

萎凋方式对 γ -氨基丁酸白茶香气成分的影响

吴 婷, 李沅达, 邓秀娟, 高 畅, 江小丽, 黄刚骅, 周红杰, 李亚莉*

(云南农业大学茶学院, 昆明 650201)

摘 要: **目的** 探明萎凋方式对 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)白茶香气成分的影响。**方法** 采用顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱法(headspace solid-phase mextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)结合感官评价和香气活性值(odour activity value, OAV)比较分析自然萎凋 GABA 白茶(TY)和复式萎凋 GABA 白茶(LY)的香气成分差异。**结果** TY 共鉴定出 39 种有效香气成分, LY 共鉴定出 41 种有效香气成分, LY 浓度及 OAV 值显著高于 TY ($P < 0.05$, $FC > 2$ 或 < 0.5)。TY 的香气浓郁持久, 带果香和兰花香, LY 的香气果香馥郁, 带兰花香和栀子花香, 复式萎凋有利于果香积累。**结论** 复式萎凋较自然萎凋更有利于芳樟醇、2-庚醇、1-己烯-3-醇、3-甲基苯甲醛、月桂醛、己酸、壬酸、2-庚酮等物质的富集, 使得 GABA 白茶中的果香型风味突出, 花香、清香和奶油型香气更加显著, 更有利于促进 GABA 白茶优良品质的形成。本研究结果可为开发不同香型 GABA 白茶产品及白茶加工工艺创新提供理论参考。

关键词: γ -氨基丁酸白茶; 萎凋; 香气成分

Effects of withering method on the aroma composition of γ -aminobutyric acid white tea

WU Ting, LI Yuan-Da, DENG Xiu-Juan, GAO Chang, JIANG Xiao-Li,
HUANG Gang-Hua, ZHOU Hong-Jie, LI Ya-Li*

(College of Tea, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

ABSTRACT: Objective To explore the effects of withering methods on the aroma components of γ -aminobutyric acid (GABA) white tea. **Methods** The headspace solid-phase mextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) combined with sensory evaluation and odour activity value (OAV) was used to compare and analyze the differences in aroma components between naturally withered GABA white tea (TY) and compound withered GABA white tea (LY). **Results** A total of 39 kinds of effective aroma components were identified by TY and 41 kinds of effective aroma component were identified by LY, and the concentration and OAV values of LY were significantly higher than those of TY ($P < 0.05$, $FC > 2$ or < 0.5). The aroma of TY was strong and persistent, with fruit and orchid aroma, the aroma of LY was fruity and fruity, with orchid and gardenia aroma, the compound withering was beneficial to the accumulation of fruit aroma. **Conclusion** Compared with natural

基金项目: 国家自然科学基金项目(31460215)、云岭产业技术领军人才项目(发改委[2014]1782)、云南省教育厅科学研究基金研究生项目(2020Y137)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31460215), the Yunnan Ling Industry Technology Leader Project (Development and Reform Commission [2014]1782), and the Yunnan Provincial Education Department Scientific Research Fund Graduate Project (2020Y137)

*通信作者: 李亚莉, 博士, 教授, 主要研究方向为茶叶加工与茶文化。E-mail: 595778901@qq.com

*Corresponding author: LI Ya-Li, Ph.D, Professor, Yunnan Agricultural University College of Tea, Fengyuan Road, Panlong District, Kunming 650201, China. E-mail: 595778901@qq.com

withering, compound withering is more beneficial to the enrichment of linalool, 2-heptanol, 1-hexen-3-ol, 3-methylbenzaldehyde, dodecyl aldehyde, hexanoic acid, nonanoic acid, 2-heptanone and other substances which makes the fruity flavor of GABA white tea outstanding, and the floral, clear and creamy aroma are more significant, which is more conducive to promoting the formation of excellent quality of GABA white tea. The results of this study can provide theoretical references for the development of GABA white tea products with different aroma types and the innovation of processing technology.

KEY WORDS: γ -aminobutyric acid white tea; withering; aroma components

0 引 言

γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)茶是富含 γ -氨基丁酸的茶, 茶树鲜叶厌氧处理后, 茶叶中 GABA 积累, 茶叶滋味的鲜爽度提高, 果香风味突出^[1]。前期研究表明, 鲜叶厌氧时间 ≥ 6 h 是茶叶 γ -氨基丁酸积累的关键因素^[2]。不同厌氧处理和萎凋工艺对 GABA 白茶的风味影响较大, 然而其具体作用机制尚不清晰。目前, GABA 茶的研究主要在乌龙茶^[3]、绿茶^[4]、普洱熟茶^[5]、普洱生茶^[6]等方面, 对 GABA 白茶香气类型及成分尚不清楚, 其果香风味构成的挥发性成分还未探明。香气对于茶叶的品质起着至关重要的作用, 本研究采用不同加工工艺加工 GABA 白茶, 对其挥发性香气进行分析, 有利于探明不同加工工艺下 GABA 白茶风味的不同和实现 GABA 白茶风味的定向调节, 同时可为多元化白茶产品开发提供参考^[7]。

白茶近年来深受茶叶爱好者的青睐^[8]。相较于其他茶类, 白茶加工工序较简, 主要为萎凋和干燥^[9], 但其加工条件极难控制。白茶特殊的工艺赋予了其滋味醇滑、香气清幽的独特风味^[10]。萎凋时, 鲜叶中的水分逐步散失, 在细胞渗透调节作用下, 细胞膜渗透性发生明显变化, 内含成分发生改变, 代谢途径中的关键酶和次生代谢产物共同决定了白茶的优良品质^[11]。现阶段, 白茶萎凋大多以自然萎凋与复式萎凋为主^[12], 自然萎凋保留了白茶最本质的口感和香气; 复式萎凋在一定程度上能改变白茶风味, 使白茶香气馥郁度增加, 花果香等特征物质富集^[13]。为丰富白茶的风味, 轻揉捻、摇青、晒青、堆青、造型及厌氧等工序^[14-15]逐渐加入到白茶加工中。

