

# 不同海拔政和白茶品质差异分析

黄琳洁<sup>1</sup>, 徐凯<sup>1,2</sup>, 周承哲<sup>1,2,3</sup>, 石碧滢<sup>1,2</sup>, 田彩云<sup>1,2</sup>, 卢丽<sup>1,2</sup>, 郭玉琼<sup>1,2,\*</sup>

(1.福建农林大学园艺学院, 福建福州 350002; 2.福建农林大学茶产业研究院, 福建福州 350002;

3.福建农林大学园艺植物生物工程研究所, 福建福州 350002)

**摘要:**以不同海拔茶树鲜叶及成品茶为材料, 采用感官审评和生化成分测定, 结合多元统计分析探究海拔高度对政和白茶品质的影响。感官审评结果表明: 不同海拔政和白茶品质有显著差异, 中、高海拔白茶滋味清鲜、醇爽, 香气清纯, 低海拔白茶滋味醇厚, 花香显。偏最小二乘判别分析结果表明, 可溶性糖、咖啡碱、3-萜烯、马鞭草烯醇、萜品油烯、顺-2-戊烯醇、2-乙基呋喃和顺-2-己烯-1-醇是区分不同海拔茶树鲜叶关键的差异成分, 其中可溶性糖、顺-2-己烯-1-醇、顺-2-戊烯醇等差异化合物在中、高海拔样品中含量较高, 咖啡碱、3-萜烯、马鞭草烯醇和萜品油烯等挥发性成分在低海拔样品中含量普遍较高。可溶性糖、游离氨基酸、萜品油烯、马鞭草烯醇、2-乙基呋喃、2-甲基丁醛、苯乙醇和3-萜烯是区分不同海拔成品茶关键的差异成分, 其中可溶性糖、游离氨基酸在高海拔成品茶含量普遍较高; 萜品油烯、马鞭草烯醇、苯乙醇和3-萜烯等挥发性成分在中、低海拔样品中含量较高, 且在高海拔样品中含量普遍较低。进一步结合香气活度值分析, 2-甲基丁醛、3-萜烯和萜品油烯可作为鉴别不同海拔白茶的特征挥发性成分。本研究将为进一步探究不同海拔茶叶风味品质特征提供一定参考依据。

**关键词:**白茶; 鲜叶; 海拔; 滋味; 香气

## Quality Differences of Zhenghe White Tea from Different Altitudes

HUANG Linjie<sup>1</sup>, XU Kai<sup>1,2</sup>, ZHOU Chengzhe<sup>1,2,3</sup>, SHI Biying<sup>1,2</sup>, TIAN Caiyun<sup>1,2</sup>, LU Li<sup>1,2</sup>, GUO Yuqiong<sup>1,2,\*</sup>

(1. College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Tea Industry Research Institute, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

3. Institute of Horticultural Biotechnology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** To explore the effect of growing altitude on the quality of Zhenghe white tea, the sensory quality and biochemical composition of tea leaves and Zhenghe white tea from different altitudes were evaluated, and multivariate statistical analysis was applied to the obtained data. The results of sensory evaluation showed that there were significant differences in the quality of white tea from different altitudes. The mid- and high-altitude white tea tasted fresh, mellow and clean with a clean and pure aroma, while the low-altitude white tea tasted mellow and thick with a floral aroma. Partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) showed that soluble sugars, caffeine, 3-carene, verbenol, terpene oleene, *cis*-2-pentenol, 2-ethylfuran and *cis*-2-hexene-1-alcohol were the key components to distinguish fresh tea leaves from different altitudes. The contents of soluble sugar, *cis*-2-hexene-1 alcohol and *cis*-2-pentenol were higher in the mid- and high-altitude samples, while the contents of volatile components such as caffeine, 3-carene, verbenol and terpinolene were higher in the low-altitude samples. Soluble sugar, free amino acid, terpinolene, verbenol, 2-ethyl furan, 2-methylbutyraldehyde, 2-phenylethanol and 3-carene were the key components to distinguish white tea from different altitudes. The contents of soluble sugar and free amino acid were higher in the high-altitude white tea, and the contents of volatile components such as terpinolene, verbenol, phenyl ethanol and 3-carene were higher in the mid- and low-altitude samples, but low in the high-altitude samples.

收稿日期: 2022-09-30

基金项目: 福建农林大学“双一流”建设科技创新能力提升培育计划项目(KSYLP004); 协同创新院茶产业分院项目(K1521015A); 福建农林大学茶产业链科技创新与服务体系建设项目(K1520005A01);

福建省高原学科建设经费项目(102/7120 1801101); 福建农林大学乡村振兴茶产业技术服务项目(11899170145); 福建张天福茶叶发展基金会科技创新基金项目(FJZTF01)

第一作者简介: 黄琳洁(1997—)(ORCID: 0000-0001-5562-0184), 女, 硕士研究生, 研究方向为茶叶加工及品质。

E-mail: huanglinjie1997@foxmail.com

\*通信作者简介: 郭玉琼(1974—)(ORCID: 0000-0002-4280-7449), 女, 教授, 博士, 研究方向为茶树生物技术与茶叶生物化学。E-mail: guoyq828@163.com

According to odor activity value (OAV) analysis, 2-methyl butyl aldehyde, 3-carene and terpinolene could be used as the characteristic volatile components to identify white tea samples from different altitudes. The results of this study will provide a reference for further exploring the flavor quality of tea from different altitudes.

**Keywords:** white tea; fresh leaves; altitude; taste; aroma

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220930-345

中图分类号: TS272

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2023) 16-0274-10

引文格式:

黄琳洁, 徐凯, 周承哲, 等. 不同海拔政和白茶品质差异分析[J]. 食品科学, 2023, 44(16): 274-283. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220930-345. <http://www.spkx.net.cn>

HUANG Linjie, XU Kai, ZHOU Chengzhe, et al. Quality differences of Zhenghe white tea from different altitudes[J]. Food Science, 2023, 44(16): 274-283. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220930-345. <http://www.spkx.net.cn>

白茶是我国的特种茶<sup>[1]</sup>, 因其具有抗氧化、抗癌变和抗突变<sup>[2]</sup>、降血糖血脂<sup>[3]</sup>等保健功效及别具一格的风味品质而受到人们的广泛关注。白茶具有外形白毫显、毫心肥壮、香气清鲜、滋味鲜醇、汤色浅杏黄的品质特征, 其独特风味品质的形成不仅取决于茶叶加工工艺, 还与鲜叶所处生长环境密切相关<sup>[4]</sup>。海拔是影响茶树生长发育的重要环境因素, 其高度变化会导致光照、温度、湿度、气压等环境因子产生差异, 进而影响茶树的生长发育、代谢生理和功能<sup>[5-6]</sup>, 综合影响鲜叶内含化学成分的组成比例。

海拔对茶叶生化成分的影响已在相关研究中报道。罗杰等<sup>[7]</sup>测定不同海拔四川蒙山茶区生化成分, 表明氨基酸含量随着海拔升高而增加, 而酚氨比随着海拔升高而减少。肖健等<sup>[8]</sup>通过不同海拔保靖黄金茶品质研究发现, 随着海拔高度的增加, 茶多酚含量呈增加趋势, 咖啡碱含量则减少。与多项研究<sup>[7,9]</sup>表明氨基酸含量随海拔高度增加而单调递增的规律不同, 保靖黄金茶氨基酸含量先随海拔高度升高而增加, 高于一定海拔高度则减少。近年来, 挥发性成分的检测手段越来越多, 其中气相色谱-质谱 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 联用技术已广泛应用于检测不同海拔茶叶香气。张悦等<sup>[10]</sup>研究不同海拔烘青绿茶香气成分, 表明橙花叔醇和吲哚等花香化合物在低海拔烘青绿茶中含量较高, 而在高海拔烘青绿茶中含量较低。杨勇等<sup>[11]</sup>对汤记高山茶和平地茶进行研究, 表明庚醛及雪松醇可能是鉴别高山茶和平地茶的重要挥发性成分。叶伟华等<sup>[12]</sup>对不同海拔乌牛早茶叶香气研究发现, 高海拔茶叶香气种类较低海拔多, 而后者有更高比例的苯乙醇等具有花香的化合物。

