

茶组植物新资源-元宝山茶的主要化学成分及其抗氧化活性

陈涛林^{1,2}, 陈美丽³, 葛智文⁴, 廖寅平⁴, 王熙富⁵, 乔小燕⁶, 张征⁴, 罗军武^{2*}

(1. 贵州大学茶学院, 贵州贵阳 550025) (2. 湖南农业大学茶学教育部重点实验室, 湖南长沙 410128) (3. 柳州市绿化建设发展中心, 广西柳州 545001) (4. 柳州市农业技术推广中心, 广西柳州 545003) (5. 柳州市林业科学研究所, 广西融水 545300) (6. 广东省农业科学院茶叶研究所, 广东广州 510600)

摘要:以茶组植物新资源元宝山茶和九万山大茶树(对照)的鲜叶固定样、红茶工艺样和绿茶工艺样为材料,分析两种茶主要品质化学成分的差异,采用 DPPH、FRAP 和 ABTS 三种方法对比分析二者的抗氧化活性。结果表明,元宝山茶鲜叶固定样茶多酚、可溶性糖、黄酮、可可碱、没食子酸、DL-C 的含量分别为 31.33%、10.96%、0.41%、2.84%、0.21%、9.28%,显著高于对照茶树鲜叶固定样 ($p<0.05$),其游离氨基酸、咖啡碱、总儿茶素、EGC、EGCG、GCG、ECG 含量分别为 1.17%、0.39%、12.55%、0.21%、1.45%、0.12%、0.86%,显著低于对照九万山大茶树鲜叶固定样 ($p<0.05$)。DPPH IC₅₀ 和 ABTS IC₅₀ 以两个绿茶工艺样最小,其次是两个鲜叶固定样;FRAP IC₅₀ 以元宝山茶绿茶工艺样最小 (225.21 μg/mL),以对照九万山大茶树红茶工艺样最大 (862.63 μg/mL)。元宝山茶各样品的 DPPH IC₅₀ 小于 ABTS IC₅₀ 和 FRAP IC₅₀,均以 FRAP IC₅₀ 最大。相关性分析表明,茶多酚、黄酮和儿茶素类物质的含量与各供试样品的抗氧化活性呈极显著相关 ($p<0.01$)。因此,与茶 (*Camellia sinensis*) 相比元宝山茶属于高茶多酚、高 DL-C、高可溶性糖、高可可碱、低咖啡碱的特异性资源,具有较强的体外抗氧化活性。

关键词: 元宝山茶; 品质; 抗氧化活性

文章编号: 1673-9078(2021)12-87-96

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.12.0189

Chemical Components and Antioxidative Activities of *Camellia*

yungkiangensis var. *yuanbaoshanica* - A New Resources of *Camellia sinensis*

CHEN Taolin^{1,2}, CHEN Meili³, GE Zhiwen⁴, LIAO Yinpin⁴, WANG Xifu⁵, QIAO Xiaoyan⁶, ZHANG Zheng⁴, LUO Junwu^{2*}

(1. Tea College of Guizhou University, Guiyang 550025, China) (2. Key Laboratory of Tea Science, Ministry of Education, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China) (3. Greening Construction Development Center of Liuzhou, Liuzhou 545001, China) (4. Agricultural Technology Extension Center of Liuzhou, Liuzhou 545003, China) (5. Forestry Research Institute of Liuzhou, Rongshui 545300, China) (6. Tea Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510600, China)

Abstract: *Camellia yungkiangensis* var. *yuanbaoshanica* (a new resource in Sect. *Thea* plants) and the *Camellia sinensis* plants grown locally in Jiuwan Mountain was compared in terms of their main quality-controlling components, using fresh leaf, black tea, and green tea samples. Additionally, the antioxidative activities of the two plants were analyzed using 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH), ferric reducing antioxidant power (FRAP), and

引文格式:

陈涛林,陈美丽,葛智文,等.茶组植物新资源-元宝山茶的主要化学成分及其抗氧化活性[J].现代食品科技,2021,37(12):87-96

CHEN Taolin, CHEN Meili, GE Zhiwen, et al. Chemical components and antioxidative activities of *Camellia yungkiangensis* var. *yuanbaoshanica* - a new resources of *Camellia sinensis* [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(12): 87-96

收稿日期: 2021-02-24

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2021]一般 188); 广西壮族自治区科技攻关项目(桂科攻 1598006-5-3); 贵州大学人才引进项目(贵大人基合字(2019)25号); 湖南省研究生科研创新项目(CX2016B284)

作者简介: 陈涛林(1988-),男,博士,讲师,研究方向:茶树遗传育种与资源高效利用, E-mail: 1085826708@qq.com

通讯作者: 罗军武(1957-),男,博士,教授,研究方向:茶树遗传育种与资源高效利用, E-mail: luojunwu11@sina.com

2,2'-azino-bis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) assays. The contents of the tea polyphenols, soluble sugars, flavonoids, theobromine, gallic acid, and DL-catechin (DL-C) in the fresh leaf sample of *Camellia yungkiangensis* var. *yuanbaoshanica* were 31.33%, 10.96%, 0.41%, 2.84%, 0.21%, and 9.28%, respectively, all of which were significantly higher than those of *Camellia sinensis* ($p < 0.05$). By contrast, the contents of free amino acids, caffeine, total catechins, epigallocatechin, epigallocatechin gallate, galocatechin gallate, and epicatechin gallate in the fresh leaf sample of *Camellia yungkiangensis* var. *yuanbaoshanica* were 1.17%, 0.39%, 12.55%, 0.21%, 1.45%, 0.12%, and 0.86%, respectively, which were significantly lower than those observed for *Camellia sinensis* ($p < 0.05$). Moreover, for both plants, the IC_{50} values of the green tea samples against DPPH and ABTS were the lowest, followed by those of the fresh leaf samples. The FRAP IC_{50} value of the green tea sample of *Camellia yungkiangensis* var. *yuanbaoshanica* was the lowest (225.21 $\mu\text{g/mL}$) whereas that of the black tea sample of *Camellia sinensis* was the highest (862.63 $\mu\text{g/mL}$). Furthermore, the DPPH IC_{50} values of all three types of *Camellia yungkiangensis* var. *yuanbaoshanica* samples were all smaller than the respective ABTS and FRAP IC_{50} values, with the FRAP IC_{50} values being the highest. Additionally, the correlation analysis revealed that the tea polyphenol, flavonoid, and catechin contents were significantly related to the antioxidative activities of all the samples ($p < 0.01$). In summary, *Camellia yungkiangensis* var. *yuanbaoshanica* was shown to be a special resource with high contents of tea polyphenols, DL-C, soluble sugars, and theobromine and a low content of caffeine. Importantly, it exhibited stronger antioxidative activities *in vitro* compared to *Camellia sinensis*.

