

夏红玲, 苗爱清, 陈维, 等. 闷黄对黄茶香气特征及关键香气化合物的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 28–37. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040079

XIA Hongling, MIAO Aiqing, CHEN Wei, et al. Effects of Sealed Yellowing on Aroma Characteristic and Key Aroma Compounds of Yellow Tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 28–37. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040079

· 研究与探讨 ·

闷黄对黄茶香气特征及关键香气化合物的影响

夏红玲, 苗爱清, 陈 维, 胡 蝶, 乔小燕, 马成英*

(广东省农业科学院茶叶研究所, 广东省茶树资源创新利用重点实验室, 广东广州 510640)

摘 要:为明确闷黄对黄茶香气品质的影响, 通过感官审评、顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用技术和多元统计分析对 3 个茶树品种所制黄茶(有闷黄)和对照样(无闷黄)的香气特征和挥发性化合物组成开展研究。结果表明, 与对照样相比, 黄茶具有甜香风味。同时, 黄茶中挥发性组分总含量是对照样的 1.09~1.44 倍, 且醇类和烃类占比达到 65.88%~76.93%。对挥发性化合物的主成分分析和层次聚类分析结果显示化合物组成体现了香气特征差异, 进而可筛选出 35 种特征香气化合物 ($P<0.01$)。正交偏最小二乘法判别分析进一步明确了闷黄影响的关键香气化合物 14 种 ($VIP\geq 1$), 其中具有花香、果香和甜香的 α -松油醇、芳樟醇、 γ -松油烯、柠檬烯、松油烯、苯乙酸甲酯、2,2,6-三甲基环己酮、4-氧代异佛尔酮和邻-异丙基苯在闷黄所制黄茶中含量明显高于对照样, 这些化合物对黄茶呈现甜香的香气特征起到关键作用。

关键词:黄茶, 香气, 闷黄, 气相色谱-质谱联用, 多元统计分析

中图分类号: TS272

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)07-0028-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040079



本文网刊:

Effects of Sealed Yellowing on Aroma Characteristic and Key Aroma Compounds of Yellow Tea

XIA Hongling, MIAO Aiqing, CHEN Wei, HU Die, QIAO Xiaoyan, MA Chengying*

(Guangdong Key Laboratory of Tea Plant Resources Innovation and Utilization, Tea Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To illustrate effects of sealed yellowing on the aroma quality of tea samples, sensory evaluation, headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry and multivariate statistical analysis were used to study the aroma characteristics and volatile compounds of yellow teas (with sealed yellowing) and control samples (without sealed yellowing) manufactured from three tea varieties. The result showed that yellow teas had sweet flavor compared with control samples. Meanwhile, the total content of volatile components in the yellow tea was 1.09~1.44 times that of the control sample, and the proportion of alcohols and hydrocarbons accounted for 65.88%~76.93%. The result of principal component analysis and hierarchical cluster analysis of volatile compounds indicated that the composition of compounds reflected the difference of aroma characteristics, and then 35 characteristic aroma compounds were screened ($P<0.01$). Furthermore, orthogonal partial least squares discriminant analysis identified 14 key aroma compounds affected by sealed yellowing ($VIP\geq 1$). Among them, the contents of α -terpineol, linalool, γ -terpinene, limonene, terpinene, methyl phenylacetate, 2,2,6-trimethylcycloheptane, 4-oxoisophorone and o-cymene, with floral, fruity and sweet aroma, were significantly higher in yellow teas than in control samples. These compounds were considered to be responsible for the

收稿日期: 2022-04-26

基金项目: 广东省农业科学院科技人才引进专项资金项目 (R2021YJ-YB3025); 2021 年广东省农业科研项目和农业技术推广项目 (采后与加工岗位) (2021KJ120); 广东省农业科学院“中青年学科带头人”培养项目 (R2020PY-JX016); 广东省农业科学院创新基金项目 (202210)。

作者简介: 夏红玲 (1993-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 茶叶加工与品质分析, E-mail: xiahongling@gdaas.cn。

* **通信作者:** 马成英 (1985-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 茶叶加工与品质控制, E-mail: machengying@tea.gdaas.cn。

sweet aroma characteristic of yellow tea.

Key words: yellow tea; aroma; sealed yellowing; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); multivariate statistical analysis

茶是世界上最受欢迎的饮料之一,由茶树鲜嫩茶叶加工而成^[1]。根据加工工艺和品质特征的不同,茶叶分为六大类。香气是茶叶的重要品质之一,不同茶类具有不同的香气特征^[2-3],其感官表现由挥发性化合物的组成与含量决定^[4],主要受茶树品种、栽培环境和加工工艺的影响^[5-7]。目前已分离鉴定出了 700 多种与茶叶香气有关的成分,包括烃类、醇类、醛类和酯类等^[8],这为茶叶香气特征的研究奠定了坚实的基础。

黄茶是六大茶类之一,特有的闷黄工序赋予了黄茶三黄(干茶黄、汤色黄、叶底黄)的特征^[9-10]。闷黄使得茶叶内含物质在高温高湿条件下发生化学变化,经过干燥后,形成独特的黄茶香气品质^[11]。雷玉萍等^[12]取“御金香”鲜叶为原料,发现与不闷黄对照样相比,闷黄加工后的茶叶呈嫩栗香,甜香浓郁。文帅等^[13]报道以金萱品种所制黄茶呈现锅巴香(干坯闷黄)和花香(湿坯闷黄)。张厅等^[14]发现随着闷黄时间的增加,蒙顶黄芽的香型由清香转为甜香、火功香。张娇等^[9]对比闷黄工序前后的茶叶样品,结果表明闷黄前样品清香较低,闷黄结束后清香带甜香。可见闷黄对黄茶香气品质的形成至关重要。

近年来,随着气相色谱—质谱联用(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)技术的发展^[15],利用顶空固相微萃取结合 GC-MS 已从黄小茶中检测出 100 多种挥发性化合物^[16]。Shi 等^[17]通过搅拌棒吸附萃取结合 GC-MS 从 15 种市售黄茶中检测到 74 种化合物,其中醇类和酯类占比 52.44%。宋玉欣等^[18]从 3 个茶树品种黄茶中检测出 42 种香气物质,且均以醇类和醛类为主,共有的香气成分包括芳樟醇、正戊醇、庚醛等。然而现有研究集中在闷黄对黄茶香气特征的影响以及成品黄茶挥发性化合物分析方面,有关闷黄工序对挥发性化合物的影响尚不清楚。闷黄-香气特征-挥发性化合物之间的关系未被完全揭示,限制了对黄茶香气品质的完整认知。

为深入分析闷黄对黄茶香气特征及关键香气化合物的影响,本研究选取英红九号、茶树新品系 YPX 和金萱 3 个茶树品种为研究对象,按照有无闷黄工序分别加工黄茶和对照样,通过感官审评确定其香气特征;采用 GC-MS 技术进行挥发性有机化合物检测,结合多元统计分析,筛选黄茶呈香特征的关键香气化合物,分析闷黄工序对黄茶香气化合物组成的影响,明确闷黄-香气特征-挥发性香气化合物之间的相关性,为黄茶的工艺改进和品质定向调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

茶树鲜叶一芽二叶 广东省农业科学院茶叶研究所英德基地,茶树品种为英红九号(YJ)、金萱(JX)