目前, 海拔高度对茶叶品质成分的影响多在绿茶、乌龙茶等<sup>[10,13]</sup>茶类中研究报道, 而不同海拔白茶品质差异研究鲜有报道。本研究选用政和县当地主栽茶树品种福

安大白茶为材料, 选择3个位于不同海拔高度、成龄的茶园作为实验对象, 采用感官审评、生化成分测定筛选出不同海拔茶树鲜叶及成品茶的特征差异化合物, 以期为不同海拔茶叶品质特征的区分提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂



编号信息如表1所示。

图1 不同海拔茶树鲜叶

Fig. 1 Fresh leaves tea from different altitudes

供试样品为国家级良种福安大白茶, 于2021年3月22日取自福建省政和云根茶业有限公司茶叶种植基地 (27°32'N, 119°16'E)。3个海拔高度茶园树龄为15~20 a, 施肥量和栽培管理措施等基本保持一致, 分别为低海拔 (200 m)、中海拔 (500 m) 和高海拔 (1 000 m)。鲜叶样品的采摘标准为单芽及一芽二叶 (图1), 根据统一的政和白茶加工标准 (GB/T 22109—2008《地理标志产品 政和白茶》) 付制成白茶样品。鲜叶样品经液氮固样后, 置于真空冷冻干燥机干燥48 h。成品茶加工流程具体包括: 1) 在萎凋房内, 将鲜叶置于水筛中, 同时进行通风排湿, 萎凋房温度维持在25℃, 萎凋总历时48 h; 2) 并筛, 鲜叶堆厚10~15 cm, 摊成凹状, 形成周围厚中间薄, 历时60 h; 3) 80℃烘2 h至茶叶水分含量小于7%即得供试样。上述茶样均重复3次。茶样编号如表1所示。

表1 不同海拔政和白茶样品信息

编号	鲜叶原料	茶园海拔/m	海拔类别	鲜叶/成品茶
YA1	单芽	200	低海拔	鲜叶
YE1	一芽二叶	200		鲜叶
BHYZ1	单芽	200		成品茶
BMD1	一芽二叶	200		成品茶
YA2	单芽	500	中海拔	鲜叶
YE2	一芽二叶	500		鲜叶
BHYZ2	单芽	500		成品茶
BMD2	一芽二叶	500		成品茶
YA3	单芽	1 000	高海拔	鲜叶
YE3	一芽二叶	1 000		鲜叶
BHYZ3	单芽	1 000		成品茶
BMD3	一芽二叶	1 000		成品茶

4-叔丁基环己醇 上海易恩化学技术有限公司；植物可溶性糖含量测试盒（微量法）苏州科铭生物技术有限公司；十二水磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、氯化亚锡、茛三酮、甲醇、碳酸钠、盐酸、硫酸、结晶氯化铝、草酸、福林酚、95%乙醇、乙酸乙酯、正丁醇等均均为国产分析纯。

## 1.2 仪器与设备

真空冷冻干燥机 郑州华辰仪器有限公司；ClarusSQ8T气相色谱-质谱联用仪、TurboMatrix HS顶空和带捕集阱自动进样器 美国PerkinElmer公司；759S紫外-可见分光光度计 上海棱光技术有限公司；Infinite F200 PRO多功能酶标仪 奥地利Tecan公司。

## 1.3 方法

### 1.3.1 白茶感官审评

根据GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》，由具有评茶员资质（评茶员三级及以上）的5名专业人员对成品茶样品进行感官审评（2男3女，年龄范围21~56岁）。

### 1.3.2 生化成分含量测定

水浸出物参照GB/T 8305—2013《茶水浸出物测定》中差数法测定；茶多酚含量采用GB/T 8313—2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》中福林酚比色法测定；游离氨基酸总量采用GB/T 8314—2013《茶游离氨基酸总量的测定》中茛三酮比色法测定；咖啡碱含量采用GB/T 8312—2013《茶咖啡碱测定》中紫外分光光度法测定；可溶性糖采用植物可溶性糖含量测试盒测定。

### 1.3.3 挥发性成分含量测定

参考王丽雨等<sup>[14]</sup>方法，称取0.5 g茶粉于20 mL顶空瓶中，加入3 mL饱和氯化钠溶液和3 μL 4-叔丁基环己醇（内标物），加盖密封并以顶空进样方式进样。顶空条件：平衡温度80 °C，取样针温度100 °C，传输线温度

120 °C，样品平衡30 min，捕集阱Hi 280 °C，Lo 40 °C，保持5 min，干吹1 min，解吸0.5 min，顶空瓶压力32 psi，色谱柱压力12 psi，解吸压力12 psi，顶空出口分流。

GC-MS条件：Elite-5MS色谱柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm）；载气为He（纯度>99.999%），离子延迟时间2.5 min。升温程序：起始柱温50 °C，保持5 min，以5 °C/min升至210 °C，保持3 min，总运行时间40 min；电离能量70 eV；离子源温度230 °C；质谱传输线温度250 °C；质量扫描范围45~500 u。

### 1.3.4 挥发性成分的定性、定量分析和香气活性值（odor activity value, OAV）计算

挥发性成分定性分析：通过NIST11质谱数据库对总离子流图的各峰谱图匹配检索，结合文献[15]和保留时间对挥发性成分进行对比定性分析，各个挥发性成分的相对含量用该物质的峰面积与内标物4-叔丁基环己醇峰面积的比值表示。挥发性成分的定量采用内标法计算<sup>[16]</sup>。

OAV是香气物质含量与该物质阈值之比，能表明单一香气物质对整体香气的贡献作用，且OAV越大贡献程度越高，OAV按下式计算：

$$OAV_i = \frac{C_i}{T_i}$$

式中： $C_i$ 为挥发性成分含量/（μg/kg）； $T_i$ 为挥发性成分在水中的香气阈值/（μg/kg）<sup>[17-18]</sup>。

## 1.4 数据处理

采用SPSS 19.0计算平均值、标准偏差并进行方差齐次性检验和相关性分析。采用TBtools 1.0986和Origin 2022进行热图绘制和层次聚类；采用SIMCA 14.0进行偏最小二乘判别分析（partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA），采用随机200次的置换检验判别该模型的有效性和可靠性，变量投影重要性（variable importance in projection, VIP）值大于1为标准筛选重要变量；采用Graphpad Prism 8绘制柱状图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同海拔政和白茶感官审评分析

如表2所示，高海拔样品比中、低海拔样品审评得分高；外形表现为中、高海拔样品的毫芽较多、匀整，而低海拔样品毫毛较少；汤色方面，白毫银针样品以浅杏黄为主，白牡丹样品以黄绿为主；香气方面，茶样均带有毫香，但中、高海拔样品香气较清纯，低海拔样品花香显；滋味方面，高海拔样品较中、低海拔样品清鲜醇爽；叶底表现为中、高海拔样品软嫩肥壮而有别于低海拔样品的尚嫩。

