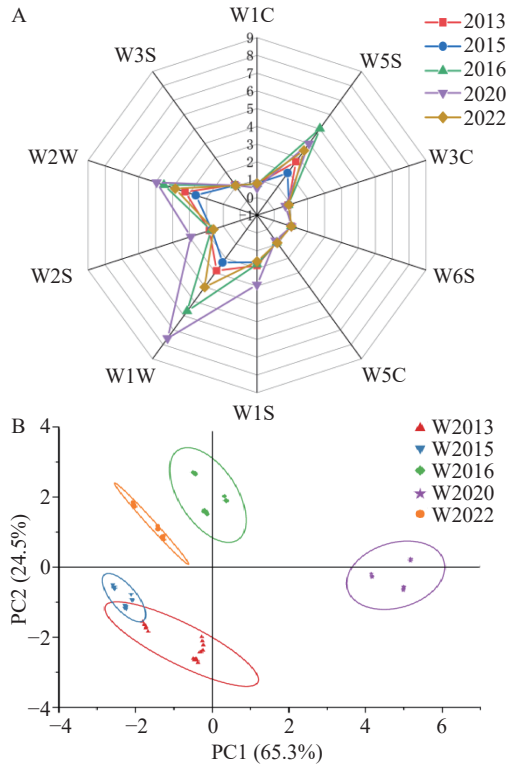


图 3 不同年份贵州白茶电子鼻响应值雷达图(A)及 PCA 图(B)

Fig.3 Radar plot (A) and PCA plot (B) of electronic nose response values of Guizhou white tea of different years

2.5 不同年份贵州白茶挥发性物质种类和含量差异

如表 3 所示, 在不同年份贵州白茶中共鉴定出 123 种挥发性物质, 包括醇类 17 种、醛类 13 种、酮类 18 种、烷烃类 23 种、烯烃类 12 种、酯类 22 种、其他类 18 种。其中, W2013、W2015、W2016、W2020 和 W2022 中分别检测出 23 种、3 种、2 种、1 种和 3 种特有挥发性成分。根据 123 种挥发性物质的聚类热图显示, 不同年份贵州白茶挥发性物质之间存在明显差异(图 4A)。此外, 根据 123 种挥发性物质的 PCA 图显示, W2016 和 W2022 位于第一象限, W2013 位于第二象限, W2015 和 W2020 位于第四象限, 说明 5 种不同年份贵州白茶挥发性物质之间存在明显差异, 这与聚类热图的结果一致(图 4B)。

如图 4C 所示, 在 7 种挥发性物质类别中, 醇类、醛类、酮类、烷烃类、烯烃类、酯类和其他类含量范围分别为 194.06~1697.14、124.98~761.16、389.21~1209.47、319.58~1397.12、128.00~666.74、377.75~11525.67、482.88~1912.17 ng/g。白茶陈化过程中挥发性物质总量整体上呈先上升后下降的变化趋势; 醇类、醛类和酯类含量呈先上升后下降再上升的变化趋势; 酮类和其他类含量呈先下降后上升再下降的变化趋势; 烷烃类和烯烃类含量呈先上升后下降的变化趋势。