和茶树新品系(YPX),采摘时间为 2019 年 6 月;C7~C30 饱和正构烷烃、癸酸乙酯 色谱纯,德国 Meker 公司。

YS-6CST-90I 型燃气茶叶杀青机、YS-6CRT-40 型茶叶揉捻机 福建省泉州裕盛机械有限公司;XS-6CHZ-9B 型茶叶烘焙机 福建省安溪祥山机械有限公司;DVB/CarbonWR/PDMS Smart SPME Arrow 萃取头(1.1 mm, 120/20 μ m)、多功能自动进样系统 RTC120 瑞士 CTC Analytics AG 公司;DB-5MS 毛细管色谱柱(60 m $\times$ 0.32 mm, 0.25 μ m)、8890-5977 B 气相色谱-质谱联用仪 美国 Agilent 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 黄茶和对照样加工工艺 根据前期制茶研究基础形成黄茶加工工艺,并将同一品种茶树鲜叶分别制成黄茶(YT)和对照样(CK)。

黄茶工艺流程:摊青 14 h(摊青叶含水量 67%~70%) $\rightarrow$ 260 $^{\circ}$ C 杀青 6~7 min $\rightarrow$ 摊凉 30 min $\rightarrow$ 揉捻 $\rightarrow$ 80 $^{\circ}$ C 闷堆 6 h $\rightarrow$ 90 $^{\circ}$ C 烘干 2 h;

对照样品工艺流程:摊青 14 h(摊青叶含水量 67%~70%) $\rightarrow$ 260 $^{\circ}$ C 杀青 6~7 min $\rightarrow$ 摊凉 30 min $\rightarrow$ 揉捻 $\rightarrow$ 90 $^{\circ}$ C 烘干 2 h。

黄茶的闷黄采用湿坯闷黄,将揉捻后的在制叶完全密封置于 80 $^{\circ}$ C 烘焙机中闷堆 6 h;摊青、杀青、摊凉、揉捻和烘干加工的参数和环境条件与对照样相同。英红九号、YPX 和金萱加工的黄茶分别记为 YJ_YT、YPX_YT 和 JX_YT,英红九号、YPX 和金萱加工的对照样分别记为 YJ_CK、YPX_CK 和 JX_CK。

1.2.2 香气感官审评 参照国标 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》进行茶叶香气感官审评。

1.2.3 挥发性物质提取 采用顶空固相微萃取的方法对茶叶挥发性物质进行提取。常温下将加工的 6 种茶叶样品磨成粉末,称取 1.000 $\pm$ 0.005 g 样品于 20 mL 顶空瓶中,测定前加入 2 μ L 浓度为 100 μ g/mL 的癸酸乙酯正己烷溶液作为内标。萃取时将顶空瓶置于加热振荡器中,于 60 $^{\circ}$ C 下平衡 5 min;随后使用萃取头于 60 $^{\circ}$ C 下萃取 40 min。进样时萃取头在 GC-MS 进样口处解吸附 2 min。

1.2.4 挥发性物质检测 气相色谱条件:进样口温度为 250 $^{\circ}$ C;采用不分流进样模式;氦气(99.999%)作为载气,流量为 1 mL/min;升温程序设置为初始柱温 35 $^{\circ}$ C,保持 2 min,以 5 $^{\circ}$ C/min 升温至 250 $^{\circ}$ C,不保持。质谱条件:采用电子轰击离子源,电子能量为 70 eV;传输线温度和离子源温度为 230 $^{\circ}$ C,四极杆温度为 150 $^{\circ}$ C;运行全扫描模式,扫描质荷比范围 m/z 35~450;溶剂延迟 8 min。

1.2.5 定性定量分析 由气相色谱-质谱联用仪检测所得的原始数据利用 Masshunter 工作站中的未知物分析软件(Unknowns Analysis, Version 10.0, 美国 Agilent 公司)进行处理。定性分析是将原始数据与 NIST17 库中数据比对,以质谱结果匹配度得分大于 70.0 且线性保留指数(linear retention index, LRI)偏差在 10 个单位内为依据确定化合物。化合物的 LRI 根据 Babushok 等报道的公式计算,具体如公式(1):

$$LRI=100\times n+100\times\frac{t_x-t_n}{t_{n+1}-t_n} \quad \text{式(1)}$$

式中: t_x 、 t_n 和 t_{n+1} 分别为待测物质、含有 n 个碳原子正构烷烃和含有 $n+1$ 个碳原子正构烷烃的保留时间(min)。

化合物的相对含量,则通过公式(2)由癸酸乙酯内标校正求得:

$$\text{相对含量}(\text{ng/g})=\frac{\text{化合物峰面积}}{\text{内标峰面积}}\times\frac{\text{内标质量}(\text{ng})}{\text{样品质量}(\text{g})} \quad \text{式(2)}$$

1.3 数据处理

每个样品的重复取样 3 次检测挥发性有机物,数据定性定量,利用 Excel 计算相对含量、平均值和标准差,并做表格。采用 TBtools 绘制 Venn 图和聚类热图,Origin 软件绘制柱形图^[19]。利用 Metaboanalyst 5.0 和 R 语言对数据进行分析并作图^[20-21]。前处理包括:a.以每组化合物最小值的 1/5 填充数据组中的缺失值;b.将数据进行对数变换和归一化。通过主成分分析(principle component analysis, PCA)和层次聚类分析(hierarchical cluster analysis, HCA)明确化合物和香气特征之间的关联,层次聚类分析中选用欧氏距离(euclidian distance)函数确定样品间距,以全连接(complete-linkage)算法测量类间距离。单因素方差分析(one-way analysis of variance, one-way ANOVA)结合最小显著差数,以校正 P 值小于 0.01 为标准,筛选差异极显著的特征香气化合物。正交偏最小二乘法判别分析(orthogonal partial least squares-dis-

criminant analysis, OPLS-DA)筛选组间差异化合物。

2 结果与分析

2.1 闷黄对黄茶香气特征的影响

为明确闷黄对黄茶香气特征的影响,对不同茶树品种所制的黄茶和对照样进行了感官审评,香气感官品质如表 1 所示。结果显示,同一茶树品种所制黄茶比对照样甜香特征更突出,表明闷黄工序有利于甜香品质的形成;不同茶树品种所制黄茶甜香程度不同,表明甜香特征不仅受闷黄的影响,还受茶树品种的影响。3 个茶树品种所制黄茶均具甜香香气,与蒙顶黄芽和福鼎大白所制黄茶的甜香香型相似^[22-24],而无闷黄的对照样与已报道的清香型绿茶特征相近^[25-27],这表明闷黄可以使 3 个茶树品种黄茶带有甜香的香气特征。

表 1 不同茶树品种所制黄茶和对照样的香气感官品质
Table 1 The aroma sensory quality of yellow tea and control sample manufactured from different tea varieties

序号	茶样名称	香气特征
1	YJ_YT	甜香明显
2	YPX_YT	甜香明显
3	JX_YT	甜香
4	YJ_CK	清香带甜
5	YPX_CK	清香带微甜
6	JX_CK	清香带微甜

2.2 闷黄对黄茶香气组分的影响

为进一步研究闷黄对黄茶香气组分的影响,采用顶空固相微萃取结合 GC-MS 技术分析了黄茶和对照样的挥发性化合物。结果表明,YJ、YPX 和 JX 这 3 个品种茶样中共检测到 50 种香气化合物(表 2),包含醇类 13 种,醛类 11 种,烃类 10 种,酮类 8 种,酯类 4 种,以及其他类型化合物 4 种。

由 Venn 图(图 1A)可以看出同一品种加工的黄茶和对照样,其香气组成存在差异。YJ_YT 和 YJ_CK 各检出 38 和 40 种香气物质,黄茶特有组分 4 种(二氢芳樟醇、(E)-苣荬烯、苯乙酸甲酯和茶螺烷),对照

