Food and Machinery

Volume 37 | Issue 8 Article 4

8-28-2021

Active components, antioxidant capacity and quality evaluation of Sichuan dark tea

ZHU Bo-yu
Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu, Sichuan 610066, China

XIA Chen
Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu, Sichuan 610066, China

LUO Ke-bin
West China School of Public Health, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610044, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: https://www.ifoodmm.cn/journal

Part of the Food Science Commons

Recommended Citation

Bo-yu, ZHU; Chen, XIA; Ke-bin, LUO; Yong-qing, ZHU; Xiao-bo, TANG; and Jian, CHEN (2021) "Active components, antioxidant capacity and quality evaluation of Sichuan dark tea," *Food and Machinery*: Vol. 37: Iss. 8, Article 4.
DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.08.004
Available at: https://www.ifoodmm.cn/journal/vol37/iss8/4

This Fundamental Research is brought to you for free and open access by Food and Machinery. It has been accepted for inclusion in Food and Machinery by an authorized editor of Food and Machinery.

Active components, antioxidant capacity and quality evaluation of Sichuan dark tea

Authors

ZHU Bo-yu, XIA Chen, LUO Ke-bin, ZHU Yong-qing, TANG Xiao-bo, and CHEN Jian

This fundamental research is available in Food and Machinery: https://www.ifoodmm.cn/journal/vol37/iss8/4

DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2021.08.004

四川黑茶活性成分、抗氧化能力及品质评价

Active components, antioxidant capacity and quality evaluation of Sichuan dark tea

朱柏雨[1] 夏 陈[1] 罗棵濒[2] 朱永清[1] 唐晓波[3] 陈 建[1]

ZHU Bo-yu[1] *XIA Chen*[1] *LUO Ke-bin*[2] *ZHU Yong-qing*[1] *TANG Xiao-bo*[3] *CHEN Jian*[1]

(1. 四川省农业科学院农产品加工研究所,四川 成都 610066;2. 四川大学公共卫生学院,四川 成都 610044;3. 四川省农业科学院茶叶研究所,四川 成都 610066)

(1. *Institute of Agro-Products Processing Science and Technology*, *Sichuan Academy of Agricultural Sciences*, *Chengdu*, *Sichuan* 610066, *China*; 2. *West China School of Public Health*, *Sichuan University*, *Chengdu*, *Sichuan* 610044, *China*; 3. *Tea Research Institute*, *Sichuan Academy of Agricultural Sciences*, *Chengdu*, *Sichuan* 610066, *China*)

摘要:目的:以 26 种市售四川黑茶(S1～S26)为材料,分析茶多酚单体、咖啡碱(CAF)、总多酚(TPC)和总黄酮(TFC)含量,并考察其体外抗氧化活性。**方法:**采用梯度洗脱分析茶多酚单体、咖啡碱含量,分别采用福林酚法和化学分析法分析总多酚和总黄酮含量,并以 DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除能力评价抗氧化活性。**结果:**黑茶中没食子酸(GA)、没食子儿茶素(GC)、表没食子儿茶素(EGC)、儿茶素(C)、表儿茶素(EC)、表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)、没食子儿茶素没食子酸酯(GCG)、表没食子儿茶素(ECG)、儿茶素没食子酸酯(CG)、咖啡碱(CAF)、总酚酸(TPC)、总黄酮(TFC)含量分别为 0.26～19.64,0.72～4.73,0.00～20.28,0.00～0.95,0.00～6.06,0.32～9.44,0.62～63.12,0.29～17.08,0.21～1.81,9.53～44.43,20.96～279.05,7.92～17.49 mg/g。ABTS 自由基清除力以水溶性维生素 E 当量计算为 33.49～232.87 mg/g,DPPH 自由基清除力以水溶性维生素 E 当量计算为 45.26～237.59 mg/g。相关性分析表明 DPPH 自由基清除能力与 10 个单体化合物以及总多酚和总黄酮含量均存在显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)的正相关;ABTS 自由基清除能力与 GC、GA、CAF 含量存在极显著正相关($P<0.01$),与 TPC 和 TFC 含量存在显著正相关($P<0.05$)。主成分分析表明 EGCG、C、TPC 3 个成分累计贡献率为 87.566%。**结论:**S16、S23、S19 3 种黑茶得分较高,品质较好。

