

唐梦婷, 廖献盛, 张文敬, 等. 不同茶季‘金牡丹’五大类茶主要品质成分差异分析[J]. 福建农业学报, 2025, 40 (2): 158–170.
TANG M T, LIAO X S, ZHANG W J, et al. Chemical Differentiations of Spring, Summer, and Autumn 'Jinmudan' Teas[J].
Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2025, 40 (2): 158–170.



不同茶季‘金牡丹’五大类茶主要品质成分差异分析

唐梦婷^{1,2}, 廖献盛¹, 张文敬¹, 魏明秀³, 吴先寿⁴, 徐梦婷¹, 郑玉成², 金珊¹,
张见明^{2*}, 叶乃兴^{1*}

(1. 福建农林大学园艺学院/茶学福建省高校重点实验室, 福建 福州 350002; 2. 武夷学院中国乌龙茶产业协同创新中心, 福建 武夷山 354300; 3. 寿宁县茶产业发展中心, 福建 寿宁 355500; 4. 福建谦谦一叶茶业科技有限公司, 福建 寿宁 355500)

摘要:【目的】揭示‘金牡丹’茶的主要品质特征及其春、夏、秋3季中不同茶类(红茶、乌龙茶、白茶、黄茶及绿茶)的主要品质成分差异情况, 探究不同茶季金牡丹茶主要特征代谢物间的关联特性以及可用于区分不同茶季的主要代谢物。【方法】以不同茶季的金牡丹鲜叶制成的红茶、乌龙茶、黄茶、白茶及绿茶为供试材料, 基于生化测定、高效液相色谱法以及AQC(6-aminoquinolyl-N-hydroxysuccinimidyl carbamate)衍生液质联用法对供试茶样的生化成分进行测定分析。【结果】金牡丹夏茶的茶多酚和儿茶素含量高于其他茶季。而春茶中氨基酸含量最高, 夏茶最低。金牡丹茶的儿茶素组成以EGC、EGCG、ECG及GC为主。相关性分析表明, 不同茶季中特征性代谢物间显著相关。基于OPLS-DA判别模型, 在不同茶季的金牡丹红茶、乌龙茶、白茶、黄茶及绿茶中分别筛选出12、15、15、17、17种差异代谢产物, 这些代谢物可作为区分春、夏、秋茶的潜在标志。【结论】本研究明确了金牡丹茶在不同茶类和茶季中的滋味品质化学特征, 揭示其不同茶季的主要特征代谢物的变化规律, 为提升金牡丹鲜叶原料的利用率及优化金牡丹茶品质提供科学依据。

关键词: 金牡丹; 茶类; 茶季; 滋味; 品质成分

中图分类号: TS272

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2025) 02-0158-13

Chemical Differentiations of Spring, Summer, and Autumn 'Jinmudan' Teas

TANG Mengting^{1,2}, LIAO Xiansheng¹, ZHANG Wenjing¹, WEI Mingxiu³, WU Xianshou⁴, XU Mengting¹, ZHENG Yucheng², JIN Shan¹, ZHANG Jianming^{2*}, YE Naixing^{1*}

(1. College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University/Fujian Provincial Key Laboratory of Tea Science in Universities, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. China Oolong Tea Industry Collaborative Innovation Center, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300, China; 3. Shouning County Tea Industry Development Center, Shouning, Fujian 355500, China; 4. Fujian Qianqian Yiye Tea Industry Technology Co., Ltd., Shouning, Fujian 355500, China)

Abstract: 【Objective】Differentiations in the main chemicals related to quality of spring, summer, and autumn Jinmudan teas were analyzed to examine the correlations between metabolites and characteristics of the teas. 【Methods】Black, oolong, yellow, white, and green Jinmudan teas made of fresh leaves plucked separately in three seasons were analyzed for biochemical composition using the conventional methods, high performance liquid chromatography, and AQC derivative liquid chromatography tandem triple quadrupole mass spectrometry. 【Results】The contents of tea polyphenols and catechins in the Jinmudan summer tea were significantly higher than those in the others, whereas that of amino acids highest in the spring tea and lowest in the summer tea. The catechins in the Jinmudan teas were mainly EGC, EGCG, ECG, and GC. Significant correlation between characteristic metabolites in different tea seasons. As analyzed by the OPLS-DA discriminant model, 12

收稿日期: 2024-12-06 修回日期: 2024-12-29

作者简介: 唐梦婷 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事茶叶品质化学研究, E-mail: 1660020107@qq.com

* 通信作者: 叶乃兴 (1963—), 男, 教授, 主要从事茶树栽培育种和品质化学研究, E-mail: ynxtea@126.com; 张见明 (1970—), 男, 高级农艺师, 主要从事茶树资源利用与茶园生态研究, E-mail: zjm0308@163.com

基金项目: 中国乌龙茶产业协同创新中心开放研究基金 (2024W01); 福建农林大学科技创新专项基金项目 (CXZX 2025 KFB24102A); 福建张天福茶叶发展基金会科技创新基金 (FJZTF01)

differential metabolites came from the black tea, 15 from the oolong tea, 15 from the white tea, 17 from the yellow tea, and 17 from the green tea. These metabolites were distinctive enough to serve as markers to separate these teas.

【Conclusion】The chemical differences among the varieties of spring, summer, and autumn Jinmudan teas underscored a close relationship between the chemistry and quality characteristics of the teas.

Key words: Jinmudan tea; types of tea; tea plucking season; sensory quality; chemistry

0 引言

【研究意义】茶叶的初级和次级代谢产物是决定茶叶品质的内在核心因素，而采摘季节、加工工艺以及生态环境等是决定茶叶品质的外在因素^[1,2]。‘金牡丹’是我国的优良茶树品种，目前针对金牡丹茶在不同茶季以及不同茶类间的生化成分研究尚少^[3,4]，限制了金牡丹品种在不同茶类加工中的优化利用及推广应用。因此，探明金牡丹茶的主要品质特征及其在不同茶季多茶类的主要特征代谢物的变化规律，对该品种的推广和高效开发利用具有重要的现实意义。【前人研究进展】茶叶的品质特征受到茶树品种、采摘季节与加工方式等因素的影响。具体而言，春、夏、秋不同采摘季节影响着茶树芽叶中代谢产物的积累，这些代谢产物是决定茶叶品质的关键内在因素。相较于春茶，夏秋茶因口感偏苦涩而利用率较低，造成资源浪费。此外，茶叶的不同加工方式进一步塑造了成品茶独特的香气、滋味等品质特征。我国在悠久的制茶历史中形成了6种基本茶类，根据发酵程度和加工方式的不同可分类为绿茶、白茶、黄茶、乌龙茶、红茶和黑茶。不同的加工工艺会使同一品种的茶叶的香气滋味特征发生变化，从而制成具有不同品质特征的茶叶^[5]。例如，白茶和绿茶通常具有较高的氨基酸含量，这与其特定的制作工艺有关^[6]。研究表明，金牡丹红茶在揉捻前加入了轻摇青工艺，与传统红茶相比，具有更为醇厚的口感和鲜明的花香^[7]。在相同生长环境下，不同茶类的茶多酚、氨基酸、儿茶素、生物碱等生化成分的含量存在显著差异^[8,9]。按照采摘季节的不同，通常可分为春茶、夏茶和秋茶。春茶通常因富含鲜味和甜味氨基酸而呈现甜鲜的口感，而夏秋茶含有较高的茶多酚，口感偏苦涩^[10]。此外，在香气组成上，春茶香气成分种类较为丰富，而秋茶的香气更浓郁^[11]。【本研究切入点】然而，当前对于金牡丹茶在不同茶季以及不同茶类间的生化成分研究尚不充分，这限制了其在多茶类加工中的优化利用。【拟解决的关键问题】探究并分析金牡丹茶主要品质特征及春、夏、秋3季不同茶类主要特征代谢物的变化情况，旨在挖掘不同茶季金牡丹多茶类

间生化成分的差异变化规律及主要品质特征，为金牡丹茶品质的提升提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以福建省谦谦一叶茶业科技有限公司高山茶园基地（119°14'E，27°11'N）栽培的金牡丹品种鲜叶为供试材料，分别于春（2023年4月上旬）、夏（2023年6月中下旬）、秋季（2023年10月上旬）采摘。采摘标准为一芽二叶（红茶、绿茶、黄茶、白茶）和一芽三四叶（乌龙茶），供试金牡丹鲜叶样品按照红茶、乌龙茶、白茶、黄茶和绿茶的加工工艺制作对应茶类的春茶、夏茶和秋茶，并设置3次生物学重复。具体加工方法参考文献^[3,4]。

1.2 试剂和仪器

1.2.1 主要试剂

甲醇、甲酸铵购自上海安谱实验科技股份有限公司；乙腈购自上海默克化工技术有限公司；甲酸、乙酸乙酯、草酸、95%乙醇、无水碳酸氢钠、正丁醇购自国药集团化学试剂有限公司；甲醇、甲酸铵、乙腈和甲酸均为色谱纯。