表 3　不同年份贵州白茶挥发性物质含量

Table 3　Volatile matter content of Guizhou white tea in different years

序号	挥发性物质	保留时间（min）	含量（ng/g）				
			W2013	W2015	W2016	W2020	W2022
	醇类						
1	2-乙基-1-己醇	19.71	–	11.64±0.09^{a}	6.72±0.22^{b}	7.75±2.89^{b}	6.07±0.22^{b}
2	2,5-二甲基-2,5-己二醇	26.24	–	610.76±12.97^{b}	48.59±0.22^{d}	1561.47±23.99^{a}	248.46±6.88^{c}
3	1-辛醇	21.42	–	34.31±1.35^{a}	–	36.12±3.49^{a}	–
4	2-甲基-3-丁烯-2-醇	7.59	–	57.20±18.31^{a}	–	17.32±7.98^{b}	–
5	2-甲基-1-丁醇	12.01	–	30.38±0.57^{a}	–	19.45±0.19^{b}	–
6	反-2-戊烯-1-醇	15.22	–	11.18±1.11	–	–	–
7	橙花叔醇	32.19	0.85±0.10^{b}	–	109.07±5.19^{a}	–	–
8	2-(4-甲基苯基)丙-2-醇	28.31	1.08±0.09^{d}	28.91±0.30^{b}	–	19.19±1.00^{c}	31.56±0.23^{a}
9	橙花醇	27.21	3.91±0.13	–	–	–	–
10	二乙二醇	30.85	13.88±0.38^{b}	–	12.13±0.66^{a}	–	–
11	顺-2-戊烯-1-醇	15.21	30.23±8.07	–	–	–	–
12	异戊醇	12.02	62.06±2.29^{a}	2.13±0.19^{b}	–	–	4.79±0.28^{b}
13	正己醇	16.07	122.78±0.84^{a}	–	17.54±0.25^{b}	–	–
14	青叶醇	16.95	166.81±3.49	–	–	–	–
15	3,4-二甲基环己醇	22.92	223.60±3.84^{a}	3.54±0.17^{b}	–	5.05±0.46^{b}	–
16	1-戊烯-3-醇	10.74	233.85±6.61^{a}	–	–	30.78±2.27^{b}	–
17	芳樟醇	21.18	217.02±31.31	–	–	–	–
	醛类						
18	2-丁烯醛	7.78	–	12.05±4.85	–	–	–
19	正丁醛	4.46	1.86±0.35^{b}	–	–	–	27.38±1.09^{a}
20	癸醛	20.12	3.06±0.08^{b}	–	8.67±0.38^{a}	–	10.48±0.22^{a}
21	2-甲基-2-丁烯醛	9.16	7.50±0.16^{c}	22.04±1.06^{b}	42.08±6.28^{a}	25.44±0.67^{b}	13.06±0.31^{c}
22	正辛醛	14.52	19.57±1.42^{a}	–	–	19.83±0.23^{a}	–
23	正壬醛	17.38	24.07±2.59^{e}	128.57±0.58^{a}	30.22±0.54^{d}	54.99±1.67^{b}	35.34±0.15^{c}
24	2-甲基丁醛	5.06	42.23±2.66	–	–	–	–
25	正戊醛	6.34	49.11±2.87^{b}	–	342.10±10.99^{a}	341.08±27.95^{a}	–
26	异戊醛	5.13	52.30±3.08	–	–	–	–
27	庚醛	11.62	90.06±1.32^{a}	–	–	–	38.72±0.29^{b}
28	(E)-丁-2-烯醛	7.79	100.98±7.13^{a}	–	17.25±0.88^{b}	–	–
29	青叶醛	12.59	135.83±0.80	–	–	–	–
30	正己醛	8.80	234.59±3.18	–	–	–	–
	酮类						
31	4-甲基-2-己酮	11.51	–	99.56±9.11^{a}	58.88±3.43^{b}	46.26±14.46^{bc}	38.18±4.38^{c}
32	2-戊酮	6.29	–	–	224.08±4.84^{b}	98.77±8.21^{c}	298.75±1.41^{a}
33	2-庚酮	11.51	–	0.90±0.27^{d}	8.33±0.24^{a}	7.08±0.27^{b}	3.04±0.11^{c}
34	3-十一酮	21.75	–	6.50±0.55^{a}	4.28±0.26^{b}	4.38±0.40^{b}	–
35	环丁基甲基酮	12.44	–	–	–	94.67±4.17	–
36	7,8-二氢紫罗兰酮	27.80	–	5.06±0.14^{b}	15.61±0.70^{a}	4.55±0.56^{b}	2.44±0.08^{c}
37	香叶基丙酮	28.49	–	97.56±1.29^{b}	16.07±0.43^{d}	104.11±3.66^{a}	26.46±0.51^{c}
38	1-甲氧基-2-丙酮	9.28	–	–	10.12±0.24^{c}	15.52±5.08^{b}	21.64±1.01^{a}
39	茉莉酮	30.45	2.94±0.09^{b}	–	–	11.31±2.96^{a}	–
40	大马士酮	27.91	7.18±0.19^{b}	118.90±2.31^{a}	5.64±0.26^{b}	–	–
41	3-辛烯-2-酮	17.75	9.92±0.83^{c}	–	35.69±1.02^{a}	25.02±2.79^{b}	–
42	2-辛酮	14.38	19.68±4.28^{c}	24.85±1.46^{bc}	–	38.27±1.03^{b}	252.33±14.54^{a}
43	羟基丙酮	15.02	15.82±0.34^{a}	–	–	1.29±0.12^{b}	–
44	1-戊烯-3-酮	7.28	28.87±1.47	–	–	–	–
45	2,2,6-三甲基环己酮	15.43	36.99±1.59	–	–	–	–
46	甲基异丁基酮	6.94	56.44±7.77^{a}	44.98±4.28^{b}	–	23.80±2.12^{c}	49.05±1.29^{ab}
47	甲基庚烯酮	15.86	86.69±0.24^{a}	–	21.52±2.06^{bc}	18.96±2.01^{c}	24.05±2.58^{b}
48	3-辛酮	13.53	124.68±1.06^{e}	576.41±40.25^{a}	357.22±4.44^{c}	288.43±22.36^{d}	493.54±16.31^{b}