关键词:黑茶;茶多酚;咖啡碱;总黄酮;抗氧化能力

Abstract: **Objective**: The contents of tea polyphenol monomer, caffeine (CAF), total polyphenols acid (TPC) and total flavonoids (TFC) in 26 kinds of commercial Sichuan dark tea (S1～S26) were analyzed, and the *in vitro* antioxidant activities were investigated, to provide a theoretical basis for the quality evaluation of Sichuan dark tea. **Methods**: Gradient elution was used to analyze the content of tea polyphenol monomer and caffeine. The contents of TPC and TFC were determined by the folin phenol method and chemical analysis method, respectively. The antioxidant activity was evaluated by DPPH and ABTS radical scavenging capacity. **Results**: The content of gallic acid (GA), gallocatechin (GC), epigallocatechin (EGC), catechin (C), epicatechin (EC), epigallocatechin gallate (EGCG), gallocatechin gallate (GCG), epicatechin gallate, catechin gallate (CG), caffeine (CAF), total polyphenols acid (TPC), total flavonoids (TFC) were 0.26～19.64, 0.72～4.73, 0.00～20.28, 0.00～0.95, 0.00～6.06, 0.32～9.44, 0.62～63.12, 0.29～17.08, 0.21～1.81, 9.53～44.43, 20.96～279.05 and 7.92～17.49 mg/g, respectively. The free radical scavenging activity of ABTS was 33.49～232.87 mg/g based on a water-soluble V_E equivalent. Moreover, that of DPPH was 45.26～237.59 mg/g correlation analysis results showed that DPPH scavenging abilities positively correlated with the ten monomers, CAF, TPC, and TFC ($P<0.05$ or $P<0.01$). However, ABTS radical scavenging abilities positively correlated with the contents of GC, GA, and CAF ($P<0.01$), also positively correlated with TPC and TFC ($P<0.05$). **Conclusion**: PCA results showed that the cumulative contribution rate of EGCG, C and TPC was 87.566%. According to the comprehensive analysis, S16, S23 and S19 had higher scores,

基金项目:四川省科技计划资助重点研发项目(编号:2019YFN0178)

作者简介:朱柏雨,男,四川省农业科学院研究实习员,硕士。

通信作者:陈建(1969—),男,四川省农业科学院研究员,博士。E-mail:1046652698@qq.com

收稿日期:2020-12-01

implying relatively better quality. The variations of the results should be attributed to the raw materials, production technology, and storage conditions of dark tea.

Keywords: Sichuan dark tea; tea polyphenols; caffeine; total flavonoids; antioxidant ability

茶叶中富含多种天然活性物质,包括茶多酚、生物碱、氨基酸和茶色素等[1],其中茶多酚是茶叶中发挥生物活性的重要物质[2]。研究表明,茶多酚具有抗炎[3]、抗癌细胞增殖[4]、抗心血管疾病[5]和抗糖尿病[6]等作用。此外咖啡碱和茶碱等物质也是茶叶中重要的呈味物质和活性成分,具有强心、促进代谢[7]、利尿[8]、助消化[9]等功效。黑茶主产于四川、湖南、湖北、云南、广西等地[10],是由茶树的鲜叶或成熟的新梢经杀青、渥堆、干燥等工艺制成[11],原料一般较为粗老,儿茶素化合物含量通常低于嫩叶[12]。黑茶的渥堆是加工过程中的关键工艺,该工艺会发生氧化还原、美拉德反应等化学变化,这些变化可能促使茶多酚单体相互转化及分解,且不同的渥堆工艺生产的黑茶中茶多酚等功效物质可能有巨大差异[1]。曹永等[13]以湖南产区的天尖茶、茯砖茶和百两茶,云南的普洱茶以及广西的六堡茶为原料,考察了不同产区黑茶的简单儿茶素(表没食子儿茶素、儿茶素、表儿茶素)和酯型儿茶素(表儿茶素没食子酸酯、表没食子儿茶素没食子酸酯)含量,结果显示天尖、茯砖和百两茶提取物中儿茶素的总量高于普洱茶和六堡茶,酯型儿茶素含量则以天尖茶和百两茶占优。王斌等[14]分析了26种安化黑茶水溶性成分,并与干燥未加工的茶叶及新鲜茶叶作对比。结果表明,26种安化黑茶的没食子酸、没食子儿茶素、表没食子儿茶素、咖啡碱、表儿茶素、表没食子儿茶素没食子酸酯、表儿茶素没食子酸酯、没食子儿茶素没食子酸酯、儿茶素没食子酸酯含量差异较大,与新鲜茶叶对比后发现除了咖啡碱外,其他化合物的含量均存在显著下降的情况,部分物质下降至1/20以下。刘婷婷等[15]研究发现黑茶在发酵过程中,其主要品质成分及生物酶活性均存在显著变化。随着黑茶发酵程度的不断加深,茶多酚、儿茶素、茶褐素、纤维素、原果胶、蛋白质、氨基酸、可溶性糖含量均在渥堆工艺中下降,其含量降幅分别为69.2%,43.7%,52.4%,9.6%,60.0%,62.3%,66.2%,37.2%,多酚氧化酶、过氧化物酶、纤维素酶、果胶酶活性分别提高了246%,371%,371%,223%,咖啡碱含量则无显著变化。

四川黑茶历史悠久,早在乾隆年间就分为"南路边茶"和"西路边茶",但目前关于四川黑茶中茶多酚和黄酮及功效的研究较少,同时对于市售四川黑茶的品质评价也未见报道。因此研究拟对26种市售四川黑茶产品进行茶多酚和咖啡碱含量分析,通过自由基清除试验评价其抗氧化能力,并以相关性及主成分分析对市售26种四川黑茶(S1~S26)进行品质评价,以期为四川黑茶研发、生产和质量控制提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

26种黑茶:四川市售;

没食子酸(GA)、没食子儿茶素(GC)、儿茶素(C)、表没食子儿茶素(EGC)、表儿茶素(EC)、没食子儿茶素没食子酸酯(GCG)、表儿茶素没食子酸酯(ECG)、儿茶素没食子酸酯(CG)标准品:北京索莱宝科技有限公司;

表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)标准品:上海源叶生物科技有限公司;

咖啡碱(CAF)标准品:成都普菲德生物技术有限公司;