8种儿茶素组分标准品：儿茶素（catechin, C）、表儿茶素（epicatechin, EC）、表没食子儿茶素没食子酸酯（epigallocatechin gallate, EGCG）、（-）-表没食子儿茶素-3-O-（3-O-甲基没食子酸酯）[（-）-Epigallocatechin-3-O-（3-O-methylgallate）, EGCG3 "Me]、表没食子儿茶素（epigallocatechin, EGC）、没食子儿茶素（gallocatechin, GC）、表儿茶素没食子酸酯（epicatechin gallate, ECG）、没食子儿茶素没食子酸酯（gallocatechin gallate, GCG）。2种生物碱组分标准品：咖啡碱（caffeine, CAF）、可可碱（theobromine, TB）。21种氨基酸组分标准品：丙氨酸（alanine, Ala）、β-氨基丁酸（β-Aminobutyric acid, β-ABA）、γ-氨基丁酸（γ-Aminobutyric acid, GABA）、精氨酸（arginine, Arg）、天冬氨酸（aspartic acid, Asp）、组氨酸（histidine, His）、异亮氨酸（isoleucine, Ile）、亮氨酸（leucine, Leu）、赖氨酸（lysine, Lys）、蛋氨酸（methionine, Met）、鸟氨酸（ornithine, Orn）、脯氨酸（proline, Pro）、

丝氨酸 (serine, Ser)、苏氨酸 (threonine, Thr)、色氨酸 (tryptophan, Trp)、酪氨酸 (tyrosine, Tyr)、缬氨酸 (valine, Val)、天冬氨酸 (aspartic acid, Asp)、茶氨酸 (theanine, Thea)、谷氨酰胺 (glutamine, Gln)、谷氨酸 (glutamic acid, Glu) 均购自上海源叶生物科技有限公司, 纯度大于 98%。

1.2.2 主要仪器

电热恒温水浴锅购自上海丙林电子科技有限公司; 分光光度计、Ulti Mate 3000 高效液相色谱仪购自美国赛默飞世尔科技公司; C_{18} 反相色谱柱 ($5\ \mu\text{m}$, $4.6\times 250\ \text{mm}$; $2.6\ \mu\text{m}$, $2.1\times 100\ \text{mm}$) 购自广州菲罗门公司; Nexera X2 LC-30A 高效液相色谱仪购自日本 Shimadzu 公司; 串联 Sciex 4500 Q-Trap 质谱仪购自美国 Sciex 公司; AB204-N 分析天平购自美国梅特勒公司; 超纯水系统购自上海和泰仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 茶叶常规生化成分测定

通过烘干法茶叶水分测定仪测定含水率; 通过恒温干燥法对水浸出物的含量进行测定; 通过酒石酸亚铁比色法测定茶多酚的含量; 通过系统比色法测定茶色素含量^[12]。

1.3.2 儿茶素和生物碱组分测定方法

参照徐梦婷等^[13]的方法, 采用高效液相色谱法进行测定。色谱条件: 流动相为 0.2% 甲酸-水溶液 (A 相) 和甲醇 (B 相); 流速 $1.00\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$; 柱温 $40\ ^\circ\text{C}$; 进样量 $10\ \mu\text{L}$ 。梯度洗脱程序 (A 相): $88\% (2\ \text{min}) \rightarrow 88\% \sim 75\% (8\ \text{min}) \rightarrow 75\% \sim 73\% (5\ \text{min}) \rightarrow 73\% \sim 68\% (5\ \text{min}) \rightarrow 68\% (5\ \text{min}) \rightarrow 68\% \sim 88\% (8\ \text{min})$ 。

1.3.3 氨基酸组分测定方法

参考 Zhou 等^[14]的方法, 采用 AQC 衍生液质联用法测定。色谱条件: 流动相 A 为甲酸铵溶液 ($10\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH6.0), 流动相 B: 乙腈溶液; 流速 $0.3\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$; 柱温 $40\ ^\circ\text{C}$; 进样量 $1\ \mu\text{L}$ 。梯度洗脱程序 (B 相): $5\% \sim 20\% (12\ \text{min}) \rightarrow 20\% \sim 35\% (4\ \text{min}) \rightarrow 35\% \sim 90\% (2\ \text{min}) \rightarrow 90\% \sim 5\% (1\ \text{min}) \rightarrow 5\% (4\ \text{min})$ 。质谱条件: 离子源为电喷雾电离 (ESI) 源; 正离子模式为多反应检测模式; 电喷雾电压 $4500\ \text{V}$, 气帘气压力 $30\ \text{psi}$, 辅助气温度 $550\ ^\circ\text{C}$, 喷雾气压力 $55\ \text{psi}$, 辅助加热气压力 $55\ \text{psi}$ 。

1.4 数据处理

滋味活度值 (taste active value, TAV) 计算如公式所示:

$$\text{TAV} = C/T$$

式中: C 表示滋味物质的含量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$); T 表示滋味物质的阈值 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)。

每个样品进行 3 次生物学重复。使用 Excel 2019 进行数据处理, 测定结果以“平均值 $\pm$ 标准差”表示; P 值 < 0.05 为存在显著性差异, P 值 < 0.01 为存在极显著性差异; 相关系数 (correlation coefficient, cor) 为衡量两个变量之间线性关系强度和方向的指标; 使用 Chiplot (<https://www.chiplot.online/>) 在线分析平台进行相关性分析; 基于迈维云平台 (<https://cloud.metware.cn/>) 进行聚类热图分析 (heatmap analysis)、主成分分析 (principal component analysis, PCA)、正交偏最小二乘判别分析 (orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)。

2 结果与分析

2.1 不同茶季金牡丹多茶类主要生化成分含量分析

由表 1 可知, 金牡丹茶在不同茶季及茶类间的主要生化成分含量上表现出显著差异。金牡丹春茶的水浸出物含量为黄茶 $>$ 绿茶 $>$ 白茶 $>$ 红茶 $>$ 乌龙茶, 而夏、秋茶为绿茶 $>$ 黄茶 $>$ 白茶 $>$ 乌龙茶 $>$ 红茶。茶多酚含量在不同茶季中均表现为绿茶 $>$ 黄茶 $>$ 白茶 $>$ 乌龙茶 $>$ 红茶, 且均在夏季时含量最高。春茶氨基酸含量最高, 夏茶最低。金牡丹不同茶类的酚氨比均为夏茶 $>$ 秋茶 $>$ 春茶, 夏秋茶酚氨比均高于春茶, 其中春季金牡丹白茶氨基酸含量最高, 酚氨比最低。茶三素 (茶红素、茶黄素、茶褐素) 总量在不同茶季中均为红茶最高, 绿茶最低, 与不同茶类的发酵程度有关。

2.2 不同茶季金牡丹多茶类儿茶素组分与生物碱含量分析

不同茶季金牡丹多茶类的儿茶素组分与生物碱的含量如表 2 所示。根据化学结构, 儿茶素可分为酯型儿茶素 (total esterified catechins, TECs; 包括 EGCG、EGCG3"Me、ECG、GCG、CG) 和非酯型儿茶素 (total non-esterified catechins, TSCs; 包括 EC、EGC、C、GC)。本研究共测定出 EGC、C、EGCG、EC、EGCG3"Me、ECG、GC、GCG 等 8 种主要儿茶素。从不同茶季看, 儿茶素含量在夏茶中最高。除金牡丹乌龙茶的儿茶素总量为夏茶 $>$ 秋茶 $>$ 春茶, 其余茶类的儿茶素总量均为夏茶 $>$ 春茶 $>$ 秋茶。春、夏季红茶中 ECG、GC 和 EGCG 的含量较高, 约占总儿茶素的 66.23%、72.18%, 而秋季红茶中 C、GC 和 EGC 含量较高, 约占 66.14%。从

表 1 不同茶季金牡丹 5 大茶类主要生化成分含量

Table 1 Biochemical compositions of 5 types of Jinmudan tea of different seasons

生化成分 Biochemical composition	茶季 Tea season	红茶 Black tea	乌龙茶 Oolong tea	白茶 White tea	黄茶 Yellow tea	绿茶 Green tea
水浸出物 Water extract/%	春茶	47.23±0.58c	46.31±0.26c	52.00±0.61b	54.01±0.34a	53.14±0.83a
	夏茶	43.56±0.22d	46.73±0.13c	51.05±0.72b	53.10±0.83a	53.97±0.50a
	秋茶	39.40±0.01d	45.41±0.01c	49.47±0.01b	51.95±0.00a	53.32±0.00a
茶多酚 Tea polyphenols/%	春茶	18.14±0.64e	23.66±0.40d	26.60±0.12c	28.92±0.62b	31.34±0.32a
	夏茶	20.00±0.61d	25.40±0.43c	31.03±0.40b	31.87±0.28b	34.63±0.16a
	秋茶	17.44±0.51e	25.22±0.67d	29.31±0.42c	30.86±0.31b	33.02±0.41a
氨基酸总量 Total amount of amino acids/%	春茶	1.72±0.06e	2.69±0.12d	4.64±0.07a	3.01±0.07c	3.95±0.16b
	夏茶	1.24±0.03e	1.72±0.04d	2.90±0.06b	1.87±0.01c	3.14±0.05a
	秋茶	1.60±0.03d	2.35±0.08c	4.04±0.20a	2.42±0.03c	3.56±0.08b
酚氨比 Phenol ammonia ratio	春茶	10.53±0.61a	8.80±0.28b	6.24±0.09d	8.83±0.24b	8.23±0.43c
	夏茶	16.14±0.84a	14.80±0.64c	10.66±0.24d	15.70±0.24b	10.62±0.04d
	秋茶	10.88±0.30b	10.74±0.46c	7.27±0.36e	12.74±0.41a	9.28±0.35d
茶黄素 Theaflavin/%	春茶	0.21±0.01a	0.04±0.01b	0.04±0.00b	0.03±0.00c	
	夏茶	0.14±0.01a	0.03±0.00b	0.02±0.00c	0.02±0.00c	—
	秋茶	0.10±0.00a	0.04±0.00b	0.03±0.00c	0.03±0.00c	
茶红素 Thearubigin/%	春茶	2.26±0.07a	1.61±0.09b	1.20±0.02d	1.23±0.07c	
	夏茶	1.87±0.07a	1.38±0.10b	0.77±0.03d	1.08±0.08c	—
	秋茶	2.36±0.16a	1.44±0.00b	0.93±0.02d	1.15±0.03c	
茶褐素 Theabrownin/%	春茶	1.92±0.04a	1.17±0.04b	0.77±0.04d	1.12±0.02c	
	夏茶	2.10±0.03a	1.13±0.04b	0.75±0.01d	0.92±0.05c	—
	秋茶	1.63±0.00a	1.62±0.01b	0.90±0.02d	1.05±0.08c	