### 2.2 不同海拔茶树鲜叶及成品茶主要生化成分分析

2.2.1 不同海拔茶树鲜叶及成品茶主要生化成分含量分析  
如图2a、b所示，在单芽和一芽二叶样品中，高海拔

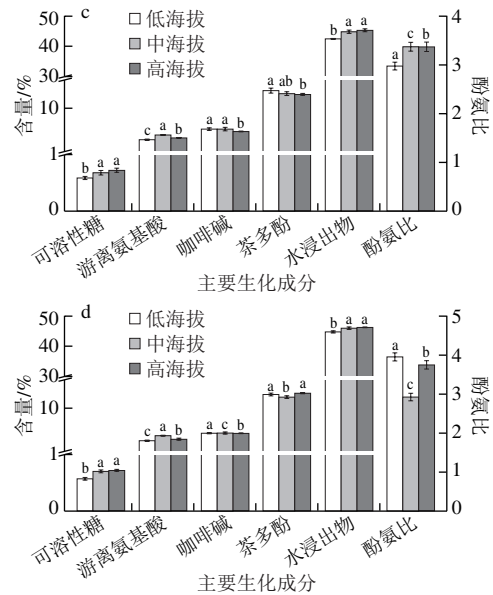
表2 不同海拔政和白茶感官审评结果

Table 2 Sensory evaluation of Zhenghe white tea from different altitudes

茶样	外形		汤色		香气		滋味		叶底		总分
	评语	评分	评语	评分	评语	评分	评语	评分	评语	评分	
BHYZ1	茸毛略薄	90	杏黄	90	有毫香、花香	92	毫味、醇厚	90	嫩匀、较亮	89	90.4
BHYZ2	芽针秀长、洁净、银灰白	93	浅杏黄、清澈明亮	94	毫香显、尚清纯	93	鲜嫩醇爽、毫味显	94	肥壮、软嫩、明亮	94	93.5
BHYZ3	芽针肥壮、茸毛厚、洁净、银灰白	96	浅杏黄、清澈明亮	94	毫香显露、清纯	96	清鲜醇爽、毫味足	96	肥壮、软嫩、明亮	95	95.7
BMD1	毫心尚显、叶张尚嫩、尚匀	89	浅黄	89	略有毫香、花香	89	尚清甜、醇厚	87	叶张尚嫩	88	88.3
BMD2	毫心较显、叶张嫩、尚壮、尚匀整、灰绿尚润	92	嫩绿、清澈	93	尚鲜嫩、尚纯爽有毫香	91	较清甜、醇爽	90	叶张嫩、尚明	92	91.3
BMD3	毫心多肥壮、叶背多茸毛、匀整、灰绿润	95	浅黄绿、清澈	95	鲜嫩、纯爽、毫香显	96	清甜醇爽、毫味足	93	叶张肥嫩明亮	96	94.8

组样品的可溶性糖和水浸出物含量均显著高于低海拔组样品，而酚氨比显著低于低海拔组样品；中、高海拔组样品的游离氨基酸含量高于低海拔组样品，不同海拔区间达到显著差异水平 ( $P < 0.05$ )；不同海拔单芽和一芽二叶样品间茶多酚含量未达到显著水平。咖啡碱含量均以高海拔组样品最低，且与中、低海拔组样品差异达到显著性水平。

如图2c、d所示，在白毫银针和白牡丹样品中，中、高海拔组样品的可溶性糖和水浸出物含量均显著高于低海拔组样品，且与低海拔组样品差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )；中、高海拔组样品的游离氨基酸含量均显著高于低海拔组样品，各海拔区间差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )；高海拔组样品的咖啡碱含量最低，且在白毫银针样品中与其他两个海拔区间达到显著水平；中海拔组样品的酚氨比值最低，与其他2个海拔达到显著水平，茶多酚含量在白毫银针样品中介于高、低海拔组样品，而在白牡丹样品中含量最低，且与其他海拔达到显著水平。



a.单芽; b.一芽二叶; c.白毫银针; d.白牡丹; 图4 同。不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图2 不同海拔鲜叶、成品茶主要生化成分比较

Fig. 2 Comparison of major biochemical components of fresh leaves and white tea from different altitudes

如表3所示，海拔高度与茶树鲜叶、成品茶样品的生化成分具有一定的相关性，在鲜叶样品中，海拔高度与可溶性糖、游离氨基酸和水浸出物含量呈显著正相关，与咖啡碱、酚氨比显著负相关；在成品茶样品中，海拔高度与可溶性糖、水浸出物含量呈极显著正相关。

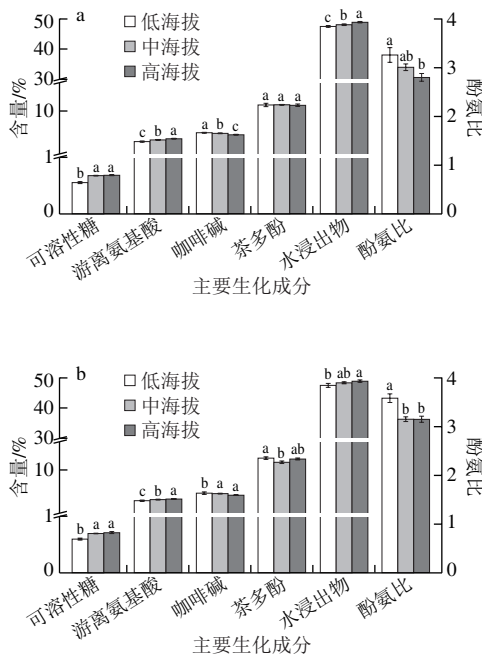
表3 海拔与主要生化成分的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between altitude and major biochemical components

因素	成品茶/鲜叶	正相关		负相关	
		成品茶	鲜叶	成品茶	鲜叶
海拔	成品茶	可溶性糖 (0.81**); 水浸出物 (0.63**)			
	鲜叶	可溶性糖 (0.79**); 游离氨基酸 (0.92*); 水浸出物 (0.88*)	咖啡碱 (-0.91**); 酚氨比 (-0.67*)		

注: \*\*, \* 分别表示在0.01和0.05水平(双侧)显著相关。

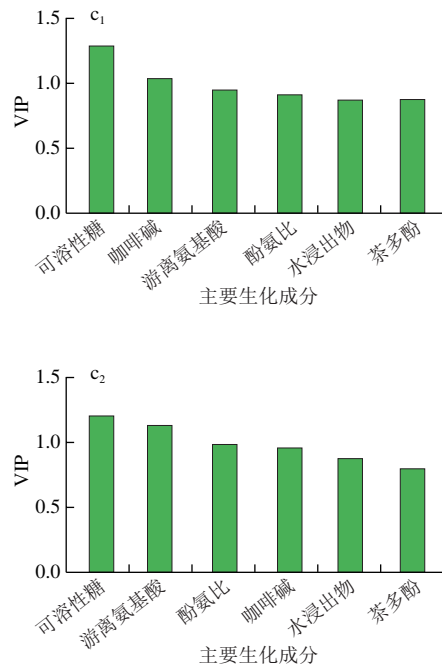
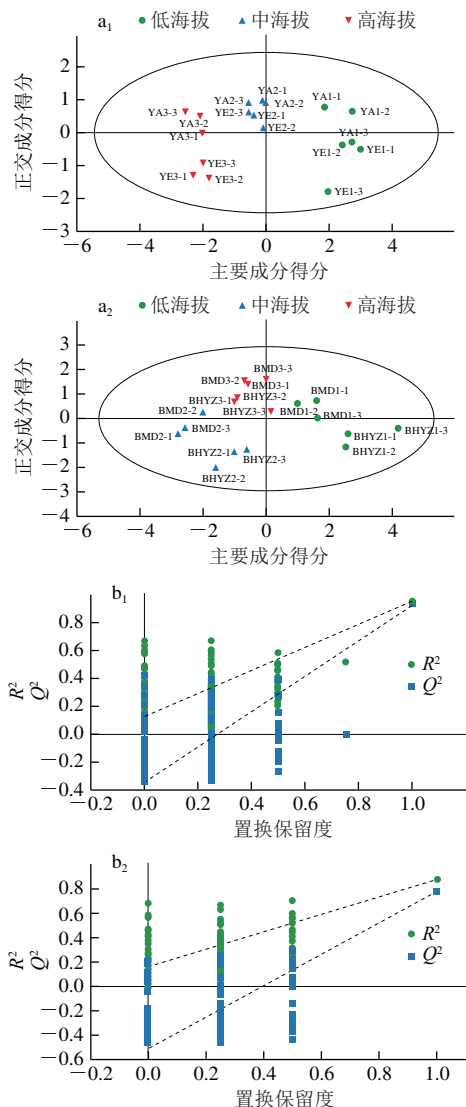
2.2.2 不同海拔茶树鲜叶及成品茶主要生化成分PLS-DA 基于鲜叶样品主要生化成分含量数据构建PLS-DA模型，结果(图3a<sub>1</sub>)显示，低海拔样品多聚集于第1、4象限，中海拔样品多聚集于第1、2象限，高海拔样品多聚集于第2、3象限，其拟合参数为 $R^2_y=0.833$ ， $Q^2=0.777$ 。