甲醇、乙腈:色谱纯,美国MREDA公司;

甲酸、福林酚、芦丁、水溶性维生素E、过硫酸钾、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH):分析纯,成都市科龙化工试剂厂;

试验用水为超纯水。

1.2 仪器与设备

高速万能粉碎机:FW-100型,北京科伟永兴仪器有限公司;

数控超声波清洗器:KH2200DE型,昆山禾创超声仪器有限公司;

台式低速离心机:TD-4Z型,四川蜀科仪器有限公司;

酶标仪:ELX-800型,美国伯腾仪器有限公司;

高效液相色谱仪:1290型,美国Agilent公司;

优普系列超纯水机:UPC-1-10T型,成都超纯科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 黑茶多酚单体及生物碱含量分析

(1) 对照品的制备:单体酚与咖啡碱对照品20.0 mg,以甲醇溶解定容至5 mL,以二倍稀释法制备不同浓度的对照品溶液,冷藏备用。

(2) 样品的制备:将供试样品粉碎过筛,精密称取供试黑茶1.000 0 g于锥形瓶中,加入80%甲醇8 mL,40 ℃超声30 min后离心,收集上清液至25 mL容量瓶,残渣再以同样方法重复提取2次,合并3次提取液,定容备用。

(3) 色谱条件:采用梯度洗脱,Eclipse Plus C_{18}柱(2.1 mm×50 mm,1.8 μm);检测波长280 nm;柱温35 ℃;流速0.3 mL/min;进样量1 μL;流动相A为1%甲酸—水溶液,B为乙腈,洗脱条件:0~2 min,5%~10% B;2~10 min,10%~20% B;10~15 min,20%~40% B;15~17 min,40%~70% B;17~20 min,70%~95% B。

(4) 多酚单体及生物碱含量计算:经HPLC分析后,

根据供试品各化合物峰面积及标准曲线按式(1)计算含量。

$$W=\frac{C\times D\times V}{m\times 1\ 000},\tag{1}$$

式中：

W——含量，mg/g；

C——样品质量浓度，μg/mL；

D——稀释倍数；

V——样品体积，mL；

m——样品质量，g。

1.3.2　总多酚(TPC)含量分析　采用福林酚法[16]，按式(1)计算 TPC 含量(以没食子酸当量计)。

1.3.3　总黄酮(TFC)含量分析　参照宋莹等[17]的方法，并按式(1)计算 TFC 含量(以芦丁当量计)。

1.3.4　抗氧化活性分析

(1) ABTS 自由基清除能力：参照夏陈等[18]的方法，以水溶性维生素 E 为横坐标，吸光值为纵坐标绘制标准曲线，据标准曲线计算 ABTS 自由基清除力。

(2) DPPH 自由基清除能力：参照邓俊琳等[19]的方法，以水溶性维生素 E 为横坐标，吸光值为纵坐标绘制标准曲线，据标准曲线计算 DPPH 自由基清除力。

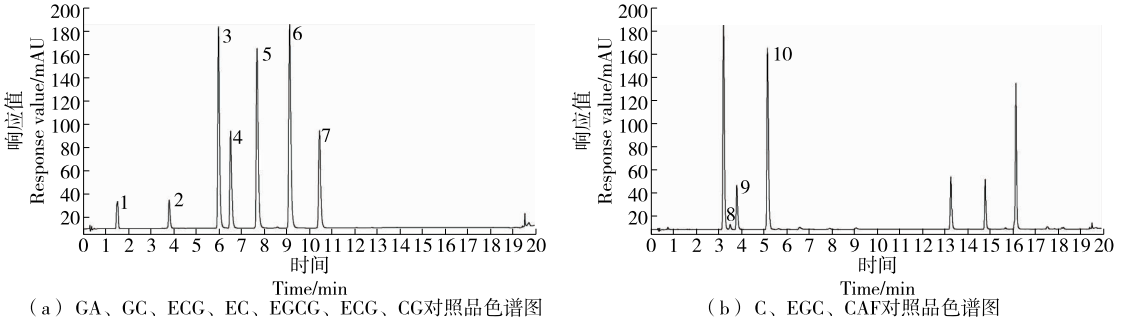
1.4　数据处理与分析

所有数据均为 3 次重复取平均值，使用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理并通过 SPSS 20.0 采用 Turkey 方法对数据进行分析。

2　结果与分析

2.1　四川黑茶活性成分含量

对照品和样品的 HPLC 图谱如图 1 和图 2 所示。由图 1 可知，10 个对照品在 20 min 内均得到较好的分离且峰形较好，26 个样品色谱图中的 10 个目标物的保留时间与对照品色谱图一致。



(a) GA、GC、ECG、EC、EGCG、ECG、CG对照品色谱图　　(b) C、EGC、CAF对照品色谱图

1. GA　2. GC　3. ECG　4. EC　5. EGCG　6. ECG　7. CG　8. C　9. EGC　10. CAF

图 1　对照品 HPLC 图谱

Figure 1　HPLC chromatogram of reference substance (280 nm)

以各对照品浓度为横坐标，峰面积为纵坐标制图得标准曲线回归方程如表 1 所示，10 个目标物的回归方程 R^2 在 0.998 7～0.999 9，表明各回归方程在其线性范围内线性关系良好，可以用于各物质含量计算。