“—”表示未检测出；相同小写字母表示同一茶季不同茶类之间数据差异不显著（ $P>0.05$ ），不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ），下同。

“—” indicates substance not detected; the same lowercase letters indicate no significant difference among different tea types of the same season ($P>0.05$), while different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$). same for the following tables.

表 2 不同茶季金牡丹 5 大类茶儿茶素及生物碱含量

Table 2 Catechin and alkaloid contents in 5 types of Jinmudan tea of different seasons

项目 Item	组分名称 Component	茶季 Tea season	红茶 Black tea	乌龙茶 Oolong tea	白茶 White tea	黄茶 Yellow tea	绿茶 Green tea
儿茶素 Catechin/（mg·g ⁻¹ ）	EGC	春茶	1.53±0.16d	11.59±0.38c	9.26±0.28bc	18.03±0.78a	13.05±0.89b
		夏茶	1.32±0.08e	19.18±1.76c	7.66±0.52d	23.60±1.75b	30.92±1.70a
		秋茶	1.46±0.07d	16.85±0.31b	7.78±0.13c	17.21±0.55b	19.76±0.47a
	C	春茶	1.24±0.04d	1.37±0.04c	1.93±0.13b	1.84±0.01b	2.53±0.10a
		夏茶	1.47±0.06e	1.62±0.06d	2.48±0.05b	2.29±0.06c	4.68±0.11a
		秋茶	1.51±0.07c	1.61±0.04c	2.05±0.15ab	1.88±0.01bc	2.30±0.04a
	EGCG	春茶	1.82±0.19d	27.83±1.15c	60.73±0.92b	56.03±0.78b	72.25±0.74a
		夏茶	3.26±0.06d	40.87±0.85c	77.61±0.70b	63.21±1.92b	90.72±0.19a
		秋茶	1.04±0.17e	28.48±2.20d	58.80±1.17b	50.42±3.14c	67.27±2.81a
	EC	春茶	0.58±0.13d	5.16±0.38b	2.22±0.16c	6.03±0.52a	6.56±1.17a
		夏茶	0.22±0.01e	6.69±0.45c	1.95±0.31d	8.19±0.48b	10.75±0.08a
		秋茶	0.15±0.03c	5.28±0.35a	2.48±0.1b	5.74±0.54a	5.92±0.59a

续上表

项目 Item	组分名称 Component	茶季 Tea season	红茶 Black tea	乌龙茶 Oolong tea	白茶 White tea	黄茶 Yellow tea	绿茶 Green tea
儿茶素 Catechin/ (mg·g ⁻¹)	EGCG3"Me	春茶	0.10±0.01d	4.16±0.38c	5.36±0.21b	4.36±0.37c	6.20±0.05a
		夏茶	0.69±0.07c	4.17±0.42b	3.97±0.69b	5.94±0.53a	6.35±1.14a
		秋茶	0.64±0.17c	5.21±0.70a	5.34±0.25a	3.72±0.33b	4.05±0.42b
	ECG	春茶	1.61±0.06e	6.50±0.36d	20.70±0.10a	14.35±0.71c	15.84±0.81b
		夏茶	2.81±0.09e	10.74±0.26d	16.70±0.58c	18.28±1.67b	23.05±0.37b
		秋茶	1.39±0.16c	7.69±0.61b	13.16±0.66a	11.47±1.10a	12.63±1.40a
	GCG	春茶	0.06±0.01d	0.18±0.02c	0.23±0.07c	0.37±0.05b	0.47±0.05a
		夏茶	0.04±0.02e	0.93±0.03c	0.79±0.06d	1.08±0.07b	1.25±0.01a
		秋茶	0.20±0.04b	0.45±0.03b	0.45±0.16b	1.43±0.28a	1.53±0.08a
	GC	春茶	4.44±0.11a	2.50±0.19c	3.01±0.34b	0.47±0.04d	0.38±0.04d
		夏茶	3.65±0.07a	0.92±0.11c	3.46±0.15a	0.83±0.04c	1.83±0.30b
		秋茶	3.71±0.03a	1.03±0.11c	2.57±0.08b	0.53±0.05d	0.51±0.05d
	TECs	春茶	4.07±0.21d	38.43±1.01c	76.35±18.57b	75.12±1.03b	94.76±0.67a
		夏茶	6.80±0.03e	56.53±1.28d	99.28±0.79b	88.52±3.78c	121.36±0.58a
		秋茶	3.27±0.20e	41.83±3.34d	77.74±1.11b	67.05±2.64c	85.48±4.69a
	TSCs	春茶	7.80±0.21c	20.05±1.09b	17.50±1.44b	26.36±0.87b	22.52±1.96a
		夏茶	6.67±0.21e	28.40±2.28c	15.55±0.87d	34.91±2.28b	48.18±1.92a
		秋茶	6.84±0.21d	24.78±1.49b	14.89±0.38c	25.37±0.50b	28.49±1.01a
	TCs	春茶	11.87±0.38d	58.48±1.27c	93.85±17.19b	101.49±1.89b	117.27±2.23a
		夏茶	13.46±0.24e	84.93±1.49d	114.83±0.87c	123.43±6.05b	169.54±2.40a
		秋茶	10.10±0.22d	66.61±4.80c	92.63±1.03b	92.41±2.40b	113.97±5.71a
生物碱 Alkaloid/ (mg·g ⁻¹)	TB	春茶	0.48±0.09d	0.73±0.00c	0.91±0.03b	0.88±0.03b	1.52±0.11a
		夏茶	0.34±0.02d	0.61±0.04c	1.32±0.11b	1.39±0.08b	1.65±0.08a
		秋茶	0.34±0.03d	0.51±0.05c	1.17±0.06a	0.70±0.07b	1.25±0.04a
	CAF	春茶	16.16±1.12e	18.87±0.82d	33.39±0.38a	26.81±0.58c	31.96±0.20b
		夏茶	13.56±0.60e	29.81±1.24d	39.69±1.24b	32.62±0.11c	42.81±0.92a
		秋茶	9.84±0.55d	12.53±0.71c	30.88±1.56a	23.70±1.68b	24.26±0.65b
	总量	春茶	16.64±1.21e	19.61±0.83d	34.30±0.37a	27.69±0.62c	33.47±0.22b
		夏茶	13.90±0.62e	30.42±1.28d	41.01±1.35b	34.00±0.17c	44.46±0.97a
		秋茶	10.18±0.55d	13.04±0.67c	32.06±1.62a	24.40±1.74b	25.51±0.69b

不同茶类来看，儿茶素总量（total catechins, TCs）整体呈绿茶>黄茶>白茶>乌龙茶>红茶的趋势，与茶多酚含量变化一致。EGC、EGCG、ECG及GC是金牡丹茶主要成分，占总儿茶素的78.11%~88.80%。在本研究中，金牡丹茶的生物碱总含量在不同茶季中均为绿茶>白茶>黄茶>乌龙茶>红茶，金牡丹红茶生物碱含量在春茶中最高，

其余茶类均在夏茶中含量最高。

2.3 不同茶季金牡丹多茶类氨基酸组分与含量分析

从不同茶季看（表3），金牡丹不同茶类的氨基酸总量均为春茶最高，秋茶次之，夏茶最低。根据参考文献[15]描述的游离氨基酸滋味特征，可将氨基酸分为鲜味（天冬氨酸、天冬酰胺、谷氨酸、谷氨酰胺、茶氨酸）、甜味（丙氨酸、脯氨酸、丝氨

表 3 不同茶季金牡丹 5 大类茶氨基酸含量
Table 3 Amino acid content of 5 types of Jinmudan tea of different seasons