置换检验有助于判别该模型的预测能力(图3b<sub>1</sub>), 回归直线 $Q^2$ 与Y轴的截距小于0, 表明所构建的PLS-DA判别模型不存在过度拟合现象, 有较好的预测能力( $R^2=0.134$ ,  $Q^2=-0.342$ )。通过该模型可以区分不同海拔茶树鲜叶, 并从中筛选出VIP值大于1的关键生化成分(图3c<sub>1</sub>), 包括可溶性糖和咖啡碱。

基于成品茶样品主要生化成分含量数据构建PLS-DA模型, 结果(图3a<sub>2</sub>)显示, 低海拔样品多聚集于第4象限, 中海拔样品多聚集于第3象限, 高海拔样品聚集于第1、2象限, 其拟合参数为 $R^2=0.876$ ,  $Q^2=0.776$ 。置换检验(图3b<sub>2</sub>)显示, 回归直线 $Q^2$ 与Y轴的截距小于0, 表明所构建的PLS-DA判别模型不存在过度拟合现象, 有较好的预测能力( $R^2=0.16$ ,  $Q^2=-0.52$ )。通过该模型可以区分不同海拔成品茶样品, 并从中筛选出VIP值大于1的关键生化成分(图3c<sub>2</sub>), 包括可溶性糖和游离氨基酸。中、高海拔组样品的可溶性糖和游离氨基酸含量显著高于低海拔组样品, 这与感官审评中、高海拔白茶滋味呈现清甜醇爽一致。



1.鲜叶样品; 2.成品茶样品。图6同。

图3 不同海拔茶树鲜叶、成品茶主要生化成分PLS-DA (a)、置换检验图(b)和VIP值(c)

Fig. 3 PLS-DA score plots (a), permutation test plots (b) and VIP scores (c) of major biochemical components in fresh leaves and white tea from different altitudes

## 2.3 不同海拔茶树鲜叶及成品茶挥发性成分分析

### 2.3.1 不同海拔茶树鲜叶及成品茶挥发性成分种类和相对含量比较

不同海拔茶树鲜叶样品共检测出31种挥发性成分, 包括醇类12种、萜烯类9种、醛类5种、芳香族类1种、酮类1种、酯类1种、其他1种和杂氧化合物1种(图4a、b)。反-2-戊烯醛为高海拔茶区的特有挥发性成分。其中, 单芽样品含量最高的挥发性成分类型为萜烯类化合物, 其次是醇类化合物; 而一芽二叶样品则相反。高海拔样品醇类化合物含量(单芽32.00%、一芽二叶42.31%)高于低海拔样品(单芽26.09%、一芽二叶40.74%), 但萜烯类化合物含量(单芽36.00%、一芽二叶30.77%)低于低海拔样品(单芽39.13%、一芽二叶33.33%)。

不同海拔成品茶样品共检测出32种挥发性成分, 包括醇类9种、萜烯类9种、醛类5种、芳香族类2种、酮类2种、硫醚类1种、酸类1种、酯类1种、其他1种和杂氧化合物1种(图4c、d)。反-2-辛烯醛为中海拔茶区的特有挥发性成分。其中, 不同海拔成品茶样品含量最高的挥发性成分类型为醇类化合物, 其次是萜烯类化合物。白毫银针样品中, 高海拔组样品醇类化合物含量

(30.00%) 高于低海拔组样品 (29.63%)，但萜烯类化合物含量 (26.67%) 低于低海拔组样品 (29.63%)；白牡丹样品中，高海拔组样品萜烯类化合物含量 (27.59%) 高于低海拔组样品 (25.00%)，但醇类化合物含量 (32.14%) 低于低海拔组样品 (27.59%)。

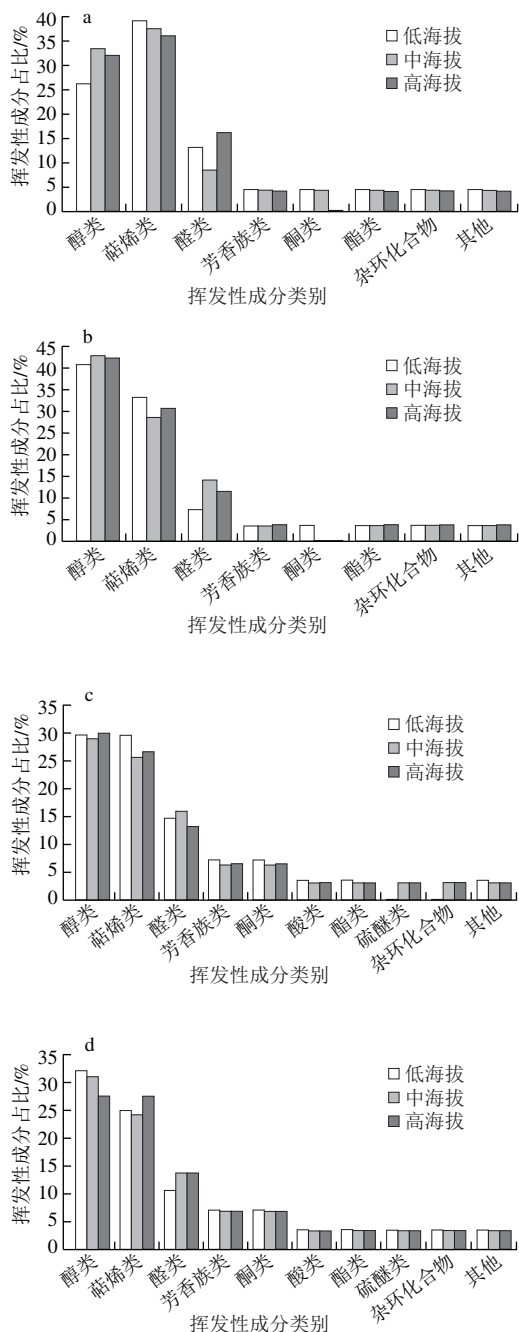


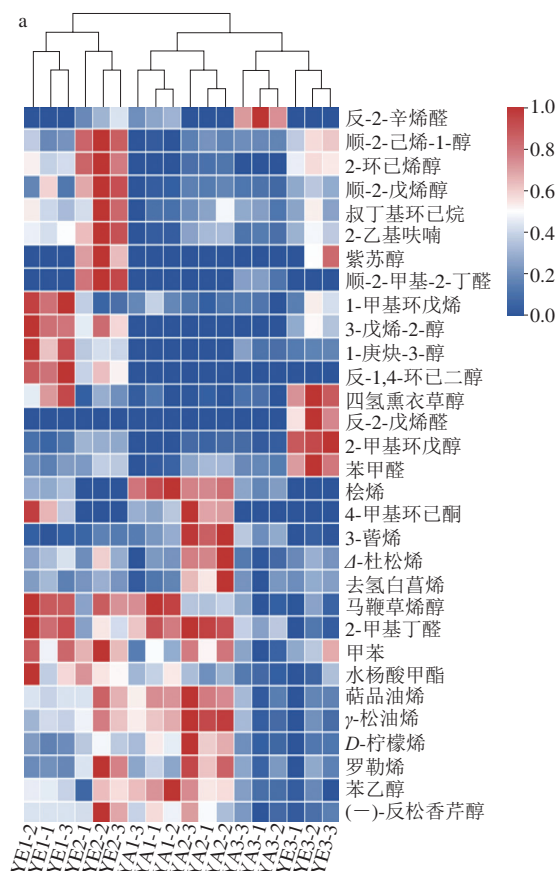
图4 不同海拔茶树鲜叶、成品茶主要挥发性成分组分占比

Fig. 4 Percentages of major volatile components of fresh leaves and white tea from different altitudes