2.1.1　GA 含量　由表 2 可知，26 个黑茶样品中 GA 含量差异较大，其中 S21 的 GA 含量显著高于其他样品($P<0.05$)，而 S11 的 GA 含量最低。已有研究[20]表明，绿茶中GA含量大多低于 1.00 mg/g，试验的26个样品中有 25 个样品的 GA 含量高于 1.00 mg/g，表明茶叶经过发酵、渥堆、干燥等加工后能够显著提高 GA 含量，可能是在发酵等加工过程中的酯化儿茶素经过微生物作用、酶转化以及美拉德反应的共同作用下降解形成GA

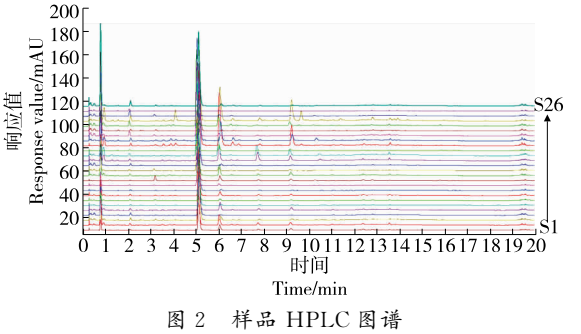


图 2　样品 HPLC 图谱

Figure 2　HPLC chromatogram of the sample (280 nm)

表 1　回归方程及线性范围

Table 1　Control regression equation and linear range

成分	线性回归方程	R^2	线性范围/(μg·mL^{-1})
GA	$y=5.575\ 2x-12.024$	0.999 6	1.72～440.00
GC	$y=0.378\ 4x-0.616\ 4$	0.998 7	15.68～784.00
EGC	$y=0.322\ 9x+0.237\ 6$	0.999 9	15.68～784.00
C	$y=1.075\ 9x+0.004\ 3$	0.999 9	7.84～784.00
CAF	$y=5.010\ 7x-28.005$	0.999 9	4.90～784.00
EC	$y=1.581\ 9x-6.418\ 2$	0.999 3	6.80～435.55
EGCG	$y=2.887\ 7x-15.209$	0.999 2	6.80～435.50
GCG	$y=2.952\ 5x-15.285$	0.999 2	6.80～435.55
ECG	$y=3.483x-15.813$	0.999 3	6.80～435.55
CG	$y=3.266x-9.228\ 9$	0.999 4	6.81～217.77

等物质[21]。

2.1.2　GC、GCG、C、EGCG、ECG 含量　26 个样品中 GC、GCG、C、EGCG、EGC 5 个多酚单体含量差异较大(表 3)。与绿茶[22]相比,黑茶的 GC 和 GCG 含量均相对较高,但 C、EGCG 和 EGC 含量则远低于绿茶。黑茶在渥堆及干燥过程中由于温度升高使GC和GCG含量升高,而C、

表 2　四川黑茶 GA 含量†

Table 2　GA content of Sichuan dark tea　　mg/g

样品	含量	样品	含量	样品	含量	样品	含量
S1	2.66±0.01^{e}	S8	4.67±0.00^{i}	S15	3.93±0.01^{g}	S22	12.09±0.22^{s}
S2	8.43±0.02^{n}	S9	1.03±0.00^{b}	S16	5.00±0.07^{j}	S23	9.49±0.00^{q}
S3	9.84±0.03^{r}	S10	1.96±0.00^{c}	S17	2.42±0.02^{d}	S24	9.06±0.01^{o}
S4	7.15±0.05^{k}	S11	0.26±0.00^{a}	S18	2.76±0.06^{f}	S25	8.03±0.03^{m}
S5	9.40±0.03^{p}	S12	7.36±0.01^{l}	S19	16.59±0.01^{u}	S26	3.96±0.10^{g}
S6	2.42±0.01^{d}	S13	4.30±0.01^{h}	S20	17.63±0.02^{v}	均值	7.14
S7	1.91±0.01^{c}	S14	13.58±0.02^{t}	S21	19.64±0.12^{w}		

