DOI:10.12441/spyswjs.20221124002 [文章编号] 1673-1689(2024)07-0035-12

不同茶树品种芽型工夫红茶的品质特征

李 晶[1,3] 林馥茗[2,3] 戴浩民[1,3] 黄 艳[2,3] 刘 佳[1,3] 陈林海[4] 陈志丹[2,3] 孙威江[1,3*]

(1. 福建农林大学园艺学院,福建 福州 350002; 2. 福建农林大学安溪茶学院,福建 泉州 362400; 3. 福建省茶产业工程技术研究中心,福建 福州 350002; 4. 福安市茶叶质量检测中心, 福建 福安 355000)

摘要:为了解不同茶树品种制作的芽型工夫红茶品质差异,采用高效液相色谱技术、固相微萃取-气相色谱-质谱联用(SPME-GC-MS)技术、定量描述性分析和化学计量学对10个茶树品种芽型工夫红茶的特征滋味物质和特征香气成分进行分析。定量描述性分析结果表明,10个茶树品种芽型工夫红茶的整体香气以甜香、花香为主,滋味以甜醇、浓厚为主。不同样品中检测的16种内含成分(非挥发性成分)存在一定的差异,平均变异系数为21.63%,其中茶黄素的差异最大;在10个茶树品种红茶中共检测出49种挥发性物质,其中质量分数最高的挥发性物质类型为醇类化合物,其次为酯类化合物,酮类化合物质量分数最低,其中香叶醇质量分数最高;正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares-discriminant analysis,OPLS-DA)能将‘金牡丹’‘福云7号’与其他茶树品种红茶区分开,且筛选出12种与芽型工夫红茶茶树品种密切相关的标志差异物。相关性分析结果表明,咖啡碱和茶多酚与回甘呈显著正相关,咖啡碱、可可碱与醇度呈显著正相关,香叶醇、顺-α,α-5-三甲基-5-乙烯基四氢化呋喃-2-甲醇、水杨酸甲酯、芳樟醇与花果香呈正相关。该研究为芽型工夫红茶的生产加工和品质提升提供了理论依据。

关键词:茶树品种;芽型工夫红茶;品质特征;判别分析

Quality Characteristics of Bud-Type Congou Black Tea from Different Tea Cultivars

LI Jing[1,3] *LIN Fuming*[2,3] *DAI Haomin*[1,3] *HUANG Yan*[2,3] *LIU Jia*[1,3] *CHEN Linhai*[4] *CHEN Zhidan*[2,3] *SUN Weijiang*[1,3*]

(1. College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Anxi College of Tea Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Quanzhou 362400, China; 3. Fujian Tea Industry Engineering Technology Research Center, Fuzhou 350002, China; 4. Fu'an Tea Quality Inspection Center, Fu'an 355000, China.)

Abstract: In order to investigate the quality differences of bud-type Congou black tea produced from different tea cultivars, high-performance liquid chromatography (HPLC), solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS), quantitative descriptive analysis (QDA), and chemometrics were employed to analyze the characteristic taste substances and aroma components of bud-type Congou black tea made from ten tea cultivars. The results of QDA showed that the overall aroma of the bud-type Congou black tea from the 10 cultivars was predominantly sweet and floral, while the taste was mainly sweet and mellow. Sixteen differentiated internal components (non-volatile compounds) were detected across the different samples, with an average coefficient of variation of 21.63%, and the greatest variation observed in theaflavin. A total of 49 volatile compounds were identified in the black tea from 10 tea cultivars, with alcohols being the most abundant class,

基金项目:国家自然科学基金项目(31770732);国家重点研发计划专项项目(2019YFD1001601);福建省高校产学合作项目(2019N5007);福建主要茶类原产地溯源与标准体系研究项目(K1520005A04);福建张天福茶叶发展基金会科技创新基金项目(FJZTF01)。

通信作者:孙威江(1964—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事茶叶加工与品质化学研究。E-mail:swj8103@126.com

收稿日期:2022-11-24 **改回日期:**2023-05-08

followed by esters, and ketones being the least abundant. Geraniol was found to have the highest mass fraction among the volatile components. Orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA) effectively distinguish ‘Golden Peony’ and ‘Fuyun No. 7’ from other cultivars, and 12 markers closely related to bud-type Congou black tea cultivars were identified. Correlation analysis revealed a significant positive correlation between caffeine and tea polyphenols with aftertaste sweetness, while caffeine and theobromine were significantly positively correlated with body. Geranyl alcohol, cis-α, α-5-trimethyl-5-vinyltetrahydrofuran-2-methanol, methyl salicylate, and linalool were positively correlated with floral and fruity aromas. This study provides a theoretical basis for the production, processing, and quality improvement of bud-type Congou black tea.

Keywords: tea tree varieties;bud-type Congou black tea;quality characteristics;discriminant analysis

我国红茶主要分为三大类型：小种红茶、工夫红茶和红碎茶[1]。工夫红茶是我国红茶产品的主要类型，其独特的风味深受大众喜爱，曾为我国出口经济做出重大贡献[2-4]。随着生活水平的提高，人们对茶类有了更高的品质要求。近年来，以原料细嫩、风味甜醇鲜爽、花果蜜香馥郁[5]而闻名的‘金骏眉’的出现，促使我国传统工夫红茶市场重新变得活跃[6]。但其价格不菲，令普通消费者望而却步。因此，适合普通消费者的优质工夫红茶产品的研发变得尤为迫切。

评价茶叶风味品质的重要指标是滋味和香气[7]。滋味和香气主要受茶树内含物质和茶叶加工工艺的影响，因而茶叶的加工工艺和化学组分一直是人们的研究重点[8-10]。因此，风味组学应运而生。风味组学是分子感官科学[11]的一个分支，其技术基础在于选择高通量和高灵敏度的分析方法，如气相色谱-质谱联用（GC-MS）、反相液相色谱（RP-HPLC）、核磁共振（NMR）等技术，从分子层面来揭示茶叶中的特征风味化学成分。Gao 等利用 HS-GC-IMS 技术研究工夫红茶表明，甜花香、果香与 6 种挥发性物质呈正相关[12]。同时，感官审评方法在茶叶品质研究中的运用也必不可少，主要分为三大类：差别检验、描述性分析和偏好测试。Wang 等对 8 个国家的乌龙茶进行定量描述性分析和风味轮构建，发现了每个国家乌龙茶独特的感官品质特征[13]。目前，针对不同产区、茶树品种和加工工艺的工夫红茶均有一定的研究[14-15]，而有关基于高嫩度采摘标准所制的红茶研究较少，尤其是不同茶树品种对基于高嫩度采摘标准所制的工夫红茶的品质影响鲜有报道。

因此，进一步开展茶树品种对基于高嫩度采摘标准所制工夫红茶品质风味影响的研究，对高品质工夫红茶市场开发与拓展意义重大。本研究中将采摘标准为一芽一叶初展所制的工夫红茶定义为芽型工夫红茶，并从茶树品种对芽型工夫红茶品质风味影响的角度出发，采用分子感官学、固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术结合化学计量学分析 10 个茶树品种芽型工夫红茶的特征滋味物质和特征香气成分的差异，以期为高品质工夫红茶的生产加工和品质提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

茶树品种为‘梅占’‘金观音’‘金牡丹’‘黄观音’‘白芽奇兰’‘福安菜茶’‘福云 6 号’‘福云 7 号’‘福安大白’‘福鼎大毫’，其鲜叶均取自福建省福安市仙梁阁茶业茶园。鲜叶采摘时间为 2021 年 3 月中下旬，采摘标准为一芽一叶初展，经萎凋、揉捻、发酵、干燥后，制备成相应茶树品种的芽型工夫红茶。每个品种重复 3 次，共计 30 个茶样。