氨基酸名称 Amino acid	茶季 Tea season	氨基酸含量 Amino acid content/ (mg·g ⁻¹)					
		红茶 Black tea	乌龙茶 Oolong tea	白茶 White tea	黄茶 Yellow tea	绿茶 Green tea	
苦味氨基酸 Bitter amino acids	蛋氨酸 Met	春茶	0.047±0.009ab	0.037±0.005b	0.037±0.002b	0.041±0.003ab	0.049±0.007a
		夏茶	0.022±0.000c	0.047±0.006a	0.037±0.006b	0.023±0.006c	0.040±0.000ab
		秋茶	0.052±0.004a	0.041±0.003b	0.036±0.002bc	0.038±0.002bc	0.035±0.002c
	精氨酸 Arg	春茶	0.505±0.089b	0.410±0.035b	0.959±0.108a	0.529±0.015b	0.533±0.038b
		夏茶	0.283±0.054b	0.289±0.081b	0.275±0.030b	0.608±0.055a	0.519±0.154a
		秋茶	0.462±0.016bc	0.450±0.000c	0.796±0.054a	0.432±0.009c	0.511±0.027b
	赖氨酸 Lys	春茶	0.402±0.049c	0.300±0.019d	1.498±0.036a	0.676±0.024b	0.724±0.056b
		夏茶	0.157±0.030c	0.171±0.024c	0.270±0.055ab	0.341±0.075a	0.224±0.047b
		秋茶	0.598±0.164b	0.590±0.124b	0.866±0.000a	0.506±0.082b	0.64±0.022b
	络氨酸 Tyr	春茶	0.729±0.120b	0.533±0.037c	1.044±0.127a	0.575±0.015bc	1.168±0.138a
		夏茶	0.421±0.083b	0.263±0.043bc	0.615±0.127a	0.220±0.018c	0.678±0.135a
		秋茶	0.514±0.060c	0.344±0.058d	1.309±0.095a	0.590±0.030c	1.156±0.034b
	亮氨酸 Leu	春茶	0.390±0.056c	0.258±0.016d	0.464±0.033b	0.615±0.012a	0.666±0.033a
		夏茶	0.717±0.123bc	0.036±0.006d	0.926±0.187a	0.610±0.009c	0.809±0.047ab
		秋茶	0.368±0.057c	0.418±0.038c	0.690±0.083b	0.864±0.111a	0.442±0.109c
	色氨酸 Trp	春茶	0.574±0.119b	0.563±0.059b	0.561±0.037b	0.590±0.029b	0.752±0.027a
		夏茶	0.442±0.054bc	0.615±0.086ab	0.531±0.166bc	0.381±0.096c	0.745±0.045a
		秋茶	0.362±0.071c	0.697±0.119a	0.705±0.061a	0.526±0.006b	0.696±0.029a
	缬氨酸 Val	春茶	0.481±0.045c	0.401±0.041c	1.190±0.090a	0.726±0.018b	1.213±0.120a
		夏茶	0.427±0.045c	0.244±0.082c	1.740±0.489a	0.925±0.084b	1.173±0.249b
		秋茶	0.461±0.055c	0.768±0.134b	0.708±0.021b	0.805±0.111b	1.326±0.079a
	异亮氨酸 Ile	春茶	0.703±0.075d	0.487±0.024e	0.871±0.054c	1.063±0.044b	1.320±0.102a
		夏茶	0.357±0.067b	0.383±0.000b	0.719±0.022a	0.435±0.026b	0.485±0.133b
		秋茶	0.677±0.092b	0.281±0.027c	0.635±0.295b	0.591±0.107b	1.232±0.063a
	组氨酸 His	春茶	0.164±0.008c	0.205±0.022bc	0.251±0.02b	0.236±0.005b	0.353±0.048a
		夏茶	0.094±0.031b	0.067±0.055b	0.155±0.085ab	0.159±0.020ab	0.220±0.015a
		秋茶	0.081±0.021b	0.111±0.040b	0.150±0.092b	0.110±0.048b	0.356±0.010a
合计	春茶	3.994±0.554c	3.193±0.233d	6.875±0.457a	5.050±0.037b	6.778±0.548a	
	夏茶	2.919±0.184c	2.115±0.199d	5.268±0.643a	3.703±0.088b	4.893±0.189a	
	秋茶	3.576±0.336c	3.698±0.389c	5.896±0.467a	4.463±0.457b	6.392±0.266a	
甜味氨基酸 Sweet amino acids	丙氨酸 Ala	春茶	0.623±0.104b	0.613±0.063b	1.451±0.171a	0.595±0.066b	0.666±0.018b
		夏茶	0.763±0.102a	0.449±0.057b	0.864±0.005a	0.548±0.086b	0.755±0.185a
		秋茶	0.588±0.103c	0.807±0.047b	1.097±0.066a	0.824±0.068b	0.350±0.046d
	脯氨酸 Pro	春茶	0.329±0.107b	0.202±0.053c	0.469±0.052a	0.347±0.021b	0.428±0.022ab
		夏茶	0.483±0.119b	0.427±0.062b	0.678±0.026a	0.267±0.032c	0.417±0.088b
		秋茶	0.689±0.032b	0.593±0.081b	0.839±0.123a	0.431±0.034c	0.259±0.033d
	苏氨酸 Thr	春茶	0.571±0.024d	0.554±0.048d	0.708±0.056c	0.863±0.002b	1.095±0.112a
		夏茶	0.487±0.082b	0.306±0.127b	0.899±0.108a	0.525±0.230b	1.100±0.051a
		秋茶	0.537±0.084b	0.537±0.029b	0.828±0.128a	0.599±0.050b	0.878±0.064a
	丝氨酸 Ser	春茶	1.544±0.151c	1.541±0.151c	2.576±0.047a	2.247±0.061b	2.203±0.113b
		夏茶	0.896±0.094b	0.761±0.166b	1.600±0.365a	1.509±0.025a	1.475±0.154a
		秋茶	1.121±0.147c	1.073±0.117c	2.143±0.082a	2.095±0.023a	1.831±0.121b

续上表

氨基酸名称 Amino acid		茶季 Tea season	氨基酸含量 Amino acid content/ (mg·g ⁻¹)				
			红茶 Black tea	乌龙茶 Oolong tea	白茶 White tea	黄茶 Yellow tea	绿茶 Green tea
甜味氨基酸 Sweet amino acids	合计	春茶	3.066±0.172c	2.910±0.269c	5.205±0.164a	4.052±0.145b	4.392±0.201b
		夏茶	2.629±0.135b	1.943±0.065c	4.042±0.353a	2.849±0.332b	3.747±0.370a
		秋茶	2.936±0.109d	3.010±0.165d	4.907±0.195a	3.949±0.096b	3.319±0.163c
鲜味氨基酸 Umami amino acids	天冬氨酸 Asp	春茶	1.327±0.246b	0.763±0.105c	1.324±0.082b	0.515±0.103c	2.638±0.367a
		夏茶	0.353±0.113b	0.064±0.054c	0.371±0.182b	0.190±0.091bc	1.047±0.021a
		秋茶	2.305±0.121a	1.035±0.094b	0.934±0.060b	0.638±0.125c	2.291±0.076a
	天冬酰胺 Asn	春茶	0.610±0.059c	0.655±0.071c	2.266±0.092a	1.473±0.079b	1.423±0.077b
		夏茶	0.462±0.120c	0.179±0.044d	1.214±0.240a	0.791±0.068b	0.773±0.199b
		秋茶	0.321±0.046c	0.388±0.065c	1.741±0.043a	1.202±0.103b	1.139±0.035b
	茶氨酸 Thea	春茶	5.729±0.226e	14.017±0.135d	27.499±0.102a	15.203±0.572c	18.966±0.089b
		夏茶	4.318±0.195c	9.552±0.389b	15.930±0.630a	8.850±0.354b	16.299±1.098a
		秋茶	5.215±0.139d	11.824±0.532c	24.612±1.516a	11.068±0.072c	17.961±0.978b
	谷氨酸 Glu	春茶	0.826±0.094d	1.081±0.083c	0.812±0.086d	1.410±0.053b	2.083±0.111a
		夏茶	0.448±0.053d	0.762±0.037b	0.304±0.028e	0.601±0.057c	1.697±0.084a
		秋茶	0.488±0.034d	0.683±0.050c	0.613±0.121cd	1.192±0.075b	1.591±0.026a
	谷氨酰胺 Gln	春茶	0.856±0.033d	3.519±0.453a	0.942±0.048d	1.483±0.030c	2.117±0.191b
		夏茶	0.540±0.053d	2.018±0.148a	0.553±0.037d	0.980±0.074c	1.864±0.034b
		秋茶	0.500±0.037e	2.272±0.041a	0.821±0.009d	1.310±0.085c	2.057±0.021b
	合计	春茶	9.349±0.358d	20.036±0.712c	32.844±0.271a	20.084±0.752c	27.227±0.800b
		夏茶	6.120±0.231e	12.576±0.416c	18.372±0.828b	11.412±0.360d	21.680±0.954a
		秋茶	8.829±0.209d	16.202±0.566c	28.721±1.568a	15.409±0.169c	25.039±1.062b
无味氨基酸 Odorless amino acids	β-氨基丁酸 β-ABA	春茶	0.375±0.017b	0.313±0.032c	0.732±0.041a	0.392±0.018b	0.418±0.036b
		夏茶	0.433±0.035bc	0.140±0.048d	0.744±0.021a	0.368±0.017c	0.463±0.055b
		秋茶	0.362±0.040b	0.243±0.035c	0.410±0.065ab	0.106±0.025d	0.448±0.018a
	γ-氨基丁酸 GABA	春茶	0.347±0.01bc	0.308±0.027c	0.506±0.049a	0.399±0.011b	0.462±0.031a
		夏茶	0.247±0.027c	0.331±0.009bc	0.490±0.028a	0.277±0.092c	0.397±0.023b
		秋茶	0.207±0.013c	0.268±0.035ab	0.345±0.056ab	0.233±0.115bc	0.369±0.060a
	鸟氨酸 Orn	春茶	0.118±0.013b	0.158±0.030ab	0.216±0.035a	0.150±0.028ab	0.201±0.054a
		夏茶	0.051±0.021b	0.071±0.014b	0.046±0.000b	0.055±0.022b	0.181±0.019a
		秋茶	0.113±0.008a	0.069±0.022b	0.137±0.029a	0.066±0.013b	0.071±0.011b
	合计	春茶	0.840±0.029d	0.779±0.067d	1.454±0.040a	0.941±0.049c	1.081±0.061b
		夏茶	0.731±0.026c	0.541±0.047d	1.280±0.032a	0.700±0.081c	1.042±0.039b
		秋茶	0.682±0.024b	0.580±0.017b	0.892±0.075a	0.405±0.089c	0.888±0.088a
总计	春茶	17.249±0.580e	26.918±1.225d	46.378±0.733a	30.127±0.713c	39.477±1.580b	
	夏茶	12.400±0.318e	17.175±0.409d	28.961±0.597b	18.664±0.127c	31.362±0.534a	
	秋茶	16.023±0.328d	23.491±0.772c	40.416±2.004a	24.226±0.267c	35.638±0.799b	