表 2 不同茶树品种所制黄茶和对照样的香气组分

Table 2 The aroma components contained in yellow tea and control sample manufactured from different tea varieties

编号	化合物	保留指数			匹配度	相对含量(ng/g)				
		谱库数值	实验数值	YJ_YT		YPX_YT	JX_YT	YJ_CK	YPX_CK	JX_CK
醇类										
1	1-戊醇	765	763	83	49.07±17.86	69.87±16.40	155.20±28.71	79.63±12.65	108.40±14.99	109.37±25.72
2	芳樟醇氧化物Ⅰ	1074	1072	92	31.33±1.27	37.73±5.05	453.13±38.57	27.67±3.52	37.80±2.81	358.47±27.22
3	芳樟醇氧化物Ⅱ	1086	1088	89	—	—	352.55±34.01	—	—	246.63±21.77
4	芳樟醇	1099	1098	97	614.60±18.33	415.17±41.23	818.03±38.27	393.63±36.35	205.10±10.15	341.53±18.46
5	脱氢芳樟醇	1108	1102	95	74.03±2.32	301.87±20.67	1190.93±29.99	55.80±4.33	297.23±13.45	842.93±25.65
6	苯乙醇	1121	1112	92	—	63.50±6.68	145.43±14.63	—	65.20±1.44	98.77±2.40
7	二氢芳樟醇	1136	1133	84	2.23±0.12	—	—	—	—	—
8	芳樟醇氧化物Ⅲ	1173	1171	93	5.57±0.15	16.07±1.14	139.40±5.80	6.53±0.71	24.70±0.69	135.70±4.03
9	芳樟醇氧化物Ⅳ	1174	1174	95	16.13±0.76	25.13±1.68	133.33±4.23	19.83±1.57	36.93±1.33	140.40±3.85
10	4-萜烯醇	1175	1184	88	21.13±0.49	23.63±1.60	—	12.67±1.81	—	—

续表 2

编号	化合物	保留指数		匹配度	相对含量(ng/g)					
		谱库数值	实验数值		YJ_YT	YPX_YT	JX_YT	YJ_CK	YPX_CK	JX_CK
11	2,6-二甲基-3,7-辛二烯-2,6-二醇	1189	1185	96	—	—	101.00±2.72	—	32.10±0.44	181.37±0.64
12	α -松油醇	1190	1197	89	159.73±4.85	120.83±6.30	141.87±4.20	34.63±1.63	29.33±2.05	18.63±2.00
13	香叶醇	1255	1246	79	37.83±1.88	26.77±0.67	—	8.05±0.64	—	8.97±5.77
	该类化合物总量				1011.67±43.11	1100.57±90.18	3513.37±66.63	635.77±44.36	800.67±52.56	2482.77±116.85
	醛类									
14	正己醛	801	799	92	—	39.83±4.83	77.90±30.35	17.85±8.41	52.23±3.48	33.30±0.57
15	3-糠醛	832	829	85	—	—	40.90±25.03	27.33±4.65	37.80±0.26	32.57±6.75
16	庚醛	901	900	80	—	12.50±3.08	25.87±7.26	5.50±1.99	21.17±0.71	12.47±0.47
17	(E)-2-庚烯醛	964	955	90	11.13±0.81	20.77±5.03	39.40±12.42	19.90±8.96	26.83±1.81	23.37±2.35
18	5-甲基呋喃醛	962	959	81	—	—	—	4.33±0.35	7.93±0.50	10.27±0.57
19	苯甲醛	961	963	97	114.23±5.17	134.90±8.92	156.23±10.10	195.97±20.21	278.43±5.01	194.43±11.32
20	(E,E)-2,4-庚二烯醛	1012	1010	91	28.20±0.46	81.97±5.00	113.40±5.34	52.03±4.55	102.63±1.44	70.33±5.21
21	苯乙醛	1044	1044	95	55.47±4.40	65.87±7.50	102.87±3.86	69.97±11.57	95.43±3.55	76.70±14.44
22	藏红花醛	1201	1201	95	17.40±0.62	17.90±1.85	41.60±3.39	24.50±2.27	20.73±1.20	28.30±1.25
23	β -环柠檬醛	1221	1222	94	62.97±4.38	62.43±2.73	103.63±1.12	61.17±6.07	66.33±1.69	64.40±2.41
24	β -环高柠檬醛	1254	1259	81	—	11.50±4.61	13.10±3.29	6.33±1.72	13.00±1.71	11.67±0.59
	该类化合物总量				289.40±6.19	447.67±40.13	701.27±91.24	478.93±73.10	722.53±19.37	546.70±13.49
	烃类									
25	月桂烯	991	989	90	84.67±2.53	60.53±10.46	69.93±18.66	54.13±12.33	42.07±3.32	—
26	松油烯	1018	1019	89	17.37±1.06	14.57±4.55	9.20±0.52	9.73±1.04	10.47±0.76	6.03±0.76
27	邻-异丙基苯	1023	1027	94	33.87±1.19	53.37±10.16	60.97±7.00	23.60±6.01	36.43±2.55	33.67±2.41
28	柠檬烯	1030	1032	82	268.83±20.86	232.07±55.42	221.87±34.96	165.03±33.34	150.03±17.99	106.97±15.63
29	γ -松油烯	1061	1060	89	38.90±2.54	40.70±8.91	51.37±9.11	24.33±5.26	29.03±2.84	24.20±2.40
30	别罗勒烯	1131	1127	90	17.23±1.44	11.80±2.52	13.43±0.98	9.37±1.61	11.33±4.90	11.40±0.36
31	β -波旁烯	1384	1391	86	5.27±0.12	7.60±0.20	10.40±0.20	4.33±0.15	19.17±3.61	18.23±1.30
32	δ -杜松烯	1524	1522	93	5.77±0.35	63.37±1.55	62.17±0.78	5.03±0.25	64.70±2.65	50.73±2.56
33	(E)-菖蒲烯	1529	1526	87	1.25±0.07	23.20±1.08	17.50±0.69	—	18.60±0.70	13.87±0.81
34	α -二去氢菖蒲烯	1542	1548	85	—	10.37±0.57	8.53±0.15	—	4.47±0.15	3.67±0.12
	该类化合物总量				472.73±28.36	517.57±89.77	525.37±63.58	295.57±59.72	386.30±31.86	268.77±21.27
	酮类									
35	2,2,6-三甲基环己酮	1035	1037	86	49.60±3.47	35.03±9.58	71.33±10.13	33.93±6.81	27.87±1.36	29.43±3.04
36	3,5-辛二烯-2-酮	1073	1067	87	35.43±3.45	51.07±5.27	74.73±3.93	42.27±8.06	57.23±3.26	50.70±5.12
37	异佛尔酮	1119	1123	83	—	—	11.87±0.78	—	—	—
38	4-氧代异佛尔酮	1145	1144	79	4.83±0.25	8.90±0.57	14.70±1.20	3.95±0.21	—	—
39	α -紫罗酮	1427	1422	78	4.87±0.32	4.63±0.15	—	5.47±0.32	5.70±0.20	4.37±0.32
40	橙花基丙酮	1435	1443	93	9.90±0.40	11.63±0.76	14.17±0.50	13.03±0.12	14.93±0.49	14.77±0.74
41	β -紫罗酮	1485	1479	91	15.47±0.98	21.50±1.31	35.87±1.50	20.93±0.70	29.43±1.72	27.80±0.82
42	5,6-环氧- β -紫罗酮	1488	1482	74	5.35±0.07	—	12.60±0.46	9.33±0.32	11.27±0.75	10.83±0.15
	该类化合物总量				123.67±7.40	129.80±17.91	235.27±12.33	127.60±13.72	146.43±6.40	137.90±8.52
	酯类									
43	苯乙酸甲酯	1178	1174	90	22.63±0.97	11.27±2.35	13.15±0.49	—	—	—
44	水杨酸甲酯	1192	1194	89	—	4.20±0.42	22.97±0.74	—	3.37±0.35	13.37±0.45
45	2-甲氨基苯甲酸甲酯	1405	1408	77	1.60±0.10	2.47±0.15	—	1.27±0.12	2.40±0.10	2.35±0.07
46	二氢猕猴桃内酯	1530	1536	97	20.87±0.23	26.30±1.57	57.30±4.60	19.97±4.45	25.57±1.15	28.97±2.73
	该类化合物总量				45.10±1.11	42.83±2.22	89.03±9.63	21.23±4.45	31.33±1.54	43.90±1.40
	其他									
47	2-戊基呋喃	993	990	85	—	33.23±5.49	—	34.90±3.26	59.77±5.35	44.23±2.84
48	2-乙酰基吡咯	1063	1058	92	57.80±1.15	48.43±2.54	72.00±3.83	52.03±4.25	22.83±0.97	56.33±1.89
49	苯乙腈	1143	1137	98	35.77±1.21	133.53±5.71	99.70±4.00	14.83±0.78	73.67±2.42	63.43±1.90
50	茶螺烷	1302	1305	80	3.63±0.15	3.80±0.57	13.97±0.57	—	—	6.23±0.23
	该类化合物总量				97.20±2.25	217.73±14.27	185.67±7.88	101.77±7.48	156.27±7.50	170.23±5.36
	香气化合物总量				2039.77±65.27	2456.17±243.91	5249.97±123.07	1660.87±201.45	2243.53±86.83	3650.27±165.09