癸酸乙酯、儿茶素标准品、生物碱标准品：色谱纯，美国 Sigma-Aldrich 公司；甲醇、乙腈和冰乙酸：色谱纯，德国默克公司；蒽酮、福林酚、茚三酮：分析纯，上海麦克林生化科技有限公司；碳酸氢钠：分析纯，上海沪试化工有限公司；正丁醇、无水乙醇、盐酸和硫酸：分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

e2695 型高效液相色谱仪：美国 Waters 公司；Clarus SQ 8T 型气相色谱-质谱联用仪：美国 Perkin Elmer 公司；TU-1810 型紫外分光光度计：北

京普析仪器有限责任公司；TDZ5B-WS型台式多管架离心机：上海卢湘仪离心机仪器有限公司；MA150型电子天平：德国Sartorius公司；Infinite M200 PRO型多功能酶标仪：奥地利Tecan公司。

1.3 方法

1.3.1 茶汤感官审评 感官审评参照GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》对茶汤进行审评；定量描述性分析参照GB/T 16861—1997《感官分析 通过多元分析方法鉴定和选择用于建立感官剖面的描述词》。

1.3.2 内含成分检测 水浸出物测定：参照GB/T 8305—2013《茶 水浸出物测定》；氨基酸测定：参照GB/T 8314—2013《茶 游离氨基酸含量的测定》；茶黄素测定：参照GB/T 30483—2013《茶叶中茶黄素的测定 高效液相色谱法》；茶红素和茶褐素测定：参照NY/T 3675—2020《红茶中茶红素和茶褐素含量的测定 分光光度法》；茶多酚测定：参照GB/T 8313—2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》；儿茶素和生物碱测定：参照GB/T 8313—2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》提取母液，采用HPLC-DAD法进行检测，色谱柱为C_{18}色谱柱（4.6 mm×250 mm×5 μm），流动相A为体积分数2%的乙酸，流动相B为体积分数100%的乙腈。洗脱梯度：体积分数100%的流动相A保持10 min，再在15 min内将流动相A体积分数降至68%、流动相B体积分数升至32%，保持10 min，最后将流动相A体积分数升至100%、流动相B体积分数降至0。柱温35 ℃，流量1 mL/min，检测波长278 nm，进样量10 μL。可溶性糖测定：参照文献[16]中的蒽酮比色法。

1.3.3 挥发性物质测定

（1）样品前处理：称取0.5 g的茶粉置于萃取瓶中，立即加入5 mL 100 ℃的高纯水和15 μL含有癸酸乙酯（1 μL）的内标溶液，加盖密封置于60 ℃水浴，插入预先老化的65 μm PDMS/DVB萃取头平衡10 min，吸附40 min，取出后插入色谱进样口吸附5 min，进行GC-MS检测。

（2）GC-MS分析条件：Elite-FFAP色谱柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm），载气为氦气（纯度>99.999%）。升温程序：起始柱温50 ℃，保持5 min，以5 ℃/min升至210 ℃，保持3 min，以15 ℃/min升至230 ℃，保持5 min。MS条件：电子电离源，电子能量70 eV，离子源温度230 ℃，质谱传输线温度250 ℃，质量扫描范围*m/z*为45~500。

（3）定性方法：根据气相色谱-质谱联用仪得到挥发性物质的总离子色谱图并结合相对保留时间、相关特征离子、相对丰度匹配检索，再通过计算机检索，参考标准谱图（NIST08和NIST08s）和查阅茶叶香气文献资料及数据，对挥发性物质化学结构、名称进行判定。

（4）定量方法：采用内标癸酸乙酯定量香气成分，计算公式见式（1）。

$$\omega_i=\frac{\omega_e\times S_i}{S_e} \quad (1)$$

式中：

ω_i——i样本的质量分数，μg/kg；

ω_e——癸酸乙酯质量分数，μg/kg；

S_i——i样本的峰面积；

S_e——癸酸乙酯的峰面积。

1.4 数据统计与分析

采用Excel 2021绘制雷达图和柱形图；采用SPSS 26进行单因素方差分析；采用SIMCA 14.1进行正交偏最小二乘判别分析；采用TBtools绘制热图和进行聚类分析；通过hiplot网站进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同茶树品种芽型工夫红茶感官品质分析

由表1可知，10个茶树品种芽型工夫红茶的感官品质均较优，但因茶树品种不同，在同一加工工艺下，其品质仍存在差异。‘梅占’分数最高，其次为‘福安菜茶’和‘金牡丹’。汤色以橙红明亮为主，香气以甜香和花果香为主，滋味以甜醇为主。采用雷达图进行效果差异可视化对比，结果表明（见图1），‘梅占’突出的特征是滋味甜醇、花香浓郁，具有较强的甜感和鲜爽度，同时具备适当其他滋味属性，口味丰富。‘金观音’滋味甜醇、鲜爽，花香馥郁，甜醇、鲜爽滋味属性明显优于大多数品种，在感官审评中分数也较高。‘福安大白’醇中带涩，花香、甜香较显，在感官审评中分数排名较低，适当苦涩感可以丰富茶汤的口感，但过高的苦涩感则会影响整体风味。

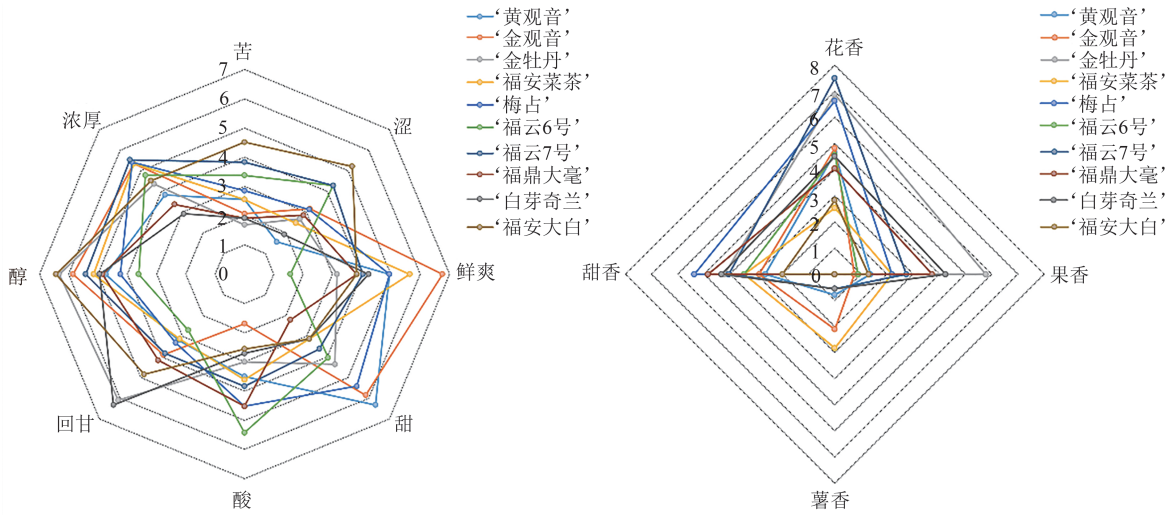
2.2 不同茶树品种芽型工夫红茶成分分析

不同茶树品种芽型工夫红茶内含成分的平均变异系数为21.63%（见图2（a）），这表明不同茶树

表 1　不同茶树品种芽型工夫红茶的感官审评

Table 1 Sensory evaluation of the bud-type Congou black tea from different tea cultivars