2.3.2 不同海拔茶树鲜叶及成品茶挥发性成分聚类分析  
如图5a所示，各茶样所含有的特征挥发性成分不

同，YE1、YE2聚为一大类，其中YE1含有较多含量的1-甲基环戊烯、3-戊烯-2-醇、1-庚炔-3-醇、反-1,4-环己二醇、紫苏醇、马鞭草烯醇、2-甲基丁醛和甲苯，而顺-2-己烯-1-醇、2-环己烯醇、顺-2-戊烯醇、紫苏醇、叔丁基环己烷、2-乙基呋喃和顺-2-甲基-2-丁醛在YE2样品中含量较高。聚为一小类的YA3、YE3与聚为另一小类的YA1、YA2聚为一大类。其中2-甲基丁醛、苯乙醇、 $\gamma$ -松油烯、萜品油烯和桉烯在YA1、YA2聚类中含量较高。同时上述挥发性成分在高海拔组样品中含量普遍较低，在YE3样品中四氢熏衣草醇、反-2-戊烯醛、苯甲醛和2-甲基环戊醇含量较高。

成品茶样品的聚类效果和鲜叶样品的聚类结果一致，结果 (图5b) 表明，BMD1和BMD2聚为一大类，BHYZ3、BMD3与BHYZ2、BHYZ1聚为另一大类，其中高海拔组样品聚为一小类，BHYZ1、BHYZ2聚为另一小类。与其他茶样相比较，2,6-二甲基-3-庚烯、己酸、(E)-4-己烯-1-醇、紫苏醇、2-己烯醛、马鞭草烯醇、顺-2-己烯-1-醇、2-甲基丁醛、罗勒烯、水杨酸甲酯、顺-2-戊烯醇、1-庚炔-3-酮、二甲基硫和甲苯在BMD1和BMD2中含量较高；BMD3含有较多含量的苯丙醛；D-柠檬烯和 $\alpha$ -法尼烯在BHYZ1、BHYZ2中的含量显著高于其他样品。



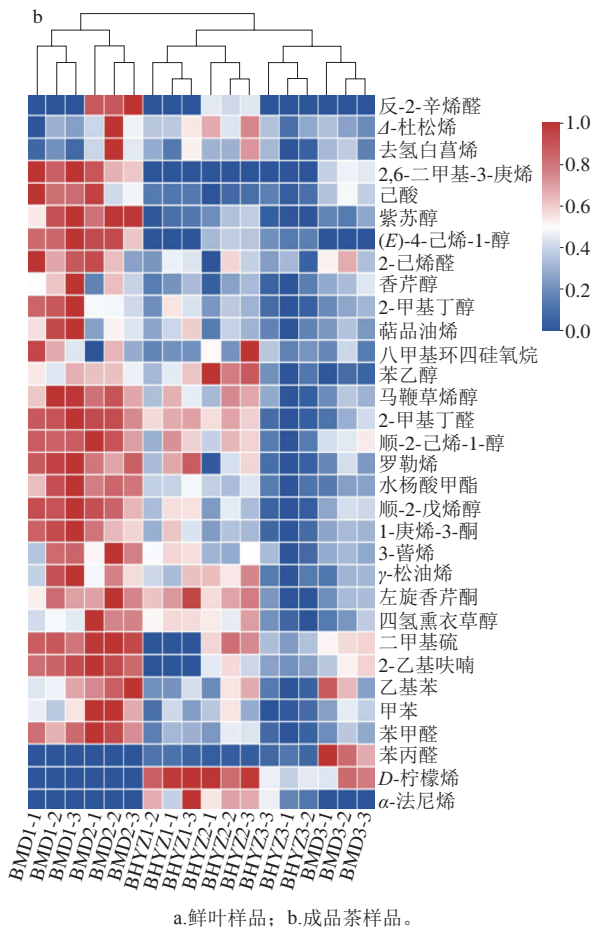


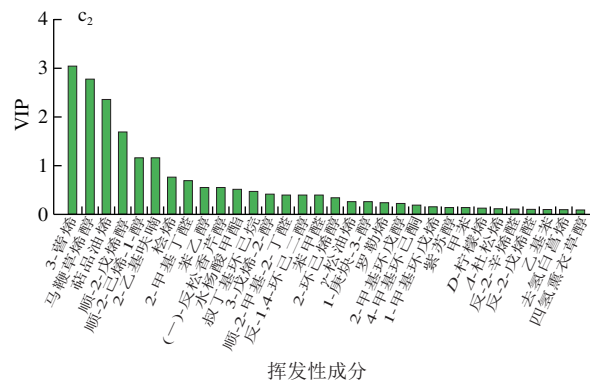
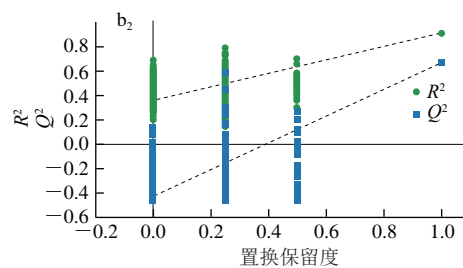
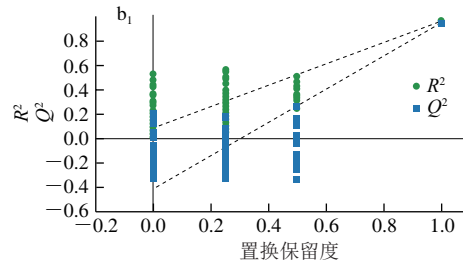
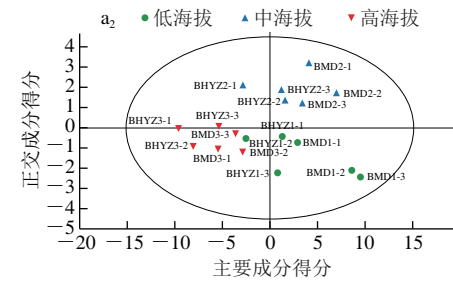
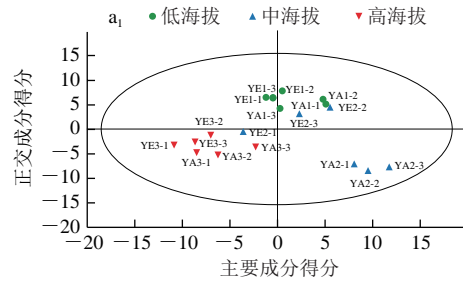
图5 不同海拔茶树鲜叶及成品茶主要挥发性成分的热图及层次聚类图  
Fig.5 HCA heatmaps of major volatile components in fresh leaves and white tea from different altitudes

2.3.3 不同海拔茶树鲜叶及成品茶挥发性成分PLS-DA、OAV分析

基于茶树鲜叶样品31种所有挥发性成分含量数据构建PLS-DA模型，结果(图6a<sub>1</sub>)显示，低海拔样品多聚集于第1、2象限，中海拔样品多聚集于第1、4象限，高海拔样品多聚集于第3象限，其拟合参数为 $R^2_y=0.901$ ， $Q^2=0.827$ 。置换检验(图6b<sub>1</sub>)显示，回归直线 $Q^2$ 与Y轴的截距小于0，表明所构建的PLS-DA模型不存在过度拟合现象，有较好的预测能力( $R^2=0.085$ ， $Q^2=-0.405$ )。通过该模型可以区分不同海拔茶树鲜叶样品，并从中鉴定出6种VIP值大于1的关键挥发性成分(图6c<sub>3</sub>)，包括3-萜烯、马鞭草烯醇、萜品油烯、顺-2-戊烯醇、2-乙基呋喃和顺-2-己烯-1-醇。