Key words: *Camellia yungkiangensis* var. *yuanbaoshanica*; quality; antioxidative activity

茶叶在我国古代曾被用来治疗多种疾病, 现已成为世界上除水以外的第二大无酒精饮料, 受到世界各国人民的广泛欢迎和喜爱。因其富含儿茶素、鞣质、黄酮类等具有强抗氧化活性的天然有机化合物, 因此, 茶的保健功效在过去几十年以来一直是科研工作者关注的热点, 也使其成为天然抗氧化产品开发的重要来源^[1]。元宝山茶 (*Camellia yungkiangensis* H. T. Chang var. *yuanbaoshanica* Z. W. Ge, Y. P. Liao et T. L. Chen) 是分布于广西融水县境内元宝山海拔 1000 m 以上区域的一种野生茶资源, 被当地老百姓称为“原生茶”, 其叶片光泽性强, 芽叶茸毛较多, 从叶片大小、叶形、叶色、育芽力等方面均明显区别于当地的其它茶树 (*Camellia sinensis*) 资源类型, 经笔者鉴定该资源属于榕江茶 (*Camellia yungkiangensis* H. T. Chang) 的变种, 是茶组植物的又一新资源^[2]。长期以来, 当地老百姓和企业都习惯将其制作成烘青类绿茶饮用, 其成品茶汤色浅绿明亮, 有清花香, 且香气持久高长, 滋味鲜爽、醇厚、回甘明显。研究表明, 该资源多酚、可可碱含量高, 加工绿茶品质独特, 在品种选育和茶叶深加工等方面具有很好的开发潜力和利用价值。

氧自由基是人体细胞代谢过程中产生的一种性质活泼的自由基, 已有的研究表明, 氧自由基的大量积累不仅会导致细胞和组织的损伤, 还会加速机体衰老甚至诱发各种疾病^[3]。长期以来的实践和研究证明, 植物体中存在的多种天然化合物如多酚类、黄酮类等均具有较好的抗氧化和抗衰老作用^[4], 因此, 评价和筛选具有强抗氧化活性的植物资源已成为近年来食品和医药科学研究的新方向^[1,5-8]。

ABTS[2,2'-联氨-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)]^[9]、DPPH (1,1-二苯-2-苦基肼)^[10-11]和 FRAP (铁

离子还原能力)^[12]是目前测定体外抗氧化活性最常用的三种方法, 其原理主要是通过抗氧化剂使自由基或亚铁离子溶液中的电子转移, 从而使溶液颜色发生变化, 利用反应前后的溶液的吸光度大小来评判抗氧化剂的抗氧化活性。这三种方法各从不同角度评价抗氧化剂的抗氧化能力, 不仅操作简单而且灵敏度高、重复性好。

本研究以该资源的鲜叶固定样、红茶工艺样和绿茶工艺样为材料, 以当地九万山地区的大茶树 (*Camellia sinensis*) 鲜叶固定样、红茶工艺样和绿茶工艺样为对照, 在分析比较二者主要品质化学成分差异的基础上, 通过 DPPH、ABTS 和 FRAP 三种方法对二者的抗氧化活性进行对比分析。并通过分析其主要生物活性化合物的含量与抗氧化活性的相关性, 探讨其抗氧化机理, 以初步评价该资源在食品和医药等行业上的应用价值, 为该资源的进一步开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究选取广西元宝山茶的鲜叶固定样、红茶工艺样和绿茶工艺样为材料, 分别编号为 YBS、YBSBT、YBSGT; 以广西九万山大茶树的鲜叶固定样、红茶工艺样和绿茶工艺样为对照, 分别编号为 JWS、JWSBT、JWSGT。于 2017 年 3 月至 4 月分别采集两个资源无病虫害的标准一芽二叶嫩梢, 绿茶工艺样采用鲜叶→摊放→杀青→揉捻→初烘→摊凉→复烘→摊凉的工艺方法进行加工; 红茶工艺样采用鲜叶→萎凋→揉捻→发酵→初烘→摊凉→复烘→摊凉的工艺方法进行

加工; 鲜叶固定样采用蒸青固样法进行固样, 具体方法为: 将采集的新鲜嫩叶置于煮沸的蒸锅上, 利用蒸汽进行快速杀青, 以叶色变暗、嫩茎折而不断为适度, 时间 90~120 s; 将杀青后的鲜叶摊凉至室温后置于 75 °C 烘箱中烘至足干。将足干的样品置于 -20 °C 保存备用。以儿茶素 (含 50% EGCG) 和 Vc 作为阳性对照。

1.2 主要仪器与试剂

1.2.1 主要仪器

高效液相色谱仪 (日本, SHIMADZU); 岛津 SHIMADZU 紫外分光光度计 (UV 2700); 纯水机 (美国, Millipore 公司); C18 色谱柱 (ECOSIL 4.6×150 mm 5 μm C/N EC181546 S/N 4I7501-11)、平头进样器、0.45 μm 的无机膜和有机膜、恒温水浴锅、干燥器 (内装有效变色硅胶干燥剂)、抽滤装置 (玻璃抽气管, 抽滤瓶, 布氏漏斗)、玻质砂芯坩埚、定量滤纸、DHG-9146A 型恒温电热干燥箱 (上海精宏实验设备有限公司、自动控温 ±2 °C); 具盖铝质烘皿、具盖玻璃蒸发皿、分析天平 (感量 0.0001 g) 及实验室常规玻璃仪器。

1.2.2 主要试剂

儿茶素组分标准品 (美国, Sigma 公司); 抗坏血酸 Vc (AR)、醋酸钠 (AR)、三氯化铁 (AR)、高硫酸钾 (AR)、硫酸亚铁 (AR)、酒石酸钾钠 (AR)、磷酸氢二钠 (AR)、磷酸二氢钾 (AR)、茛三酮 (AR)、氯化亚锡 (AR)、酒石酸亚铁 (AR)、碳酸钠 (AR)、福林酚 (AR)、甲醇 (HPLC)、浓硫酸 (AR)、浓盐酸 (AR)、冰醋酸 (HPLC)、N-N 二甲基甲酰胺 (HPLC)、乙腈 (HPLC) 等均购自上海国药集团化学试剂有限公司; 2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐/ABTS (纯度 98%,)、2,4,6-三吡啶基三嗪/TPTZ (纯度 98%) 均购自上海瑞永生物科技有限公司; 1,1-二苯基-2-苦基肼/DPPH (纯度 >97%), 购自梯希爱 (上海) 化成工业发展有限公司; 儿茶素 (含 50% EGCG) 由湖南三福生物科技有限公司提供。

1.3 方法

1.3.1 生化成分的测定方法

1.3.1.1 茶汤制备方法

准确称取 3 g (精确至 0.0001 g) 磨碎试样于 500 mL 锥形瓶中, 加沸蒸馏水 450 mL, 立即移入沸水浴中, 浸提 45 min (每隔 10 min 摇动一次), 浸提完毕后立即趁热减压过滤, 残渣用少量热蒸馏水洗涤 2~3 次。将滤液转入 500 mL 容量瓶中, 冷却后用水定容至刻度, 摇匀备用。

1.3.1.2 常规生化成分的测定方法

水分测定: 参照国家标准 GB/T 8304-2013《茶 水分测定》; 水浸出物测定: 参照国家标准 GB/T 8305-2013《茶 水浸出物测定》; 茶多酚含量测定: 参照国家标准 GB/T 8313-2008《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》; 游离氨基酸总量测定: 参照国家标准 GB/T 8314-2013《茶 游离氨基酸总量的测定》; 黄酮类物质含量测定: 三氯化铝比色法^[13]; 可溶性糖含量测定: 硫酸-蒽酮比色法^[14]。