品种	外形	香气	汤色	滋味	叶底	总分
‘福云 6 号’	满披金毫，匀整	花香	橙红明亮	较浓尚醇	细嫩较匀	91.70
‘福安大白’	金毫显、卷结乌润	甜香显，带青花香	橙黄明亮	醇中带涩	细嫩匀整	91.70
‘福鼎大毫’	金毫显、卷结乌润	甜香带青，纯正	橙黄明亮	醇和	细嫩匀整、红亮	92.30
‘金观音’	金毫显、卷结、较乌润	甜香较显，有花香	橙红明亮	甜醇、鲜爽	细嫩匀整、红亮	93.43
‘福云 7 号’	金毫较显，匀整	花香浓郁	橙红明亮	浓厚、有涩感	匀整软亮	93.48
‘黄观音’	带毫、较卷结乌润	花香	橙红明亮	甜醇带涩	匀整、尚亮	93.50
‘白芽奇兰’	金毫较显、卷结、较乌润	花香	橙黄明亮	甜醇、浓厚	细嫩匀整、红亮	94.18
‘金牡丹’	金毫较显、较卷结乌润	花果香浓郁	橙红明亮	浓醇	细嫩匀整、红亮	94.30
‘福安菜茶’	带毫、较卷结	甜香，有薯香	橙红明亮	浓醇、鲜爽	细嫩匀整、红亮	94.38
‘梅占’	金毫显、卷结乌润	花香浓郁	橙黄明亮	甜醇	细嫩较亮	94.88



(a) 滋味雷达图　　(b) 香气雷达图

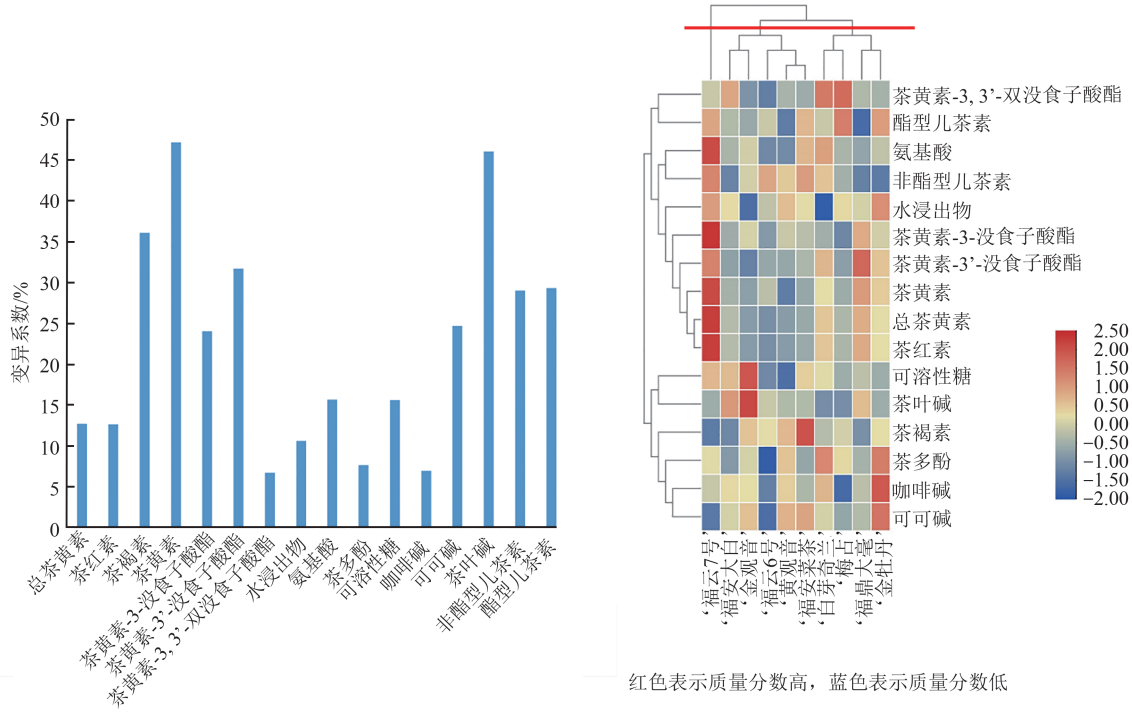
图 1　不同茶树品种芽型工夫红茶的风味雷达图

Fig. 1　Flavor radar map of the bud-type Congou black tea from different tea cultivars

品种红茶间的差异中等。内含成分根据变异系数从高到低依次为茶黄素、茶叶碱、茶褐素、茶黄素-3’-没食子酸酯、酯型儿茶素、非酯型儿茶素、可可碱、茶黄素-3-没食子酸酯、氨基酸、可溶性糖、总茶黄素、茶红素、水浸出物、茶多酚、咖啡碱、茶黄素-3,3’-双没食子酸酯。不同茶树品种芽型工夫红茶中茶黄素的差异最大，质量分数为 0.07%~0.36%；其次是茶叶碱，质量分数为 0.05%~0.19%。不同茶树品种芽型工夫红茶的可可碱、非酯型儿茶素和酯型儿茶素差异中等，质量分数分别为 0.15%~0.33%、0.39%~0.84%、0.54%~13.30%。茶黄素-3,3’-双没食子酸酯差异最小，质量分数为 0.87%~1.06%。茶黄素、茶叶碱和茶褐素变异系数大于 36%，说明不同茶树品种红茶间差异最大的内含成分是茶黄素、茶叶碱和茶褐素。茶黄素是红茶中非常重要的品质指标之一，不仅具有优异的抗氧化活性[17]，还会影响茶汤的鲜爽度和色泽[18]。因此，加工工艺和茶树品种差异是影响内含成分变化的主要原因[19]。

由图 2（b）可知，10 个样本可分为 3 类，第一

类是‘福云7号’，茶红素、总茶黄素、茶黄素、茶黄素-3-没食子酸酯和氨基酸质量分数最高，茶褐素和可可碱质量分数较低。茶红素、茶黄素和茶褐素是儿茶素的衍生物，是影响茶汤浓度和强度的重要组成部分，且茶黄素与涩味相关[20-21]。‘福云7号’中茶红素、茶黄素质量分数越高，其滋味浓强度越高，与感官审评结果（浓厚、有涩感）相符。第二类包括‘福安大白’‘金观音’‘黄观音’‘福云6号’‘福安菜茶’，氨基酸质量分数最低，可溶性糖、茶叶碱、茶褐素质量分数最高。Chen等认为可溶性糖不仅会给茶汤带来甜感，还会影响其醇厚度，茶褐素影响其茶汤色泽[22]。因此第二类红茶口感醇度较好，茶汤色泽较深。第三类包括‘白芽奇兰’‘梅占’‘福鼎大毫’‘金牡丹’，可可碱、咖啡碱、茶多酚质量分数最高，茶红素、总茶黄素、茶黄素、茶黄素-3’-没食子酸酯、水浸出物和可溶性糖质量分数中等，非酯型儿茶素质量分数最低。研究表明，咖啡碱与红茶品质呈正相关，品质优异的红茶其咖啡碱质量分数较高[23]。咖啡碱化学结构稳定[21]，其质量分数主要受茶树品种和嫩度的影响，说明基于一芽一叶初展采摘标准的‘金牡丹’和‘白芽奇兰’品质优良。



(a) 变异系数　　(b) 热图分析

图2　不同茶树品种芽型工夫红茶内含成分分析

Fig. 2　Composition analysis within the bud-type Congou black tea from different tea cultivars

2.3　不同茶树品种芽型工夫红茶挥发性物质分析

2.3.1　不同茶树品种芽型工夫红茶的挥发性物质定性定量分析　为了研究不同茶树品种芽型工夫红茶的香气特征，利用固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术对30个茶样的挥发性物质进行分析鉴定，结果见表2。由表2可知，共检测出49种挥发性物质，其中包括：醛类7种、萜烯类4种、醇类14种、酮类5种、酯类18种和其他化合物1种。图3显示不同茶树品种芽型工夫红茶挥发性物质类型占比，其中质量分数最高的挥发性物质类型为醇类化合物，其次为酯类化合物，酮类化合物质量分数最低，这与梁爽等[24]研究结果一致。