挥发性有机物质决定了茶叶的香气^[16], 气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)结合计量学分析是目前研究不同香气组分最有效的方法, 可以分离、鉴定和量化茶叶及其提取物的香气成分^[17], 结合香气活性值(odour activity value, OAV)可有效筛选出 GABA 白茶的特征性挥发性风味物质^[18-19]。前期研究中, 鲜叶充氮厌氧处理 6 h 可有效提升茶叶中 γ -氨基丁酸含量的富集^[5], 所以本研究借鉴前人研究, 采用厌氧处理 6 h 后的茶树鲜叶, 以自然萎凋和复式萎凋工艺加工白茶, 以

顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱法(headspace solid-phase mextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)结合 OAV 分析 GABA 白茶中的挥发性香气物质组成结构, 探明不同萎凋方式对 GABA 白茶香气的影响, 并阐明自然萎凋和复式萎凋两种工艺下 GABA 白茶的特征香气物质, 为云南白茶开拓更多的品类提供理论支撑和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

云抗 10 号(*Camellia assamica* Yun kang 10)茶树品种鲜叶一芽二叶, 于 2021 年 4 月 30 日采自云南省大理洲云农县宝丰乡大栗树茶厂。

氯化钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 正己烷(色谱纯, 德国 Merck 公司); 芳樟醇标准品(同位素内标, 色谱纯, 云南西力生物技术股份有限公司)。

1.2 仪器与设备

6CH941 茶叶烘干机(浙江上洋机械股份有限公司); 8890-5977B 气相色谱-质谱联用仪、DB-5MS 毛细管柱(30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μ m)、DVB/CAR/PDMS 萃取头(120 μ m)(美国 Agilent 公司); MM400 球磨仪(德国 Retsch 公司); SPME AllowCond 固相微萃取装置、Fiber Conditioning Station 老化装置、Agitator 样品加热箱(瑞士思特斯分析仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 实验茶样制备

设置自然萎凋的 GABA 白茶为对照组, 编号 TY; 复式萎凋的 GABA 白茶为实验组, 编号为 LY, 工艺流程如下:

TY 茶样制备: 充氮厌氧处理 6 h 后, 摊叶厚度(5 $\pm$ 1) cm, 温度(25 $\pm$ 3) $^{\circ}$ C、湿度 80% $\pm$ 5%环境条件下室内自然萎凋 86 h, 60 $^{\circ}$ C烘干机烘干。

LY 茶样制备: 充氮厌氧处理 6 h 后, 在摊叶厚度(5 $\pm$ 1) cm, 温度(25 $\pm$ 3) $^{\circ}$ C、湿度 80% $\pm$ 5%环境条件下室内萎凋 60 h, 室外非阳光直射区域日晒 4 h, 室内堆积于箩筐(高 40 cm、直径 40 cm)中 18 h, 室外日晒 4 h, 60 $^{\circ}$ C烘干机烘干。

室内自然萎凋温湿度采用自动设备检测,人为调节;室外非阳光直射区域人工控制, TY 与 LY 在萎凋处理结束后均匀摊于网筛上置于同一台烘干机中,设置温度 60℃烘至足干。

1.3.2 茶样检测

挥发性香气成分检测参照吴婷等^[20]方法进行,检测 3 次平行。

1.3.3 定量定性分析

根据吴婷等^[20]方法对数据进行定性定量分析。

根据公式(1)计算各挥发性组分浓度值:

$$\text{各组分浓度}/(\mu\text{g/g}) = \frac{\text{物质峰面积}}{\text{内标峰面积}} \times \frac{\text{内标质量}(\mu\text{g})}{\text{样本量}(\text{g})} \quad (1)$$

1.3.4 气味活度值计算

OAV 为挥发性化合物质量浓度与该物质嗅觉阈值的比值,按公式(2)计算:

$$\text{OAV} = \frac{C}{\text{OT}} \quad (2)$$

公式(2)中: C 表示每种香气成分的含量(μg/g); OT 表示每个香气成分在参考文献中的气味阈值(μg/g)^[21-22]。

1.3.5 感官审评

参照 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》和 GB/T 22291—2017《白茶》,采用评语与评分相结合的方式评定 GABA 白茶茶叶品质。

1.4 数据分析

利用 SIMCA 软件进行主成分分析(principal component

analysis, PCA), SPSS 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同萎凋方式 GABA 白茶的香气组分结构差异

经 HS-SPME-GC-MS 分析鉴定,两种不同萎凋方式的 GABA 白茶中共鉴定出 41 种香气成分(表 1),其中 TY 鉴定出 39 种,LY 鉴定出 41 种;TY 中 39 种香气成分 LY 中皆存在, TY 中仅有的两种物质为己醛和 3-甲基吡啶,分别具有苹果香味和熟果样香气^[20]。鉴定出的 41 种香气成分主要分为醇类(10 种)、醛类(6 种)、酸类(2 种)、烃类(3 种)、酮类(7 种)、杂环化合物(3 种)、酯类(10 种)7 大类物质。相较于 TY, LY 不同类成分总含量增加较大, FC 为 12.04 倍;其中醇类、酸类、醛类、烃类物质含量分别增加了 614.58 μg/g (FC=12.71)、561.32 μg/g (FC=12.80)、157.63 μg/g (FC=11.95)、198.3 μg/g (FC=11.18)。