酸、苏氨酸)、苦味(精氨酸、组氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、蛋氨酸、色氨酸、缬氨酸、酪氨酸)和无味(鸟氨酸、赖氨酸、 β -氨基丁酸、 γ -氨基丁酸)。鲜味氨基酸在春、夏、秋季不同茶类的氨基酸总量的比例均高于 50%。其中,春季乌龙茶鲜味氨基酸占氨基酸总量的 74.46%,是其鲜味特征的主

要来源。从不同茶类看,白茶的氨基酸含量最高,其次为绿茶、黄茶、乌龙茶、红茶。茶氨酸作为主要鲜味氨基酸,在白茶中含量最高,分别占春、夏、秋季金牡丹白茶总氨基酸含量的 57.59%、55.00%和 59.41%,是形成金牡丹白茶鲜爽味的关键物质。绿茶中的苦味氨基酸含量显著高于其他茶类,约占

绿茶总氨基酸的 15.32%~17.19%。其中，精氨酸、亮氨酸、酪氨酸等苦味氨基酸含量在夏、秋季增加。金牡丹乌龙茶、红茶及黄茶以鲜味和甜味氨基酸为主，其中金牡丹乌龙茶中的谷氨酰胺含量较高，是形成其汤感和滋味特征的重要成分之一。

滋味活性值（taste active value, TAV）反映了呈味物质含量与其感官阈值的比值，当 TAV>1 时，表明该物质对样品呈味贡献大^[16]。由表 4 可知，金牡丹红茶的主要呈味物质为谷氨酸、谷氨酰胺、茶氨酸、天冬氨酸、缬氨酸、丙氨酸、丝氨酸等；金

牡丹乌龙茶主要呈味物质为谷氨酸、谷氨酰胺、茶氨酸、丝氨酸、组氨酸等，苦味氨基酸在红茶和乌龙茶中的 TAV 值大部分小于 1。金牡丹白茶主要呈味物质有茶氨酸、谷氨酸、缬氨酸、赖氨酸、谷氨酰胺等。金牡丹黄茶主要呈味物质为谷氨酸、茶氨酸、谷氨酰胺、缬氨酸、丝氨酸。金牡丹绿茶主要呈味物质为谷氨酸、茶氨酸、谷氨酰胺、缬氨酸、天冬氨酸等，呈鲜味的氨基酸在绿茶中的 TAV 值最高，对绿茶的鲜味呈现有着重要作用。

表 4 不同茶季金牡丹 5 大茶类 TAV 值
Table 4 The TAV value of 5 kinds of Jinmudan tea in different tea seasons

氨基酸名称 Amino acid	阈值 Threshold/ (mg·g ⁻¹)	茶季 Tea season	滋味活性值 TAV value				
			红茶 Black tea	乌龙茶 Oolong tea	白茶 White tea	黄茶 Yellow tea	绿茶 Green tea
蛋氨酸 Met	0.30	春茶	0.15±0.03ab	0.12±0.02b	0.13±0.01ab	0.14±0.01ab	0.16±0.02a
		夏茶	0.07±0.00c	0.16±0.02a	0.10±0.03bc	0.08±0.02c	0.13±0.00ab
		秋茶	0.17±0.01a	0.14±0.01b	0.12±0.01bc	0.13±0.01bc	0.12±0.01c
精氨酸 Arg	0.50	春茶	1.01±0.18b	0.82±0.07b	1.57±0.45a	1.06±0.03b	1.07±0.08b
		夏茶	0.57±0.11b	0.58±0.16b	0.8±0.47ab	1.22±0.11a	1.04±0.31ab
		秋茶	0.92±0.03b	0.90±0.00b	1.35±0.42a	0.86±0.02b	1.02±0.05ab
赖氨酸 Lys	0.50	春茶	0.80±0.10bc	0.60±0.04c	2.42±0.92a	1.35±0.05bc	1.45±0.11b
		夏茶	0.31±0.06b	0.34±0.05b	0.60±0.21a	0.68±0.15a	0.45±0.09ab
		秋茶	1.20±0.33ab	1.18±0.25ab	1.56±0.31a	1.01±0.16b	1.28±0.04ab
络氨酸 Tyr	0.91	春茶	0.80±0.13bc	0.59±0.04c	0.96±0.32b	0.63±0.02c	1.28±0.15a
		夏茶	0.46±0.09b	0.29±0.05b	0.49±0.25b	0.24±0.02b	0.75±0.15a
		秋茶	0.56±0.07b	0.38±0.06b	1.21±0.49a	0.65±0.03b	1.27±0.04a
亮氨酸 Leu	1.90	春茶	0.21±0.03c	0.14±0.01d	0.27±0.05b	0.32±0.01a	0.35±0.02a
		夏茶	0.38±0.06ab	0.02±0.00c	0.39±0.07ab	0.32±0.00b	0.43±0.02a
		秋茶	0.19±0.03b	0.22±0.02b	0.4±0.11a	0.45±0.06a	0.23±0.06b
色氨酸 Trp	0.90	春茶	0.64±0.13b	0.63±0.07b	0.61±0.02b	0.66±0.03b	0.84±0.03a
		夏茶	0.49±0.06b	0.68±0.10ab	0.54±0.25b	0.42±0.11b	0.83±0.05a
		秋茶	0.40±0.08c	0.77±0.13a	0.72±0.14ab	0.58±0.01b	0.77±0.03a
缬氨酸 Val	0.40	春茶	1.20±0.11c	1.00±0.10c	2.52±0.64a	1.81±0.05b	3.03±0.30a
		夏茶	1.07±0.11bc	0.61±0.21c	3.28±1.37a	2.31±0.21b	2.93±0.62a
		秋茶	1.15±0.14c	1.92±0.33b	1.94±0.34b	2.01±0.28b	3.32±0.20a
异亮氨酸 Ile	0.90	春茶	0.78±0.08c	0.54±0.03d	1.04±0.17b	1.18±0.05b	1.47±0.11a
		夏茶	0.4±0.07b	0.43±0.00b	0.69±0.18a	0.48±0.03ab	0.54±0.15ab
		秋茶	0.75±0.10b	0.31±0.03c	0.78±0.30b	0.66±0.12b	1.37±0.07a
组氨酸 His	0.20	春茶	0.82±0.04c	1.02±0.11bc	1.2±0.01b	1.18±0.02b	1.77±0.24a
		夏茶	0.47±0.16bc	0.34±0.28c	0.67±0.37bc	0.79±0.10ab	1.10±0.08a
		秋茶	0.4±0.10c	0.56±0.20c	0.92±0.25b	0.55±0.24c	1.78±0.05a
丙氨酸 Ala	0.60	春茶	1.04±0.17b	1.02±0.10b	1.9±0.74a	0.99±0.11b	1.11±0.03b
		夏茶	1.27±0.17ab	0.75±0.10c	1.32±0.21a	0.91±0.14bc	1.26±0.31ab
		秋茶	0.98±0.17c	1.34±0.08b	1.70±0.32a	1.37±0.11b	0.58±0.08d