由表2可知，10个茶树品种红茶中共有的挥发性物质有8种，分别为β-环柠檬醛、芳樟醇、顺式-马鞭烯醇、香叶醇、3,5-辛二烯-2-酮、茉莉酮、水杨酸甲酯、癸酸乙酯。按照挥发性物质质量分数的高低，这10个茶树品种红茶属于红茶中第3种香气类型[25]，即香叶醇质量分数最高。

表2 不同茶树品种芽型工夫红茶主要挥发性物质的定性定量结果

Table 2 Qualitative and quantitative results on the main volatile components of the bud-type Congou black tea from different tea cultivars

香气成分		CAS号	芽型工夫红茶主要挥发性物质质量分数/(μg/kg)									
			‘福安菜茶’	‘黄观音’	‘梅占’	‘白芽奇兰’	‘金牡丹’	‘福云7号’	‘福云6号’	‘金观音’	‘福鼎大毫’	‘福安大白’
醛类	苯甲醛	100-52-7	3.93±0.68^{ab}	2.30±0.25^{c}	2.83±0.24^{bc}	—	—	—	—	4.61±0.18^{a}	3.21±1.61^{bc}	—
	苯乙醛	122-78-1	16.99±0.71^{a}	13.37±1.65^{ab}	—	—	5.07±1.89^{c}	14.38±2.10^{ab}	11.11±2.76^{b}	—	11.40±4.69^{b}	—
	壬醛	124-19-6	—	5.20±0.76^{c}	7.72±0.40^{bc}	—	—	10.34±0.35^{ab}	8.63±0.95^{abc}	13.38±2.52^{a}	8.41±6.11^{abc}	6.60±1.53^{bc}
	顺式-柠檬醛	106-26-3	10.25±0.71^{b}	7.93±1.49^{bc}	15.32±1.87^{b}	10.45±0.78^{b}	33.13±11.90^{a}	5.11±0.24^{bc}	25.48±5.48^{a}	34.95±0.07^{a}	11.75±3.71^{b}	—
	β-环柠檬醛	432-25-7	4.01±0.29^{b}	2.62±0.33^{b}	3.41±0.57^{b}	3.18±0.25^{b}	7.15±1.90^{a}	2.87±0.15^{b}	4.15±0.35^{b}	4.10±0.13^{b}	3.79±1.27^{b}	2.86±0.68^{b}
	柠檬醛	5392-40-5	—	16.70±1.82^{de}	—	18.73±0.39^{de}	67.01±24.59^{ab}	10.82±0.28^{de}	47.89±8.31^{bc}	68.67±2.35^{a}	22.25±10.15^{d}	28.80±7.61^{cd}
	正癸醛	112-31-2	1.36±0.35^{bc}	—	1.76±0.35^{ab}	—	—	0.85±0.14^{c}	2.31±0.55^{a}	—	1.81±0.71^{bc}	—
萜烯类	月桂烯	123-35-3	—	—	—	—	—	—	—	31.43±4.55^{a}	—	—
	(+)-*α*-蒎烯	3856-25-5	—	—	14.95±0.08^{c}	—	35.08±16.84^{a}	—	—	21.26±3.20^{b}	—	—
	(-)-A-苹澄茄油烯	17699-14-8	4.62±0.28^{ab}	9.11±1.15^{ab}	17.78±22.95^{a}	2.95±0.08^{ab}	—	—	—	5.14±0.20^{ab}	3.17±1.45^{ab}	3.29±0.83^{ab}
	β-杜松烯	29350-73-0	7.68±0.28^{b}	17.81±1.17^{a}	2.54±0.65^{de}	—	2.04±0.09^{de}	—	—	3.92±0.12^{cd}	4.74±3.37^{cd}	5.53±1.56^{bc}
醇类	苯甲醇	100-51-6	3.26±0.14^{a}	—	—	—	—	—	—	—	—	1.96±0.23^{b}
	顺-*αα*-5-三甲基-5-乙烯基四氢化呋喃-2-甲醇	5989-33-3	28.35±0.49^{bcde}	—	14.77±1.08^{cde}	36.90±1.27^{bcd}	94.55±47.40^{a}	43.92±5.34^{bc}	3.97±1.85^{de}	51.48±5.30^{b}	19.35±8.04^{bcde}	32.65±6.27^{bcde}
	芳樟醇	78-70-6	183.95±4.95^{bcde}	197.49±29.66^{bcd}	127.55±6.43^{de}	246.96±9.84^{bc}	219.91±64.32^{bcd}	507.16±53.49^{a}	87.04±19.74^{e}	217.37±31.18^{bcd}	172.73±74.72^{cde}	145.48±29.31^{de}
	苯乙醇	60-12-8	21.40±0.42^{ab}	23.64±0.41^{a}	13.64±0.91^{b}	25.61±0.56^{a}	16.96±5.39^{ab}	13.58±0.79^{b}	20.72±8.53^{ab}	12.90±0.18^{b}	—	19.46±7.10^{ab}
	2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-呋喃-3-醇	14049-11-7	5.58±0.35^{b}	—	3.92±0.12^{b}	5.50±7.78^{b}	18.87±7.09^{a}	7.31±0.88^{b}	—	2.80±3.95^{b}	1.16±1.63^{b}	—
	顺式-马鞭烯醇	18881-04-4	2.90±0.01^{b}	2.31±0.37^{b}	3.89±0.16^{ab}	6.48±4.92^{ab}	8.17±2.84^{a}	2.17±0.08^{b}	6.87±0.34^{ab}	6.21±2.76^{ab}	2.89±2.34^{b}	3.55±0.74^{ab}
	α-松油醇	10482-56-1	—	6.00±1.03^{bc}	—	9.65±0.92^{bc}	16.77±6.25^{b}	8.34±0.62^{bc}	—	94.92±134.23^{a}	12.49±0.72^{bc}	10.51±2.03^{bc}
	(*S*)-(-)-紫苏醇	18457-55-1	3.35±0.64^{a}	—	—	—	—	—	—	—	—	—