† 字母不同代表不同样品之间差异显著($P<0.05$)。

表 3　四川黑茶 GC、GCG、C、EGCG、ECG 含量†

Table 3　Contents of GC, GCG, C, EGCG and ECG in Sichuan dark tea　　mg/g

样品	GC	GCG	C	EGCG	ECG
S1	1.27±0.01^{c}	4.60±0.01^{g}	—	1.20±0.00^{k}	1.37±0.00^{g}
S2	2.85±0.02^{m}	8.61±0.01^{i}	0.31±0.02^{g}	2.18±0.00^{p}	2.16±0.05^{h}
S3	1.81±0.00^{f}	3.05±0.01^{e}	0.16±0.00^{a}	0.93±0.00^{h}	1.23±0.00^{f}
S4	2.28±0.02^{i}	0.62±0.00^{a}	—	0.32±0.00^{a}	0.37±0.00^{a}
S5	2.48±0.01^{jk}	6.49±0.02^{h}	0.24±0.00^{c}	1.76±0.01^{o}	2.11±0.01^{h}
S6	1.58±0.00^{e}	1.12±0.00^{abc}	—	0.51±0.00^{d}	0.50±0.01^{b}
S7	0.76±0.01^{a}	1.41±0.01^{bc}	—	0.57±0.00^{e}	0.54±0.01^{b}
S8	1.82±0.05^{f}	3.18±0.01^{e}	—	0.98±0.00^{i}	1.01±0.01^{de}
S9	0.72±0.00^{a}	1.13±0.00^{abc}	—	0.58±0.00^{e}	0.48±0.00^{b}
S10	0.96±0.01^{b}	1.67±0.00^{cd}	—	0.39±0.00^{b}	0.61±0.00^{b}
S11	0.72±0.03^{a}	4.09±0.00^{f}	—	1.07±0.01^{j}	1.33±0.00^{g}
S12	1.96±0.00^{g}	8.78±0.01^{i}	—	1.50±0.00^{m}	2.56±0.00^{i}
S13	1.33±0.01^{d}	2.83±0.01^{e}	0.17±0.00^{b}	0.84±0.00^{g}	1.10±0.00^{e}
S14	3.86±0.00^{q}	1.56±0.00^{bc}	0.27±0.03^{d}	0.57±0.00^{e}	0.75±0.00^{c}
S15	3.79±0.12^{p}	13.20±0.01^{j}	—	7.49±0.14^{r}	3.88±0.01^{k}
S16	3.78±0.05^{p}	15.13±0.22^{k}	0.91±0.02^{m}	9.44±0.00^{s}	4.74±0.07^{l}
S17	3.27±0.01^{o}	4.59±0.01^{g}	—	0.43±0.00^{bc}	1.43±0.00^{g}
S18	2.51±0.02^{k}	54.01±0.13^{n}	0.68±0.00^{l}	1.65±0.07^{n}	16.19±0.04^{o}
S19	3.76±0.00^{p}	15.88±0.01^{l}	0.63±0.00^{k}	1.39±0.00^{l}	4.86±0.08^{m}
S20	2.58±0.01^{l}	2.05±0.00^{d}	0.28±0.00^{e}	0.80±0.00^{f}	0.95±0.01^{d}
S21	4.73±0.02^{s}	0.99±0.01^{ab}	0.30±0.00^{f}	0.47±0.00^{cd}	0.49±0.00^{b}
S22	2.96±0.05^{n}	8.84±0.16^{i}	0.47±0.01^{i}	1.07±0.02^{j}	3.27±0.06^{j}
S23	4.67±0.00^{r}	30.87±0.01^{m}	0.95±0.00^{n}	2.87±0.00^{q}	17.08±0.00^{p}
S24	2.13±0.01^{h}	1.09±0.00^{abc}	0.37±0.00^{h}	0.39±0.00^{b}	0.61±0.00^{b}
S25	2.45±0.00^{j}	0.62±0.00^{a}	—	0.32±0.00^{a}	0.29±0.00^{a}
S26	2.25±0.06^{i}	63.12±1.75^{o}	0.50±0.01^{j}	1.51±0.08^{m}	13.56±0.37^{n}
均值	2.40	9.98	0.24	1.59	3.21

† "—"表示未检出;字母不同代表不同样品之间差异显著($P<0.05$)。

EGCG 和 EGC 的含量下降。有研究[23-24]表明，儿茶素类化合物会发生个体异构化，尤其是在较高的温度下更明显。随着温度的升高，部分儿茶素类化合物的含量减少，而其异构体含量增加，部分儿茶素类化合物从上位结构(EGC 和 EGCG)变化为非上位结构(GC 和 GCG)[25]。因此四川黑茶 C、EGCG、EGC 含量较绿茶有所下降，而 GC、GCG 的含量升高。

2.1.3　EC、ECG、CG、CAF 含量　已有研究[20]表明，绿茶中 EC 含量在 0.64～10.20 mg/g，ECG 含量在 2.18～13.40 mg/g。由表 4 可知，26 个黑茶样品中的 EC 和 ECG 含量均低于绿茶，是由于黑茶在制作中需经过渥堆、发酵等工艺步骤，在氧化酶类(多酚氧化酶、过氧化物酶等)的作用下黑茶中几乎所有简单儿茶素(C、EC、EGC)和酯儿茶素(ECG、EGCG)含量显著降低，从而形成黑茶独有的颜色、风味和香气[26]。与其他单体酚相比，26 个样品中的 CG 含量均处于较低的水平，而且各样品间的 CG 含量差异较大。所有供试品中咖啡碱含量占 10 种化合物总量 24.50%以上且与绿茶[22]相比差异不大，表明咖啡碱性质稳定，在黑茶加工过程中不易受温度、发酵及氧化影响[27]。

2.2　黑茶总多酚含量

通过福林酚法，以没食子酸浓度为横坐标，吸光值为纵坐标，制图得总多酚标准曲线：$y=0.001\ 8x+0.042\ 6$，线性范围 2.34～300.00 μg/mL，其 $R^2=0.999\ 1$，表明在该范围内，线性关系良好，可用于总多酚含量计算。

黑茶中含有大量的多酚类化合物，主要以游离或结合的方式存在，其能够发挥降血脂、防止血栓和动脉硬化的形成。由表 5 可知，26 个黑茶样品中的总多酚含量差异较大，其中 S23 总多酚含量为 S11 总多酚含量的 10 倍以上。多酚是一类在同一个苯环上有多个酚羟基取代的芳香羧酸类化合物，由于其含有多个酚羟基取代，因而结构不稳定[28]，在一定的光照、水分、温度、酶及酸碱条件