续上表

氨基酸名称 Amino acid	阈值 Threshold/ (mg·g ⁻¹)	茶季 Tea season	滋味活性值 TAV value				
			红茶 Black tea	乌龙茶 Oolong tea	白茶 White tea	黄茶 Yellow tea	绿茶 Green tea
脯氨酸 Pro	3.00	春茶	0.11±0.04a	0.07±0.02b	0.15±0.03a	0.12±0.01a	0.14±0.01a
		夏茶	0.16±0.04ab	0.14±0.02ab	0.18±0.07a	0.09±0.01b	0.14±0.03ab
		秋茶	0.23±0.01a	0.2±0.03ab	0.22±0.08a	0.14±0.01bc	0.09±0.01c
苏氨酸 Thr	2.60	春茶	0.22±0.01c	0.21±0.02c	0.29±0.04b	0.33±0.00b	0.42±0.04a
		夏茶	0.19±0.03c	0.12±0.05c	0.33±0.05b	0.20±0.09c	0.42±0.02a
		秋茶	0.21±0.03b	0.21±0.01b	0.31±0.06a	0.23±0.02b	0.34±0.02a
丝氨酸 Ser	1.50	春茶	1.03±0.10c	1.03±0.10c	1.66±0.11a	1.50±0.04b	1.47±0.08b
		夏茶	0.60±0.06b	0.51±0.11b	1.14±0.13a	1.01±0.02a	0.98±0.10a
		秋茶	0.75±0.10c	0.72±0.08c	1.44±0.04a	1.4±0.02a	1.22±0.08b
天冬氨酸 Asp	1.00	春茶	1.33±0.25b	0.76±0.11bc	1.01±0.52bc	0.52±0.10c	2.64±0.37a
		夏茶	0.35±0.11b	0.06±0.05c	0.31±0.23b	0.19±0.09bc	1.05±0.02a
		秋茶	2.31±0.12a	1.04±0.09b	0.81±0.26bc	0.64±0.13c	2.29±0.08a
天冬酰胺 Asn	1.00	春茶	0.61±0.06c	0.66±0.07c	1.96±0.47a	1.47±0.08b	1.42±0.08b
		夏茶	0.46±0.12b	0.18±0.04c	0.99±0.17a	0.79±0.07a	0.77±0.20a
		秋茶	0.32±0.05c	0.39±0.06c	1.58±0.26a	1.2±0.10b	1.14±0.03b
茶氨酸 Thea	4.18	春茶	1.37±0.05c	3.35±0.03b	5.55±1.76a	3.64±0.14b	4.54±0.02ab
		夏茶	1.03±0.05c	2.29±0.09b	3.23±1.06a	2.12±0.08b	3.90±0.26a
		秋茶	1.25±0.03c	2.83±0.13bc	4.77±1.86a	2.65±0.02c	4.3±0.23ab
谷氨酸 Glu	0.30	春茶	2.75±0.31c	3.60±0.28c	3.51±1.16c	4.70±0.18b	6.94±0.37a
		夏茶	1.49±0.18d	2.54±0.12b	1.30±0.47d	2.00±0.19c	5.66±0.28a
		秋茶	1.63±0.11c	2.28±0.17c	2.46±1.10c	3.97±0.25b	5.30±0.09a
谷氨酰胺 Gln	0.50	春茶	1.71±0.07d	7.04±0.91a	2.23±0.68cd	2.97±0.06c	4.23±0.38b
		夏茶	1.08±0.11c	4.04±0.30a	1.42±0.61bc	1.96±0.15b	3.73±0.07a
		秋茶	1.00±0.07e	4.54±0.08a	1.90±0.45d	2.62±0.17c	4.11±0.04b

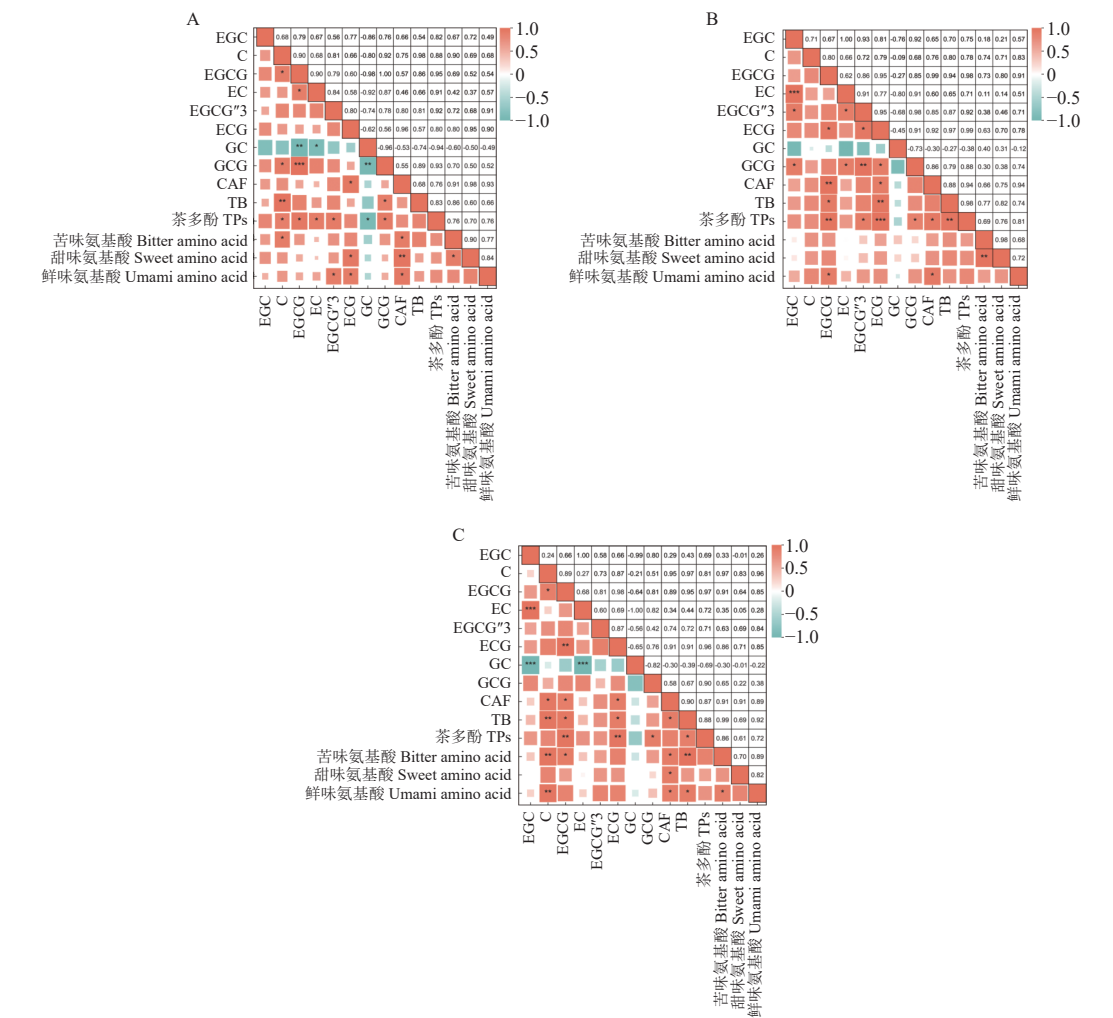
2.4 金牡丹茶主要特征性代谢物的相关性研究

相关性分析揭示了金牡丹茶在不同茶季的主要特征性代谢物之间的关联特性（图 1）。在金牡丹茶的不同茶季中，鲜味氨基酸均与多种儿茶素（如 EGCG、ECG 等）及 CAF、TB 等呈正相关（ $\text{cor} \geq 0.80$ ），金牡丹春茶中，鲜味氨基酸还与甜味氨基酸呈正相关。茶多酚作为茶叶中的主要活性成分，在不同茶季中均与多种儿茶素（如 EGCG、ECG、GCG 等）呈显著正相关（ $\text{cor} \geq 0.80$ ， $P < 0.05$ ），这表明它们的合成和积累过程关系密切。而苦味氨基酸均与 CAF、TB、EGCG 等呈正相关。此外，在金牡丹春茶中，GC 与多种儿茶素和其他特征代谢物呈显著负相关（ $\text{cor} \leq -0.80$ ， $P < 0.05$ ）；在夏茶中，GC 除与苦味氨基酸和甜味氨基酸呈正相关外，与其余代谢物均呈负相关；在秋茶中，GC 与 EGC、EC 呈极显著负相关（ $\text{cor} \leq -0.80$ ， $P < 0.01$ ），与多数代谢物也呈负相关或无明显相关性，这表明 GC 的

含量与多数代谢物的含量在季节性变化中均呈相反趋势，但也与特定代谢物存在正相关关系。

2.5 不同茶季金牡丹多茶类 OPLS-DA 判别

OPLS-DA 评价模型中 R^2X 和 R^2Y 分别表示所建模型对 X 和 Y 矩阵的解释率， Q^2 表示模型的预测能力。当这 3 个指标越接近于 1 时，表示模型越稳定可靠，即可以用此模型筛选差异代谢物（图 2）^[17]。春、夏、秋季不同茶类均可通过 2 个主成分实现茶季上的区分，且所建立的 OPLS-DA 模型有效。根据变量投影重要性（variable importance of projection, VIP）分析代谢产物对不同茶季及不同茶类的贡献率差异。VIP 值越大，表示该代谢产物对模型分类贡献越大，也表明其不同茶季间差异显著。通过筛选 $\text{VIP} \geq 1$ 且 $P < 0.05$ 的代谢物，结果显示，春、夏、秋季金牡丹红茶中 CAF、EGCG、茶氨酸、亮氨酸、丙氨酸等 14 种代谢物 $\text{VIP} \geq 1$ ；金牡丹乌龙茶中 γ -氨基丁酸、天冬氨酸、苏氨酸、EGCG 等 12 种代谢物



春茶 (A)、夏茶 (B)、秋茶 (C)。*代表 $0.01 < P \leq 0.05$, **代表 $0.001 < P \leq 0.01$, ***代表 $0.0001 < P \leq 0.001$ 。
Spring tea (A), Summer tea(B), and Autumn tea (C). * indicates statistical significance at $0.01 < P \leq 0.05$; ** at $0.001 < P \leq 0.01$; and *** at $0.0001 < P \leq 0.001$.