续表

香气成分		CAS号	芽型工夫红茶主要挥发性物质质量分数/(μg/kg)									
			‘福安菜茶’	‘黄观音’	‘梅占’	‘白芽奇兰’	‘金牡丹’	‘福云7号’	‘福云6号’	‘金观音’	‘福鼎大毫’	‘福安大白’
醇类	桃金娘烯醇	515-00-4	—	3.28±1.03^{bc}	4.84±0.23^{b}	—	14.34±5.23^{a}	—	—	—	—	—
	橙花醇	106-25-2	4.04±0.06^{cd}	3.43±0.64^{cd}	—	20.24±1.07^{b}	41.40±13.72^{a}	2.78±0.08^{cd}	4.15±0.76^{cd}	5.70±0.98^{cd}	3.40±4.81^{cd}	—
	香叶醇	106-24-1	465.33±5.36^{b}	505.17±7.44^{b}	1 237.26±21.57^{b}	984.39±20.67^{b}	3 836.43±1.83^{a}	313.09±16.65^{b}	547.31±14.13^{b}	1 122.04±15.36^{b}	244.44±10.71^{b}	379.65±10.08^{b}
	橄榄醇	500-66-3	—	—	3.78±0.32^{c}	—	—	4.29±0.11^{b}	6.95±0.40^{a}	3.59±0.58^{c}	—	—
	橙花叔醇	7212-44-4	4.38±0.87^{c}	3.97±0.47^{c}	—	5.87±0.19^{c}	35.09±9.77^{a}	2.64±0.15^{c}	5.02±0.81^{c}	12.44±0.40^{b}	4.43±0.56^{c}	2.22±0.54^{c}
	(+)-雪松醇	77-53-2	—	0.87±0.09^{c}	—	—	1.97±0.04^{b}	0.85±0.04^{c}	2.03±0.11^{b}	12.01±0.01^{a}	—	—
酮类	3,5-辛二烯-2-酮	30086-02-3	8.04±0.71^{a}	4.13±0.40^{bc}	3.88±0.18^{bc}	4.26±0.35^{bc}	1.76±1.12^{d}	3.62±0.49^{bc}	5.74±2.79^{ab}	8.16±0.89^{a}	2.85±0.57^{c}	6.69±1.14^{a}
	茉莉酮	488-10-8	5.96±0.65^{cd}	2.88±0.11^{d}	5.72±1.01^{cd}	5.96±0.06^{cd}	16.52±7.23^{b}	2.84±0.11^{d}	11.18±2.96^{bc}	29.35±0.80^{a}	13.14±0.34^{bc}	12.07±0.80^{bc}
	香叶基丙酮	3796-70-1	2.81±0.13^{b}	—	2.62±0.54^{b}	1.00±1.41^{b}	2.11±0.06^{b}	1.11±0.11^{b}	1.98±0.18^{b}	17.22±16.45^{a}	1.97±0.10^{b}	1.91±0.60^{b}
	β-紫罗兰酮	79-77-6	—	—	—	3.82±0.25^{cd}	7.03±1.69^{abc}	4.00±0.24^{cd}	10.25±1.24^{a}	8.98±5.88^{ab}	—	4.81±1.34^{bc}
	(*EZ*)-*β*-紫罗兰酮	14901-07-6	7.31±0.83^{b}	3.58±0.21^{c}	7.75±0.36^{b}	7.94±0.19^{b}	—	—	—	11.14±0.19^{a}	6.50±3.14^{b}	—
酯类	异丁酸叶醇酯	41519-23-7	—	—	—	2.71±0.13^{a}	—	1.12±0.03^{a}	1.65±0.13^{a}	3.41±4.82^{a}	1.37±0.19^{a}	—
	丁酸叶醇酯	16491-36-4	2.24±0.34^{ab}	—	—	—	3.76±0.42^{a}	—	—	3.08±4.35^{ab}	—	—
	水杨酸甲酯	119-36-8	136.25±8.83^{b}	97.86±2.93^{b}	128.10±6.94^{b}	105.51±7.79^{b}	267.72±9.12^{a}	95.77±8.85^{b}	127.87±2.91^{b}	83.21±1.16^{b}	88.34±3.69^{b}	93.56±22.49^{b}
	异戊酸叶醇酯	35154-45-1	3.90±0.71^{a}	—	—	3.60±0.57^{a}	—	1.13±0.02^{b}	—	—	—	—
	甲基(2*E*)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸酯	2349-14-6	22.89±0.71^{b}	3.99±0.67^{cd}	19.59±22.04^{bc}	7.20±0.28^{bcd}	—	—	8.90±0.32^{bcd}	58.76±0.35^{a}	—	4.94±1.20^{cd}
	甲酸芳樟酯	115-99-1	—	—	—	—	—	—	—	4.61±0.56^{a}	4.35±1.87^{a}	—
	乙酸香叶酯	105-87-3	—	—	6.04±1.46^{b}	—	—	3.48±0.63^{b}	5.67±0.25^{b}	14.14±11.51^{a}	—	2.57±0.70^{b}
	己酸叶醇酯	53398-86-0	9.52±0.71^{a}	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	己酸己酯	6378-65-0	1.27±0.54^{a}	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	己酸反-2-己烯酯	53398-86-0	1.79±0.45^{a}	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	癸酸乙酯	110-38-3	25.95±0.00^{ab}	33.05±0.03^{a}	24.98±1.38^{c}	22.80±1.81^{c}	27.45±2.12^{ab}	25.95±0.97^{ab}	25.95±0.00^{ab}	25.95±0.00^{ab}	25.95±0.00^{ab}	25.95±0.00^{ab}

续表

香气成分		CAS 号	芽型工夫红茶主要挥发性物质质量分数/(μg/kg)									
			‘福安菜茶’	‘黄观音’	‘梅占’	‘白芽奇兰’	‘金牡丹’	‘福云7号’	‘福云6号’	‘金观音’	‘福鼎大毫’	‘福安大白’
酯类	异丁酸香叶酯	2345-26-8	—	—	—	—	3.26±0.67^{a}	—	—	—	—	—
	邻苯二甲酸正丁异辛酯	84-78-6	1.08±0.11^{b}	—	1.80±0.28^{b}	—	6.30±0.98^{a}	1.30±0.18^{b}	—	—	5.12±4.70^{a}	1.42±0.40^{b}
	棕榈酸甲酯	112-39-0	1.35±0.34^{bcd}	—	1.09±0.13^{cd}	—	7.52±1.77^{a}	1.21±0.06^{cd}	2.42±0.42^{bc}	2.97±0.04^{b}	2.43±1.44^{bc}	1.13±0.21^{cd}
	邻苯二甲酸二丁酯	84-74-2	1.62±0.02^{bcd}	1.18±0.06^{cd}	2.70±0.57^{bc}	3.00±0.33^{bc}	11.50±2.52^{a}	2.36±0.43^{bc}	3.58±1.76^{b}	1.98±0.04^{bcd}	—	—
	棕榈酸乙酯	628-97-7	1.54±0.28^{de}	1.18±0.06^{de}	1.97±0.05^{de}	2.57±0.10^{cd}	10.14±3.16^{a}	2.76±0.22^{cd}	5.59±0.24^{b}	4.61±0.56^{bc}	2.79±0.91^{cd}	—
	亚油酸乙酯	544-35-4	—	—	1.04±0.06^{cd}	—	3.87±1.29^{a}	—	1.60±0.01^{bc}	3.92±0.11^{a}	—	2.23±0.86^{b}
	亚麻酸乙酯	1191-41-9	1.16±0.18^{bc}	1.39±0.02^{bc}	2.62±0.54^{b}	2.90±0.15^{b}	7.26±2.60^{a}	2.11±0.18^{b}	2.38±0.05^{b}	—	—	—
其他	石竹素	1139-30-6	—	1.17±0.22^{a}	—	—	—	—	—	—	—	—

注：—代表未检出。

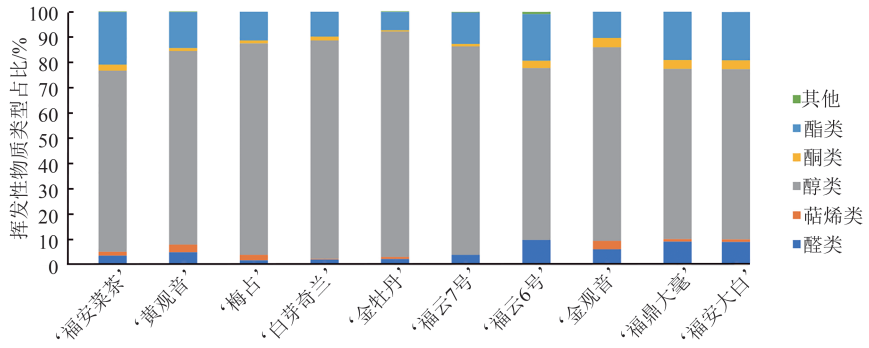


图 3　不同茶树品种芽型工夫红茶挥发性物质类型及占比

Fig. 3　Types and proportions of volatile components in the bud-type Congou black tea from different tea cultivars

2.3.2　不同茶树品种芽型工夫红茶挥发性物质聚类分析　49 种挥发性物质的层次聚类结果（见图 4）表明，整体挥发性物质质量分数最高的是‘金牡丹’，其次是‘金观音’；挥发性物质质量分数整体较低的是‘黄观音’和‘福安大白’。由图 4 显示，10 个茶树品种红茶可分为 3 类，第一类为‘金牡丹’，整体挥发性物质质量分数最高。这些挥发性物质大多是具有花香和果香特征的醇类和酯类化合物[26]，比如水杨酸甲酯、香叶醇和 β-环柠檬醛等，与感官审评结果（花果香浓郁）相符；第二类是薯香特征明显的‘金观音’，其整体挥发性物质质量分数次之，且与薯香呈正相关的甲基（2*E*）-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸酯质量分数较高；第三类是‘福安菜茶’‘福云 6 号’‘白芽奇兰’‘福云 7 号’‘福鼎大毫’‘梅占’‘黄观音’和‘福安大白’，挥发性物质质量分数相比较前面两类整体较低，感官上主要表现为甜花香型。