1.3.1.3 儿茶素、生物碱、没食子酸含量检测方法

色谱柱: ECOSIL C18 4.6×150 mm 5 μm C/N EC181546 S/N 4I7501-11; 流动相: A 相为超纯水; B 相为 N,N-二甲基甲酰胺: 甲醇: 冰醋酸 = 39.5:2:1.5 (V/V/V); 检测波长: 278 nm; 柱温: 30 °C; 流速: 1 mL/min; 进样体积: 10 μL; 梯度洗脱程序见表 1。

表 1 流动相洗脱梯度

Table 1 Mobile phase elution gradient

时间/min	B/%
0.01	9
10.00	14
15.00	23
27.00	36
31.00	36
32.00	9
37.00	stop

1.3.2 抗氧化能力的测定方法

1.3.2.1 DPPH 自由基清除率测定

参考 Chen 等^[15]和 Omp 等^[16]的方法, 具体步骤如下:

(1) 试剂配制

0.5 mmol/L DPPH 溶液 (A): 称取 0.0493 g DPPH, 用甲醇溶解后定容至 250 mL, 摇匀后冷藏保存; 0.1 mol/L 醋酸 (B): 取 5.77 mL 冰醋酸用水定容至 1000 mL; 0.1 mol/L 醋酸钠溶液 (C): 称取 8.2 g 无水醋酸钠用水定容至 1000 mL; 醋酸盐缓冲液 (0.1 mol/L, pH 5.5) (D): 取 0.1 mol/L 醋酸 6.8 mL, 加入 43.2 mL 0.1 mol/L 醋酸钠溶液, 混匀备用; 甲醇-乙酸工作液 (0.1 mol/L, pH 5.5) (E): 取 40 mL 醋酸盐缓冲液 (0.1 mol/L, pH 5.5), 加入 60 mL 甲醇, 混匀备用。

(2) 茶汤的制备

准确称取 3 g (精确至 0.0001 g) 磨碎试样于 500 mL 锥形瓶中, 加沸蒸馏水 450 mL, 立即移入沸水浴中, 浸提 45 min (每隔 10 min 摇动一次), 浸提完毕后立即趁热减压过滤, 残渣用少量热蒸馏水洗涤 2~3 次。将滤液转入 500 mL 容量瓶中, 冷却后用水定容

至刻度, 摇匀, 得到质量浓度为 6 mg/mL 的茶汤作为母液, 将上述母液分别稀释至不同浓度梯度, 作为样品反应液。

(3) 反应体系

将茶汤母液分别稀释至 5、10、20、30、40、50、60 $\mu\text{g/mL}$ 作为样品反应液, 儿茶素和 Vc 作为阳性对照, 浓度分别为 5~100 $\mu\text{g/mL}$ 。准确吸取 2 mL 各浓度样品反应液和阳性对照液, 分别置入包裹有铝箔纸的玻璃试管中, 各试管中依次加入 1 mL 上述 A 溶液和 2 mL 上述 E 溶液, 快速混匀后置于 30 $^{\circ}\text{C}$ 黑暗环境下反应 30 min, 于 517 nm 波长下比色, 以 E 溶液作为比色调零液, 测得吸光值为 A_x 。以蒸馏水作为空白对照, 作相同处理后测得吸光值为 A_0 , 按下式计算 DPPH 自由基清除率:

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\% = [(A_0 - A_x) / A_0] \times 100\%$$

1.3.2.2 ABTS 自由基清除率测定

参考 Arnao 等^[17]和 Thaipong 等^[18]的方法, 具体步骤如下:

(1) 试剂配制

7.4 mmol/L ABTS 储备液 (A): 准确称取 0.4060 g ABTS, 用水定容至 100 mL, 摇匀备用; 2.6 mmol/L 高硫酸钾储备液 (B): 准确称取 0.3514 g 高硫酸钾, 用水定容至 500 mL, 摇匀备用; ABTS⁺储备液 (C): 将 A 溶液和 B 溶液按 1:3 (V/V) 混合, 在室温、黑暗环境下静置 12 h。ABTS⁺工作液 (现配现用) (D): 取 1 mL 经过 12 h 静置的 C 溶液, 加入 10 mL 无水乙醇, 混匀后在 734 nm 波长下测定其吸光度为 $A_0 = 1.1 \pm 0.02$ 。

(2) 反应体系

茶汤母液制备方法同 1.3.2.1, 将母液分别稀释至 20、40、60、100、150、200、300 $\mu\text{g/mL}$ 作为样品反应液, 儿茶素和 Vc 作为阳性对照, 浓度分别为 10~300 $\mu\text{g/mL}$ 。准确吸取 0.5 mL 各浓度样品反应液和阳性对照液, 分别置入包裹有铝箔纸的玻璃试管中, 各试管中分别加入 5 mL D 溶液, 快速混匀后置于黑暗环境下反应 2 h, 于 734 nm 波长下比色, 取 5 mL 无水乙醇, 加入 0.5 mL 样品反应液, 混匀后作为比色调零液, 测得吸光值为 A_x 。按下式计算 ABTS⁺自由基清除率:

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率}/\% = [(A_0 - A_x) / A_0] \times 100$$

1.3.2.3 总抗氧化能力测定

参照 Rusak 等^[19]的方法, 具体步骤如下:

(1) 试剂配制

0.02 mol/L 三氯化铁溶液 (A): 准确称取 0.1625 g FeCl_3 , 用蒸馏水定容至 50 mL, 摇匀后置于避光处保存备用; 10 mmol/L TPTZ 溶液 (B): 准确称取 31.233

mg TPTZ, 用 40 mmol/L 盐酸溶液定容至 10 mL, 摇匀后冷藏保存备用; 0.3 mol/L 醋酸钠缓冲溶液 (C): 准确称取 5.1 g 醋酸钠, 加入 20 mL 冰醋酸, 用水稀释定容至 250 mL, 摇匀后置于避光处保存备用; FRAP 工作液 (现用现配) (D): 将 A、B、C 三个溶液以 1:1:10 (V/V/V) 混合, 冷藏避光保存备用; 40 mmol/L 盐酸溶液 (E): 取浓盐酸 (12 mol/L) 0.1 mL 加水至 30 mL, 置于避光处保存备用; 3 mmol/L FeSO_4 标准溶液 (F): 准确称取 41.71 mg 硫酸亚铁溶于适量的水中, 加入 0.65 mL 18 mol/L 的硫酸, 再加水定容至 50 mL, 并置入小铁钉。

(2) 标准曲线的制作

分别吸取 0.1 mL 浓度为 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mmol/L 的 FeSO_4 标准液, 加入 3 mL FRAP 工作液, 再加入 0.3 mL 超纯水, 快速混匀后准确反应 20 min, 于 593 nm 波长下测定吸光度, 用超纯水调零, 根据浓度和吸光度绘制标准曲线 $y(\text{吸光度}) = Ax(\text{浓度}) + B$, $R^2 = 0.999$ 以上。样品的总抗氧化能力 (FRAP 值) 以达到相同吸光度所需 FeSO_4 的毫摩尔数表示。