两种不同萎凋方式的 GABA 白茶的香气成分的 PCA 得分散点图(图 1)显示, PC1 为 95.60%, PC2 为 3.69%, 累计贡献率为 99.29%, 结果表明两个样品之间贡献率高度可信,本次检测出的香气成分用于不同萎凋方式的 GABA 白茶香气的分析具有可行性。且 TY 在左半部分, LY 在右半部分,实现了组间明显区分,表明自然萎凋 GABA 白茶和复式萎凋 GABA 白茶的香气物质组成结构差异显著。由以上分析可知不同萎凋工艺加工的 GABA 白茶香气物质组成存在显著差异($P<0.05$), LY 的香气物质含量更高,物质种类更加丰富。

表 1 不同萎凋方式 GABA 白茶的香气成分
Table 1 Aroma components of GABA white tea with different withering methods

序号	物质	CAS	保留指数	相对含量/(μg/g)		FC (LY/TY)
				TY	LY	
	醇类			52.47	667.05	12.71
1	(E)-3-己烯醇	928-97-2	854.63	1.00±0.19 ^a	27.6±4.92 ^b	28.16
2	芳樟醇	78-70-6	1107.19	36.14±6.07 ^a	393.78±24.51 ^b	11.09
3	2-苯乙醇	60-12-8	1116.14	0.81±0.18 ^a	37.97±3.11 ^b	47.86
4	2-庚醇	543-49-7	900.03	0.48±0.10 ^a	33.04±3.81 ^b	70.23
5	1-己烯-3-醇	4798-44-1	865.29	0.16±0.02 ^a	3.27±0.57 ^b	21.14
6	辛烯-3-醇	3391-86-4	979.76	0.90±0.10 ^a	5.57±0.48 ^b	6.30
7	(E)-6-壬烯-1-醇	31502-19-9	1152.97	0.05±0.01 ^a	0.68±0.08 ^b	14.33
8	(Z)-2-戊烯-1-醇	1576-95-0	764.28	0.25±0.05 ^a	2.97±0.63 ^b	12.24
9	己醇	111-27-3	868.77	0.36±0.04 ^a	7.32±1.21 ^b	20.60
10	香叶醇	106-24-1	1251.02	12.32±2.22 ^a	154.85±12.7 ^b	12.78
	醛类			14.39	172.02	11.95
11	己醛	66-25-1	796.82	-	2.31±0.26 ^b	-
12	3-甲基苯甲醛	620-23-5	1216.97	1.79±0.19 ^a	10.18±2.98 ^b	5.74
13	(E)-柠檬醛	141-27-5	1266.43	12.33±2.2 ^a	154.84±12.64 ^b	12.77

表 1(续)						
序号	物质	CAS	保留指数	相对含量/($\mu\text{g/g}$)		FC (LY/TY)
				TY	LY	
14	月桂醛	112-54-9	1204.81	0.04 $\pm$ 0.01 ^a	0.12 $\pm$ 0.01 ^b	3.33
15	癸醛	112-31-2	1204.83	0.04 $\pm$ 0.01 ^a	0.12 $\pm$ 0.02 ^b	3.28
16	苯甲醛	100-52-7	961.84	0.19 $\pm$ 0.02 ^a	4.45 $\pm$ 0.83 ^b	24.33
	酸类			47.56	608.88	12.80
17	己酸	142-62-1	1008.78	1.71 $\pm$ 0.34 ^a	40.71 $\pm$ 2.75 ^b	24.22
18	壬酸	112-05-0	1265.43	12.33 $\pm$ 2.2 ^a	154.84 $\pm$ 12.64 ^b	12.77
	烃类			19.48	217.78	11.18
19	γ -松油烯	99-85-4	1059.13	0.69 $\pm$ 0.11 ^a	2.69 $\pm$ 0.25 ^b	3.96
20	(+)-柠檬烯	5989-27-5	1030.66	4.25 $\pm$ 0.65 ^a	15.21 $\pm$ 1.34 ^b	3.65
21	3,4-二甲基-2,4,6-辛三烯	57396-75-5	1128.11	0.50 $\pm$ 0.08 ^a	4.33 $\pm$ 0.45 ^b	8.79
	酮类			1.85	10.88	5.88
22	3'-甲基苯乙酮	585-74-0	1186.64	0.05 $\pm$ 0.01 ^a	0.20 $\pm$ 0.02 ^b	4.25
23	2-己基-5-甲基-3(2H)-咪喃酮	33922-66-6	1261.71	0.18 $\pm$ 0.07 ^a	1.55 $\pm$ 0.13 ^b	8.59
24	Z-四氢-6-(2-戊烯基)-2H-吡喃-2-酮	25524-95-2	1487.94	1.00 $\pm$ 0.07 ^a	4.34 $\pm$ 0.77 ^b	4.37
25	1-(2-羟基-5-甲基苯基)-乙酮	1450-72-2	1309.6	0.17 $\pm$ 0.02 ^a	1.30 $\pm$ 0.25 ^b	7.58
26	α -紫罗兰酮	127-41-3	1422.61	0.19 $\pm$ 0.03 ^a	1.17 $\pm$ 0.16 ^b	6.36
27	二苯甲酮	119-61-9	1634.7	0.06 $\pm$ 0.01 ^a	0.13 $\pm$ 0.02 ^b	2.20
28	2-庚酮	110-43-0	887.67	0.20 $\pm$ 0.04 ^a	2.19 $\pm$ 0.31 ^b	11.45
	杂环化合物			3.62	40.36	11.15
29	3-甲基吡啶	83-34-1	1386.19	-	0.12 $\pm$ 0.03 ^b	-
30	芳樟醇氧化物(咪喃型)	5989-33-3	1072	3.58 $\pm$ 0.53 ^a	39.66 $\pm$ 3.47 ^b	11.30
31	1-(2-咪喃基)-1-戊酮	3194-17-0	1115.88	0.04 $\pm$ 0.00 ^a	0.58 $\pm$ 0.06 ^b	15.18
	酯类			16.76	162.98	9.72
32	乙酸异丁香酚酯	93-29-8	1446.71	0.20 $\pm$ 0.03 ^a	1.10 $\pm$ 0.18 ^b	5.67
33	棕榈酸乙酯	628-97-7	1989.83	0.02 $\pm$ 0.00 ^a	0.40 $\pm$ 0.10 ^b	19.98
34	(E,Z)-2-己酸,3-己烯基酯	53398-87-1	1430.06	0.10 $\pm$ 0.01 ^a	0.78 $\pm$ 0.16 ^b	7.58
35	反式-3-己烯基乙酸酯	3681-82-1	1003.31	0.75 $\pm$ 0.15 ^a	5.69 $\pm$ 0.29 ^b	7.78
36	己酸叶醇酯	31501-11-8	1377.16	11.89 $\pm$ 1.18 ^a	1.01 $\pm$ 0.23 ^b	0.09
37	棕榈酸异丙酯	142-91-6	2019.8	0.06 $\pm$ 0.00 ^a	0.37 $\pm$ 0.10 ^b	6.85
38	乙酸苄酯	140-11-4	1161.3	0.05 $\pm$ 0.01 ^a	0.40 $\pm$ 0.05 ^b	8.47
39	邻氨基苯甲酸甲酯	134-20-3	1341.5	0.20 $\pm$ 0.03 ^a	0.74 $\pm$ 0.06 ^b	8.47
40	水杨酸甲酯	119-36-8	1195.19	3.40 $\pm$ 0.61 ^a	152.19 $\pm$ 9.04 ^b	45.56
41	γ -十一内酯	104-67-6	1625.93	0.09 $\pm$ 0.01 ^a	0.30 $\pm$ 0.03 ^b	3.43