2.4　不同茶树品种芽型工夫红茶内含成分和挥发性物质的 OPLS-DA 分析

对 10 个茶树品种芽型工夫红茶的 16 种内含成分和 49 种挥发性物质进行 OPLS-DA 分析，以观察样本间的相似性。如图 5（a）所示，‘金牡丹’和

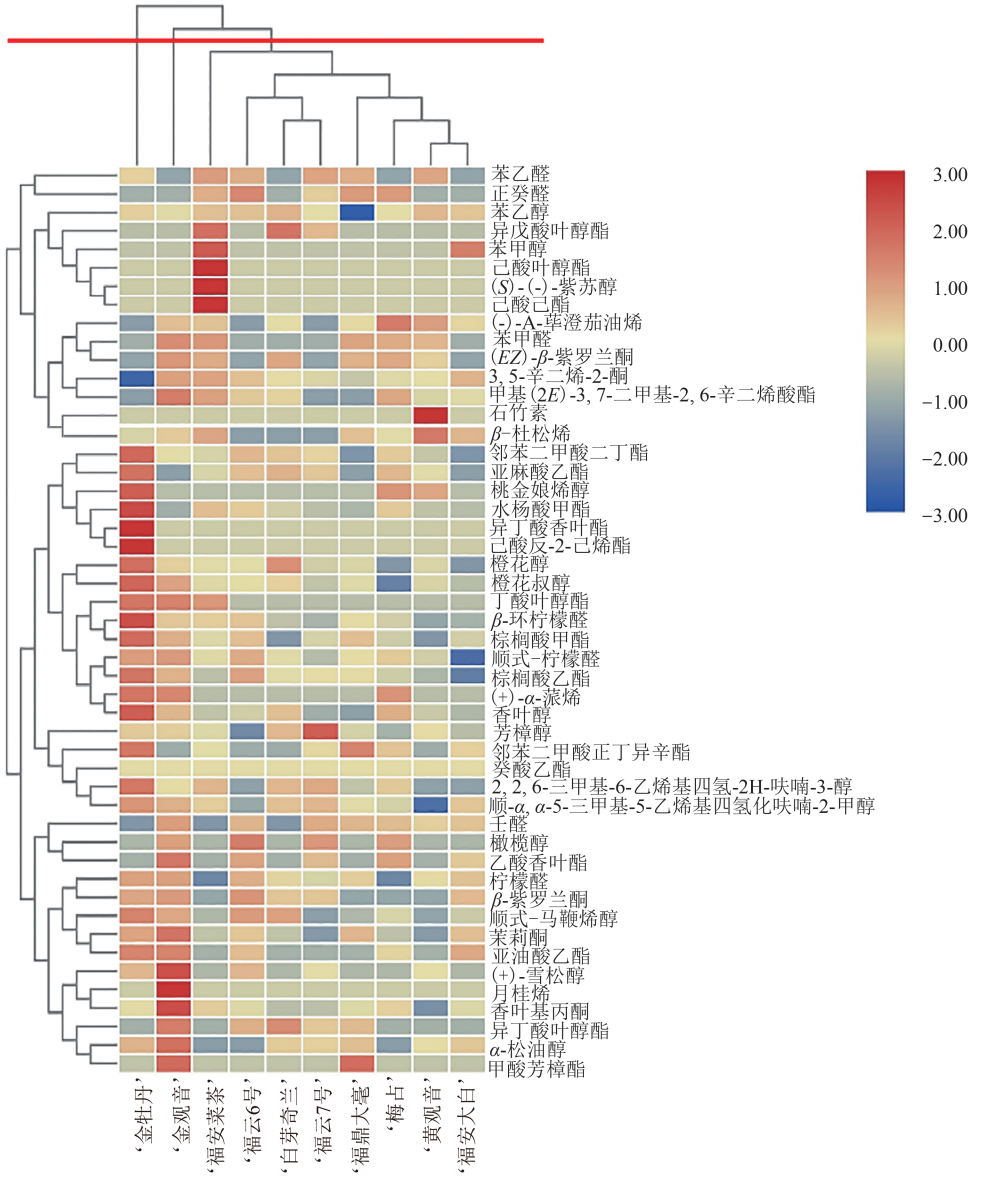


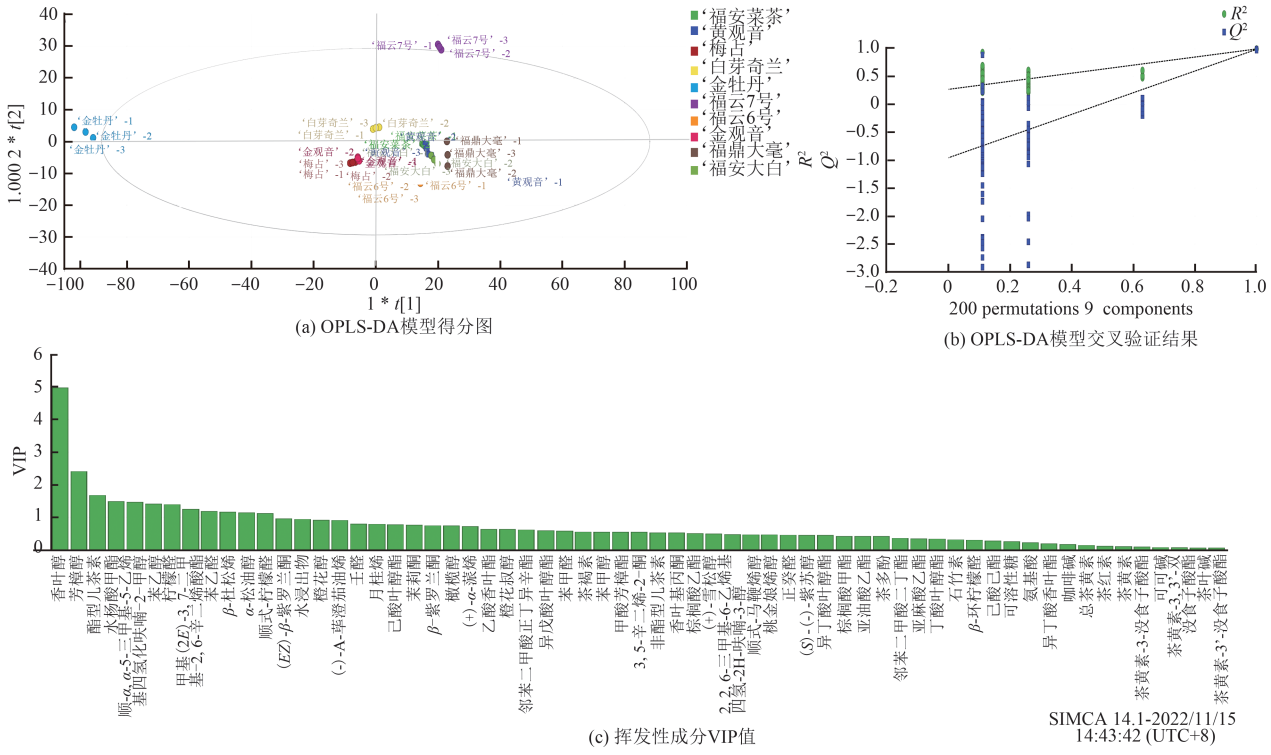
图4　不同茶树品种芽型工夫红茶挥发性物质的层次聚类热图

Fig. 4　Hierarchical cluster heat map of volatile components in the bud-type Congou black tea from different tea cultivars