表 4　四川黑茶 EGC、CAF、EC、CG 含量†

Table 4　Contents of EGC, CAF, EC and CG in Sichuan dark tea　　mg/g

样品	EGC	CAF	EC	CG	样品	EGC	CAF	EC	CG
S1	1.34 ± 0.00^{bc}	15.60 ± 0.02^{d}	0.63 ± 0.00^{c}	0.30 ± 0.01^{ef}	S15	2.52 ± 0.01^{g}	31.20 ± 0.03^{o}	1.70 ± 0.00^{i}	1.37 ± 0.01^{r}
S2	5.14 ± 0.16^{k}	26.37 ± 0.09^{k}	1.31 ± 0.00^{h}	0.39 ± 0.01^{k}	S16	4.13 ± 0.06^{j}	37.48 ± 0.56^{s}	1.88 ± 0.14^{j}	1.81 ± 0.22^{s}
S3	1.68 ± 0.00^{d}	30.34 ± 0.10^{n}	0.81 ± 0.00^{ef}	0.35 ± 0.01^{i}	S17	1.41 ± 0.00^{c}	19.63 ± 0.05^{g}	0.70 ± 0.00^{d}	0.29 ± 0.01^{e}
S4	0.85 ± 0.01^{a}	36.23 ± 0.28^{q}	0.28 ± 0.00^{a}	0.32 ± 0.00^{g}	S18	13.47 ± 0.03^{n}	38.48 ± 0.11^{u}	6.06 ± 0.07^{o}	0.87 ± 0.13^{p}
S5	3.47 ± 0.01^{i}	26.87 ± 0.10^{l}	1.26 ± 0.01^{h}	0.50 ± 0.02^{m}	S19	15.10 ± 0.03^{o}	38.34 ± 0.02^{u}	4.71 ± 0.00^{m}	0.51 ± 0.01^{no}
S6	—	15.08 ± 0.05^{c}	—	0.26 ± 0.00^{c}	S20	2.23 ± 0.00^{f}	36.47 ± 0.04^{q}	0.95 ± 0.00^{g}	0.33 ± 0.00^{g}
S7	—	18.58 ± 0.00^{f}	0.29 ± 0.00^{a}	0.22 ± 0.01^{b}	S21	2.84 ± 0.02^{h}	31.79 ± 0.19^{p}	0.81 ± 0.00^{ef}	0.30 ± 0.01^{f}
S8	1.40 ± 0.00^{c}	20.61 ± 0.02^{h}	0.59 ± 0.00^{c}	0.28 ± 0.01^{d}	S22	8.49 ± 0.15^{m}	37.82 ± 0.72^{t}	3.15 ± 0.02^{k}	0.47 ± 0.16^{l}
S9	—	16.51 ± 0.06^{e}	—	0.22 ± 0.01^{b}	S23	6.73 ± 0.01^{l}	44.43 ± 0.01^{w}	3.58 ± 0.00^{l}	1.22 ± 0.01^{q}
S10	1.20 ± 0.01^{b}	14.50 ± 0.02^{b}	0.46 ± 0.00^{b}	0.22 ± 0.00^{b}	S24	2.66 ± 0.00^{g}	38.80 ± 0.05^{v}	1.33 ± 0.00^{h}	0.52 ± 0.00^{o}
S11	1.53 ± 0.00^{cd}	9.53 ± 0.00^{a}	0.43 ± 0.01^{b}	0.21 ± 0.00^{a}	S25	0.91 ± 0.00^{a}	22.58 ± 0.08^{i}	0.44 ± 0.00^{b}	0.22 ± 0.00^{b}
S12	0.84 ± 0.00^{a}	25.80 ± 0.03^{j}	1.74 ± 0.00^{i}	0.36 ± 0.01^{i}	S26	20.28 ± 0.55^{p}	36.21 ± 0.98^{q}	5.90 ± 0.08^{n}	0.51 ± 0.02^{n}
S13	2.00 ± 0.00^{e}	27.83 ± 0.07^{m}	0.78 ± 0.00^{e}	0.38 ± 0.01^{j}	均值	4.06	28.24	1.56	0.49
S14	2.36 ± 0.28^{f}	37.12 ± 0.02^{r}	0.86 ± 0.00^{f}	0.34 ± 0.00^{h}					

† “—”表示未检出；字母不同代表不同样品之间差异显著($P<0.05$)。

表 5　四川黑茶总多酚含量†

Table 5　Total polyphenol content of Sichuan dark tea　　mg/g

样品	含量	样品	含量	样品	含量	样品	含量
S1	68.75 ± 1.77^{e}	S8	81.04 ± 2.60^{f}	S15	55.86 ± 2.08^{d}	S22	141.93 ± 4.10^{j}
S2	147.81 ± 2.54^{jk}	S9	31.22 ± 1.36^{b}	S16	156.11 ± 4.98^{k}	S23	279.05 ± 8.58^{n}
S3	104.80 ± 0.83^{g}	S10	42.15 ± 0.92^{c}	S17	76.58 ± 2.50^{ef}	S24	147.06 ± 3.58^{jk}
S4	85.23 ± 2.55^{f}	S11	20.96 ± 0.58^{a}	S18	102.38 ± 3.36^{g}	S25	107.70 ± 2.94^{gh}
S5	144.23 ± 3.31^{j}	S12	126.54 ± 3.52^{i}	S19	214.04 ± 7.76^{m}	S26	165.73 ± 4.01^{l}
S6	43.37 ± 0.91^{c}	S13	76.18 ± 2.53^{ef}	S20	115.10 ± 4.20^{h}	均值	109.07
S7	45.39 ± 1.80^{c}	S14	124.25 ± 3.31^{i}	S21	132.48 ± 6.03^{i}		