注: “—”表示化合物在此样品中检出频次 $\leq 1/3$ 。

样特有组分 6 种(正己醛、3-糠醛、庚醛、5-甲基呋喃醛、 β -环高柠檬醛和 2-戊基呋喃)。YPX_YT 和 YPX_CK 各检出香气物质 43 和 42 种,黄茶特有香气物质 5 种(4-萜烯醇、香叶醇、4-氧代异佛尔酮、苯乙酸甲酯和茶螺烷),对照样特有香气物质 4 种(2,6-二甲基-3,7-辛二烯-2,6-二醇、3-糠醛、5-甲基呋喃醛和 5,6-环氧- β -紫罗兰酮)。JX_YT 和 JX_CK 各检出香气物质 43 和 44 种,黄茶特有香气物质 4 种(月桂烯、异佛尔酮、4-氧代异佛尔酮和苯乙酸甲酯),对照样特有香气 5 种(香叶醇、5-甲基呋喃醛、 α -紫罗兰酮、2-甲氨基苯甲酸甲酯和 2-戊基呋喃)。苯乙酸甲酯是 3 个品种黄茶特有组分的共性化合物, YJ_YT 和 YPX_YT 特有组分均包含茶螺烷, YPX_YT 和 JX_YT 特有组分均包含 4-氧代异佛尔酮,表明闷黄会形成黄茶特有的香气共性物质。同时闷黄导致的特有组分的形成也会受到茶树品种的影响。

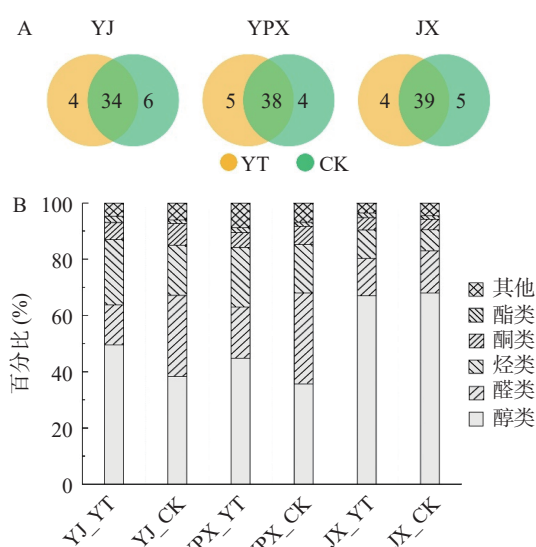


图1 黄茶和对照样香气化合物组成的维恩图(A)和相对含量百分比柱形图(B)

Fig.1 Venn diagrams (A) and relative content percentage histogram (B) of aroma compounds in yellow tea and control sample

除了特有组分上的差异,黄茶香气组分总含量均高于同一品种所制对照样,是对照样的 1.09~1.44 倍(表 2),其中 JX_YT 所含的香气组分总含量最高(5249.97 ± 123.07 ng/g),是 JX_CK 的 1.44 倍。与此发现一致的是,龙井、梅占两个茶树品种加工的黄茶所含挥发性化合物总含量高于其在同一品种无闷黄工序的绿茶中的总含量^[28-29]。各类型香气物质的含量占比也有所不同,尤其是醇类、醛类和萜类物质的含量占比(图 1B)。YJ_YT 中醇类、醛类和萜类占比分别为 49.60%、14.19% 和 23.18%, YJ_CK 中则为 38.28%、28.84% 和 17.80%; YPX_YT 中醇类、醛类和萜类占比分别为 44.81%、18.23% 和 21.07%, YPX_CK 中则为 35.69%、32.21% 和 17.22%; JX_YT 中醇类、醛类和萜类的占比分别为 66.92%、13.36% 和 10.01%, 在 JX_CK 中则分别为 68.02%、14.98%

和 7.36%。可见 6 种成品茶香气化合物均以醇类为主,萜类化合物占比在黄茶中高于同一品种对照样,醛类物质占比在黄茶中低于同一品种对照样。JX_YT 与其他两种黄茶的香气组分分布略有差异,可能与茶树品种有关。张厅等^[14]发现中茶 302 号加工的蒙顶黄芽茶香气组成以醇类为主,占比 47.35%~52.13%,其次是萜类化合物,与本研究结果吻合。速晓娟等^[30]对福鼎大白等茶树品种加工的蒙顶黄芽香气组分分析表明其中醇类最为丰富,占总挥发性物质的 31.69%。蒋容港等^[31]对不同原料等级黄茶香气的分析表明,芽型黄茶中醇类和萜类含量相近,且为最高;芽叶型黄茶中醇类含量最高,萜类次之,醇类含量约为萜类的两倍。可见,有闷黄工序的芽叶型黄茶香气组分中醇类和萜类贡献较大,但实际占比会受茶树品种的影响。

此外,从表 2 可以看出黄茶中含量较高的醇类主要为萜烯醇,萜类多为含碳数 10 的同分异构体和含碳数 15 的萜烯类。现有研究报道,加工过程中香气的形成主要有四种途径:类胡萝卜素的氧化降解、脂肪酸降解、糖苷水解和美拉德反应^[32]。萜烯醇和萜烯类化合物与糖苷物质的水解相关,醛类物质源于脂肪酸和氨基酸等物质的代谢,酮类化合物主要来自类胡萝卜素的降解^[32-35]。本研究的结果从侧面反映出闷黄工序有利于糖苷类水解释放萜烯醇和萜烯类化合物^[11,17,36]。