注: 同列不同小写字母表示具有显著差异($P<0.05$), -表示未检出, 下同, 差异倍数(fold change, FC)。

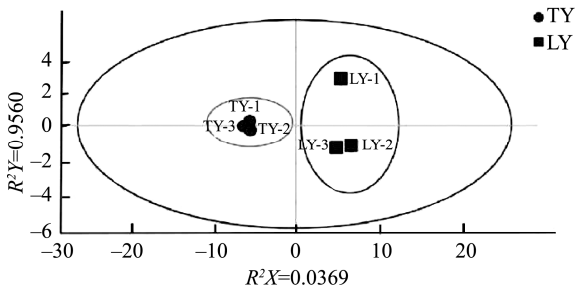


图 1 不同萎凋方式 GABA 白茶的香气成分主成分分析
Fig.1 Principal component analysis of aroma components of GABA white tea with different withering methods

2.2 不同萎凋方式 GABA 白茶中的香气差异显著性分析

基于 $P<0.05$, 且 $\text{FC}>2$ 或 $\text{FC}<0.5$ 的筛选条件, 共从两种萎凋方式 GABA 白茶中筛选出了 39 种显著性差异化合物。相较于 TY, LY 有 1 种物质显著降低, 为己酸叶醇酯, 带有水仙花等香气特征^[23], 其余 38 种物质含量显著增加, 分析如下:

$\text{FC}\geq 20$ 的物质有 8 种, 含量增加了 3.11~148.79 $\mu\text{g/g}$, 包括 2-庚醇($\text{FC}=70.23$, 具有甜嫩新鲜的花香)、2-苯乙醇($\text{FC}=47.86$, 具有柔和、愉快而持久的玫瑰香)、水杨酸甲酯

(FC=45.56, 具有樱桃、苹果、草莓等果香香气)、(E)-3-己烯醇(FC=28.16, 清香、花香)、苯甲醛(FC=24.33, 柑橘香、花香)、己酸(FC=24.22, 具有特殊的杏仁气味)、1-己烯-3-醇(FC=21.14, 具有柔和、愉快而持久的玫瑰香)、己醇(FC=20.60, 果香、花香、清香)^[24-25]。

10≤FC<20的物质有 10 种, 含量增加了 0.38~357.64 μg/g, 包括棕榈酸乙酯(FC=19.98, 弱蜡香、果香、奶油香)、1-(2-呋喃基)-1-戊酮(FC=15.18, 熟果香)、(E)-6-壬烯-1-醇(FC=14.33, 清香)、香叶醇(FC=12.78, 具有椰子、浆果、紫罗兰、桂花等香气)、(E)-柠檬醛(FC=12.77, 浓烈柑橘的果香)、壬酸(FC=12.77, 玫瑰、鸢尾、薰衣草等花香)、(Z)-2-戊烯-1-醇(FC=12.24, 果香、花香等香气)、2-庚酮(FC=11.45, 具有樱桃、柑橘等香味)、芳樟醇氧化物(呋喃型)(FC=11.30, 具有花香)、芳樟醇(FC=11.09, 具有甜嫩新鲜的花香)^[26]。