基于成品茶样品32种所有挥发性成分含量数据构建PLS-DA模型，结果(图6a<sub>2</sub>)显示，低海拔样品多聚集于第3、4象限，中海拔样品多聚集于第1、2象限，高海拔样品聚集于第3象限，其拟合参数为 $R^2_y=0.915$ ， $Q^2=0.728$ 。置换检验(图6b<sub>2</sub>)显示，回归直线 $Q^2$ 与Y轴的截距小于0，表明所构建的PLS-DA模型不存在过度拟合

现象，有较好的预测能力( $R^2=0.362$ ， $Q^2=-0.432$ )。通过该模型可以区分不同海拔成品茶样品，并从中鉴定出6种VIP值大于1的关键挥发性成分(图6c<sub>2</sub>)，包括萜品油烯、马鞭草烯醇、2-乙基呋喃、2-甲基丁醛、苯乙醇和3-萜烯。



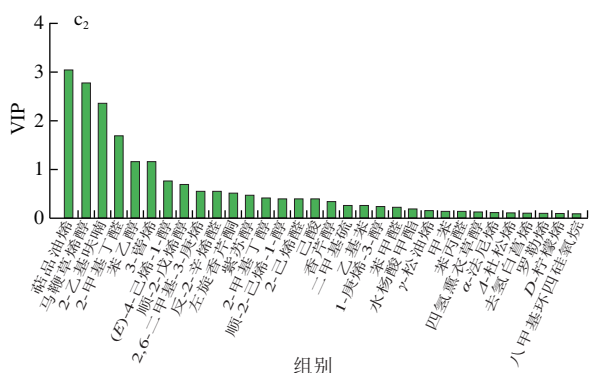


图6 不同海拔茶树鲜叶及成品茶主要挥发性成分PLS-DA得分图(a)、置换检验图(b)和VIP值(c)

Fig. 6 PLS-DA score plots (a), permutation test plots (b) and VIP scores (c) of major volatile components in fresh leaves and white tea from different altitudes

结合成品茶中挥发性成分的相对含量,通过查阅相关文献阈值<sup>[17-20]</sup>计算OAV(表4),不同海拔成品茶样品共鉴定出16种挥发性成分,包括醇类4种、醛类4种、芳香族类1种、萜烯类3种、硫醚类1种、酮类1种、杂氧化合物1种和酯类化合物1种,这些化合物主要为不同海拔成品茶提供“果香”、“青草香”等香气属性,具有重要的贡献。其中OAV≥1的挥发性成分有5种,分别为2-甲基丁醛、反-2-辛烯醛、2-乙基呋喃、3-萜烯和萜品油烯,推测这些挥发性成分对白茶香气品质有重要作用,不同海拔之间有显著差异。不同海拔成品茶共有挥发性成分3种,OAV最大的萜品油烯、3-萜烯分别赋予政和白茶清香、花香和木香等香气特征。

表4 不同海拔成品茶关键挥发性成分OAV  
Table 4 OAVs of major volatile constituents in white tea from different altitudes

类型	挥发性成分	阈值/ (μg/kg)	香气特征	OAV					
				BHYZ1	BMD1	BHYZ2	BMD2	BHYZ3	BMD3
醇类	顺-2-戊烯醇	150	青草香	0.03	0.04	0.02	0.04	0.01	0.02
	顺-2-己烯-1-醇	70	青草香气和新茶叶气息	0.06	0.07	0.06	0.07	0.03	0.05
	苯乙醇	45	玫瑰香、甜香	0.08	0.08	0.11	0.09	0.05	0.04
	(E)-4-己烯-1-醇	90	草本香		0.04	0.01	0.03	0.01	
醛类	2-甲基丁醛	3	焦糖、果香	3.2	4.15	3.1	3.94	1.18	1.96
	2-己烯醛	5	新鲜水果味、清香	0.24	0.39	0.23	0.31	0.19	0.28
	苯甲醛	3	杏仁味、水果香	0.21	0.37	0.24	0.41	0.14	0.21
	反-2-辛烯醛	0.02	青气、果仁香、油脂气			9.34	19.74		
	D-柠檬烯	10	柠檬			0.01			
萜烯类	3-萜烯	0.4	松脂香、甜香、强烈的松木样香气	36.52	42.15	29	45.9	19.32	26.07
	萜品油烯	0.2	清香、花香、木香	94.08	150.54	74.53	91.55	50.97	72.89
酮类	左旋香芹酮	50	薄荷味、留兰香味	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02
氧杂环类	2-乙基呋喃	2.3	烘烤香	-	1.7	0.94	1.82	0.48	0.97
酯类	水杨酸甲酯	40	冬青油草药香味、薄荷味	0.02	0.04	0.02	0.04	0.01	0.02
芳香族	乙基苯	16	芳香气味	0.01	0.02	0.02	0.03	-	0.02
硫醚类	二甲基硫	1.1	清新并带有些醇香	-	0.22	0.19	0.25	0.08	0.14

### 3 讨论

#### 3.1 不同海拔政和白茶重要生化成分

茶树生长发育不仅受自身遗传因子的影响,还受海拔等环境因素影响<sup>[21]</sup>,而海拔影响茶树物质代谢主要受光照、温度、水肥等环境因子的调节作用,导致鲜叶内含成分在数量和比例上的差别<sup>[22]</sup>。本研究通过测定不同海拔茶树鲜叶及成品茶的主要生化成分表明,在茶树鲜叶样品中,可溶性糖、咖啡碱、游离氨基酸和水浸出物含量存在统计学差异( $P<0.05$ )。随着海拔高度升高,可溶性糖、水浸出物和游离氨基酸含量增加,咖啡碱含量减少。高山茶区气温较低,光照强度相对较弱而漫射光多<sup>[10]</sup>,不利于咖啡碱的合成<sup>[7]</sup>。海拔较高的茶园昼夜温差大,有助于茶树光合作用碳同化的产物积累,茶叶水浸出物含量高<sup>[23]</sup>。可溶性糖是细胞渗透压调节物质之一,受气温影响较大,高海拔茶区冬季气温低,可溶性糖含量随温度下降而上升,而低海拔茶区降温速度慢,可溶性糖增加幅度小<sup>[24]</sup>。在成品茶样品中,可溶性糖、咖啡碱和水浸出物含量与鲜叶样品随海拔高度变化的趋势一致,表明鲜叶内含成分基质造就成品茶优良品质的形成。

PLS-DA结果表明,该模型能够对不同海拔茶树鲜叶、成品茶进行有效判别,并鉴定出可溶性糖和咖啡碱是区分不同海拔茶树鲜叶的重要生化成分,可溶性糖和游离氨基酸是区分不同海拔成品茶的重要生化成分。成品白茶可溶性糖含量略比鲜叶含量增加,前人研究<sup>[25]</sup>表明长时间萎凋促进可溶性糖含量的产生。鲜叶样品中,咖啡碱含量随着海拔升高而降低,这与Kfoury等<sup>[26]</sup>研究高海拔茶树鲜叶中咖啡碱的含量较低,与低海拔茶叶存在显著差异相一致。海拔每上升100 m,年平均温度下降0.6℃<sup>[7]</sup>,李智<sup>[27]</sup>研究表明,茶树芽叶的咖啡碱含量随着大气温度下降而减少,一定程度上解释高海拔茶区咖啡碱含量低。成品茶样品中,中、高海拔样品游离氨基酸含量高于低海拔样品,前人发现在乌龙茶和绿茶中<sup>[6,10-11]</sup>游离氨基酸在较高海拔样品中含量更高,本实验对鲜叶及成品茶的研究结果也进一步验证这一结论。高山茶园具有相对低温、湿度大、降雨量多的气候特点,有利于氨基酸等含氮化合物的合成和积累<sup>[7]</sup>。综上,可溶性糖、游离氨基酸和咖啡碱等生化成分可以作为区分不同海拔鲜叶、成品茶品质差异的依据。