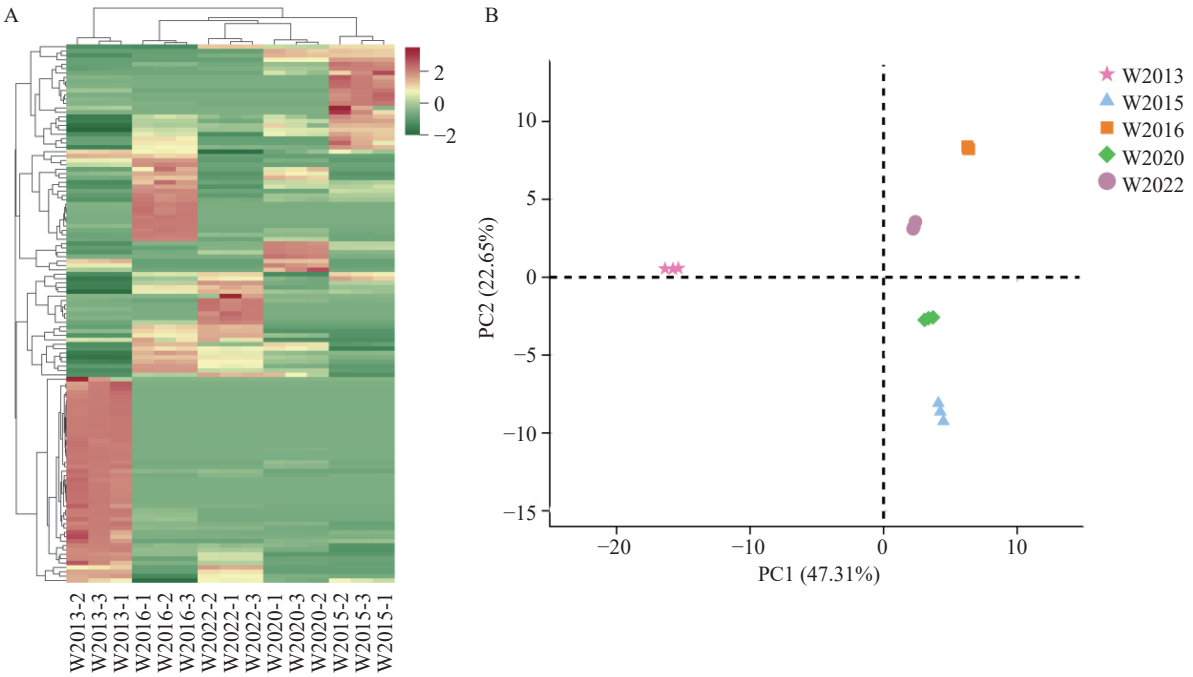
续表 3

序号	挥发性物质	保留时间（min）	含量(ng/g)				
			W2013	W2015	W2016	W2020	W2022
	烷烃类						
49	3-甲基十一烷	10.70	–	175.00±2.33^{a}	88.18±1.14^{b}	102.08±5.82^{b}	47.08±3.49^{c}
50	2,2,4,4-四甲基戊烷	5.61	–	404.40±28.69^{a}	289.26±4.72^{b}	121.00±8.08^{c}	134.85±4.36^{c}
51	2,2,5,5-四甲基己烷	7.44	–	1.81±0.27^{a}	1.35±0.08^{a}	–	–
52	2-甲基戊烷	4.33	–	121.81±0.36^{c}	316.95±15.28^{a}	129.87±9.16^{c}	216.11±3.33^{b}
53	2,2,3,4-四甲基戊烷	5.78	–	–	–	–	20.66±1.79
54	2-甲基-5-乙基庚烷	6.67	–	100.28±0.96^{c}	72.83±2.55^{d}	443.17±9.78^{a}	173.11±2.03^{b}
55	2,2,4,6,6-五甲基庚烷	5.60	–	14.71±0.11^{c}	128.84±0.45^{a}	56.45±0.58^{b}	66.09±1.59^{b}
56	3-乙基-2-甲基庚烷	10.38	–	–	27.57±0.25	–	–
57	3,4-二乙基正己烷	6.67	–	4.98±0.58	–	–	–
58	1,2-环氧环戊烷	9.48	–	–	42.89±0.86^{a}	6.30±0.13^{b}	–
59	甲基环氧丙烷	3.24	–	20.76±7.97^{a}	15.21±0.22^{a}	–	–
60	3,5-二甲基辛烷	8.00	1.62±0.10^{e}	419.78±22.97^{a}	68.83±0.65^{c}	89.83±4.37^{b}	26.75±0.84^{d}
61	2,2,5-三甲基己烷	7.45	2.23±0.30^{b}	55.33±10.14^{a}	–	–	–
62	2,4-二甲基庚烷	3.50	2.40±0.20	–	–	–	–
63	正辛烷	3.43	2.49±0.21^{d}	2.89±0.16^{c}	25.31±0.21^{a}	5.99±0.08^{b}	6.35±0.25^{b}
64	3-乙基-3-甲基庚烷	9.12	24.89±19.17	–	–	–	–
65	3-甲基癸烷	7.99	15.99±1.94^{a}	3.12±0.13^{b}	–	2.02±0.08^{b}	–
66	2,6,11-三甲基十二烷	12.44	12.31±2.09	–	–	–	–
67	十三烷	14.42	19.01±2.04^{b}	72.24±6.78^{a}	–	–	–
68	3-甲基十五烷	21.48	29.47±0.39^{a}	–	–	–	22.01±0.47^{b}
69	正癸烷	6.49	36.81±4.95^{a}	–	1.23±0.08^{b}	–	1.20±0.08^{b}
70	十四烷	17.16	74.50±0.80	–	–	–	–
71	正十二烷	11.63	97.87±0.95^{a}	–	15.30±0.68^{b}	5.59±0.52^{d}	13.02±0.08^{c}
	烯烃类						
72	2-辛烯	3.90	–	177.22±0.38^{b}	521.86±22.39^{a}	144.10±6.20^{b}	–
73	丙烯	7.24	–	1.97±0.22^{a}	4.12±0.16^{a}	2.17±0.16^{a}	–
74	2-甲氧基丙烯	3.24	–	–	16.37±5.41^{a}	12.39±3.10^{a}	–
75	柠蒙烯	11.97	–	–	66.04±4.47^{a}	–	74.70±2.49^{a}
76	3-苯基-1-戊烯	30.22	–	–	3.05±0.09^{a}	–	9.83±0.21^{a}
77	萜品油烯	14.35	–	–	21.19±0.16^{a}	3.60±0.25^{c}	13.07±0.68^{b}
78	4-羟基苯乙烯	38.75	1.70±0.09^{b}	78.22±6.11^{a}	–	–	–
79	α-松油烯	11.31	1.91±0.09^{b}	–	18.57±0.08^{a}	–	–
80	长叶烯	22.19	2.44±0.08	–	–	–	–
81	d-柠檬烯	11.97	33.21±0.40	–	–	–	–
82	月桂烯	10.91	61.90±1.64^{a}	–	15.54±0.23^{b}	–	30.40±0.22^{b}
83	苯并环丁烯	13.67	74.85±0.63	–	–	–	–
	酯类						
84	己酸甲酯	11.68	–	183.38±8.53^{b}	478.00±11.16^{a}	–	–
85	异戊酸乙酯	8.43	–	–	3000.93±51.58	–	–
86	硬脂酸乙酯	39.91	–	39.78±0.35^{d}	100.90±1.03^{a}	56.23±2.51^{c}	89.41±0.88^{b}
87	水杨酸乙酯	27.84	–	57.66±1.17^{b}	59.50±1.03^{b}	30.68±2.08^{c}	120.50±2.13^{a}
88	乙酸丁酯	8.56	–	72.20±3.78^{b}	56.55±1.32^{c}	–	76.75±1.25^{a}
89	棕榈酸甲酯	35.66	1.75±0.09^{b}	–	51.44±1.42^{a}	–	–
90	邻苯二甲酸二乙酯	38.56	1.73±0.10^{b}	–	–	–	40.94±1.34^{a}
91	邻苯二甲酸二甲酯	37.36	5.13±0.56^{a}	–	–	–	7.01±0.28^{a}
92	丁二酸二乙酯	24.53	6.31±0.19^{a}	–	8.32±2.68^{a}	–	8.66±2.13^{a}
93	十四酸乙酯	32.42	7.99±0.10^{b}	–	13.65±0.14^{a}	2.05±0.09^{c}	–
94	γ-戊内酯	23.13	8.21±0.09^{c}	–	66.89±3.78^{a}	57.96±5.48^{b}	57.52±2.36^{b}
95	亚麻酸乙酯	42.52	9.54±0.22	–	–	–	–
96	甲酸乙酯	3.84	18.77±1.58^{a}	–	2.36±0.10^{b}	–	3.07±0.15^{b}
97	正丁酸乙酯	7.65	51.15±9.77^{a}	4.65±0.15^{b}	3.44±0.36^{b}	1.69±0.27^{b}	2.26±0.08^{b}
98	癸酸乙酯	23.52	63.12±7.78^{c}	–	7543.76±70.29^{a}	2489.44±66.09^{b}	–