2.3 闷黄影响的特征香气化合物

感官审评结果表明有无闷黄工序所制成品茶之

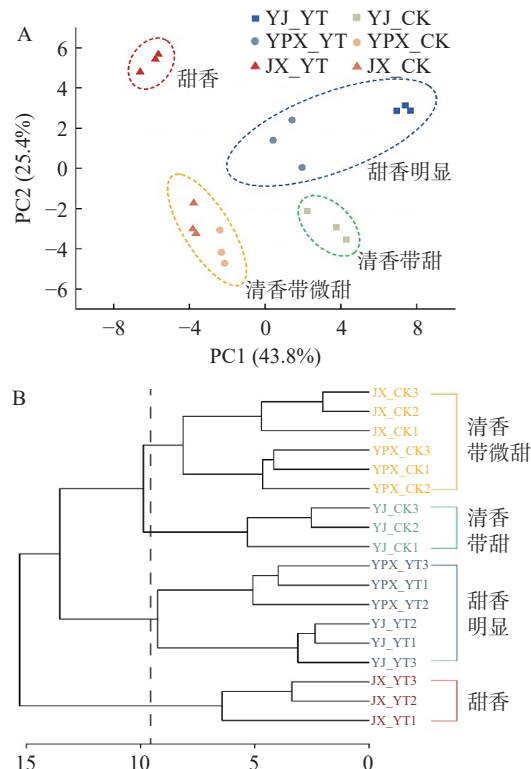


图2 基于黄茶和对照样中香气化合物的 PCA 图(A)和 HCA 图(B)

Fig.2 The PCA score plot (A) and HCA dendrogram (B) based on aroma compounds in yellow tea and control sample

间香气特征存在明显差异,为检验挥发性化合物组成能否体现香气特征差异,采用无监督的主成分分析和层次聚类分析对成品茶进行分类,并将结果与香气感官审评分类结果进行对比。将 50 种挥发性有机物的相对含量水平作为变量进行主成分分析,发现当选取 2 个主成分时,6 种样品在 PCA 得分图的分布已有明显区别,累计方差贡献率为 69.2%。由图 2A 可知,6 种样品分布在 PCA 得分图的 4 个区域,YPX_YT 和 YJ_YT 在 PC1 和 PC2 轴的正向,JX_YT 在 PC1 轴的负向和 PC2 轴的正向,YJ_CK 在 PC1 轴的正向和 PC2 轴的负向,JX_CK 和 YPX_CK 在 PC1 和 PC2 轴的负向,这与感官审评香气特征分类一致。

以香气化合物为变量,对茶叶样品进行层次聚类分析。如图 2B 所示,当聚类距离为 9.5 左右时,这些样品可以被分为 4 类,分别为:JX_CK 和 YPX_CK、YJ_CK、YPX_YT 和 YJ_YT、JX_YT,与感官审评的分组一致。按照距离从近到远来看,JX_CK 和 YPX_CK 首先聚成一类,说明其化合物信息的相似度高,与它们在 PCA 的集中分布一致,同时与感官

审评上表现为同一香气类型相对应。在 15 的距离水平上,只有 JX_YT 被分为一组,说明与其他样品化合物组成差异大,与 PCA 图中结论相同。基于香气化合物的 PCA 和 HCA 分析得到的成品茶分类结果与香气感官审评分组结果一致,说明这些香气化合物组成代表了香气特征的差异。

基于挥发性化合物与香气特征的关系,可筛选代表不同香气特征的特征香气化合物。将成品茶以香气特征分为 4 组,对所含的 50 种挥发性化合物进行单因素方差分析,以极显著性差异水平 0.01 ($P < 0.01$) 为标准,筛选出 35 种组间差异性极显著的化合物。基于其相对含量(对数变换和归一化后值)绘制聚类热图,结果如图 3 所示。特征香气化合物被分为 4 类,相对含量的高低以不同颜色显示,灰色表示该化合物未在茶样中检出;4 组呈现不同香气特征的样品记为 G1(甜香明显)、G2(甜香)、G3(清香带甜)和 G4(清香带微甜)。

第 I 类化合物仅在部分茶样中检出,代表了不同香气特征茶样中的特有组分。如 5-甲基呋喃醛仅

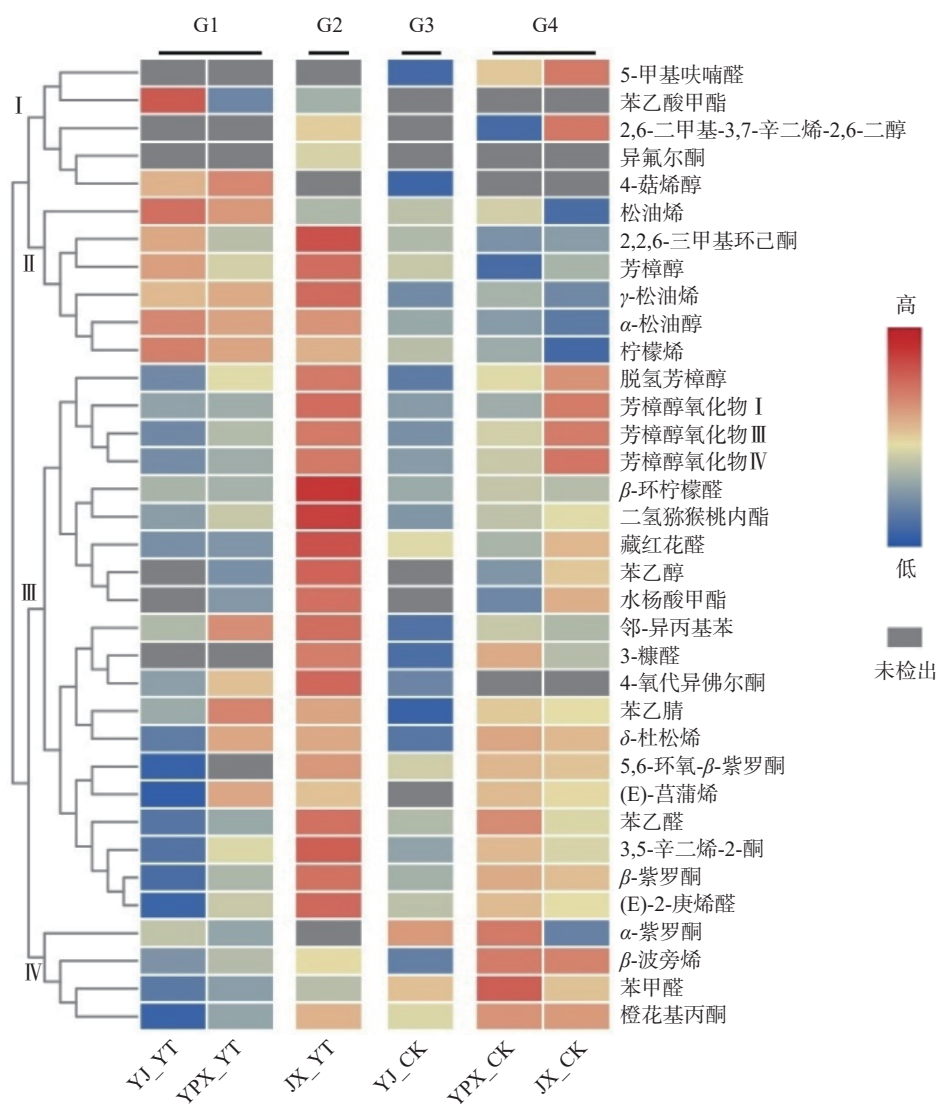


图 3 黄茶和对照样中特征香气化合物的聚类热图

Fig.3 The cluster heatmap of characteristic aroma compounds in yellow tea and control sample

在 G3、G4 样品组中检出; 苯乙酸甲酯具有甜香^[37], 仅在 G1、G2 样品组中检出, 这 2 种化合物可能是导致茶样在有无闷黄加工后香气不同的关键化合物。