图 1 不同茶季金牡丹茶主要特征代谢物相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of major characteristic metabolites in Jinmudan tea in different tea seasons

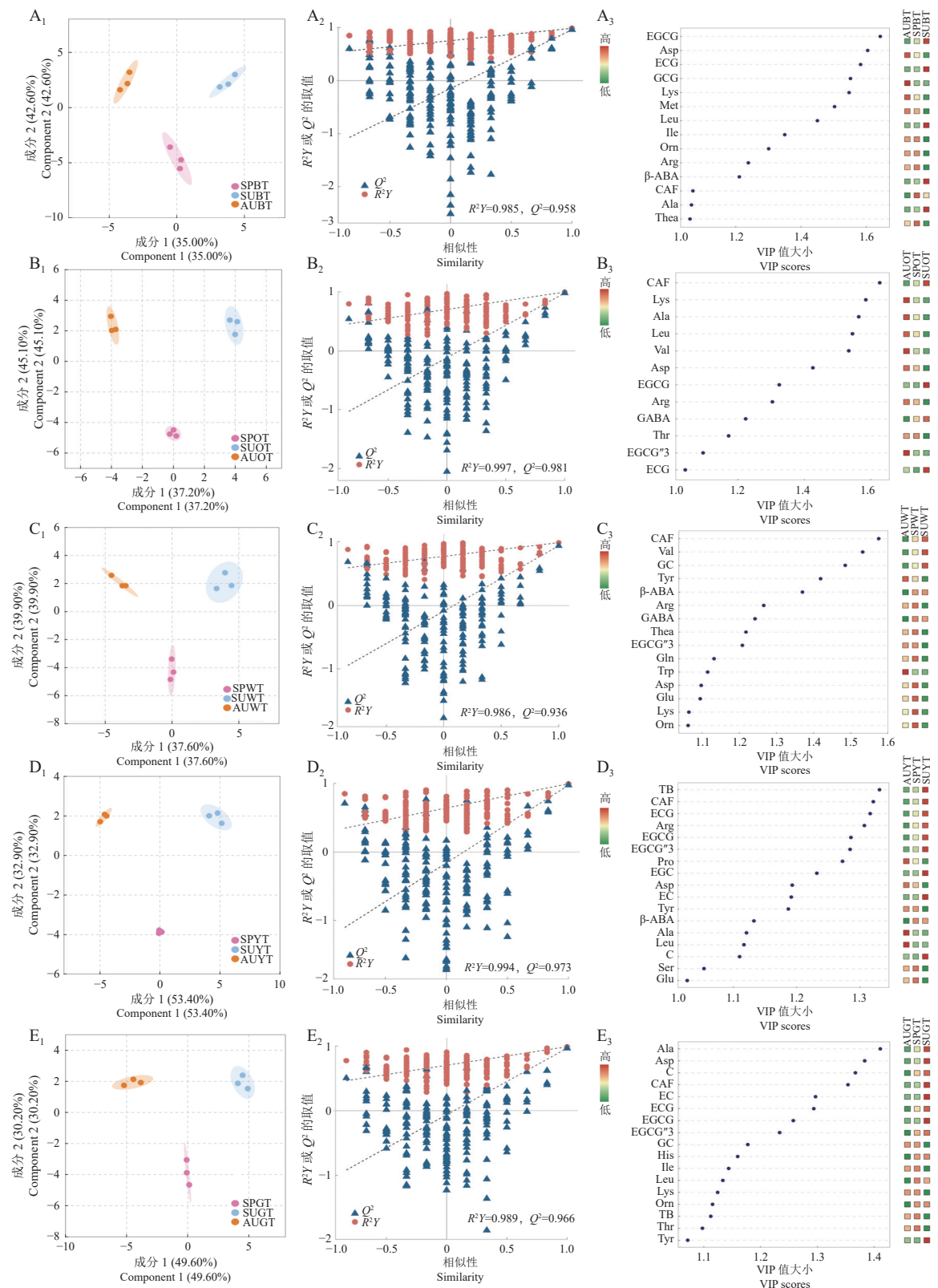
VIP ≥ 1 ；金牡丹白茶中酪氨酸、缬氨酸、茶氨酸、 β -氨基丁酸、GC 等 15 种代谢物 VIP ≥ 1 ；金牡丹黄茶中，C、EC、ECG、可可碱、酪氨酸、 β -氨基丁酸等 17 种代谢物 VIP ≥ 1 ；金牡丹绿茶中，EGCG、咖啡碱、组氨酸、赖氨酸等 17 种代谢物 VIP ≥ 1 。以上结果显示，可通过对主要特征代谢物构成的 OPLS-DA 判别模型分析，实现不同茶类在茶季上的区分，这些成分也是形成金牡丹春、夏、秋季的不同茶类品质的重要滋味物质。

3 讨论与结论

茶叶中茶多酚、氨基酸、儿茶素、咖啡碱等物质含量与占比是衡量茶叶品质、决定茶叶加工方向和经济价值的重要指标。本研究通过分析金牡丹品种春、夏、秋 3 季多茶类的生化成分含量差异，重点探讨了其主要特征代谢物含量在茶类和茶季间的

变化规律，揭示了金牡丹茶丰富的内含物质成分及其不同茶季间茶叶品质的差异。

从不同茶季上看，金牡丹不同茶类的酚氨比均呈夏茶>秋茶>春茶的变化趋势。其中，春茶的酚氨比适中，适制多种茶类，而夏、秋茶的酚氨比高，更适制红茶和乌龙茶。咖啡碱和可可碱是茶叶中最主要的嘌呤类生物碱，也是决定茶叶苦味的重要成分。不同茶类金牡丹的茶多酚、咖啡碱、生物碱含量均在夏茶中最高，而氨基酸含量最低。这是由于夏季强光和高温抑制了氮代谢、促进了碳代谢，茶树新梢生长迅速且容易老化，导致茶叶中的氨基酸的含量明显减少，而咖啡碱、茶多酚的含量明显增加，也是造成夏茶的苦涩味重、鲜爽度下降的原因之一^[18]。生物碱在茶树中的积累具有季节性变化规律，在本研究中呈绿茶>白茶>黄茶>乌龙茶>红茶的趋势。茶叶中氨基酸的含量影响着茶叶



1-3 分别为 OPLS-DA 得分图、OPLS-DA 置换检验图及 VIP 聚类热图；A：红茶，B：乌龙茶，C：白茶，D：黄茶，E：绿茶。SP 表示春茶；SU 表示夏茶；AU 表示秋茶；BT 表示红茶，OT 表示乌龙茶，WT 表示白茶，YT 表示黄茶，GT 表示绿茶。

1-3: OPLS-DA score plot, OPLS-DA permutation test plot, and VIP cluster heatmap; A: black tea, B: oolong tea, C: white tea, D: yellow tea, E: green tea. SP represents spring tea, SU represents summer tea, AU represents autumn tea, BT represents black tea, OT represents oolong tea, WT represents white tea, YT represents yellow tea, and GT represents green tea.