续表 3

序号	挥发性物质	保留时间（min）	含量(ng/g)				
			W2013	W2015	W2016	W2020	W2022
99	戊酸乙酯	10.22	154.23±7.51	–	–	–	–
100	丙酸乙酯	5.90	244.93±50.35^{a}	18.01±0.09^{c}	44.94±1.21^{c}	27.82±0.89^{c}	94.72±0.74^{b}
101	棕榈酸乙酯	36.32	196.75±1.35	–	–	–	–
102	辛酸乙酯	18.43	212.02±6.01^{a}	–	59.10±0.66^{c}	37.54±0.70^{d}	76.70±2.09^{b}
103	庚酸乙酯	15.72	236.78±8.88^{a}	–	35.87±0.08^{b}	30.13±0.78^{bc}	24.97±0.73^{c}
104	壬酸乙酯	21.03	367.17±0.09^{a}	–	–	–	2.93±0.11^{b}
105	乙酸乙酯	4.64	945.38±36.00^{a}	2.07±0.38^{b}	–	1.95±0.20^{b}	–
	其他类						
106	2,6-二甲基吡嗪	15.34	–	142.88±9.67^{c}	195.03±1.41^{b}	134.60±4.96^{c}	255.79±7.63^{a}
107	2,3-二氢呋喃	4.00	–	8.03±0.10^{c}	15.13±0.23^{b}	4.51±0.23^{d}	17.78±1.04^{a}
108	吲哚	39.84	–	225.78±1.60^{a}	164.02±2.83^{c}	177.87±3.51^{b}	126.91±0.76^{d}
109	2,5-二甲基吡嗪	15.34	–	517.99±6.48^{b}	272.73±1.14^{c}	1200.27±39.26^{a}	270.60±2.92^{c}
110	2-乙烯基吡嗪	18.54	–	–	–	–	53.26±2.44
111	1-乙基吡咯	11.55	–	–	–	–	684.79±72.11
112	2-甲基呋喃	4.39	1.40±0.21^{a}	20.20±1.75^{a}	–	–	–
113	1,2,4-三甲氧基苯	33.12	1.94±0.16^{b}	–	73.56±3.96^{a}	–	–
114	吡啶	11.37	11.69±0.18^{a}	–	–	21.80±1.68^{a}	–
115	4-乙基甲苯	12.77	13.21±0.93^{a}	–	33.45±1.16^{a}	–	–
116	吡嗪	12.32	17.99±0.69^{a}	12.66±2.72^{b}	16.06±0.22^{a}	8.11±1.76^{c}	–
117	三甲基吡嗪	17.55	22.88±0.20^{a}	–	2.41±0.09^{b}	–	–
118	2,3-二甲基吡嗪	16.01	23.93±0.57	–	–	–	–
119	4-异丙基甲苯	14.04	58.98±1.36	–	–	–	–
120	2-甲基吡嗪	13.81	61.43±2.39^{a}	14.16±0.43^{c}	–	16.46±0.39^{c}	44.10±0.95^{b}
121	2-乙酰基吡咯	30.95	64.32±0.45^{b}	326.24±12.85^{a}	–	–	–
122	2-乙基呋喃	5.81	104.46±9.24^{c}	212.91±0.73^{d}	576.76±11.70^{a}	306.01±5.16^{c}	458.94±0.25^{b}
123	2-正戊基呋喃	12.90	100.66±6.24	–	–	–	–

如图 4D 所示，白茶陈化过程中挥发性物质种类数量呈先上升后下降再上升的变化趋势。醛类数量在 W2013 中显著上升。白茶陈化过程中醇类数量呈先上升后下降再上升的变化趋势；酮类数量整体上呈先上升后下降的变化趋势。白茶陈化过程中烷烃类和烯烃类数量变化差异较小；酯类数量在 W2015 中显著下降；其他类数量在 W2013 中显著较高。在贮藏过程中，白茶中挥发性物质种类和含量的变化趋势一致。总的来说，陈化过程有助于贵州白茶香气特征的形成。



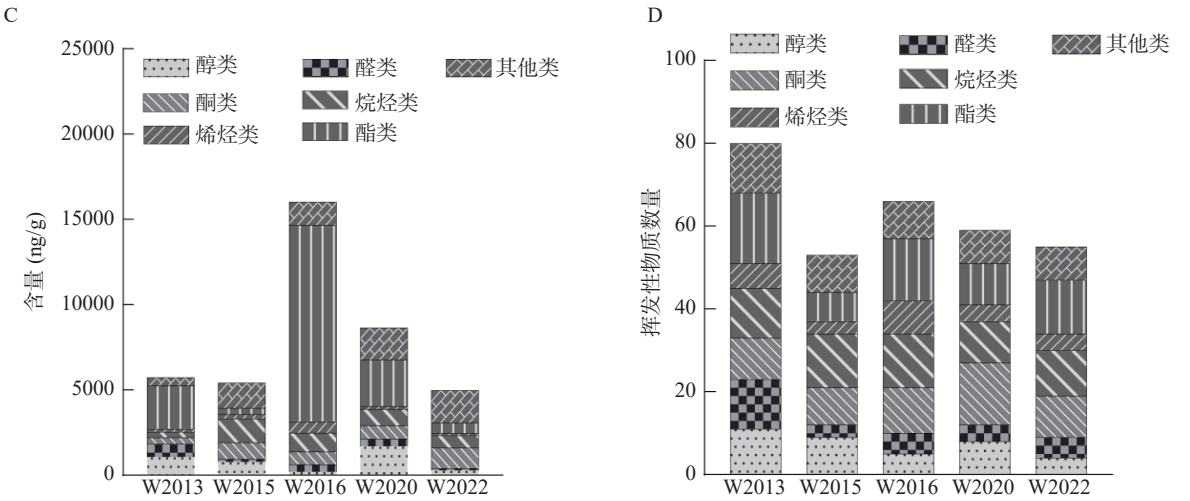


图 4　不同年份贵州白茶挥发性物质分析

Fig.4　Analysis of volatile components in Guizhou white tea from various harvest years