#### 3.2 不同海拔政和白茶重要挥发性成分

不同海拔茶园气候(光照、温度、湿度)、水肥条件、地形和土壤等自然环境条件的差异影响茶树鲜叶香气的形成,而鲜叶香气对成品茶香气的形成、转化,起着基础作用<sup>[6,28]</sup>。本实验采用GC-MS及多元统计分析技术对不同海拔茶树鲜叶及成品茶挥发性成分进行分析,



与不同海拔乌龙茶以醛类和酯类化合物<sup>[28]</sup>，绿茶的醛类和烷烃类化合物<sup>[10]</sup>为主不同，不同海拔白茶以醇类和萜烯类化合物为主，这可能可以解释白茶香气以清纯为主的品质特征。茶树鲜叶挥发性成分PLS-DA结果表明，3-萜烯、马鞭草烯醇、萜品油烯、顺-2-戊烯醇、2-乙基呋喃和顺-2-己烯-1-醇为区分不同海拔茶树鲜叶的关键挥发性成分。中、高海拔鲜叶样品的顺-2-己烯-1-醇、顺-2-戊烯醇含量均高于低海拔鲜叶样品。顺-2-己烯-1-醇呈青草香，是巨峰葡萄主要的呈香物质<sup>[30]</sup>，前人研究发现顺-2-己烯-1-醇对红茶清香品质具有贡献作用<sup>[31]</sup>；顺-2-戊烯醇呈青草香、果香，是茶叶香气品质优劣的重要指标<sup>[32]</sup>，在金萱和四季春乌龙茶中均有检出<sup>[33]</sup>。此外，前人研究表明顺-2-戊烯醇是高山茶树鲜叶的主要挥发性成分之一<sup>[34]</sup>。不同海拔成品茶香气差异显著，中、高海拔白茶香气清纯，低海拔白茶花香显。成品茶挥发性成分PLS-DA结果表明，萜品油烯、马鞭草烯醇、苯乙醇、2-甲基丁醛、3-萜烯和2-乙基呋喃为区分不同海拔成品茶的关键挥发性成分。前人研究表明2-甲基丁醛、苯乙醇和2-乙基呋喃是白茶的主要挥发性成分<sup>[35]</sup>。苯乙醇具有玫瑰和丁香气味，是多种茶类中重要的风味化合物<sup>[36-37]</sup>；本研究发现苯乙醇在低、中海拔区间含量较高，且后者显著高于其他海拔区间，与叶伟华等<sup>[12]</sup>研究表明，海拔150~500 m的乌牛早绿茶中苯乙醇的相对含量较高，与本研究结果一致。2-甲基丁醛、2-乙基呋喃均呈烘烤香，前人研究发现茶叶干燥过程中形成的高温环境会促进二者的产生<sup>[38-39]</sup>，且2-甲基丁醛是冻顶乌龙、铁观音和大红袍茶汤香气品质的重要组成物质<sup>[36]</sup>。单萜烯化合物通常带有浓郁的甜香、花香和木香<sup>[37]</sup>。3-萜烯呈甜香、木香，前人研究发现3-萜烯是形成4个品种白牡丹茶香气品质产生差异的特征香气成分之一<sup>[40]</sup>；萜品油烯带花香，是柑橘和金橘呈现花香的关键挥发性成分<sup>[41]</sup>。此外在不同海拔绿茶<sup>[10]</sup>和乌龙茶<sup>[28]</sup>中也发现了在低海拔区间花香化合物相对含量较高。马鞭草烯醇主要呈现柠檬香气，是柠檬草精油的主要挥发性成分<sup>[42]</sup>，且广泛存在于不同品种的柠檬果皮中<sup>[43]</sup>。

OAV $\geq$ 1被认为对整体香气有重要贡献作用，而OAV $<$ 1对整体香气特征起到修饰作用<sup>[44]</sup>，结合OAV $\geq$ 1和VIP值 $>$ 1筛选出2-甲基丁醛、3-萜烯和萜品油烯是形成不同海拔政和白茶香气差异的主要物质基础。本研究发现低海拔白茶的3-萜烯和萜品油烯含量显著高于高海拔白茶，OAV是基于单一香气化合物在水中的阈值<sup>[45]</sup>，而香气成分之间具有协同、拮抗和掩盖作用<sup>[46]</sup>，有报道显示花香化合物与木香、果香味化合物之间有显著加成作用，对花香香味形成有增强作用<sup>[47-48]</sup>，感官审评结果同样显示高海拔白茶香气更为清新，低海拔白茶花香显。

## 4 结论

通过不同海拔茶树鲜叶及成品茶的生化成分和挥发性成分检测分析，结果表明，可溶性糖、咖啡碱、游离氨基酸和水浸出物含量在不同海拔茶树鲜叶及成品茶中存在统计学差异( $P<0.05$ )，鲜叶样品中，随着海拔高度升高，可溶性糖、水浸出物和游离氨基酸含量增加，咖啡碱含量减少；在成品茶样品中，可溶性糖、咖啡碱和水浸出物含量与鲜叶样品的变化趋势一致，相关性分析结果表明，海拔高度与可溶性糖、水浸出物含量呈极显著正相关。采用GC-MS技术对不同海拔鲜叶及成品茶挥发性成分进行鉴定，二者均以醇类和萜烯类化合物为主。偏小二乘法判别分析和聚类分析可知，可溶性糖、咖啡碱、3-萜烯、马鞭草烯醇、萜品油烯、顺-2-戊烯醇、2-乙基呋喃和顺-2-己烯-1-醇是区分不同海拔茶树鲜叶的重要差异成分，其中，中、高海拔鲜叶样品的顺-2-己烯-1-醇、顺-2-戊烯醇含量均高于低海拔鲜叶样品。可溶性糖、游离氨基酸、萜品油烯、马鞭草烯醇、苯乙醇、2-甲基丁醛、3-萜烯和2-乙基呋喃是区分不同海拔成品茶的重要差异成分，其中萜品油烯、马鞭草烯醇、苯乙醇、2-甲基丁醛、3-萜烯和2-乙基呋喃等特征化合物在低、中海拔样品中普遍比高海拔样品含量高。OAV分析表明，2-甲基丁醛、3-萜烯和萜品油烯可作为鉴别不同海拔白茶的特征挥发性成分。本实验从茶树鲜叶及成品茶的角度入手，探讨海拔高度差异对茶叶品质的影响，本研究分析获得的特征化合物为鉴别不同海拔政和白茶品质差异提供参考。

## 参考文献:

- [1] 沈佐民, 宛晓春. 促进中国茶叶出口贸易发展的思路与对策[J]. 农业经济问题, 2007(5): 23-27. DOI:10.3969/j.issn.1000-6389.2007.05.004.
- [2] HAJIAGHAALIPOUR F, KANTHIMATHI M S, SANUSI J, et al. White tea (*Camellia sinensis*) inhibits proliferation of the colon cancer cell line, HT-29, activates caspases and protects DNA of normal cells against oxidative damage[J]. Food Chemistry, 2015, 169: 401-410. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.07.005.
- [3] DIAS T R, TOMÁS G, TEIXEIRA N F, et al. White tea (*Camellia Sinensis* (L.)): antioxidant properties and beneficial health effects[J]. International Journal of Food Science, Nutrition and Dietetics, 2013, 2(2): 19-26. DOI:10.19070/2326-3350-130005.
- [4] 刘东娜, 罗凡, 李春华, 等. 白茶品质化学研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(4): 79-91. DOI:10.13304/j.nykjdb.2017.0336.
- [5] 王婷婷, 金心怡. 生态条件对茶叶品质的影响探析[J]. 茶叶科学技术, 2014(3): 6-12. DOI:10.3969/j.issn.1007-4872.2014.03.002.
- [6] 刘晓纯, 曹藩荣. 综述海拔高度对凤凰单丛茶品质风味的影响[J]. 广东茶业, 2020(5): 2-5. DOI:10.3969/j.issn.1672-7398.2020.05.001.
- [7] 罗杰, 金立鑫, 韩吟文, 等. 四川省蒙山茶区海拔高度与茶叶品质关系[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2009, 34(4): 122-127. DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2009.04.025.