(3) 反应体系

茶汤母液制备方法同 1.3.2.1, 将母液分别稀释至 50、100、200、400、600、800 $\mu\text{g/mL}$ 作为样品反应液, 儿茶素和 Vc 作为阳性对照, 浓度分别为 20~1000 $\mu\text{g/mL}$ 。吸取 0.1 mL 的各浓度样品反应液和阳性对照液, 分别置于玻璃试管中, 分别依次加入 3 mL FRAP 工作液和 0.3 mL 超纯水, 快速混匀后准确反应 20 min, 于 593 nm 波长下测定其吸光度, 根据标准曲线计算样品的总抗氧化能力 (FRAP 值)。

1.3.3 数据统计分析方法

数据的基本统计分析采用 EXCEL 2010 软件进行; 采用 SPSS Statistics 22 软件进行 Duncan 多重比较分析和相关性分析。所有数据均采用平均值 \pm 标准差 ($\bar{X} \pm SD$) 表示。

2 结果与讨论

2.1 元宝山茶与对照九万山大茶树各样品的主要品质化学成分分析

主要品质化学成分分析

供试样品的主要生物活性化合物如表 2 所示。由表 2 可知, 元宝山茶与对照九万山大茶树 3 组相同工艺处理样品比较, 茶多酚、儿茶素 (DL-Catechin, DL-C)、可溶性糖、黄酮、可可碱含量均以元宝山茶最高, 且各组样品的含量差异均达到显著水平 ($p < 0.05$)。其中茶多酚含量最高的是元宝山茶鲜叶固

定样, 高达 31.33%; DL-C 含量最高的是元宝山茶绿茶工艺样, 高达 10.01%; 可溶性糖含量最高的是元宝山茶鲜叶固定样, 高达 10.96%, 含量最低的是九万山大茶树红茶工艺样, 仅为 2.35%; 可可碱含量最高的是元宝山茶红茶工艺样, 高达 3.98%, 含量最低的是对照九万山大茶树鲜叶固定样, 仅为 0.27%。游离氨基酸、咖啡碱、表没食子儿茶素 (Epigallocatechin, EGC)、表儿茶素没食子酸酯 (Epicatechin gallate, ECG) 含量均以对照九万山大茶树最高, 且各组样品的含量差异均达到显著水平 ($p < 0.05$)。其中咖啡碱含量最高的是对照九万山大茶树绿茶工艺样, 高达 4.03%, 含量最低的是元宝山茶红茶工艺样, 仅为 0.20%。没食子酸含量最高的是元宝山茶绿茶工艺样 (0.29%), 含量最低的是对照九万山大茶树鲜叶固定

样 (0.04%)。

元宝山茶各样品的总儿茶素、表没食子儿茶素没食子酸酯 (Epigallocatechin gallate, EGCG)、没食子儿茶素没食子酸酯 (Gallocatechin gallate, GCG) 含量均较对照九万山大茶树相同工艺样品低, 其中元宝山茶鲜叶固定样 (12.55%、1.45%、0.12%) 和绿茶工艺样 (13.91%、1.78%、0.16%) 与对照九万山大茶树鲜叶固定样 (16.47%、9.20%、1.30%) 和绿茶工艺样 (17.44%、9.86%、1.41%) 的差异均达到显著水平 ($p < 0.05$), 元宝山茶红茶工艺样 (1.81%、0.52%、0.04%) 与对照九万山大茶树红茶工艺样 (2.04%、0.77%、0.04%) 之间差异无显著性。元宝山茶各样品的表儿茶素 (Epicatechin, EC) 含量均较对照九万山大茶树相同工艺样品高。

表 2 元宝山茶与对照九万山大茶树各样品的主要化学成分及含量 (%)

Table 2 The main chemical compositions and their contents of different samples (%)

化学成分	YBS	YBSBT	YBSGT	JWS	JWSBT	JWSGT
茶多酚	31.33±0.44 ^a	22.08±0.52 ^d	31.69±0.01 ^a	25.29±0.39 ^b	14.44±0.35 ^c	23.61±0.15 ^c
游离氨基酸	1.17±0.16 ^e	1.55±0.18 ^d	1.51±0.11 ^d	3.49±0.16 ^c	4.62±0.22 ^a	4.39±0.18 ^b
可溶性糖	10.96±0.59 ^a	6.30±0.39 ^b	10.52±0.14 ^a	3.79±0.31 ^c	2.35±0.17 ^d	3.53±0.28 ^c
黄酮	0.41±0.02 ^{cd}	1.35±0.05 ^a	0.47±0.01 ^c	0.33±0.01 ^e	1.03±0.08 ^b	0.38±0.01 ^{de}
可可碱	2.84±0.12 ^b	3.98±0.20 ^a	3.04±0.14 ^b	0.27±0.00 ^c	0.32±0.02 ^c	0.46±0.01 ^c
咖啡碱	0.39±0.01 ^d	0.20±0.01 ^e	0.41±0.01 ^d	3.71±0.12 ^b	3.06±0.11 ^c	4.03±0.18 ^a
没食子酸	0.21±0.02 ^b	0.05±0.01 ^d	0.29±0.02 ^a	0.04±0.00 ^d	0.09±0.01 ^c	0.10±0.03 ^c
总儿茶素	12.55±0.06 ^d	1.81±0.01 ^e	13.91±0.08 ^c	16.47±0.52 ^b	2.04±0.25 ^e	17.44±0.60 ^a
EGC	0.21±0.02 ^d	0.01±0.00 ^f	0.30±0.01 ^c	1.72±0.05 ^b	0.11±0.02 ^e	1.81±0.04 ^a
DL-C	9.28±0.03 ^b	0.76±0.00 ^e	10.01±0.03 ^a	1.30±0.04 ^d	0.18±0.01 ^f	1.36±0.03 ^c
EC	0.61±0.00 ^c	0.42±0.00 ^d	0.87±0.01 ^a	0.58±0.04 ^c	0.41±0.06 ^d	0.73±0.03 ^b
EGCG	1.45±0.10 ^d	0.52±0.02 ^e	1.78±0.11 ^c	9.20±0.22 ^b	0.77±0.11 ^e	9.86±0.30 ^a
GCG	0.12±0.01 ^b	0.04±0.00 ^b	0.16±0.01 ^b	1.30±0.11 ^a	0.13±0.04 ^b	1.41±0.14 ^d
ECG	0.86±0.01 ^b	0.05±0.00 ^d	0.79±0.01 ^b	2.37±0.18 ^a	0.43±0.05 ^c	2.27±0.13 ^a

注: 同一行不同小写字母表示差异显著, $p < 0.05$ 。

总体来看, 元宝山茶鲜叶固定样和绿茶工艺样在各成分含量上较为接近, 均具有较高含量的茶多酚、可溶性糖、可可碱、没食子酸、DL-C; 九万山大茶树的鲜叶固定样和绿茶工艺样在各成分含量上也较为接近, 均具有较高含量的游离氨基酸、咖啡碱、总儿茶素、EGC、EGCG、GCG、ECG; 两个红茶工艺样除具有相对较高的黄酮含量外, 在茶多酚和儿茶素总量及组成上的含量均较低。值得注意的是, 从以上结果可以看出, 元宝山茶鲜叶固定样和绿茶工艺样不仅具有高含量的茶多酚, 而且其可溶性糖和可可碱含量最高分别达到 10.96% 和 3.04%, 远远高于以本研究中九万山大茶树为代表的常规茶树 (*Camellia sinensis*) 品种资源, 其中可可碱含量远高于李金^[20]测定的 25 个