第Ⅱ类化合物是 4 种香气特征茶样共有的化合物, 包括松油烯(柠檬香)、2,2,6-三甲基环己酮(辛辣、蜂蜜和柑橘香)、芳樟醇(花香)、 γ -松油烯(柠檬和松脂香)、 α -松油醇(花香和木香)和柠檬烯(柠檬香)^[38-39]。除松油烯的相对含量在 G1 样品组中高于 G2、G3、G4, 其他化合物的相对含量均表现为在 G1、G2 茶样中高于 G3、G4, 并且这些化合物在霍山黄大茶、君山银针和蒙顶黄芽茶等黄茶中都被检测到, 说明可能是影响香型转变的重要化合物^[17,22,40]。Shi 等^[17]通过气相色谱-嗅闻法鉴定了黄茶中的关键香气化合物, 结果显示芳樟醇促进了黄茶良好香气的形成。柠檬烯被报道是蒙顶黄芽茶甜香的代表物质^[14,39], 吴函殷等^[41]的研究表明随着单丛茶蜜香香型的增强, 柠檬烯的相对含量也明显增加, 这些结果证实了柠檬烯和甜香之间的关联。

第Ⅲ类化合物在 4 组香气特征的茶样中含量高低差距大, 大部分化合物的含量在 G2 样品组中最高, 其次为 G4, 而在 G1 和 G3 样品组中含量低。例如脱氢芳樟醇、芳樟醇氧化物Ⅰ、芳樟醇氧化物Ⅲ和芳樟醇氧化物Ⅳ的含量在不同香型茶样中表现为 G2>G4>G1>G3; 苯乙醛(风信子香)、3,5-辛二烯-2-酮(果香、油脂气味)、 β -紫罗酮(紫罗兰香)和(E)-2-庚烯醛(脂肪气味)的含量表现为 G2>G4>G3>G1。

第Ⅳ类化合物在 G4 样品组中含量最高, 而在 G1 样品组中含量最低。

可见有无闷黄工序显著影响了成品茶中特征香气化合物的分布, 使黄茶形成了不同于对照样的香型。

2.4 闷黄影响的关键香气化合物

为了深入研究闷黄影响的关键香气物质, 采用有监督判别方法——OPLS-DA, 对有无闷黄工序所制黄茶和对照样的 35 种特征香气化合物进行分析。图 4A 为 OPLS-DA 得分图, 2 个类别在横坐标(主要成分)方向上被明显分开, 没有分散, 说明差异性显著。对模型进行交叉验证得到的 R^2Y 为 0.954, Q^2 为 0.872, 两者均接近 1 且差距较小, 同时 1000 次置换检验的 P 值小于 0.001, 说明拟合模型的准确性好, 预测能力强。因此可依据各香气组分在模型中的变量投影重要度(variable importance for the projection, VIP)筛选对组间差异贡献高的物质。以 $VIP \geq 1$ 为条件共选出 14 种化合物, 各个化合物的 VIP 得分和在对照样与黄茶中的平均相对含量如图 4B 所示。其中差异贡献度排在前三的化合物是 α -松油醇、苯乙酸甲酯和 5-甲基呋喃醛, VIP 值分别为 1.83、1.68 和 1.68, 是闷黄影响的重要化合物。

从图 4B 中可以看出, 这些关键化合物在黄茶中平均相对含量较高的有 9 种, 分别为 α -松油醇、苯乙

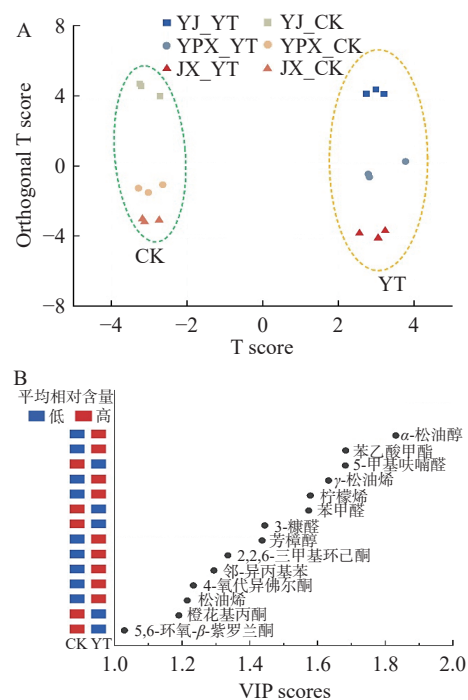


图 4 基于黄茶和对照样特征香气化合物的 OPLS-DA 图 (A) 和 14 种化合物的 VIP 得分及平均相对含量图 (B)

Fig.4 OPLS-DA score plot on the basis of characteristic aroma compounds in yellow tea (A) and control sample and VIP scores as well as average relative content of 14 compounds (B)

酸甲酯、 γ -松油烯、柠檬烯、芳樟醇、2,2,6-三甲基环己酮、邻-异丙基苯、4-氧代异佛尔酮和松油烯, 推测闷黄过程可促进这些化合物的形成。 α -松油醇和芳樟醇属于萜烯醇类, 前体物质以樱草糖苷和葡萄糖苷为主, 在加工过程中因水解而释放出来^[33]。本研究中 α -松油醇和芳樟醇在黄茶中含量显著高于对照样, 这一方面可能是因为闷黄过程中高温高湿条件促进糖苷类水解^[14]; 另一方面可能是因为湿热条件下产生的微生物所分泌的胞外酶有助于糖苷的转化^[11,42]。 γ -松油烯、柠檬烯和松油烯都是单环单萜类化合物, 互为同分异构体。已有报道柠檬烯含量会随着闷黄时间的增长而明显增加^[14]。然而几种单萜类物质在闷黄过程中的具体转化路径仍未可知, 需要进一步研究。苯乙酸甲酯(蜂蜜香和甜香)在黄茶中检出而对对照样中未检出。苯乙酸甲酯的产生被认为与高温过程相关^[43-44], 考虑到闷堆过程温度较高, 推测闷黄有利于苯乙酸甲酯的形成。2,2,6-三甲基环己酮和 4-氧代异佛尔酮为环己酮衍生物, 主要来源于类胡萝卜素的氧化降解^[32,35,45]。研究发现湿热作用是类胡萝卜素降解为香气组分的主要途径之一^[35,45], 而闷黄工序提供了湿热条件, 因此推测湿热化学作用是促进类胡萝卜素形成黄茶关键香气化合物的主要因素。邻-异丙基苯有芳香气味, 也是黄大茶和蒙顶黄芽茶的呈香组分^[17]。前人对红茶香气成分的研究表明邻-异丙基苯主要以键合态存在于茶叶中^[46], 并会随着发酵时间的延长而增多^[47]。推测黄茶中邻-异丙基苯的形成与长时间湿热环境下的闷堆有关。

此外,在闷黄所制黄茶中平均含量低于对照样的化合物有5种,包括5-甲基呋喃醛、苯甲醛、3-糠醛、橙花基丙酮和5,6-环氧- β -紫罗酮,推测闷黄过程可能会消耗或阻碍这几种化合物的形成。

总体来说,闷黄影响的关键香气化合物包括萜类和萜烯醇类化合物5种,芳香烃和芳香族酯类2种,醛类3种,酮类4种。其中9种在黄茶中平均相对含量较高,为黄茶中关键香气化合物,它们的形成可能与香气前体物质在闷黄过程的高温高湿条件下发生的反应相关。