‘福云7号’与其他样本差异显著，其次是‘白芽奇兰’；其中滋味表现为甜醇的‘梅占’和‘金观音’聚在了第三象限，样本相似度高；其他样本大多聚拢在第四象限，不同品种红茶间差异较小。经过200次置换检验，交叉验证结果（见图5(b)）表明模型验证有效。如图5(c)所示，根据VIP>1的原则，共筛选出12种与芽型工夫红茶品种密切相关的化合物，分别是香叶醇、芳樟醇、酯型儿茶素、顺-α,α-5-三甲基-5-乙烯基四氢化呋喃-2-甲醇、水杨酸甲酯、苯乙醇、柠檬醛、苯乙醛、甲基(2*E*)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸酯、β-杜松烯、α-松油醇和顺式-柠檬醛。

2.5　不同茶树品种芽型工夫红茶内含成分、挥发性物质与感官属性的相关性分析

不同茶树品种的芽型工夫红茶滋味属性强度与内含成分的相关性分析（见图6）表明，茶多酚、咖啡碱与回甘呈显著正相关[27-28]（$P<0.05$），可溶性糖与醇度呈显著正相关[29]，可溶性糖、茶叶碱与酸味呈显著负相关，可可碱与苦味呈显著负相关，茶多酚、可可碱与涩味呈显著负相关。苦味和涩味呈显著相关性，二者的影响因子具有相似性[13]。咖啡碱、可可碱与醇度呈显著正相关，酯型儿茶素与浓厚度呈显著正相关。醇和浓厚是指口感柔、

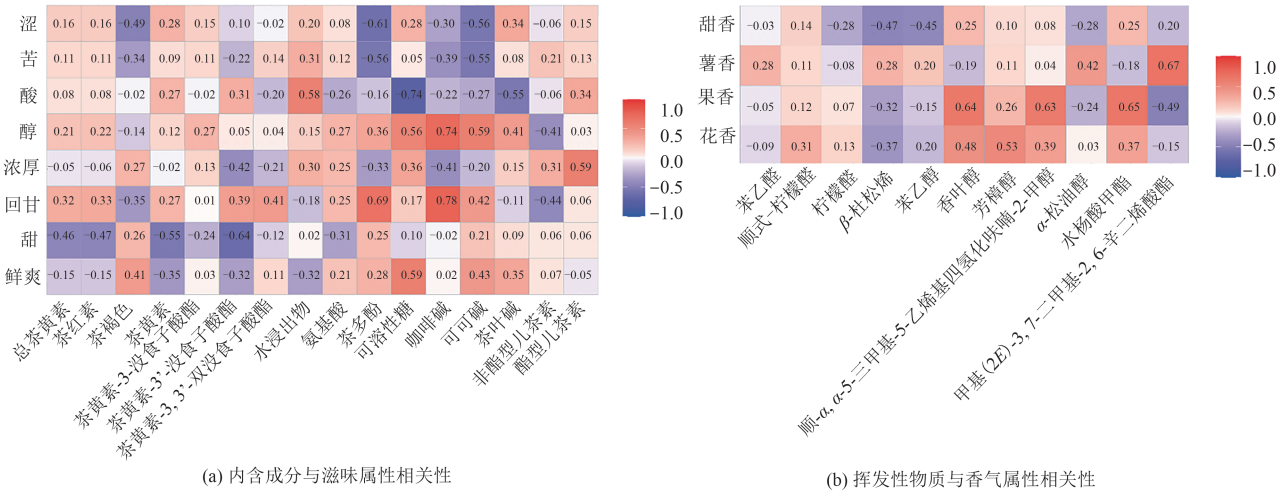


(a) OPLS-DA模型得分图　(b) OPLS-DA模型交叉验证结果

(c) 挥发性成分VIP值

图 5　不同茶树品种芽型工夫红茶的正交偏最小二乘判别分析

Fig. 5 Orthogonal partial least squares-discriminant analysis of the bud-type Congou black tea from different tea cultivars



(a) 内含成分与滋味属性相关性　(b) 挥发性物质与香气属性相关性

正值代表正相关，负值代表负相关，数值大于 0.50 表示显著正相关，数值小于−0.50 表示显著负相关，绝对值越大，相关性越强。

图 6　不同茶树品种芽型工夫红茶的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of the bud-type Congou black tea from different tea cultivars

收敛性强且具有黏稠感[30]，这与茶叶中的内含物质的丰富度有关。回甘是多种滋味属性的综合效应。长期以来，咖啡碱和茶多酚一直被认为是茶叶中苦涩味的呈味因子，但有研究表明具有苦涩属性的启动子会激活味蕾细胞中的甜味受体[13]，而苦和涩是回甘的关键贡献化合物[31]。本研究结果也显示咖啡碱和茶多酚作为甜味受体的启动子与回甘是呈显著正相关的。

不同茶树品种的芽型工夫红茶香气属性强度与关键香气成分的相关性分析（见图 6）表明，香叶醇、顺-α,α-5-三甲基-5-乙烯基四氢化呋喃-2-甲醇、水杨酸甲酯与花香呈正相关，与果香呈显著正相关，而芳樟醇与花香呈显著正相关。醇类化合物是红茶中的主要香气物质，一般呈现出花

果香的特征[32]；酯类化合物通常具有强烈而令人愉悦的花香[33]，这与本研究相符。薯香与甲基（2*E*）-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸酯呈显著正相关，研究表明吡嗪类和醛类化合物具有焦糖香和焦味。

3 结 论

茶树品种是茶叶的品质基础，不同茶树品种的内含成分会使所制芽型工夫红茶呈现出不同的品质特征。从感官审评结果看，10个茶树品种鲜叶制成的芽型工夫红茶香气呈现出甜香、花香和果香；滋味以甜醇、浓厚为主。‘梅占’和‘金观音’，其整体特征较为相似，滋味以甜醇、鲜爽为主要特征。在感官审评结果和OPLS-DA结果都表明‘梅占’和‘金观音’样本相似度高。OPLS-DA结果表明‘金牡丹’和‘福云7号’与其他品种红茶间差异显著，在香气上，分别为花果香型和甜花香型。‘金牡丹’挥发性物质总量远高于其他品种红茶，大多是具有花香和果香特征的醇类和酯类化合物，其中具有花香的香叶醇质量分数最高；‘福云7号’则是阈值低且具有花果香特征[34]的芳樟醇显著高于其他挥发性物质。本研究结果表明香叶醇、水杨酸甲酯、芳樟醇与花果香呈正相关。

‘金牡丹’和‘福云7号’的滋味在甜度、醇度和浓厚度上优于其他品种。‘金牡丹’的茶多酚、可可碱、咖啡碱、水浸出物和酯型儿茶素质量分数显著高于其他品种红茶，‘福云7号’的茶红素、总茶黄素、茶黄素、茶黄素-3-没食子酸酯和氨基酸质量分数较高。醇度和浓厚度与茶叶中的内含成分的丰富度有关，水浸出物是影响茶汤滋味的重要指标之一，其质量分数的高低直接影响茶汤的厚薄浓度。咖啡碱和茶多酚不仅是苦涩味的呈味因子，还是甜味受体的启动子，本文研究表明其与回甘呈显著正相关。

作者对10个茶树品种鲜叶制成的芽型工夫红茶的特征滋味物质和特征香气成分的差异进行了分析，为高品质工夫红茶的生产加工和品质提升提供理论依据。随着未来红茶品类的丰富，还需更多的样本和试验来进一步探索，利用大数据对未知样品的品种、产地、等级和年份等因素进行预测，建立更全面的红茶数据库。

参考文献

[1] 宋楚君，范方媛，龚淑英，等. 不同产地红茶的滋味特征及主要贡献物质[J]. 中国农业科学，2020，53(2)：383-394.
SONG C J，FAN F Y，GONG S Y，et al. Taste characteristic and main contributing compounds of different origin black tea[J]. Scientia Agricultura Sinica，2020，53(2)：383-394. (in Chinese)

[2] 姚逸. 工夫红茶的香气及色泽的特征值研究[D]. 重庆：西南大学，2013.