† 字母不同代表不同样品之间差异显著($P<0.05$)。

下易发生开环反应而使其降解或异构化[29]。黑茶的渥堆、发酵等工艺实际上是一个氧化还原过程,因而不同生产厂家、不同工艺条件的黑茶样品的总多酚含量不尽相同。

2.3 黑茶总黄酮含量

总黄酮的标准曲线为 $y=0.001x+0.051\ 7$,线性范围 0.98～500.00 μg/mL,其 $R^2=0.999\ 1$,表明在该范围内,线性关系良好,可用于总黄酮含量计算。

由表 6 可知,26 个四川黑茶样品的总黄酮含量差异较小,维持在相对稳定的水平内。有研究[30]表明,黄酮类化合物在 50 ℃以下、光照、弱酸及中性条件下均保持良好的稳定性。黑茶在渥堆过程中,其温度多在 45 ℃以下[31],因而能够保证黄酮类化合物不被降解,而黄酮类化合物含量差异可能是由其原料差异所致。

2.4 抗氧化活性

2.4.1 ABTS 自由基清除能力　以水溶性维生素 E 的质量浓度(μg/mL)为横坐标,吸光值为纵坐标,制图得标准曲线回归方程:$y=-0.006x+0.473\ 5$,线性范围 1.48～47.50 μg/mL,其 $R^2=0.997\ 5$,表明在该范围内,线性关系良好,可用于四川黑茶 ABTS 自由基清除计算。

由表 7 可知,26 个样品的 ABTS 自由基清除能力差异较大。相关性分析结果表明,ABTS 自由基清除能力与 GA、GC、CAF 以及 TPC、TFC 含量存在一定的相关性(表 9),由于黑茶的渥堆、发酵等加工过程中的美拉德反应及氧化还原反应对这些活性物质的含量均存在较大的影响,因此不同样品间 ABTS 自由基清除能力的差异也可能是由加工工艺不同所致。

2.4.2 DPPH 自由基清除能力　以水溶性维生素 E 的质量浓度(μg/mL)为横坐标,吸光值为纵坐标,制图得到 DPPH 自由基清除回归方程为 $y=0.942\ 8x-0.420\ 2$,线性范围:13.00～104.00 μg/mL,其 $R^2=0.997\ 0$,表明在该范围内,线性关系良好,可用于四川黑茶 DPPH 自由基清除计算。

由表 8 可知,26 个样品的 DPPH 自由基清除能力差异较大,显著性分析结果表明黑茶的 DPPH 自由基清除能力与单体酚、CAF、TPC 和 TFC 含量均存在显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)的正相关(表 9),而黑茶的制作工艺同样会对这些物质的含量产生较大的影响,从而导致样品间 DPPH 自由基的清除能力不尽相同。

2.5 相关性分析

如表 9 所示,简单儿茶素(C、EC、EGC)和酯儿茶素(EGC、GCG、EGCG)之间均存在显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)的相关性。四川黑茶样品的 DPPH 自由基清除能力与 GA 和 EGCG 含量呈显著正相关($P<0.05$),与其他单体化合物、总多酚及总黄酮含量呈极显著正相关($P<0.01$)。ABTS 自由基的清除能力与 GA、GC 和 CAF

表 6　四川黑茶总黄酮含量†

Table 6　Contents of total flavonoids in Sichuan dark tea　　mg/g

样品	含量	样品	含量	样品	含量	样品	含量
S1	11.63±0.10^{e}	S8	12.59±1.86^{e}	S15	8.98±0.93^{ab}	S22	13.69±0.51^{fgh}
S2	16.35±0.93^{ij}	S9	8.65±0.40^{ab}	S16	12.93±0.73^{e}	S23	14.75±1.62^{h}
S3	13.63±1.17^{fgh}	S10	12.63±0.91^{e}	S17	10.98±1.00^{cd}	S24	13.06±1.05^{fgh}
S4	10.06±0.20^{cd}	S11	7.92±0.65^{a}	S18	17.49±1.83^{j}	S25	11.34±0.83^{e}
S5	16.10±1.21^{hij}	S12	9.67±0.51^{abc}	S19	16.44±1.80^{ij}	S26	13.93±0.75^{fgh}
S6	9.49±0.52^{abc}	S13	10.30±0.85^{cd}	S20	15.34±0.76^{hij}	均值	12.41
S7	9.63±0.67^{abc}	S14	14.18±1.77^{h}	S21	10.95±0.33^{cd}		