注: A 为挥发性物质聚类热图; B 为挥发性物质 PCA 图; C 为挥发性物质含量堆积柱状图; D 为挥发性物质数量堆积柱状图。

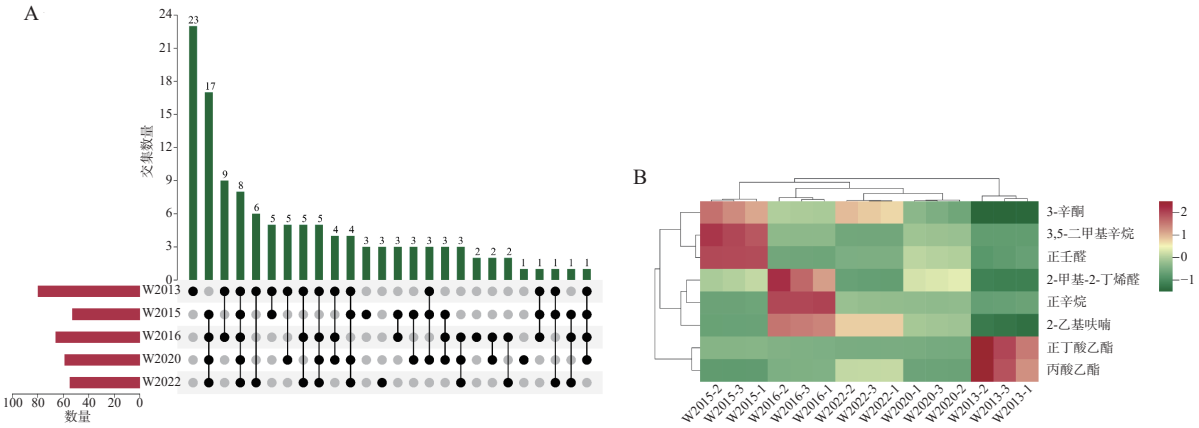


图 5　不同年份贵州白茶挥发性物质 Upset 图(A)和聚类热图(B)

Fig.5　Volatile compound upset diagram (A) and cluster heatmap (B) of Guizhou white tea across different years

2.6　不同年份贵州白茶共有挥发性物质分析

通过分析不同年份贵州白茶共有挥发性物质之间的含量差异, 有助于了解白茶陈化过程中这些挥发性物质的变化规律。如图 5A 所示, 一共鉴定出 8 种共有挥发性物质, 包括 2 种醛类(正壬醛和 2-甲基-2-丁烯醛)、1 种酮类(3-辛酮)、2 种烷烃类(3,5-二甲基辛烷和正辛烷)、2 种酯类(正丁酸乙酯和丙酸乙酯)、1 种其他类(2-乙基呋喃)。

如图 5B 所示, 3 种共有挥发性物质(3,5-二甲基辛烷、正壬醛和 3-辛酮)在 W2015 中含量最高, 3 种共有挥发性物质(2-甲基-2-丁烯醛、正辛烷和 2-乙基呋喃)在 W2016 中含量最高, 2 种共有挥发性物质(正丁酸乙酯和丙酸乙酯)在 W2013 中含量最高。值得注意的是, 大部分共有挥发性物质在 W2013 中含量最低。

2.7　不同年份贵州白茶差异挥发性物质分析

使用迈维云平台以变量投影重要性值(variable important in projection, VIP)≥1.0, P<0.05, 变化倍率值(fold change, FC)≥2 或 FC≤0.5 为筛选标准, 在

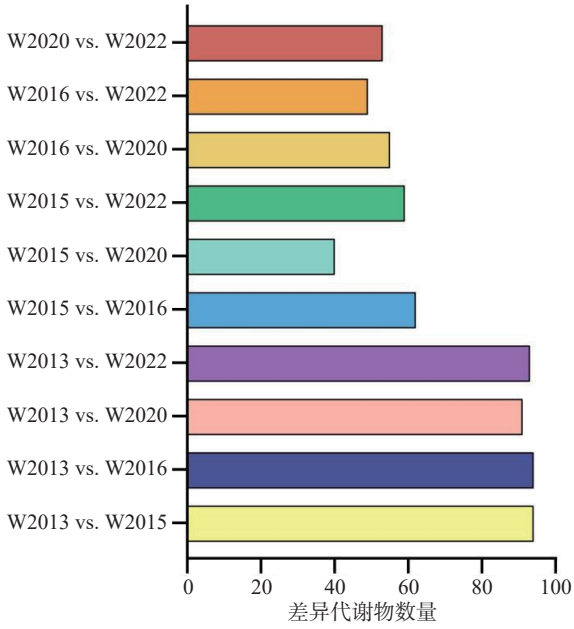


图 6　不同年份贵州白茶差异挥发性物质的数量比较

Fig.6　Comparison of the quantities of different volatile substances in Guizhou white tea of different years

表 4　不同年份贵州白茶挥发性成分 OAV 分析

Table 4　OAV analysis of volatile components of Guizhou white tea in different years