5≤FC<10的物质有 12 种, 含量增加了 0.39~8.39 μg/g, 包括 3,4-二甲基-2,4,6-辛三烯(FC=8.79, 柑橘和柠檬香气)、2-己基-5-甲基-3(2H)-呋喃酮(FC=8.59, 花香)、乙酸苄酯(FC=8.47, 具有菠萝、瓜、水仙花等香气)、邻氨基苯甲酸甲酯(FC=8.47, 蜜香)、反式-3-己烯基乙酸酯(FC=7.78, 弱蜡香、果香、奶油香)、(E,Z)-2-己酸,3-己烯基酯(FC=7.58, 玫瑰、丁香、康乃馨等花香)、1-(2-羟基-5-甲基苯基)-乙酮(FC=7.58, 甜香)、棕榈酸异丙酯(FC=6.85, 果香、蜜香)、α-紫罗兰酮(FC=6.36, 具樱桃、柑橘等香味)、辛烯-3-醇(FC=6.30, 鲜柠檬香气、青草、草药气味)、3-甲基苯甲醛(FC=5.74, 具有椰子、浆果、紫罗兰、桂花等香气)、乙酸

异丁基苯酚酯(FC=5.67, 玫瑰、丁香、康乃馨等花香)^[27]。

0≤FC<5 的物质有 8 种, 含量增加了 0.07~10.96 μg/g, 包括 Z-四氢-6-(2-戊烯基)-2H-吡喃-2-酮(FC=4.37, 呈椰子、奶油、水果、桃、茉莉香、木香和香酯香气)、3'-甲基苯乙酮(FC=4.25, 愉快新鲜橙子香气)、γ-松油烯(FC=3.96, 柑橘和柠檬香气)^[28]、(+)-柠檬烯(FC=3.65, 愉快新鲜橙子香气)^[29]、γ-十一内酯(FC=3.43, 强烈桃子似香气)、月桂醛(FC=3.33, 甜的花香和柑橘香气)、癸醛(FC=3.28, 柑橘香、花香)、二苯甲酮(FC=2.20, 具有甜味和玫瑰香味)。

GABA 白茶主要挥发性物质香型特征如表 2^[20]所示, 与 TY 相比, LY 挥发性香气物质香气类型增多, 果香型物质富集, 带有果香、甜香、清香、坚果香、蜜香等香气。结合感官分析, 感官总评分 LY 略高于 TY, TY 香气浓郁持久, 带果香和兰花香, LY 果香馥郁, 带兰花香和栀子花香, 与 TY 相比, 与挥发性香气分析一致。

2.3 不同萎凋方式 GABA 白茶的关键香气活性物质分析

比较不同茶样之间香气物质的含量不能明确说明每种物质对香气整体的影响, OAV 用于鉴别重要香气物质是目前食品风味特征物质鉴定的重要手段^[30]。茶叶众多的香气成分中, 起贡献作用的仅有一部分, 它们之间相互作用构成了不同茶叶的香气特征^[31]。前人研究通过计算 OAV 值以评价不同香气物质对茶叶整体香气的贡献度, OAV 值>1 时的挥发性物质对茶叶香气具有一定的影响, OAV>10 的香气成分对香气整体贡献极大^[32]。

表 2 GABA 白茶主要挥发性物质香型特征
Table 2 Flavor characteristics of main volatile substances in GABA white tea

香气类型	物质	种类
果香	庚醇、己醛、3-甲基呋喃、水杨酸甲酯、 1-(2-呋喃基)-1-戊酮、(E)-柠檬醛、2-庚酮、 3,4-二甲基-2,4,6-辛三烯、α-紫罗兰酮、3'-甲基苯乙酮、γ-松油烯、(+)-柠檬烯、γ-十一内酯 苯乙醇、1-己烯-3-醇、壬酸、芳樟醇氧化物(呋喃型)、芳樟醇、2-己基-5-甲基-3(2H)-呋喃酮、己酸	13
花香	叶醇酯 (E,Z)-2-己酸,3-己烯基酯、乙酸异丁基苯酚酯	9
花果香	苯甲醛、香叶醇、(Z)-2-戊烯-1-醇、3-甲基苯甲醛、 月桂醛、癸醛、乙酸苄酯	7
甜香	1-(2-羟基-5-甲基苯基)-乙酮	1
清香	(E)-6-壬烯-1-醇	1
蜜香	邻氨基苯甲酸甲酯	1
坚果香	己酸	1
果、蜜香	棕榈酸异丙酯	1
果、蜜、奶油香	棕榈酸乙酯、反式-3-己烯基乙酸酯	2
甜香、花香	二苯甲酮	1
清香、花香	(E)-3-己烯醇	1
果香、清香、药香	辛烯-3-醇	1
果香、花香、清香	己醇	1
果香、花香、木香	Z-四氢-6-(2-戊烯基)-2H-吡喃-2-酮	1

如表 3 所示, LY 的 OAV 值皆高于 TY。TY 中有 OAV>1 的香气物质 14 种, 其中 OAV 值>10 的有 7 种, 分别为(*E*)-3-己烯醇、2-苯乙醇、 γ -松油烯、(+)-柠檬烯、 α -紫罗兰酮、芳樟醇氧化物(呋喃型)、水杨酸甲酯, 以果香物质为主, 带有花香和清香。

LY 中有 OAV>1 的香气物质 18 种, 其中 OAV>10 有 15 种, 分别为(*E*)-3-己烯醇、芳樟醇、2-苯乙醇、2-庚醇、1-己烯-3-醇、3-甲基苯甲醛、月桂醛、己酸、壬酸、 γ -松油烯、(+)-柠檬烯(1230.56)、 α -紫罗兰酮、2-庚酮、芳樟醇氧化物(呋喃型)、水杨酸甲酯, 其中有 8 种是 TY 中 OAV 值>10 未筛选出的物质, 包括芳樟醇、2-庚醇、1-己烯-3-醇、3-甲基苯甲醛、月桂醛、己酸、壬酸、2-庚酮, 以果香物质为主, 其次是花香, 带有清香、奶油香和辛香等。