[3] 郃莉. 近代祁门红茶出口贸易研究[D]. 合肥：安徽大学，2019.

[4] SANLIER N，GOKCEN B B，ALTUĞ M. Tea consumption and disease correlations[J]. Trends in Food Science & Technology，2018，78：95-106.

[5] 林燕萍，张渤，张见明，等. 不同萎凋方式对武夷红茶“金骏眉”品质的影响[J]. 食品研究与开发，2021，42(19)：78-85.
LIN Y P，ZHANG B，ZHANG J M，et al. Effects of different withering methods on the quality of bohea tea “Jinjunmei”[J]. Food Research and Development，2021，42(19)：78-85. (in Chinese)

[6] 李达敏. 浅谈海南大叶种工夫红茶品质[J]. 中国茶叶，2019，41(2)：50-52.
LI D M. Discussion on the quality of Hainan Dayezhong Congou black tea[J]. China Tea，2019，41(2)：50-52. (in Chinese)

[7] 刘盼盼，郑鹏程，龚自明，等. 工夫红茶品质分析与综合评价[J]. 食品科学，2021，42(12)：195-205.
LIU P P，ZHENG P C，GONG Z M，et al. Quality analysis and comprehensive evaluation of Chinese Congou black tea[J]. Food Science，2021，42(12)：195-205. (in Chinese)

[8] 林馥茗，孙威江. 红茶品质影响因素的研究进展[J]. 中国茶叶，2012，34(3)：6-7.
LIN F M，SUN W J. Research progress on influencing factors of black tea quality[J]. China Tea，2012，34(3)：6-7. (in Chinese)

[9] HAN Z X，RANA M M，LIU G F，et al. Green tea flavour determinants and their changes over manufacturing processes[J]. Food Chemistry，2016，212：739-748.

[10] XU C H，LIANG L，LI Y H. Studies of quality development and major chemical composition of green tea processed from tea with different shoot maturity[J]. LWT - Food Science and Technology，2021，142：111055-111063.

[11] 宋焕禄. 分子感官科学及其在食品感官品质评价方面的应用[J]. 食品与发酵工业，2011，37(8)：126-130.
SONG H L. The concept of molecular sensory science and its application on food sensory quality evaluation[J]. Food and Fermentation Industries，2011，37(8)：126-130.

(in Chinese)

[12] GAO C X, HUANG Y, LI J, et al. Relationship between the grade and the characteristic flavor of PCT (Panyong Congou black tea)[J]. Foods, 2022, 11(18): 2815.

[13] WANG Z H, GAN S, SUN W J, et al. Quality characteristics of Oolong tea products in different regions and the contribution of thirteen phytochemical components to its taste[J]. Horticulturae, 2022, 8(4): 278.

[14] 杨娟,李中林,袁林颖,等. 不同茶树品种夏季鲜叶工夫红茶适制性比较[J]. 食品安全质量检测学报,2019,10(13):4242-4248.
YANG J, LI Z L, YUAN L Y, et al. Comparison of the suitability of different tea varieties fresh leaves in summer for the production of Congou black tea[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(13): 4242-4248. (in Chinese)

[15] 丁其欢, 武珊珊, 熊昌云, 等. 工夫红茶研究进展[J]. 热带农业科学, 2021, 41 (4): 110-116.
DING Q H, WU S S, XIONG C Y, et al. Research progress in Congou black tea[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2021, 41 (4): 110-116.(in Chinese)

[16] 沈诗钰,孙威江,唐琴,等. 基于近红外光谱技术的白茶可溶性糖总量快速测定研究[J]. 天然产物研究与开发,2019,31(1):16-23.
SHEN S Y, SUN W J, TANG Q, et al. Rapid determination of total water-soluble sugars in white tea by near-infrared spectroscopy[J]. Natural Product Research and Development, 2019, 31(1): 16-23. (in Chinese)

[17] IMRAN A, ARSHAD M U, ARSHAD M S, et al. Lipid peroxidation diminishing perspective of isolated theaflavins and thearubigins from black tea in arginine induced renal malfunctional rats[J]. Lipids in Health and Disease, 2018, 17(1): 157.

[18] HE H F. Research progress on theaflavins: efficacy, formation, and preparation[J]. Food & Nutrition Research, 2017, 61(1): 1344521.

[19] 滑金杰,袁海波,姚月凤,等. 温度对茶发酵叶色泽及茶色素含量的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(12):300-308.
HUA J J, YUAN H B, YAO Y F, et al. Effect of temperature on color and tea pigment content of fermented tea leaves[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(12): 300-308. (in Chinese)

[20] CARLONI P, TIANO L, PADELLA L, et al. Antioxidant activity of white, green and black tea obtained from the same tea cultivar[J]. Food Research International, 2013, 53(2): 900-908.

[21] ZHANG C, ZHOU C Z, XU K, et al. A comprehensive investigation of macro-composition and volatile compounds in spring-picked and autumn-picked white tea[J]. Foods, 2022, 11(22): 3628.

[22] CHEN Y L, DUAN J, JIANG Y M, et al. Production, quality, and biological effects of Oolong tea (*Camellia sinensis*) [J]. Food Reviews International, 2011, 27(1): 1-15.

[23] 尚卫琼,陈春林,孙承冕,等. 云南大叶种茶多酚和咖啡碱对红茶品质的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(1):155-159.
SHANG W Q, CHEN C L, SUN C M, et al. Effects of polyphenols and caffeine from Yunnan Dayezhong tea on quality of black tea[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(1): 155-159. (in Chinese)

[24] 梁爽,傅燕青,汪芳,等. 夏季鲜叶工夫红茶适制性研究[J]. 中国食品学报,2022,22(4):163-176.
LIANG S, FU Y Q, WANG F, et al. Studies on the suitability of summer fresh tea leaves for the production of Congou black tea[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(4): 163-176. (in Chinese)

[25] 李俊,祝愿,方舒婷,等. 基于固相微萃取气质联用对贵州红茶香气成分特征的研究[J]. 食品工业科技,2021,42(13):304-316.
LI J, ZHU Y, FANG S T, et al. Study on aroma composition characteristics of Guizhou black tea by solid phase microextraction-gas chromatography mass spectrometry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(13): 304-316. (in Chinese)

[26] YANG Z Y, BALDERMANN S, WATANABE N. Recent studies of the volatile compounds in tea[J]. Food Research International, 2013, 53(2): 585-599.

[27] CAO Q Q, ZOU C, ZHANG Y H, et al. Improving the taste of autumn green tea with tannase[J]. Food Chemistry, 2019, 277: 432-437.

[28] YU P G, YEO A S, LOW M Y, et al. Identifying key non-volatile compounds in ready-to-drink green tea and their impact on taste profile[J]. Food Chemistry, 2014, 155: 9-16.

[29] 银霞,张曙光,黄静,等. 湖南红茶特征滋味化学成分研究[J]. 茶叶科学,2019,39(2):150-158.
YIN X, ZHANG S G, HUANG J, et al. Study on the chemical constituents of Hunan black tea[J]. Journal of Tea Science, 2019, 39(2): 150-158. (in Chinese)

[30] 张颖彬,刘栩,鲁成银. 中国茶叶感官审评术语基元语素研究与风味轮构建[J]. 茶叶科学,2019,39(4):474-483.
ZHANG Y B, LIU X, LU C Y. Study on primitive morpheme in sensory terminology and flavor wheel construction of Chinese tea[J]. Journal of Tea Science, 2019, 39(4): 474-483. (in Chinese)

（下转第 55 页）