序号	化合物名称	香气特征	阈值(ng/g)[32−39]	OAV				
				W2013	W2015	W2016	W2020	W2022
1	大马士酮	苹果香	0.0015	4788.97	79266.60	3761.16	−	−
2	甲基庚烯酮	草木香	0.05	1733.79	−	430.45	379.24	480.94
3	2-辛酮	木质香	0.06	328.00	414.24	−	637.78	4205.53
4	2,2,6-三甲基环己酮	辛辣味	0.1	369.90	−	−	−	−
5	癸醛	甜花香	0.1	30.61	−	86.75	−	104.85
6	茉莉酮	茉莉花香	0.26	11.30	−	−	43.51	−
7	异戊醛	苹果香	0.4	130.75	−	−	−	−
8	正壬醛	玫瑰香、柑橘香	1	24.07	128.57	30.22	54.99	35.34
9	橙花醇	玫瑰香、柠檬香	1.1	3.56	−	−	−	−
10	月桂烯	甜橘味、香脂气	1.5	41.27	−	10.36	−	20.27
11	庚醛	草味	2.8	32.17	−	−	−	13.83
12	正己醛	果香、青草香	5	46.92	−	−	−	−
13	正己醇	果香、清香	5.6	21.93	−	3.13	−	−
14	2-正戊基呋喃	烧烤香、豆香	5.8	17.36	−	−	−	−
15	芳樟醇	花香、甜香	6	36.17	−	−	−	−
16	香叶基丙酮	果香、玫瑰香	10	−	9.76	1.61	10.41	2.65
17	1-辛醇	果香	22	−	1.56	−	1.64	−
18	柠蒙烯	果香、柠檬香	34	−	−	1.94	−	2.20
19	青叶醛	青草香、果香	40	3.40	−	−	−	−
20	吲哚	花香	40	−	5.64	4.10	4.45	3.17
21	2-甲基吡嗪	烧烤香、可可香	60	1.02	0.24	−	0.27	0.73
22	己酸甲酯	果香	75	−	2.45	6.37	−	−
23	2,5-二甲基吡嗪	可可香	233	−	2.22	1.17	5.15	1.16
24	2-乙基呋喃	焦糖香	330	0.32	0.65	1.75	0.93	1.39

注：“−”为未检出。

不同年份贵州白茶中一共筛选出 117 种差异代谢物。如图 6 所示，W2013 与其他 4 种茶样之间的差异代谢物数量最为丰富，这表明白茶中挥发性物质在长期陈化过程中发生了复杂的转化。

OAV 分析经常用于研究特定挥发性物质对茶汤整体香气的贡献，当 OAV>1 时，认为挥发性物质对整体香气特征具有贡献；当 OAV>100 时，认为挥发性物质对整体香气特征具有重要贡献[31]。如表 4 所示，通过查找相关文献获得差异挥发性物质阈值，计算发现 24 种 OAV>1 的挥发性化合物。其中，香叶基丙酮(果香、玫瑰香)、吲哚(花香)和 2,5-二甲基吡嗪(可可香)仅在 W2013 中未检测出，而 2,2,6-三甲基环己酮(辛辣味)、异戊醛(苹果香)、橙花醇(玫瑰香、柠檬香)、正己醛(果香、青草香)、2-正戊基呋喃(烧烤香、豆香)、芳樟醇(花香、甜香)和青叶醛(青草香、果香)仅在 W2013 中检测出，说明 W2013 与其他 4 种茶样的香气特征差异较大。此外，OAV>100 的化合物有 7 种，分别是大马士酮(苹果香)、甲基庚烯酮(草木香)、2-辛酮(木质香)、2,2,6-三甲基环己酮(辛辣味)、癸醛(甜花香)、异戊醛(苹果香)和正壬醛(玫瑰香、柑橘香)。其中，大马士酮的 OAV 在 W2013、W2015 和 W2016 中均大于 1000，说明其对它们香气特征的形成有较大影响。值得注意的是，正壬醛在所有年份白茶中均被检测出，且 OAV 均大于 20，这表明正壬醛对贮藏过程中白茶香气的形成具有重大贡献。

3　结论

贮藏时间对白茶的品质有重要影响，在白茶陈化过程中挥发性和非挥发性成分会发生一系列复杂的变化，从而形成了不同年份白茶的独特风味特征。结果表明，白茶陈化过程中茶多酚含量整体上显著降低，总黄酮和水浸出物含量呈先上升后下降的变化趋势。电子鼻分析结果表明，不同年份贵州白茶的香气特征差异可能与硫化物、芳香成分和氮氧类挥发性物质有关。挥发性成分分析表明，不同年份贵州白茶挥发性物质之间存在明显差异。在贮藏过程中，白茶中挥发性物质种类和含量的变化趋势一致。值得注意的是，陈化过程有助于贵州白茶香气特征的形成。此外，在不同年份贵州白茶中鉴定出 25 种共有挥发性物质。OAV 分析表明，大马士酮是 W2013、W2015 和 W2016 香气特征形成的关键化合物，而正壬醛对白茶陈化过程中香气特征的形成具有重大贡献。综上所述，陈化过程能够改变白茶的风味特征，合理的贮藏时间有助于贵州白茶品质的提升。本研究旨在探究白茶陈化过程中主要滋味物质和挥发性成分的变化规律，以期阐释贮藏时间对白茶风味特征的影响，为贵州白茶科学贮藏提供理论依据。

© 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] 孟繁博, 黄道梅, 陈芝能, 等. 贵州茶资源‘鸟王种’的扦插效果分析[J]. 分子植物育种, 2025, 23(9): 3052−3056. [MENG F B, HUANG D M, CHEN Z N, et al. Analysis of the effect of cuttings of Guizhou tea resource ‘Bird King Seed’[J]. Molecular Plant Breeding, 2025, 23(9): 3052−3056.]

[2] CHEN S Q, CHEN M Z, PAN S, et al. Health benefits and mechanisms of Tianmuhu White tea in modulating glycolipid metabolism and oxidative stress[J]. Am J Transl Res, 2025, 17(7): 5100−5109.

[3] WU W W, ZHENG Z Q, WANG Z H, et al. Profiling of potential anti-diabetic active compounds in white tea: An integrated study of polyphenol-targeted metabolomics, network pharmacology, and computer simulation[J]. Foods, 2024, 13(21): 3354.

[4] ZHOU F, SHANG B H, LIU C W, et al. Comparative study of the anti-obesity effects of white tea and dark tea: Insights from microbiome and metabolomics[J]. Food Res Int, 2025, 202: 115666.