感官结果如表 4 所示, 结合特征物质分析, TY 香气浓郁持久, 带果香和兰花香, 其主要香气活性物质为(*E*)-3-己烯醇、2-苯乙醇、 γ -松油烯、(+)-柠檬烯、 α -紫罗兰酮、芳樟醇氧化物(呋喃型)、水杨酸甲酯; LY 果香馥郁, 带兰花香和栀子花香, 其主要香气活性物质为芳樟醇、2-庚醇、1-己烯-3-醇、3-甲基苯甲醛、月桂醛、己酸、壬酸、2-庚酮。

3 讨 论

萎凋阶段不同的处理对白茶香气形成具有重要意义, 自然萎凋和复式萎凋在白茶的生产中应用较广, 萎凋较重或较轻会造成香气不纯、苦涩、青气重等, 降低白茶品质^[33]。自然萎凋工序较简便, 室内自然环境下均匀晾干于水筛中, 适时并晒, 翻动较少, 对品种要求较高, 利于保持毫香和品种香, 形成清香和花香等香气特征^[34]。复式萎凋在天气不稳定的情况下, 根据环境条件合理确定室内萎凋时间, 结合日晒、堆青等处理以最佳的萎凋条件组合加工出香气馥郁滋味醇厚的白茶, 日晒是提升白茶香气的有效手段, 日光与室内自然萎凋相结合, 降低了茶叶加工中的机械损伤, 节约了其人力的使用。但日晒对于控制萎凋程度难以稳定控制, 易使成茶叶底出现红叶。同时白茶的加工与气候的变化密切相关, 不同加工地点其温湿度变化较大, 对茶叶萎凋失水影响较大, 大叶种叶质较厚, 其萎凋时间较长^[35]。

大叶种内含物质丰富, 其鲜叶进行充氮厌氧处理后其鲜叶本身具有的部分青草气物质在无氧呼吸环境下转化, 形成厌氧结束后嗅到的浓烈的熟果带有果酸样香气特征,

根据其 γ -氨基丁酸含量富集的特点结合可定义为“ γ 香”; 自然萎凋环境较为稳定, 香型较为单一, 主要以毫香、花香、甜香为主, 而复式萎凋增加了更多的因素形成, 其萎凋叶内部在不同光线、温度及堆积养青后形成馥郁的果香、蜜香等香气类型。而大叶种白茶加工技术及其萎凋中物质变化研究还需深入, 同时 GABA 白茶的生产对产地海拔、品种等具有一定要求, 深入探究系统规范的 GABA 白茶生产技术对促进产业化更好发展有积极意义。

表 3 不同萎凋的 GABA 白茶关键挥发性香气成分的 OAV 值
Table 3 OAV values of volatile aroma components of GABA white tea with different withering

物质	CAS	OT/($\mu\text{g/g}$)	OAV	
			TY	LY
(<i>E</i>)-3-己烯醇	928-97-2	0.07	14.30	394.23
芳樟醇	78-70-6	0.39	2.08	97.36
2-苯乙醇	60-12-8	0.00567	32.87	206.61
2-庚醇	543-49-7	0.41	1.17	80.58
1-己烯-3-醇	4798-44-1	0.07	2.26	46.76
己醛	66-25-1	0.07	0.55	1.77
3-甲基苯甲醛	620-23-5	0.045	-	51.30
月桂醛	112-54-9	0.35	5.11	29.08
癸醛	112-31-2	0.02	1.82	5.97
苯甲醛	100-52-7	0.89	0.40	0.21
己酸	142-62-1	3.00	4.11	51.61
壬酸	112-05-0	0.89	-	14.24
γ -松油烯	99-85-4	0.0075	1643.11	20647.07
(+)-柠檬烯	5989-27-5	0.32	112.95	1230.56
α -紫罗兰酮	127-41-3	0.01	424.59	1520.60
2-庚酮	110-43-0	0.14	1.40	15.64
3-甲基吡啶	83-34-1	0.50	-	0.25
芳樟醇氧化物 (呋喃型)	5989-33-3	0.32	11.18	123.93
乙酸苄酯	140-11-4	0.364	0.13	1.11
水杨酸甲酯	119-36-8	0.04	85.01	3804.75

表 4 感官审评结果
Table 4 Sensory evaluation results

编号	外形 (25%)	香气 (25%)	汤色 (10%)	滋味 (30%)	叶底 (10%)	总分
TY	黄绿匀整 芽叶连枝(92.00)	浓郁持久, 带果香、兰花香(90.00)	浅杏黄明亮 (91.00)	鲜甜甘爽 (93.00)	黄绿 软匀嫩 (92.00)	91.70
LY	黄绿匀整 芽叶连枝(91.00)	果香馥郁持久, 带兰花香、栀子花香(95.00)	浅杏黄带绿 (92.00)	鲜甜甘爽, 显苦(92.00)	绿黄较亮 (91.50)	92.45

4 结 论

本研究采用 HS-SPME-GC-MS 结合 OAV 对自然萎凋和复式萎凋的 GABA 白茶挥发性物质进行比较分析, 复式萎凋的 GABA 白茶的挥发性物质含量更高, 物质种类更加丰富, 己醛和 3-甲基呋喃为复式萎凋的 GABA 白茶特有挥发性物质。自然萎凋的 GABA 白茶香气浓郁持久, 带果香和兰花香; 复式萎凋的 GABA 白茶果香馥郁, 带兰花香和栀子花香, 香气类型丰富, 果香型物质富集, 带有果香、甜香、清香、坚果香、蜜香等香气。复式萎凋的 GABA 白茶更有利于果香型风味的形成, 且香型更加馥郁, 香气物质更加丰富, 其更有利于芳樟醇、2-庚醇、1-己烯-3-醇、3-甲基苯甲醛、月桂醛、己酸、壬酸、2-庚酮等物质的显著富集。研究结果可为开发不同香型 GABA 白茶产品及加工工艺创新提供理论参考。