3 结论

闷黄是黄茶香气品质形成的关键工序,本研究发现闷黄促使黄茶香气品质具有甜香特征。对挥发性化合物的分析表明黄茶中香气组分与对照样存在明显差异,醇类和烃类占比达65.88%~76.93%,萜烯醇和萜烯类化合物为主要成分。借助多元统计分析筛选出35种特征香气化合物,例如具铃兰花香的芳樟醇和柠檬香的柠檬烯等在呈甜香茶样中占优势,而苦杏仁味的苯甲醛则在清香型茶样中贡献较大。进一步根据VIP ≥ 1 筛选出闷黄影响的关键香气化合物14种,其中 α -松油醇、芳樟醇、 γ -松油烯、柠檬烯、松油烯、苯乙酸甲酯、2,2,6-三甲基环己酮、4-氧代异佛尔酮和邻-异丙基苯在黄茶中的含量高于对照样,分别具有花香、果香和甜香,对塑造黄茶甜香风味至关重要。这些化合物的形成可能与闷黄过程密切相关,具体的转化和生成路径值得后续系统研究。本研究剖析了闷黄对黄茶香气特征和挥发性化合物的影响,明确了黄茶呈现甜香品质的关键香气化合物,为深入理解闷黄-香气特征-挥发性香气化合物之间的关联提供了理论基础。

参考文献

- [1] KHAN N, MUKHTAR H. Tea polyphenols for health promotion[J]. *Life Sciences*, 2007, 81(7): 519–533.
- [2] WANG Y, KAN Z, THOMPSON H J, et al. Impact of six typical processing methods on the chemical composition of tea leaves using a single *Camellia sinensis* cultivar, Longjing 43[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(19): 5423–5436.
- [3] BALDERMANN S, YANG Z, KATSUNO T, et al. Discrimination of green, oolong, and black teas by GC-MS analysis of characteristic volatile flavor compounds[J]. *American Journal of Analytical Chemistry*, 2014, 5(9): 620–632.
- [4] 夏涛. 制茶学[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2016. [XIA T. *Manufacture of tea*[M]. The Third Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2016.]
- [5] 王梦琪, 朱荫, 张悦, 等. 茶叶挥发性成分中关键呈香成分研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(23): 341–349. [WANG M Q, ZHU Y, ZHANG Y, et al. A review of recent research on key aroma compounds in tea[J]. *Food Science*, 2019, 40(23): 341–349.]
- [6] 汪琦, 赵贵福, 张续周, 等. 4个茶树品种与季节对绿茶香气成分特征的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(20): 102–107. [WANG Q, ZHAO G F, ZHANG X Z, et al. Effects of four different tea varieties and harvesting seasons on aroma characteristics of green tea[J]. *Food Science*, 2016, 37(20): 102–107.]
- [7] ZHU B, ZHANG J, LI J, et al. Aroma profile of Jinmudan tea produced using *Camellia sinensis*, cultivar Jinmudan using solid-phase microextraction, gas chromatography-mass spectrometry, and chemometrics[J]. *European Food Research and Technology*, 2021, 247(5): 1061–1082.
- [8] ZENG L, WATANABE N, YANG Z. Understanding the biosyntheses and stress response mechanisms of aroma compounds in tea (*Camellia sinensis*) to safely and effectively improve tea aroma[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(14): 2321–2334.
- [9] 张娇, 梁壮仙, 张拓, 等. 黄茶加工中主要品质成分的动态变化[J]. *食品科学*, 2019, 40(16): 200–205. [ZHANG J, LIANG Z X, ZHANG T, et al. Dynamic changes of main quality components during yellow tea processing[J]. *Food Science*, 2019, 40(16): 200–205.]
- [10] 戴前颖, 安琪, 郑芳玲, 等. 基于QDA法和CATA法的黄大茶的香气感官特性及喜好度分析[J/OL]. *食品科学*: 1–16[2022-03-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20211108.2055.016.html>. [DAI Q Y, AN Q, ZHENG F L, et al. Analysis of aroma sensory characteristics and preference degree of large yellow tea based on quantitative descriptive analysis and check-all-that-apply[J/OL]. *Food Science*: 1–16[2022-03-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20211108.2055.016.html>.]
- [11] XU J, WANG M, ZHAO J, et al. Yellow tea (*Camellia sinensis* L.), a promising Chinese tea: Processing, chemical constituents and health benefits[J]. *Food Research International*, 2018, 107: 567–577.
- [12] 雷玉萍, 吴根玲, 梁慧玲, 等. 闷黄工艺对“御金香”夏暑茶品质及理化成分的影响[J]. *中国茶叶*, 2018, 40(12): 20–23. [LEI Y P, WU G L, LIANG H L, et al. Effect of smoking yellow process on quality and physicochemical components of “Yujinxiang” summer tea[J]. *China Tea*, 2018, 40(12): 20–23.]
- [13] 文帅, 安然, 李冬利, 等. 不同闷黄工艺对黄茶品质及其抑制HepG2细胞增殖的影响[J]. *茶叶通讯*, 2020, 47(1): 75–81. [WEN S, AN R, LI D L, et al. Effects of different yellowing process on the quality of yellow tea and the inhibition of HepG2 cell proliferation[J]. *Tea Communication*, 2020, 47(1): 75–81.]
- [14] 张厅, 刘晓, 王小萍, 等. 闷黄新工艺对蒙顶黄芽品质及香气的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(22): 276–282. [ZHANG T, LIU X, WANG X P, et al. Effects of new piling technology on quality and aroma of Mengding yellow bud[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(22): 276–282.]
- [15] MA C, LI J, CHEN W, et al. Study of the aroma formation and transformation during the manufacturing process of oolong tea by solid-phase micro-extraction and gas chromatography-mass spectrometry combined with chemometrics[J]. *Food Research International*, 2018, 108: 413–422.
- [16] 刘晓慧, 张丽霞, 王日为, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法分析黄茶香气成分[J]. *食品科学*, 2010, 31(16): 239–243. [LIU X H, ZHANG L X, WANG R W, et al. Analysis of volatile components of yellow tea by HS-SPME/GC-MS[J]. *Food*