- [8] 肖健, 刘慧, 郑福维, 等. 不同海拔保靖黄金茶品质形成的气象因子初探[J]. 农学学报, 2021, 11(3): 68-73.
- [9] 黄纪刚, 韩文炎. 海拔高度对庐山云雾茶品质的影响[J]. 中国茶叶, 2019, 41(4): 19-21. DOI:10.3969/j.issn.1000-3150.2019.04.007.
- [10] 张悦, 朱荫, 吕海鹏, 等. 不同海拔烘青绿茶的品质成分分析[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 257-268. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210114-152.
- [11] 杨勇, 杨贤强, 洪高洁. 汤记高山茶和平地茶品质的对比研究[J]. 茶叶, 2004(2): 91-92. DOI:10.3969/j.issn.0577-8921.2004.02.009.
- [12] 叶伟华, 李杰峰. 海拔对乌牛早茶叶品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(8): 1512-1516. DOI:10.16178/j.issn.0528-9017.20200809.
- [13] CHEN Y L, JIANG Y M, DUAN J, et al. Variation in catechin contents in relation to quality of 'Huang Zhi Xiang' oolong tea (*Camellia sinensis*) at various growing altitudes and seasons[J]. Food Chemistry, 2010, 119(2): 648-652. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.07.014.
- [14] 王丽丽, 张应根, 杨军国, 等. 顶空固相微萃取/气相色谱-质谱联用法分析绿茶和白茶香气物质[J]. 茶叶学报, 2017, 58(1): 1-7.
- [15] 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. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021030180.
- [16] 翁晶晶, 周承哲, 朱晨, 等. 不同风味类型漳平水仙茶的主要品质差异分析[J]. 食品科学, 2021, 42(20): 208-215. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200928-354.
- [17] GUO X Y, SCHWAB W, HO C, et al. Characterization of the aroma profiles of oolong tea made from three tea cultivars by both GC-MS and GC-IMS[J]. Food Chemistry, 2022, 376: 131933. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.131933.
- [18] XU K, TIAN C Y, ZHOU C Z, et al. Non-targeted metabolomics analysis revealed the characteristic non-volatile and volatile metabolites in the rougui Wuyi rock tea (*Camellia sinensis*) from different culturing regions[J]. Foods, 2022, 11(12): 1694. DOI:10.3390/foods11121694.
- [19] 范海默特里奥. 化合物嗅觉阈值汇编[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2018: 77-327.
- [20] YANG C, LUO L P, ZHANG H J, et al. Common aroma-active components of propolis from 23 regions of China[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(7): 1268-1282. DOI:10.1002/jsfa.3969.
- [21] WEN B, REN S, ZHANG Y Y, et al. Effects of geographic locations and topographical factors on secondary metabolites distribution in green tea at a regional scale[J]. Food Control, 2020, 110: 106979. DOI:10.1016/j.foodcont.2019.106979.
- [22] 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003:132-172.
- [23] 朱永兴. 茶鲜叶品质周年变化趋势及影响因子[J]. 茶叶通讯, 1994(2): 10-13.
- [24] 骆耀平. 茶树栽培学[M]. 5版. 北京: 中国农业出版社, 2015: 151-189.
- [25] 李明月. 四川白茶加工技术及品质评价研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2015: 20-37.
- [26] KFOURY N, MORIMOTO J, KERN A, et al. Striking changes in tea metabolites due to elevational effects[J]. Food Chemistry, 2018, 264: 334-341. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.05.040.
- [27] 李智. 不同环境因子调控茶树紫色芽叶形成的分子机制研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014: 26-53.
- [28] 唐颀, 方华春, 唐劲驰, 等. 凤凰单丛茶品质地域性差异的生化基础[J]. 食品科学, 2015, 36(20): 168-173. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201520032.
- [29] 傅海峰, 林琼珍, 朱晨, 等. 6种不同香型白茶香气成分的GC-MS分析[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(10): 91-97. DOI:10.3969/j.issn.1673-1689.2020.10.012.
- [30] 牛早柱, 陈展, 赵艳卓, 等. 15个不同葡萄品种果实香气成分的GC-MS分析[J]. 华北农学报, 2019, 34(S1): 85-91. DOI:10.7668/hbxb.20190295.
- [31] 叶飞. 湖北工夫红茶品质风味特征性成分及关键工艺创新研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020: 31-48.
- [32] 陈佳佳, 朱陈松, 朱文伟, 等. 白茶萎凋过程中氨基酸类物质代谢分析[J]. 茶叶科学, 2021, 41(4): 471-481. DOI:10.13305/j.cnki.jts.2021.04.003.
- [33] 黄绮婷, 李妙清, 李娜. TD-GC-MSD法分析四季春与金萱挥发性香气成分[J]. 饮料工业, 2022, 25(2): 29-36. DOI:10.3969/j.issn.1007-7871.2022.02.010.
- [34] 穆丹, 吴甘霖, 刘正奎, 等. 同时蒸馏萃取-气质联用法分析鹤落坪自然保护区茶鲜叶挥发性成分[J]. 中药材, 2014, 37(5): 811-815. DOI:10.13863/j.issn1001-4454.2014.05.004.
- [35] 黄藩, 唐晓波, 罗凡, 等. LED光照萎凋对三花1951白茶香气的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(4): 148-155. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.04.025.
- [36] ZHU J C, CHEN F, WANG L Y, et al. Comparison of aroma-active volatiles in oolong tea infusions using GC-olfactometry, GC-FPD, and GC-MS[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(34): 7499-7510. DOI:10.1021/acs.jafc.5b02358.
- [37] 苗爱清, 吕海鹏, 孙世利, 等. 乌龙茶香气的HS-SPME-GC-MS/GC-O研究[J]. 茶叶科学, 2010, 30(S1): 583-587. DOI:10.13305/j.cnki.jts.2010.s1.013.
- [38] 谢妍纯, 邢彦纯, 李妙清, 等. 不同产地抹茶的香气成分分析[J]. 饮料工业, 2020, 23(4): 23-29.
- [39] 乔如颖. 不同茶树品种鲜叶挥发性物质及其在加工中变化[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 1-15.
- [40] 冯花, 王飞权, 张渤, 等. 不同茶树品种白牡丹茶香气成分的HS-SPME-GC-MS分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(12): 252-264. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.12.1273.
- [41] 欧小群, 王瑾, 李鹏, 等. 广陈皮及其近缘品种挥发油成分的比较[J]. 中成药, 2015, 37(2): 364-370. DOI:10.3969/j.issn.1001-1528.2015.02.029.
- [42] 邹丽婷, 王文婷, 杨辉祥, 等. 新鲜广西柠檬草精油成分的GC-MS分析[J]. 种子科技, 2020, 38(18): 13-14.
- [43] 彭思. 品种、发育时期和贮藏方式对柠檬挥发性成分的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016: 40-60.
- [44] WANG M Q, MA W J, SHI J, et al. Characterization of the key aroma compounds in Longjing tea using stir bar sorptive extraction (SBSE) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), gas chromatography-olfactometry (GC-O), odor activity value (OAV), and aroma recombination[J]. Food Research International, 2020, 130(C). DOI:10.1016/j.foodres.2019.108908.
- [45] 肖作兵, 蒋新一, 牛云蔚. 水果香气物质分析研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(2): 14-22. DOI:10.12301/j.issn.2095-6002.2021.02.003.
- [46] 陈臣, 袁佳杰, 杨仁琴, 等. 食品风味协同作用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(3): 663-668.
- [47] ATANASOVA B, THOMAS-DANGUIN T, CHABANET C, et al. Perceptual interactions in odour mixtures: odour quality in binary mixtures of woody and fruity wine odorants[J]. Chemical Senses, 2005, 30(3): 209-217. DOI:10.1093/chemse/bji016.
- [48] 朱建才. 花果类香气成分协同作用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 50-80.