[5] HUNER Y M, ATAK M, YIGIT E, et al. White tea reduces dyslipidemia, inflammation, and oxidative stress in the aortic arch in a model of atherosclerosis induced by atherogenic diet in apoe knockout mice[J]. Pharmaceuticals (Basel), 2024, 17(12): 1699.

[6] LIN Y, ZHOU X R, XIE S L, et al. Unlocking the healing power of Jinhua white tea fermented by Eurotium cristatum using the unique "flowering" technology: A promising ally against inflammatory bowel disease[J]. Food Res Int, 2025, 213: 116555.

[7] FANG S M, HUANG W J, ZHU X J, et al. Characterizing flavor determinants and α-glucosidase inhibitory components in ancient tea plants and 'Qiancha 1' white teas[J]. Food Chem: X, 2025, 27: 102408.

[8] 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 Y, ZHU H Y. Changes in sensory quality and physicochemical composition of Zhenghe white peony tea during 1~8 years of storage[J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 46(14): 371−380.]

[9] ZHU Y, KANG S Y, YAN H, et al. Enantiomeric distributions of volatile lactones and terpenoids in white teas stored for different durations[J]. Food Chem, 2020, 320: 126632.

[10] NING J M, DING D, SONG Y S, et al. Chemical constituents analysis of white tea of different qualities and different storage times[J]. European Food Research and Technology, 2016, 242(12): 2093−2104.

[11] 谢明威, 丁树洽, 聂晴, 等. 贮藏时间对‘汝城白毛茶’白茶化学成分与滋味特征的影响研究[J]. 茶叶科学, 2025, 45(2): 333−345. [XIE M W, DING S Q, NIE Q, et al. Effects of storage time on chemical composition and flavor characteristics of ‘Rucheng Bai Mao Cha’ white tea[J]. Tea Science, 2025, 45(2): 333−345.]

[12] FAN F Y, HUANG C S, TONG Y L, et al. Widely targeted metabolomics analysis of white peony teas with different storage time and association with sensory attributes[J]. Food Chem, 2021, 362: 130257.

[13] 金阳, 刘亚峰, 刁春华, 等. 基于 GC-IMS 技术分析不同贮藏时间白茶挥发性风味物质[J]. 中国茶叶加工, 2025(2): 73−79. [JIN Y, LIU Y F, DIAO C H, et al. Analysis of volatile flavor substances in white tea with different storage time based on GC-IMS[J]. China Tea Processing, 2025(2): 73−79.]

[14] 乐薇, 吴士筠. AlCl3 比色法测定箬叶总黄酮含量[J]. 黑龙江农业科学, 2015(2): 98−101. [LE W, WU S Y. Determination of total flavonoid content of Ruo leaves by AlCl3 colorimetric method[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2015(2): 98−101.]

[15] 张倩茹, 凌蕾, 何芋岐, 等. 苯酚硫酸法测定苗药艾纳香中多糖含量[J]. 中国民族民间医药, 2019, 28(14): 30−32. [ZHANG Q R, LING L, HE Y Q, et al. Determination of polysaccharide content in the seedling medicine Aina Xiang by phenol sulfuric acid method[J]. Chinese Ethnic Folk Medicine, 2019, 28(14): 30−32.]

[16] JIANG J Q, YIN R N, XIE Y, et al. Effects of cofermentation of Saccharomyces cerevisiae and different lactic acid bacteria on the organic acid content, soluble sugar content, biogenic amines, phenol content, antioxidant activity and aroma of prune wine[J]. Food Chem: X, 2024, 22: 101502.

[17] 邱梦宇, 李昊聪, 聂小宝, 等. 基于电子鼻和电子舌的洞庭(山)碧螺春茶冲泡条件优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(21): 174−182. [QIU M Y, LI H C, NIE X B, et al. Optimization of brewing conditions of Dongting (Mountain) Bi Luochun tea based on electronic nose and electronic tongue[J]. Journal of Food Safety and Quality Testing, 2024, 15(21): 174−182.]

[18] 常睿, 陈善敏, 罗红玉, 等. 不同类型沱茶品质与特征性成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(12): 3867−3874. [CHANG R, CHEN S M, LUO H Y, et al. Analysis of quality and characteristic components of different types of tuocha[J]. Journal of Food Safety and Quality Testing, 2022, 13(12): 3867−3874.]

[19] 王媛媛, 冯勇荣, 孙青占, 等. 不同产地沙棘叶茶品质分析及综合评价[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(24): 331−338. [WANG Y Y, FENG Y R, SUN Q Z, et al. Quality analysis and comprehensive evaluation of sea buckthorn leaf tea from different origins[J]. Food and Fermentation Industry, 2024, 50(24): 331−338.]

[20] 谢克孝, 王志华, 张宁宁, 等. 不同年份白茶饼主要化学成分及感官品质变化与通径分析[J]. 中国食品学报, 2024, 24(1): 252−262. [XIE K X, WANG Z H, ZHANG N N, et al. Changes in the main chemical composition and sensory quality of white tea cakes of different years and the analysis of the pathway[J]. Chinese Journal of Food, 2024, 24(1): 252−262.]

[21] WANG Z H, LIANG Y L, GAO C X, et al. The flavor characteristics and antioxidant capability of aged Jinhua white tea and the mechanisms of its dynamic evolution during long-term aging[J]. Food Chem, 2024, 436: 137705.

[22] 张灵枝, 韩丽, 欧惠算. 不同存贮时间寿眉的生化成分分析[J]. 中国茶叶加工, 2016(4): 46−49. [ZHANG L Z, HAN L, OU H S. Analysis of biochemical composition of Shoumei with different storage time[J]. China Tea Processing, 2016(4): 46−49.]

[23] VOLLMER M, ESDERS S, FARQUHARSON F M, et al. Mutual interaction of phenolic compounds and microbiota: metabolism of complex phenolic apigenin-C- and kaempferol-O-derivatives by human fecal samples[J]. J Agric Food Chem, 2018, 66(2): 485−497.