- Science, 2010, 31(16): 239–243.]
- [17] SHI Y, WANG M, DONG Z, et al. Volatile components and key odorants of Chinese yellow tea (*Camellia sinensis*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146(33): 111512.
- [18] 宋玉欣, 朱静静, 张拓, 等. 不同茶树品种茶鲜叶加工黄茶的适制性研究 [J]. 食品与机械, 2019, 35(9): 193–198. [SONG Y X, ZHU J J, ZHANG T, et al. Study on the suitability of fresh tea leaves from different tea varieties for yellow tea processing [J]. Food & Machinery, 2019, 35(9): 193–198.]
- [19] CHEN C, CHEN H, ZHANG Y, et al. TBtools: An integrative toolkit developed for interactive analyses of big biological data [J]. Molecular Plant, 2020, 13(8): 1194–1202.
- [20] STIGLIC G, WATSON R, CILAR L. Are you ready? Using the R programme for statistical analysis and graphics [J]. Research in Nursing & Health, 2019, 42(6): 494–499.
- [21] PANG Z, CHONG J, ZHOU G, et al. Metabo analyst 5.0: Narrowing the gap between raw spectra and functional insights [J]. Nucleic Acids Research, 2021, 49(1): 388–396.
- [22] 孟爱丽, 鹿晓莉, 温顺位, 等. 蒙顶黄芽香气特征及香气成分分析 [J]. 食品工业科技, 2014, 35(18): 106–112, 117. [MENG A L, PANG X L, WEN S W, et al. Analysis of aroma characteristics and aroma components from Mengding yellow tea [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(18): 106–112, 117.]
- [23] 李伟, 齐桂年, 刘晓, 等. 蒙顶黄芽加工过程感官品质及化学成分变化的研究 [J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 95–99. [LI W, QI G N, LIU X, et al. Changes in organoleptic quality and chemical composition of Mengdinghuangya during processing [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(16): 95–99.]
- [24] 张明露, 彭珣舒, 尹杰. 不同闷黄时间和温度对黄茶品质的影响 [J]. 耕作与栽培, 2018(3): 12–14. [ZHANG M L, PENG Y S, YIN J. Effects of different piling time and temperature during processing on the quality of yellow tea [J]. Tillage and Cultivation, 2018(3): 12–14.]
- [25] 王梦琪, 朱荫, 张悦, 等. “清香”绿茶的挥发性成分及其关键香气成分分析 [J]. 食品科学, 2019, 40(22): 219–228. [WANG M Q, ZHU Y, ZHANG Y, et al. Analysis of volatile composition and key aroma compounds of green teas with fresh scent flavor [J]. Food Science, 2019, 40(22): 219–228.]
- [26] 王梦琪, 朱荫, 张悦, 等. “清香”与“栗香”绿茶中非挥发性化学成分的差异分析 [J]. 食品科学, 2021, 42(14): 151–158. [WANG M Q, ZHU Y, ZHANG Y, et al. Analysis of differential non-volatile chemical compounds between green teas with refreshing aroma and chestnut-like aroma [J]. Food Science, 2021, 42(14): 151–158.]
- [27] 黄海涛, 敖存, 郭敏明, 等. 花香与清香绿茶的香气组分及品种相关性分析 [J]. 浙江农业科学, 2018, 59(5): 738–741, 771. [HUANG H T, AO C, GUO M M, et al. Aroma components of flower-scent and fresh-scent green tea and correlation analysis with varieties [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2018, 59(5): 738–741, 771.]
- [28] FENG Z, LI Y, LI M, et al. Tea aroma formation from six model manufacturing processes [J]. Food Chemistry, 2019, 285: 347–354.
- [29] 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 G H, LU A X, OUYANG K, et al. Analysis of the aroma formation in six categories of teas by GC-MS combined with chemometrics [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(20): 260–270.]
- [30] 逯晓娟, 郑晓娟, 杜晓, 等. 蒙顶黄芽主要成分含量及组分分析 [J]. 食品科学, 2014, 35(12): 108–114. [SU X J, ZHENG X J, DU X, et al. Analysis of main chemical components of Mengding yellow bud [J]. Food Science, 2014, 35(12): 108–114.]
- [31] 蒋容港, 黄燕, 金友兰, 等. 不同原料等级黄茶特征香气成分分析 [J]. 食品科学, 2021, 42(16): 89–98. [JIANG R G, HUANG Y, JIN Y L, et al. Analysis of characteristic aroma components of different grades of yellow tea [J]. Food Science, 2021, 42(16): 89–98.]
- [32] HO C T, ZHENG X, LI S. Tea aroma formation [J]. Food Science and Human Wellness, 2015, 4(1): 9–27.
- [33] 张冬桃, 孙君, 叶乃兴, 等. 茶树萜烯类香气物质合成相关酶研究进展 [J]. 茶叶学报, 2015, 56(2): 68–79. [ZHANG D T, SUN J, YE N X, et al. Research progress of enzymes associated with terpene synthesis in *Camellia sinensis* [J]. Acta Tea Sinica, 2015, 56(2): 68–79.]
- [34] 马超龙, 李小娜, 岳翠男, 等. 茶叶中脂肪酸及其对香气的影响研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2017, 38(4): 220–224. [MA C L, LI X Y, YUE C N, et al. Progress on fatty acids in tea and their influences on tea aroma [J]. Food Research and Development, 2017, 38(4): 220–224.]
- [35] 陈丽, 叶玉龙, 王春燕, 等. 茶叶中类胡萝卜素香气前体研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(5): 266–273. [CHEN L, YE Y L, WANG C Y, et al. Research progress on carotenoid aroma precursors in tea [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(5): 266–273.]
- [36] FAN F Y, ZHOU S J, QIAN H, et al. Effect of yellowing duration on the chemical profile of yellow tea and the associations with sensory traits [J]. Molecules, 2022, 27(3): 940.
- [37] 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 C N, QIN D D, LI W J, et al. Identification of key aroma components in Fuliang black tea based on HS-SPME-GC-MS and OAV [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 251–258.]
- [38] 杜红, 李艳, 贾翼, 等. 湿热后处理改善红茶风味品质的工艺优化及效果评价 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(3): 340–346. [DU H, LI Y, JIA Y, et al. Technical study and effectiveness evaluation of heat-moisture post-treatment on improving the flavor quality of black tea [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2017, 43(3): 340–346.]
- [39] GUO X, HO C T, SCHWAB W, et al. Effect of the roasting degree on flavor quality of large-leaf yellow tea [J]. Food Chemistry, 2021, 347(3): 129016.
- [40] 朱晓凤, 刘政权, 宛晓春, 等. SDE 和 HS-SPME 结合 GC-MS 分析霍山黄大茶香气成分的比较 [J]. 食品科学, 2020, 41(4): 214–221. [ZHU X F, LIU Z Q, WAN X C, et al. Comparison of simultaneous distillation and extraction and headspace-solid phase mi-

croextraction for analysis of aroma components of Huoshan large-leaf yellow tea by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2020, 41(4): 214–221.]

[41] 吴函殷, 刘晓辉, 罗龙新, 等. 12 种单丛茶香气成分研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(19): 234–239. [WU H Y, LIU X H, LUO L X, et al. Study on aroma components in twelve kinds of Dancong teas[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(19): 234–239.]

[42] 刘晓, 张厅, 刘飞, 等. 蒙顶黄茶闷堆过程中主要品质成分及酶活性变化研究[J]. 中国农学通报, 2017, 33(27): 97–101. [LIU X, ZHANG T, LIU F, et al. Variations of quality ingredients and primary enzymes activities of Mengding yellow tea during the piling process[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(27): 97–101.]

[43] 曾亮, 王杰, 柳岩, 等. 小种红茶与工夫红茶品质特性的比较分析[J]. 食品科学, 2016, 37(20): 51–56. [ZENG L, WANG J, LIU Y, et al. Comparative analysis of quality characteristics of Sou-chong and Congou[J]. Food Science, 2016, 37(20): 51–56.]

[44] 詹宝珍, 吴志锋, 马春华, 等. 焙火时间对武夷岩茶肉桂香气品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(3): 811–819.

[ZHAN B Z, WU Z F, MA C H, et al. Effects of roasting time on the aroma quality of Wuyi rock tea Rougui[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(3): 811–819.]

[45] 刘飞, 叶阳, 李春华, 等. 工夫红茶加工过程中类胡萝卜素成分的动态变化[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 231–240. [LIU F, YE Y, LI C H, et al. Dynamic change of carotenoid compounds during Congou black tea manufacturing process[J]. Food Science, 2022, 43(4): 231–240.]

[46] 杨旖旎, 杨桂秋, 杨小洪, 等. 老鹰茶游离和键合态挥发性成分的分析[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(3): 254–260. [YANG Y N, YANG G Q, YANG X H, et al. Characterization of free and bound volatile compounds in Hawk tea (*Litsea coreana* L.)[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(3): 254–260.]

[47] 潘科, 冯林, 陈娟, 等. HS-SPME-GC-MS 联用法分析不同通氧发酵加工工艺红茶香气成分[J]. 食品科学, 2015, 36(8): 181–186. [PAN K, FENG L, CHEN J, et al. Analysis of aroma compounds in black tea ventilated with oxygen for different durations during the fermentation process by head space-solid-phase micro-extraction and gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2015, 36(8): 181–186.]