参考文献

- [1] RONGCHEN L, LI Z, LENG PS, *et al.* Transcriptome sequencing reveals terpene biosynthesis pathway genes accounting for volatile terpene of tree peony [J]. *Planta*, 2021, 254(4): 67.
- [2] 杨四润, 李亚莉, 杨明容, 等. GABA 晒青茶加工技术研究[J]. *中国食物与营养*, 2012, 18(7): 32–36.
YANG SR, LI YL, YANG MR, *et al.* Research on the processing technology of GABA sun-blue tea [J]. *Food Nutr China*, 2012, 18(7): 32–36.
- [3] 王芳, 陈百文, 高 γ -氨基丁酸岩茶加工工艺研究[J]. *茶叶通讯*, 2019, 46(1): 32–37.
WANG F, CHENG BW. Study on the processing process of high γ -aminobutyric acid rock tea [J]. *Tea Commun*, 2019, 46(1): 32–37.
- [4] 杨明容, 李亚莉, 杨四润, 等. 云南大叶种茶树鲜叶加工 γ -氨基丁酸茶的研究[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2013, 28(4): 512–516.
YANG MR, LI YL, YANG SR, *et al.* Study on the processing of γ -aminobutyric acid tea from fresh leaves of Yunnan large-leaf species tea trees [J]. *J Yunnan Agric Univ (Nat Sci)*, 2013, 28(4): 512–516.
- [5] 杨四润. GABA 普洱茶的研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2012.
YANG SR. Study on GABA Pu-erh tea [D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2012.
- [6] 李加凤, 杨明容, 周红杰, 等. GABA 普洱生茶加工工艺的研究[J]. *农业开发与装备*, 2013, (3): 45–46, 69.
LI JE, YANG MR, ZHOU HJ, *et al.* Study on the processing of raw GABA Pu-erh tea [J]. *Agric Dev Equip*, 2013, (3): 45–46, 69.
- [7] BEVILACQUA M, RASMUS B, FEDERICO M, *et al.* Recent chemometrics advances for foodomics [J]. *Trends Anal Chem*, 2017. DOI: 10.1016/j.trac.2017.08.011
- [8] FENG ZH, YIFAN LI, MING LI, *et al.* Tea aroma formation from six model manufacturing processes [J]. *Food Chem*, 2019. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.01.174
- [9] 薄佳慧, 宫连瑾, 叶兴妹, 等. 金花白茶加工过程中主要滋味物质的动态变化[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(1): 306–314, 20.
FU JH, GONG LJ, YE XM, *et al.* Study on the sensory taste characteristics of white tea and related contribution components [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2022, 38(1): 306–314, 20.
- [10] 童慧霖, 范方媛, 田宇倩, 等. 白茶感官滋味特征属性及相关贡献组分研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(7): 286–293.
TONG YL, FAN FY, TIAN YQ, *et al.* Study on the sensory taste characteristics of white tea and related contribution components [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(7): 286–293.
- [11] 陈静, 陈桂信, 叶乃兴, 等. 白茶萎凋过程中差异基因的生物信息学分析与表达分析[J]. *农业与技术*, 2021, 41(16): 17–21.
CHEN J, CHEN GX, YE NX, *et al.* Bioinformatics analysis and expression analysis of differential genes in white tea withering process [J]. *Agric Technol*, 2021, 41(16): 17–21.
- [12] 陈可坚. 不同萎凋方式对白茶品质的影响[J]. *福建茶叶*, 2020, 42(6): 35–36.
CHEN KJ. Effect of different withering methods on white tea quality [J]. *Fujian Tea*, 2020, 42(6): 35–36.
- [13] 邓仕彬, 方舒娜, 林金来. 萎凋工艺对福鼎白茶品质影响研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(13): 77–83.
DENG SB, FANG SN, LIN JL. Study on the effect of withering process on the quality of Fuding white tea [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(13): 77–83.
- [14] 冯花, 王飞权, 张渤, 等. 不同工艺制作水仙白茶的生化成分及感官品质比较[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(12): 92–102.
FENG H, WANG FQ, ZHANG B, *et al.* Comparison of biochemical constituents and sensory quality of narcissus white tea made by different processes [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2020, 36(12): 92–102.
- [15] 王飞权, 冯花, 朱晓燕, 等. 摇青和揉捻工艺对白茶生化成分和感官品质的影响[J]. *热带作物学报*, 2019, 40(11): 2236–2245.
WANG FQ, FENG H, ZHU XY, *et al.* Effects of shaking and kneading processes on biochemical composition and sensory quality of white tea [J]. *J Trop Crop*, 2019, 40(11): 2236–2245.
- [16] DAI WD, DONG CX, MEILING LU, *et al.* Characterization of white tea metabolome: Comparison against green and black tea by a nontargeted metabolomics approach [J]. *Food Res Int*, 2017, 96: 40–45.
- [17] 苏丹, 李亚莉, 李思佳, 等. 晒青茶、普洱茶(生茶)紧压茶实物样研制及其品质特征分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(15): 6233–6239.
SU D, LI YL, LI SJ, *et al.* Development of physical samples of sun-blue tea and Puerh tea (raw tea) and their quality characteristics analysis [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(15): 6233–6239.
- [18] 黄贵元, 高阳, 许利平, 等. 基于 HS-SPME/GC-MS 和电子鼻技术对干枣及其不同提取物挥发性成分分析[J/OL]. *食品科学*: 1–13. [2022-05-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20210911.1255.018.html>
HUANG GY, GAO Y, XU LP, *et al.* Analysis of volatile components of dried jujube and its different extracts based on HS-SPME/GC-MS and electronic nose techniques [J/OL]. *Food Sci*: 1–13. [2022-05-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20210911.1255.018.html>
- [19] 刘传和, 贺涵, 邵雪花, 等. 两种菠萝鲜果及其酿造果酒酯类风味物质差异性分析[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(7): 109–115.
LIU CH, HE H, SHAO XH, *et al.* Analysis of the variability of esters in the fresh fruit of two pineapple species and their brewed fruit wines [J]. *Storage Process*, 2021, 21(7): 109–115.
- [20] 吴婷, 邓秀娟, 李沅达, 等. 云茶香 1 号不同萎凋工艺白茶的化学品质研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(24): 9530–9538.
WU T, DENG XJ, LI YD, *et al.* Study on the chemical quality of white tea