茶树品种的可可碱含量 (含量范围为 0.04%~0.34%)。但其咖啡碱含量却较常规茶树品种资源低, 且远低于李金^[20]对 25 个茶树 (*Camellia sinensis*) 品种的测定结果 (含量范围为 2.74%~5.28%), 也远低于李文萃等^[21]对以鸠坑种 (*Camellia sinensis*) 为原料加工绿茶的测定结果 (2.60%~2.70%) 和宋加艳等^[22]对碧香早 (*Camellia sinensis*) 鲜叶原料的测定结果 (3.67%)。另外, 从儿茶素组分分析结果可以看出, 元宝山茶鲜叶固定样和绿茶工艺样的 DL-C 含量 (分别为 9.28%、10.01%) 远高于九万山大茶树鲜叶固定样和绿茶工艺样 (分别为 1.30%、1.36%), 也远高于宋加艳等^[22]对碧香早 (*Camellia sinensis*) 鲜叶原料的测定结果 (0.88%)。这充分说明元宝山茶属于典型的高茶多

酚、高 DL-C、高可溶性糖、高可可碱、低咖啡碱的特异性资源，具有广阔的应用前景。

2.2 元宝山茶与对照九万山大茶树各样品的

抗氧化活性分析

本研究采用三种常用的体外化学抗氧化测定方法测定了元宝山茶鲜叶固定样、红茶工艺样和绿茶工艺样及对照样品的抗氧化活性，以儿茶素（含 50% EGCG）和 Vc 为阳性对照。各样品的 DPPH 自由基清除效果如图 1 所示。由图 1 可知，各样品的 DPPH 自由基清除率与样品质量浓度呈正相关，且在实验浓度 5~60 $\mu\text{g/mL}$ 范围内呈现出明显的量效关系。阳性对照样儿茶素和 Vc 的 DPPH 自由基清除能力大于 6 个茶叶样品，6 个茶叶样品中以元宝山茶绿茶工艺样和九万山大茶树绿茶工艺样的 DPPH 自由基清除能力最强，其次为二者的鲜叶固定样，DPPH 自由基清除力最差的是二者的红茶工艺样。在实验浓度范围内，所

有样品的 DPPH 自由基清除能力大小依次为：儿茶素>Vc>九万山大茶树绿茶工艺样>元宝山茶绿茶工艺样>九万山大茶树鲜叶固定样>元宝山茶鲜叶固定样>元宝山茶红茶工艺样>九万山大茶树红茶工艺样，其 IC_{50} 值分别为 6.07、7.92、16.02、16.31、17.88、18.72、29.19、31.34 $\mu\text{g/mL}$ （表 3）。

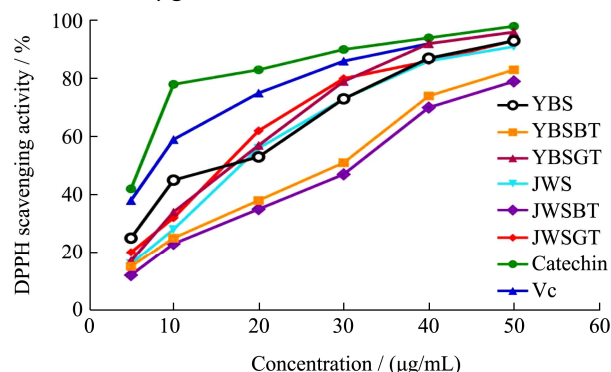


图 1 各样品对 DPPH 自由基的清除效果

Fig.1 Removing effects of each sample on DPPH free radicals

表 3 不同样品的抗氧化活性的 IC_{50} 值 ($\mu\text{g/mL}$)

Table 3 IC_{50} values of antioxidant activity of different samples ($\mu\text{g/mL}$)

组别	YBS	YBSBT	YBSGT	JWS	JWSBT	JWST	Catechin	Vc
DPPH	18.72	29.19	16.31	17.88	31.34	16.02	6.07	7.92
ABTS	137.54	150.01	110.04	113.18	157.07	105.02	21.73	43.58
FRAP	438.86	509.72	225.21	337.69	862.63	354.46	98.80	100.23

注：总抗氧化能力（FRAP）的 IC_{50} 值按 500 $\mu\text{mol/L}$ FeSO_4 对应的样品浓度计算。

各供试样品的 ABTS 自由基清除效果如图 2 所示。由图 2 可知，阳性对照样儿茶素和 Vc 的 ABTS 自由基清除力较 6 个茶叶样品强，而且儿茶素的清除能力大于 Vc。在实验浓度 20~300 $\mu\text{g/mL}$ 范围内，6 个茶叶样品的 ABTS 自由基清除率均与样品质量浓度呈正相关，且呈现出明显的量效关系。在实验浓度范围内，各样品的 ABTS 自由基清除力大小依次为：儿茶素>Vc>九万山大茶树绿茶工艺样>元宝山茶绿茶工艺样>九万山大茶树鲜叶固定样>元宝山茶鲜叶固定样>元宝山茶红茶工艺样>九万山大茶树红茶工艺样，其 IC_{50} 值分别为 21.73、43.58、105.02、110.04、113.18、137.54、150.01、157.07 $\mu\text{g/mL}$ （表 3）。

各供试样品的 FRAP 铁离子还原能力如图 3 所示。由图 3 可知，在实验浓度 50~800 $\mu\text{g/mL}$ 范围内，各样品的 FRAP 铁离子还原能力与样品质量浓度呈正相关，且呈现出明显的量效关系。阳性对照样儿茶素和 Vc 的还原能力较 6 个茶叶样品强。6 个茶叶样品中，以元宝山茶绿茶工艺样的还原能力最强，九万山大茶树红茶工艺样的还原能力相对最弱。在实验浓度范围内，各供试样品的 FRAP 铁离子还原能力大小依次为：

儿茶素>Vc>元宝山茶绿茶工艺样>九万山大茶树鲜叶固定样>九万山大茶树绿茶工艺样>元宝山茶鲜叶固定样>元宝山茶红茶工艺样>九万山大茶树红茶工艺样，其 IC_{50} 值分别为 98.80、100.23、225.21、337.69、354.46、438.86、509.72、862.63 $\mu\text{g/mL}$ （表 3）。

由三个抗氧化指标的 IC_{50} 值可知，元宝山茶鲜叶固定样、元宝山茶红茶工艺样和绿茶工艺样的 DPPH IC_{50} 值均小于 ABTS IC_{50} 值和 FRAP IC_{50} 值，均以 FRAP IC_{50} 值最大。说明元宝山茶清除自由基的能力强于对铁离子的还原能力，且对脂溶性自由基（DPPH）的清除能力高于对水溶性自由基（FRAP）的清除能力。这与乔小燕等^[1]对黄化英红九号的多酚提取物的研究和黄玉凤等^[23]对绿茶水浸出物的研究结果一致。但郑善元等^[24]对单丛茶水提物抗氧化活性的研究表明，单丛茶水提物对水溶性自由基的抑制率明显高于脂溶性自由基，这与本研究的结果恰好相反，导致这一结果的可能原因是由于供试材料属于不同茶类，其主要抗氧化活性成分的组成和含量差异较大。