[24] 赵文净, 张倩灵, 薛骏轶, 等. 储藏时间对贡眉白茶主要内含成分及抗氧化活性的影响[J]. 食品工业, 2023, 44(11): 17−20. [ZHAO W J, ZHANG Q L, XUE J Y, et al. Effects of storage time on the main components and antioxidant activity of Gongmei white tea[J]. Food Industry, 2023, 44(11): 17−20.]

[25] ZHOU B X, MA C Q, WANG H Z, et al. Biodegradation of caffeine by whole cells of tea-derived fungi *Aspergillus sydowii*, *Aspergillus niger* and optimization for caffeine degradation[J]. BMC Microbiol, 2018, 18(1): 53.

[26] 孙若璠, 高健健, 周丹阳, 等. 基于代谢组学的不同贮藏年份紧压寿眉白茶化学成分分析[J]. 食品科学, 2025, 46(7): 217−228.

［SUN R F, GAO J J, ZHOU D Y, et al. Metabolomics-based analysis of chemical components in tightly compressed Shoumei white tea from different storage years[J]. Food Science, 2025, 46(7): 217−228.］
［27］ 吕宁, 金凤燮, 鱼红闪. 酶法水解麦冬多糖及其产物的分离鉴定[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(3): 9−12. ［LÜ N, JIN F X, YU H S. Enzymatic hydrolysis of *Ophiopogon japonicus* polysaccharides and separation and identification of their products[J]. Food and Fermentation Industry, 2011, 37(3): 9−12.］
［28］ 岩嗄, 杨艳芬, 杨梓泰, 等. 景迈山古茶园与生态茶园晒青茶品质特征的研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(19): 346−354. ［[YAN G, YANG Y F, YANG Z T, et al. Study on the quality characteristics of sun-dried green tea from ancient tea plantations and ecological tea plantations in Jingmai Mountain[J]. Food and Fermentation Industry, 2025, 51(19): 346−354.］
［29］ 邓洪燕, 毛静春, 毛建富, 等. 普洱茶中儿茶素研究进展[J]. 农学学报, 2024, 14(1): 83−89. ［DENG H Y, MAO J C, MAO J F, et al. Research progress on catechins in Pu'er tea[J]. Acta Agronomica Sinica, 2024, 14(1): 83−89.］
［30］ 李颖, 张辉, 邱鹤翔, 等. 基于 E-Nose 和 HS-SPME-GC-MS 探究混菌发酵对蜂蜜茶酒品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 297−307. ［LI Y, ZHANG H, QIU H X, et al. Exploring the effect of mixed bacteria fermentation on the quality of honey tea wine based on E-Nose and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 46(19): 297−307.］
［31］ WANG T, BO N J, GUAN Y Q, et al. An integrated flavoromics and chemometric analysis of the characteristic flavor, chemical basis and flavor wheel of ancient plant ripened pu-erh tea[J]. Food Chemistry X, 2025, 26102278-102278.
［32］ 丁其欢, 邓敏, 苏建美, 等. 不同树冠管理模式对云南大叶种晒青茶品质的影响[J]. 西南农业学报, 2025, 38(2): 294−303. ［DING Q H, DENG M, SU J M, et al. Effects of different canopy management modes on the quality of Yunnan big-leaf sun-dried green tea[J]. Southwest Journal of Agriculture, 2025, 38(2): 294−303.］
［33］ 唐梦婷, 廖献盛, 吴先寿, 等. 金牡丹不同茶类夏秋茶香气品质差异分析[J]. 食品科学, 2025, 46(2): 171−182. ［TANG M T, LIAO X S, WU X S, et al. Differential analysis of aroma quality of summer and fall tea from different tea types of golden peony[J]. Food Science, 2025, 46(2): 171−182.］
［34］ 王琳琳, 张佰清, 王萍, 等. HS-SPME-GC-MS 结合 ROAV 分析藜麦茶及藜麦芽茶的香气成分[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(3): 167−173. ［WANG L L, ZHANG B Q, WANG P, et al. HS-SPME-GC-MS combined with ROAV to analyze the aroma components of quinoa tea and quinoa malt tea[J]. Food Research and Development, 2025, 46(3): 167−173.］
［35］ 熊梦钒, 鲁倩, 陈泽文, 等. HS-SPME-GC-MS 技术结合 ROAV 分析五指山茶区三种红茶的关键香气物质[J]. 现代食品科技, 2025, 41(1): 251−261. ［XIONG M F, LU Q, CHEN Z W, et al. HS-SPME-GC-MS technique combined with ROAV to analyze the key aroma substances of three kinds of black teas from Wuzhishan tea district[J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(1): 251−261.］
［36］ 张拓, 戴宇樵, 李琴, 等. 高温和低酸处理的冠突曲霉对固态发酵茶品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(4): 86−96. ［ZHANG T, DAI Y Q, LI Q, et al. Effects of high temperature and low acid treatment of Aspergillus coronarius on the quality of solid state fermented tea[J]. Preservation and Processing, 2025, 25(4): 86−96.］
［37］ 唐梦婷, 廖献盛, 谷梦雅, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析三种茶坯窨制桂花茶的香气成分[J]. 现代食品科技, 2024, 40(3): 247−258. ［TANG M T, LIAO X S, GU M Y, et al. Analysis of aroma components of osmanthus tea made from three tea blanks based on HS-SPME-GC-MS[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(3): 247−258.］
［38］ 张一昊, 宗梦婷, 刘艳红, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 的临沧普洱生茶与传统绿茶香气差异分析[J]. 生物资源, 2025, 47(5): 456−469. ［[ZHANG Y H, ZONG M T, LIU Y H, et al. Analysis of aroma differences between Lincang Puerh raw tea and traditional green tea based on HS-SPME-GC-MS[J]. Bioresources, 2025, 47(5): 456−469.］
［39］ 钱园凤, 张悦, 尤秋爽, 等. 崇觉罗汉茶的挥发性成分及关键香气成分分析[J]. 食品科技, 2025, 50(2): 300−308. ［QIAN Y F, ZHANG Y, YU Q S, et al. Analysis of volatile components and key aroma components of Chongjue Luohan tea[J]. Food Science and Technology, 2025, 50(2): 300−308.］