- with different withering processes of *Camellia sinensis* vs Yunchaxiang 1 [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(24): 9530–9538.
- [21] LIN Q, HUI N, LING W, *et al.* Analysis of aroma-active volatiles in an SDE extract of white tea [J]. *Food Sci Nutr*, 2021. DOI:10.1002/fsn3.1954
- [22] 岳翠男, 秦丹丹, 李文金, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 鉴定浮梁红茶关键呈香物质[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(9): 251–258.
- YUE CN, QIN DD, LI WJ, *et al.* Identification of key aroma-presenting substances in Fuliang black tea based on HS-SPME-GC-MS and OAV [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(9): 251–258.
- [23] 潘一斌. 花果香型工夫红茶香气特征及关键工艺研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- PAN YB. Research on the aroma characteristics and key processes of floral and fruit flavored black tea [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.
- [24] ZHANG H, WANG R, WANG T, *et al.* Methyl salicylate delays peel yellowing of 'Zaosu' pear (*Pyrus bretschneideri*) during storage by regulating chlorophyll metabolism and maintaining chloroplast ultrastructure [J]. *J Sci Food Agric*, 2019. DOI: 10.1002/jsfa.9737
- [25] 王晓欣. 酱香型和浓香型白酒中香气物质及其差异研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- WANG XX. Study on aroma substances and their differences in soy sauce and strong spiced white wine [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [26] 杨婷. 茶叶香气成分中芳樟醇手性异构体的分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- YANG T. Analysis of chiral isomers of linalool in the aroma composition of tea leaves [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [27] 吴剑涓, 李文明, 李腾飞. HPLC-DAD 法同时测定八味沉香散中的 6 种成分[J]. *中草药*, 2014, 45(24): 3569–3572.
- WU JJ, LI WM, LI TF. Simultaneous determination of six components in eight flavors of Shen Xiang San by HPLC-DAD method [J]. *Chin Tradit Herb Drug*, 2014, 45(24): 3569–3572.
- [28] 张义. 龙眼汁香气物质及其在加工和贮藏过程中的变化规律[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- ZHANG Y. Aroma substances of Longan juice and their changes during processing and storage [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.
- [29] 王志霞, 苏丹, 任洪涛, 等. 紫娟与丹妃挥发性成分差异分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(18): 7388–7396.
- WANG ZX, SU D, REN HT, *et al.* Analysis of the differences in volatile components between Zijuan and Danfei [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(18): 7388–7396.
- [30] TAYLOR K, WICK C, CASTADA H, *et al.* Discrimination of swiss cheese from 5 different factories by high impact volatile organic compound profiles determined by odor activity value using selected ion flow tube mass spectrometry and odor threshold [J]. *J Food Sci*, 2013, 78(10): C1509–C1515.
- [31] 邵淑贤, 王淑燕, 王丽, 等. 基于 ATD-GC-MS 技术的不同品种白牡丹茶香气成分分析[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(1): 261–268.
- SHAO SX, WANG SY, WANG L, *et al.* Analysis of aroma composition of different varieties of white peony tea based on ATD-GC-MS technique [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(1): 261–268.
- [32] 谢关华, 陆安霞, 欧阳珂, 等. GC-MS 结合化学计量学用于探究六大茶类香气形成的差异[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(20): 260–270.
- XIE GH, LU ANX, OUYANG K, *et al.* GC-MS combined with chemometrics for exploring the differences in aroma formation of six major tea types [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(20): 260–270.
- [33] 耿银银. 福鼎白茶制作工艺及存储技术探究[J]. *福建茶叶*, 2021, 43(11): 20–21.
- GENG KK. Research on the production technology and storage technology of Fuding white tea [J]. *Fujian Tea*, 2021, 43(11): 20–21.
- [34] 刘阳, 李光彩, 熊中彩, 等. 不同茶树品种试制白茶品质初探[J]. *蚕桑茶叶通讯*, 2021, (3): 21–24.
- LIU Y, LI GC, XIONG ZC, *et al.* A preliminary investigation on the quality of white tea made from different tea tree varieties [J]. *Newsl Sericul Tea*, 2021, (3): 21–24.
- [35] 黄藩, 张厅, 尧渝, 等. 红光和黄光萎凋对白毫银针及寿眉白茶品质的影响研究[J]. *中国茶叶加工*, 2021, (3): 17–23.
- HUANG F, ZHANG T, YAO Y, *et al.* The effect of red light and yellow light withering on the quality of BaihaoYinzhen and Shoumeibai tea [J]. *China Tea Process*, 2021, (3): 17–23.

(责任编辑: 张晓寒 郑 丽)

作者简介



吴 婷, 硕士, 主要研究方向为制茶工程与质量控制。
E-mail: 1156739844@qq.com



李亚莉, 博士, 教授, 主要研究方向为茶叶加工与茶文化。
E-mail: 595778901@qq.com