多酚类物质是茶叶中最主要的生物活性物质，也

是茶叶最主要的抗氧化成分，这类物质极易被氧化，因此它们也是红茶等发酵茶类加工过程中最主要的被氧化物质。酚类物质的氧化不仅决定了发酵茶品质的好坏，还大幅度改变了茶叶中的原始化学物质组成^[25-26]。研究表明，红茶发酵过程中有50%以上酚类物质被氧化，其中儿茶素类物质的氧化比例最高，达80%以上^[27-29]，因此本研究中的两个红茶工艺样在抗氧化活性上较其它样品弱，而多酚类和儿茶素类物质保留较多的鲜叶固定样和绿茶工艺样的抗氧化活性整体较强。

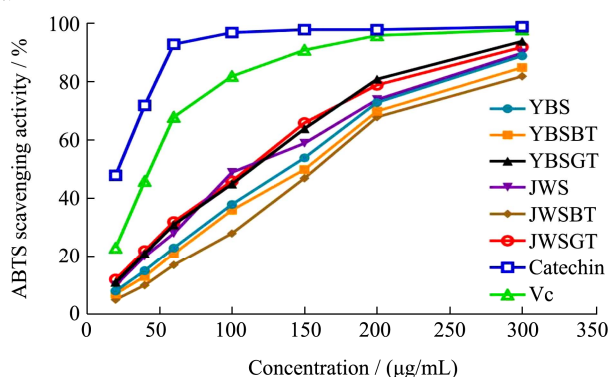


图2 各样品对 ABTS 自由基的清除效果

Fig.2 Removing effect of each sample on ABTS free radicals

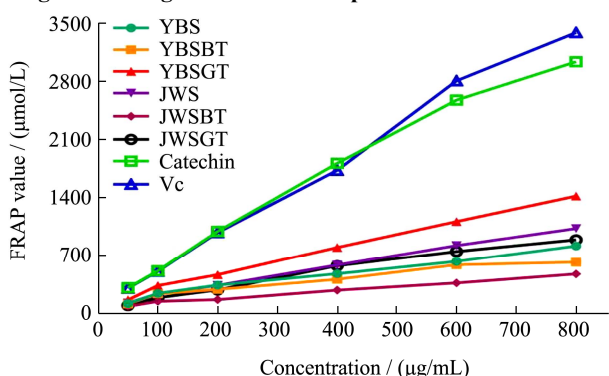


图3 各样品对 FRAP 铁离子的还原效果

Fig.3 Reduction effect of each sample on FRAP iron ions

2.3 各样品中主要生物活性化合物含量与其抗氧化活性的相关性分析

为了揭示各样品的抗氧化活性与其主要化学成分之间的相关性，计算了各抗氧化指标的 IC₅₀ 值与主要化学成分之间的 Pearson 相关系数，结果如表 4 所示。由表 4 可知，各样品的 DPPH、ABTS 和 FRAP 抗氧化活性与茶多酚含量、黄酮含量、儿茶素总量、EC 含量、EGCG 含量均呈极显著相关 ($p < 0.01$)。这与 Lee 等^[30]对绿茶水提物的研究结果和吕海鹏等^[31]对福建白茶的研究结果一致。DPPH 和 ABTS 的 IC₅₀ 值与 EGC 含量、DL-C 含量和 ECG 含量呈极显著相关

($p < 0.01$)，FRAP 的 IC₅₀ 值与 EGC 含量、DL-C 含量和 ECG 含量呈显著相关 ($p < 0.05$)。DPPH 的 IC₅₀ 值与 GCG 含量呈显著相关 ($p < 0.05$)，ABTS 的 IC₅₀ 值与 GCG 含量呈极显著相关 ($p < 0.01$)。游离氨基酸和生物碱等其它化学成分与抗氧化活性之间无显著相关性。

大量研究证明，氧化应激与多种疾病密切相关，因此生物活性物质的抗氧化活性一直以来都受到了广泛关注和研究^[32-35]。本研究对各样品的抗氧化活性和主要化学成分的 Pearson 相关性分析表明，茶多酚、黄酮和儿茶素类物质的含量与各供试样品的抗氧化活性呈极显著相关，表明它们是茶叶中最主要的抗氧化物质，它们的含量及组成比例决定了样品的抗氧化活性大小。而游离氨基酸和生物碱等其它化合物与样品的抗氧化活性无显著相关性。由相关系数大小可知，EGC、DL-C、GCG、ECG 与样品清除 DPPH 自由基和 ABTS 自由基的能力有着更为密切的关联，而与样品的 FRAP 铁离子还原能力的相关性相对较小。此外，从上述分析结果可知，九万山大茶树红茶工艺样在所有样品中的抗氧化活性最低，其茶多酚和儿茶素含量在所有样品中也是最低的，这进一步印证了样品抗氧化活性与化学成分含量的相关性分析结果的正确性。

表 4 主要化学成分与 IC₅₀ 值的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between main chemical components and IC₅₀ values

化学成分	DPPH IC ₅₀	ABTS IC ₅₀	FRAP IC ₅₀
茶多酚	-0.779**	-0.745**	-0.841**
氨基酸	0.170	-0.088	0.436
可溶性糖	-0.397	-0.061	-0.505*
黄酮	-0.932**	-0.825**	-0.644**
可可碱	0.111	0.301	-0.257
咖啡碱	-0.128	-0.376	0.159
没食子酸	-0.409	-0.174	-0.411*
总儿茶素	-0.958**	-0.934**	-0.788**
EGC	-0.602**	-0.798**	-0.442*
DL-C	-0.631**	-0.619**	-0.582*
EC	-0.772**	-0.769**	-0.811**
EGCG	-0.603**	-0.794**	-0.545**
GCG	-0.552*	-0.757**	-0.388
ECG	-0.713**	-0.840**	-0.686*

注：Pearson 相关系数，** $p < 0.01$ ，* $p < 0.05$ 。

3 结论

3.1 总的来说，元宝山茶鲜叶固定样和绿茶工艺样在主要化学成分的含量上较为接近，在茶多酚、可溶性

糖、黄酮、可可碱、没食子酸、DL-C、EC 的含量上, 元宝山茶鲜叶固定样(含量分别为 31.33%、10.96%、0.41%、2.84%、0.21%、9.28%)与元宝山茶绿茶工艺样分别显著高于对照九万山大茶树鲜叶固定样(含量分别为 25.29%、3.79%、0.33%、0.27%、0.04%、1.30%)和绿茶工艺样($p < 0.05$); 在游离氨基酸、咖啡碱、总儿茶素、EGCG、GCG、ECG 的含量上, 元宝山茶鲜叶固定样(含量分别为 1.17%、0.39%、12.55%、1.45%、0.12%、0.86%)和元宝山茶绿茶工艺样分别显著低于对照九万山大茶树鲜叶固定样(含量分别为 3.49%、3.71%、16.47%、9.20%、1.30%、2.37%)和绿茶工艺样($p < 0.05$); 两个材料的红茶工艺样在上述指标上的差异也呈现相同趋势。表明元宝山茶属于典型的高茶多酚、高 DL-C、高可溶性糖、高可可碱、低咖啡碱的特异类型资源。