图 2 不同茶季金牡丹 5 大类茶主要特征代谢物 OPLS-DA 与聚类热图综合分析

Fig. 2 Comprehensive analysis of OPLS-DA and cluster heat map of main characteristic metabolites of multiple tea types of Jinmudan in different tea seasons

的滋味和品质。金牡丹春茶的氨基酸含量最高，秋茶次之，夏茶最低。这主要是由于春季气温适中，雨量充沛，内在成分及含量较为丰富^[9]。鲜味氨基酸在不同茶季占比均超过50%，是形成金牡丹茶滋味品质的主要氨基酸。此外，金牡丹不同茶类的酯型儿茶素含量均在夏茶中最高，春季金牡丹红茶、乌龙茶和白茶中酯型儿茶素含量较低，酯型儿茶素含量的下降能够改善茶汤中的苦涩味，促进茶汤的回甘，因此金牡丹夏茶苦涩味较春茶和秋茶更明显^[19]。

从不同茶类来看，随着发酵程度的加深，茶多酚、儿茶素、咖啡碱及生物碱的含量随之下降。该结果主要是由于多酚氧化酶对儿茶素氧化导致，发酵程度越高，儿茶素的含量越低^[20,21]。春季金牡丹白茶氨基酸含量最高，酚氨比最低。有研究表明，酯型儿茶素含量的下降，能促使茶汤由清鲜口感向甜、醇口感的转变^[22]。金牡丹白茶的氨基酸含量最高，其次为金牡丹绿茶、黄茶、乌龙茶和红茶。除金牡丹白茶外，其余茶类随发酵程度的加深，氨基酸含量逐渐下降，这与氨基酸在茶叶发酵过程中自身发生氧化，产生醛类化合物有关^[23]。在不同茶季中，金牡丹白茶和绿茶的鲜味氨基酸含量均较高，谷氨酸可产生类似鲜花的香气，在金牡丹绿茶中含量高于其他茶类，为其提供强烈的“鲜爽味”^[24,25]。

不同茶季的金牡丹茶中，氨基酸、儿茶素及茶多酚等主要特征性代谢物间存在显著相关性，金牡丹茶各茶季中鲜味氨基酸与EGCG、ECG、CAF、TB等呈显著正相关，春茶中与甜味氨基酸呈正相关，且茶多酚与EGCG、ECG、GCG等呈显著正相关。GC的季节性关联差异显著，春、秋茶中与多数代谢物呈负相关，夏茶中与苦味和甜味氨基酸呈正相关，其余均为负相关或无明显相关性，表明GC与代谢物呈季节反向积累趋势。相关性分析结果表明，金牡丹茶的化学成分受到季节性变化的显著影响。主成分分析与OPLS-DA判别模型进一步明确了关键代谢物对不同茶季和茶类区分的重要贡献。其中， γ -氨基丁酸、天冬氨酸、EGCG等12种代谢物对判别不同茶季的金牡丹红茶差异有较大贡献值；天冬氨酸、苏氨酸、EGCG等12种代谢物对判别不同茶季的金牡丹乌龙茶有较大贡献值；缬氨酸、茶氨酸、 β -氨基丁酸、GC等15种代谢物对判别不同茶季的金牡丹白茶有较大贡献值；C、EC、ECG、可可碱等17种代谢物对判别不同茶季的金牡丹黄茶有较大贡献值；EGCG、咖啡碱、组氨酸、赖氨酸等17种代谢物对判别不同茶季的金牡丹绿茶有较大贡献值。

综上所述，不同茶类和茶季的金牡丹茶在化学成分上差异显著，这些特征代谢物在区分其不同茶季及茶类方面具有重要意义，并直接影响金牡丹茶的滋味和品质。未来研究可进一步聚焦这些关键代谢物的变化，以优化金牡丹茶的品质及加工工艺。

参考文献：

- [1] 叶乃兴. 茶学概论[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [2] CHEN S, LI M H, ZHENG G Y, et al. Metabolite profiling of 14 Wuyi rock tea cultivars using UPLC-QTOF MS and UPLC-QqQ MS combined with chemometrics[J]. *Molecules*, 2018, 23(2): 104.
- [3] 唐梦婷, 廖献盛, 吴先寿, 等. 金牡丹不同茶类夏秋茶香气品质差异分析[J]. *食品科学*, 2025, 46(2): 171-182.
TANG M T, LIAO X S, WU X S, et al. Differences in aroma quality of different types of jinmudan tea made from tea leaves harvested in summer and autumn[J]. *Food Science*, 2025, 46(2): 171-182. (in Chinese)
- [4] TANG M T, LIAO X S, XU M T, et al. Comprehensive investigation on the flavor difference in five types of tea from JMD (*Camellia sinensis* 'Jinmudan') [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2025, 105(2): 990-1002.
- [5] XU J, HU F L, WANG W, et al. Investigation on biochemical compositional changes during the microbial fermentation process of Fu brick tea by LC-MS based metabolomics[J]. *Food Chemistry*, 2015, 186: 176-184.
- [6] 魏明秀. 茶树新品系金茗早、凤阳紫芽、长乐大叶品种特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2022.
WEI M X. Study on the characteristics of three novel tea variety for Jinmingzao, Fengyang-ziya and Changle-day[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2022. (in Chinese)
- [7] 徐梦婷. 寿宁金牡丹红茶的品质化学解析[D]. 福州: 福建农林大学, 2024.
XU M T. Chemical analysis of quality of Shouning Jinmudan black tea[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2024. (in Chinese)
- [8] DEKA H, BARMAN T, DUTTA J, et al. Catechin and caffeine content of tea (*Camellia sinensis* L.) leaf significantly differ with seasonal variation: A study on popular cultivars in North East India[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2021, 96: 103684.
- [9] 毛娟, 王文海, 洛英, 等. 西藏墨脱县6个茶树品种春夏两季化学品质差异分析[J]. *食品科学*, 2024, 45(10): 10167-10174.
MAO J, WANG W H, LOB S, et al. Variations in chemical quality among spring and summer tea made from six cultivars grown in Motuo County, Tibet[J]. *Food Science*, 2024, 45(10): 10167-10174. (in Chinese)
- [10] DAI W D, QI D D, YANG T, et al. Nontargeted analysis using ultraperformance liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry uncovers the effects of harvest season on the metabolites and taste quality of tea (*Camellia sinensis* L.) [J].

- Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(44): 9869–9878.
- [11] 王江花. 不同采摘季节对清香型铁观音成分的影响[J]. *蚕桑茶叶通讯*, 2023(3): 21–24.
- WANG J H. The impact of different harvesting seasons on the composition of Qingxiang-type Tieguanyin tea[J]. *Newsletter of Sericulture and Tea*, 2023(3): 21–24. (in Chinese)
- [12] 罗军武. 茶学实验技术[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2020.
- [13] 徐梦婷, 魏明秀, 陈潇敏, 等. 寿宁长叶 1 号等茶树新品系儿茶素和氨基酸组分分析[J]. *茶叶学报*, 2022, 63(1): 20–26.
- XU M T, WEI M X, CHEN X M, et al. Catechins and amino acids in shouningchangye No. 1 and other new tea varieties[J]. *Acta Tea Sinica*, 2022, 63(1): 20–26. (in Chinese)
- [14] ZHOU P, ZHAO F, CHEN M J, et al. Determination of 21 free amino acids in 5 types of tea by ultra-high performance liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry (UHPLC–MS/MS) using a modified 6-aminoquinolyl-N-hydroxysuccinimidyl carbamate (AQC) method[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2019, 81: 46–54.
- [15] FANG K X, XIA Z Q, LI H J, et al. Genome-wide association analysis identified molecular markers associated with important tea flavor-related metabolites[J]. *Horticulture Research*, 2021, 8(1): 42.
- [16] ROTZOLL N, DUNKEL A, HOFMANN T. Quantitative studies, taste reconstitution, and omission experiments on the key taste compounds in morel mushrooms (*Morchella deliciosa* Fr.)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(7): 2705–2711.
- [17] LI M W, SHEN Y, LING T J, et al. Analysis of differentiated chemical components between zijuan purple tea and Yunkang green tea by UHPLC-orbitrap-MS/MS combined with chemometrics[J]. *Foods*, 2021, 10(5): 1070.
- [18] 伊晓云, 李晓嫚, 曾建明. 氮肥和留养时间对夏秋茶生长和品质的影响[J]. *茶叶学报*, 2023, 64(4): 14–20.
- YI X Y, LI X M, ZENG J M. Effects of nitrogen fertilization and retention time on growth and quality of summer and autumn teas[J]. *Acta Tea Sinica*, 2023, 64(4): 14–20. (in Chinese)
- [19] 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.
- [20] 梅黎青, 徐雨琴, 刘庆辉, 等. 婺源茶树群体种的适制性研究及品质评价[J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(2): 51–57.
- MEI L Q, XU Y Q, LIU Q H, et al. Study on the processing suitability and quality evaluation of Wuyuan tea landraces[J]. *Food Research and Development*, 2024, 45(2): 51–57. (in Chinese)
- [21] ASTILL C, BIRCH M R, DACOMBE C, et al. Factors affecting the caffeine and polyphenol contents of black and green tea infusions[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(11): 5340–5347.
- [22] 王辉, 杨霁虹, 张晓磊, 等. 蒸汽处理对黟县黑毛茶风味品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(22): 97–106.
- WANG H, YANG J H, ZHANG X L, et al. Effect of steam treatment on the flavor quality of Yixian dark tea[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(22): 97–106. (in Chinese)
- [23] 唐梦婷, 廖献盛, 谷梦雅, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析三种茶坯窖制桂花茶的香气成分[J]. *现代食品科技*, 2024, 40(3): 247–258.
- TANG M T, LIAO X S, GU M Y, et al. Analysis of aromatic compounds in three types of tea dhools scented with *Osmanthus* using HS-SPME-GC-MS[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2024, 40(3): 247–258. (in Chinese)
- [24] YU Z M, YANG Z Y. Understanding different regulatory mechanisms of proteinaceous and non-proteinaceous amino acid formation in tea (*Camellia sinensis*) provides new insights into the safe and effective alteration of tea flavor and function[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(5): 844–858.
- [25] LE GALL G, COLQUHOUN I J, DEFERNEZ M. Metabolite profiling using ¹H NMR spectroscopy for quality assessment of green tea, *Camellia sinensis* (L.)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(4): 692–700.

(责任编辑: 梁子钧)