3.2 在抗氧化活性上, 总体来看, 阳性对照样儿茶素和 Vc 整体上较 6 个茶叶样品的活性强; 在清除 DPPH 自由基和 ABTS 自由基的活性上, 元宝山茶绿茶工艺样与九万山大茶树绿茶工艺样接近, 元宝山茶鲜叶固定样与九万山大茶树鲜叶固定样接近, 元宝山茶红茶工艺样与九万山大茶树红茶工艺样接近; 在 FRAP 铁离子还原能力上, 以元宝山茶绿茶工艺样活性最强, 其次是九万山大茶树鲜叶固定样和绿茶工艺样。从三个抗氧化指标的 IC_{50} 值来看, 元宝山茶鲜叶固定样、元宝山茶红茶工艺样和绿茶工艺样的 DPPH IC_{50} 值(分别为 18.72 $\mu\text{g/mL}$ 、29.19 $\mu\text{g/mL}$ 、16.31 $\mu\text{g/mL}$)均小于其 ABTS IC_{50} 值(分别为 137.54 $\mu\text{g/mL}$ 、150.01 $\mu\text{g/mL}$ 、110.04 $\mu\text{g/mL}$)和 FRAP IC_{50} 值(分别为 438.86 $\mu\text{g/mL}$ 、509.72 $\mu\text{g/mL}$ 、225.21 $\mu\text{g/mL}$), 说明元宝山茶清除自由基的能力要强于对铁离子的还原能力, 且对脂溶性自由基(DPPH)的清除能力明显高于对水溶性自由基(FRAP)的清除能力。抗氧化活性和主要化学成分的 Pearson 相关性分析表明, 茶多酚、黄酮和儿茶素类物质的含量与各供试样品的抗氧化活性呈极显著相关($p < 0.01$), 游离氨基酸和生物碱等其它化合物与样品的抗氧化活性无显著相关性, 表明茶多酚是样品中最主要的抗氧化物质。从上述结果可以看出, 元宝山茶具有较强的体外抗氧化活性, 且其氧化的主要物质基础为高含量的茶多酚, 因此, 从元宝山茶中提取的多酚类物质可以作为抗氧化剂, 在食品和医疗工业中具有潜在的应用价值和前景。

参考文献

[1] 乔小燕,李波,何梓卿,等.黄化英红九号红茶体外抗氧化活性分析[J].农产品质量与安全,2018,5:85-90

QIAO Xiaoyan, LI Bo, HE Ziqing, et al. Analysis on antioxidant activity *in vitro* of Yellowish Yinghong 9 black tea [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2018, 5: 85-90

[2] 陈涛林.广西元宝山一种特异茶饮植物的系统学鉴定与综合评价研究[D].长沙:湖南农业大学,2019

CHEN Taolin. Systematic identification and comprehensive evaluation research on a specific tea plant of Yuanbao mountain in Guangxi [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019

[3] 李勇,孔令青,高洪,等.自由基与疾病研究进展[J].动物医学进展,2008,29(4):85-88

LI Yong, KONG Lingqing, GAO Hong, et al. Progress on free radical and diseases [J]. Progress in Veterinary Medicine, 2008, 29(4): 85-88

[4] 郑瑞生,封辉,戴聪杰,等.植物中抗氧化活性成分研究进展[J].中国农学通报,2010,26(9):85-90

ZHENG Ruisheng, FENG Hui, DAI Congjie, et al. Research progress on active antioxidant components from plants [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(9): 85-90

[5] 张伟豪,翁道玥,宋慧云,等.9种夹竹桃科和大戟科植物抗菌和抗氧化活性测定[J].南方农业学报,2018,49(1):85-90

ZHANG Weihao, WENG Daoyue, SONG Huiyun, et al. Identification on antibacterial activity and antioxidant activity of nine Apocynaceae and Euphorbiaceae plants [J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(1): 85-90

[6] 刘海英,仇农学,姚瑞祺,等.我国86种药食两用植物的抗氧化活性及其与总酚的相关性分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2009,37(2):173-180

LIU Haiying, QIU Nongxue, YAO Ruiqi, et al. Correlation analysis between antioxidant capacity and total phenolic content of 86 Chinese edible herbal extracts [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2009, 37(2): 173-180

[7] 吴迪,刘平平,李萌,等.葛根水提液及葛根发酵液的体外抗氧化及抗衰老功效评价[J].食品工业科技,2019,40(12):285-290,294

WU Di, LIU Pingping, LI Meng, et al. Evaluation of antioxidant and anti-aging effect of pueraria water extracts and pueraria fermentation broth *in vitro* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(12): 285-290, 294

[8] 徐飞飞,丁燕,张海东,等.15种药食同源中药提取物抗氧化及抗骨质疏松活性研究[J].中国食品学报,2017,17(6):240-248

XU Feifei, DING Yan, ZHANG Haidong, et al. Studies on antioxidant and anti-osteoporosis activities of the extracts of fifteen edible traditional Chinese medicine [J]. Journal of

- Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(6): 240-248
- [9] L P Leong, G Shui. An investigation of antioxidant capacity of fruits in Singapore markets [J]. Food Chemistry, 2002, 76(1): 69-75
- [10] W Brand Williams, M E Cuvelier, C Berest. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity [J]. LWT - Food Sci Technol, 1995, 28(1): 25-30
- [11] Maria I Gil, Francisco A Tomas Barberan, Bbetty Hess-Pierce, et al. Antioxidant capacities, phenolic compounds, carotenoids, and vitamin c contents of nectarine, peach, and plum cultivars from California [J]. J Agr Food Chem, 2002, 50(17): 4976-4982
- [12] GUO Changjiang, YANG Jijun, WEI Jingyu, et al. Antioxidant activities of peel, pulp and seed fractions of common fruits as determined by FRAP assay [J]. Nutr Res, 2003, 23(12): 1719-1726
- [13] 马陶陶,张群林,李俊,等.三氯化铝比色法测定中药总黄酮方法的探讨[J].时珍国医国药,2008,19:54-56
MA Taotao, ZHANG Qunlin, LI Jun, et al. AlCl₃ colorimetry for determination of total flavonoids [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2008, 19: 54-56
- [14] 魏晓明,符红,万幼平.硫酸蒽酮比色法测定鹿龟酒中多糖的含量[J].中成药,2000,22:380-382
WEI Xiaoming, FU Hong, WAN Youping. Content determination of polysaccharides in Lu Gui tincture by colorimetry of sulfuric acid anthrone [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2000, 22: 380-382
- [15] Chen Yuchi, Sugiyama Yasumasa, Abe Naoki, et al. DPPH radical-scavenging compounds from Dou-Chi, a soybean fermented food [J]. J Agr Chem Soc of JPN, 2005, 69(5): 999-1006
- [16] Sharma Om P, Bhat Tej K. DPPH antioxidant assay revisited [J]. Food Chem, 2009, 113(4): 1202-1205
- [17] Arnao Marino B, Cano Antonio, Acosta Manuel. The hydrophilic and lipophilic contribution to total antioxidant activity [J]. Food Chem, 2001, 73: 239-244
- [18] Thaipong Kriengsak, Boonprakob Unaroj, Crosby Kevin, et al. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts [J]. J. Food Compos Anal, 2006, 19(7): 669-675
- [19] Rusak Gordana, Komes Drazenka, Likia Sasa, et al. Phenolic content and antioxidative capacity of green and white tea extracts depending on extraction conditions and the solvent used [J]. Food Chem, 2008, 110(4): 852-858
- [20] 李金.茶树咖啡碱与可可碱含量、关键酶基因表达量及cSNP相关性分析[D].合肥:安徽农业大学,2013
LI Jin. A correlation study of caffeine contents with theobromine contents, transcriptional expression and cSNP of key enzyme genes in tea plants [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013
- [21] 李文萃,高华峰,范起业,等.不同炒干条件下夏季日照绿茶的品质变化及香气成分比较[J].现代食品科技,2020,36(11): 255-262
LI Wencui, GAO Huafeng, FAN Qiye, et al. Comparison of the quality and aroma components of Rizhao green tea harvested in summer dried under different roasting conditions [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(11): 255-262
- [22] 宋加艳,何加兴,欧伊伶,等.碧香早夏季鲜叶加工乌龙茶过程中品质成分动态变化[J].现代食品科技,2021,37(2):238-248, 163
SONG Jiayan, HE Jiaying, OU Yiling, et al. Dynamic changes in quality and composition of oolong tea made with fresh Bixiangzao summer tea leaves during processing [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(2): 238-248, 163
- [23] 黄玉凤,蔡明瑛,倪辉,等.单宁酶对绿茶水浸出物中儿茶素及抗氧化活性的影响[J].中国食品学报,2014,14(1):52-59
HUANG Yufeng, CAI Mingying, NI Hui, et al. Effect of tannase treatment on catechin and antioxidant activity of green tea infusion [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(1): 52-59
- [24] 郑善元,陈填烽,郑文杰,等.单从茶水提物清除DPPH和ABTS自由基的光谱学研究[J].光谱学与光谱分析,2010,30(9):2417-2423
ZHENG Shanyuan, CHEN Tianfeng, ZHENG Wenjie, et al. Spectrometric investigation of the antioxidant activities of Dancong tea aqueous extracts against DPPH and ABTS free radicals [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(9): 2417-2423
- [25] 周金伟,陈雪,易有金,等.不同类型茶叶体外抗氧化能力的比较分析[J].中国食品学报,2014,14(8):262-269
ZHOU Jinwei, CHEN Xue, YI Youjin, et al. Comparative analysis on antioxidant capacities of different types of fermented teas *in vitro* [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(8): 262-269
- [26] 范婕,王秋霜,秦丹丹,等.红茶品质及其相关生化因子研究进展[J].食品科学,2020,41(3):246-253
FAN Jie, WANG Qiushuang, QIN Dandan, et al. Recent progress in black tea quality and related biochemical factors [J].

- Food Science, 2020, 41(3): 246-253
- [27] 赵和涛.红茶发酵时主要化学变化及不同发酵方法对工夫红茶品质的影响[J].蚕桑茶叶通讯,1989,2:10-13
ZHAO Hetao. The main chemical changes during the fermentation of black tea and the effects of different fermentation methods on the quality of Gongfu black tea [J]. Newsletter of Sericulture and Tea, 1989, 2: 10-13
- [28] 张天英,支春翔,张浩,等.茶叶发酵过程中多酚变化规律及抗氧化性研究[J].湖北农业科学,2011,50(15):3144-3147
ZHANG Tianying, ZHI Chunxiang, ZHANG Hao, et al. Study on variation features and antioxidant activity of polyphenol in tea fermentation process [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(15): 3144-3147
- [29] 王登良.红碎茶发酵过程中多酚类物质含量变化的研究[J].华南农业大学学报,1992,1:110-113
WANG Dengliang. Study on the content change of polyphenols in broken black tea during fermentation [J]. Journal of South China Agricultural University, 1992, 1: 110-113
- [30] Lee K W, Kim Y J, Lee H J, et al. Cocoa has more phenolic phytochemicals and a higher antioxidant capacity than teas and red wine [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(25): b7292-7295
- [31] 吕海鹏,张悦,陈兴华,等.不同花色种类白茶的抗氧化活性及其主要品质化学成分分析[J].食品科学,2016,37(20):42-50
LYU Haipeng, ZHANG Yue, CHEN Xinghua, et al. Antioxidant activities and major chemical components in tea infusions of different kinds of white tea [J]. Food Science, 2016, 37(20): 42-50
- [32] Finkel Toren, Holbrook Nikki J. Oxidants, oxidative stress and the biology of ageing [J]. Nature, 2000, 408(6809): 239-247
- [33] 杨玲,许速.氧化应激与疾病发生的相关性[J].西南国防医药, 2012,22(11):1268-1270
YANG Ling, XU Su. Correlation between oxidative stress and disease occurrence [J]. Medical Journal of National Defending Forces in Southwest China, 2012, 22(11): 1268-1270
- [34] 李兴太,纪莹.线粒体氧化应激与天然抗氧化剂研究进展[J].食品科学,2015,36(7):268-277
LI Xingtai, JI Ying. Recent advances in mitochondrial oxidative stress and natural antioxidants [J]. Food Science, 2015, 36(7): 268-277
- [35] 王学渊,刘静宜,洪艳平,等.不同类型江西名茶儿茶素含量及体外抗氧化能力比较[J].食品与机械,2019,35(6):152-158
WANG Xueyuan, LIU Jingyi, HONG Yanping, et al. Comparative study on the catechin content and antioxidant capacity of different types of tea in Jiangxi [J]. Food & Machinery, 2019, 35(6): 152-158
-
- (上接第 64 页)
- [32] 张杰.*Cryptococcus curvatus* O3 酵母菌培养及产油脂特性 [J].微生物学通报,2009,36(1):41-45
ZHANG Jie. The cultivation and lipids accumulation of *Cryptococcus curvatus* O3 yeast [J]. Microbiology China, 2009, 36(1): 41-45
- [33] 杨晓蓉,周建新,姚明兰,等.不同储藏条件下稻谷脂肪酸值变化和霉变相关性研究[J].粮食储藏,2006,5:49-52
YANG Xiaorong, ZHOU Jianxin, YAO Minglan, et al. Study on a correlation between the fatty acid value change and mould of paddy rice in different storage conditions [J]. Grain Storage, 2006, 5: 49-52
- [34] Reddy K R N, Reddy C S, Muralidharan K. Detection of *Aspergillus* spp. and aflatoxin B 1 in rice in India [J]. Food Microbiology, 2019, 26(1): 27-31
- [35] Makun H A, Gbodi T A, Akanya O H, et al. Fungi and some mycotoxins contaminating rice (*Oryza sativa*) in Niger state, Nigeria [J]. African Journal of Biotechnology, 2017, 6(2): 99-108
- [36] Francesca De Filippis, Antonietta la Storia, F Villani, et al. Strain-level diversity analysis of *Pseudomonas fragi* after in situ pangenome reconstruction shows distinctive spoilage-associated metabolic traits clearly selected by different storage condition [J]. Applied Environmental Microbiology, 2018, 85(1): e02212-18