† 字母不同代表不同样品之间差异显著($P<0.05$)。

表 7　四川黑茶对 ABTS 自由基清除能力†

Table 7　Scavenging ability of Sichuan dark tea to ABTS free radical　　mg/g

样品	清除力	样品	清除力	样品	清除力	样品	清除力
S1	137.02±5.20^{def}	S8	145.20±7.54^{ef}	S15	232.87±6.69^{k}	S22	223.60±7.88^{jk}
S2	220.82±6.02^{jk}	S9	63.99±3.36^{b}	S16	127.41±6.13^{de}	S23	169.43±2.13^{g}
S3	172.57±6.38^{g}	S10	77.94±5.21^{b}	S17	148.33±4.62^{ef}	S24	174.65±5.11^{g}
S4	151.13±5.39^{f}	S11	119.05±5.42^{cd}	S18	184.40±6.36^{gh}	S25	134.57±4.31^{def}
S5	216.81±6.36^{jk}	S12	217.35±6.72^{jk}	S19	150.08±3.08^{f}	S26	184.75±4.51^{gh}
S6	105.43±10.49^{c}	S13	133.18±6.75d^{ef}	S20	226.59±9.31^{jk}	均值	159.79
S7	33.49±2.29^{a}	S14	195.01±11.32^{hi}	S21	208.98±5.46^{ij}		

† 字母不同代表不同样品之间差异显著($P<0.05$)。

表 8　四川黑茶对 DPPH 自由基清除能力†

Table 8　DPPH free radical scavenging ability of Sichuan dark tea　　mg/g

样品	清除力	样品	清除力	样品	清除力	样品	清除力
S1	110.52±4.34[de]	S8	113.89±4.33[e]	S15	207.51±6.78[hi]	S22	199.58±7.36[h]
S2	186.56±5.00[g]	S9	50.34±1.76[a]	S16	215.15±7.47[i]	S23	237.59±7.63[j]
S3	137.40±4.20[f]	S10	47.83±0.99[a]	S17	111.71±4.45[de]	S24	132.49±5.04[f]
S4	96.86±2.47[d]	S11	82.30±1.76[c]	S18	237.59±6.73[j]	S25	101.97±3.55d[e]
S5	183.00±6.54[g]	S12	178.11±6.45[g]	S19	219.17±6.26[i]	S26	235.40±7.73[j]
S6	70.46±1.82[b]	S13	108.00±6.04[de]	S20	184.52±3.71[g]	均值	143.42
S7	45.26±0.87[a]	S14	96.80±3.43[d]	S21	181.99±4.22[g]		

† 字母不同代表不同样品之间差异显著($P<0.05$)。

表 9　四川黑茶中单体酚、咖啡碱、总多酚、总黄酮和抗氧化活性的相关性†

Table 9　Correlation analysis of monomer phenols, CAF, TPC, TFC and antioxidant activity in Sichuan dark tea

指标	GA	GC	EGC	C	CAF	EC	EGCG	GCG	ECG	CG	TPC	TFC	DPPH	ABTS
GA	1.000	0.641**	0.179	0.360	0.611**	0.145	−0.116	−0.131	−0.061	−0.022	0.600**	0.475*	0.438*	0.595**
GC		1.000	0.324	0.612**	0.705**	0.379	0.412*	0.229	0.360	0.552**	0.708**	0.413*	0.685**	0.600**
EGC			1.000	0.662**	0.548**	0.948**	0.118	0.861**	0.745**	0.282	0.567**	0.602**	0.709**	0.306
C				1.000	0.771**	0.725**	0.430*	0.603**	0.723**	0.675**	0.814**	0.665**	0.761**	0.288
CAF					1.000	0.621**	0.287	0.449*	0.529**	0.539**	0.780**	0.597**	0.746**	0.585**
EC						1.000	0.208	0.906**	0.861**	0.425*	0.607**	0.605**	0.789**	0.359
EGCG							1.000	0.242	0.274	0.916**	0.202	0.030	0.494*	0.187
GCG								1.000	0.921**	0.428*	0.428*	0.449*	0.668**	0.231
ECG									1.000	0.540**	0.571**	0.478*	0.691**	0.220
CG										1.000	0.433*	0.216	0.637**	0.238
TPC											1.000	0.666**	0.753**	0.484*
TFC												1.000	0.616**	0.462*
DPPH													1.000	0.723**
ABTS														1.000

† *代表显著相关,$P<0.05$;**代表极显著相关,$P<0.01$。

含量呈极显著正相关($P<0.01$),与其他单体化合物无显著的相关性,表明抗氧化活性与多酚的含量以及种类有关。

2.6　主成分分析及综合评价

对 26 个四川黑茶样品的 9 个单体酚、CAF、TPC 和 TFC 含量共计 12 个成分利用 SPSS 进行主成分分析(PCA),结果见表 10。经分析提取 EGCG、C、TPC 3 个主成分进行四川黑茶样品最终的综合评价(表 11)。结果显示 S16、S23、S19 3 个四川黑茶的综合得分分别为 7.44,6.66,3.85。因此当以 EGCG、C、TPC 3 个成分作综合评价,S16、S23、S19 3 个四川黑茶更为优质。

表 10　四川黑茶的单体酚、咖啡碱、总多酚和总黄酮的主成分分析结果

Table 10　Principal component analysis of phenols, CAF, TPC and TFC in Sichuan dark tea

%

成分	贡献率	累积贡献率	成分	贡献率	累积贡献率
EGCG	55.610	55.610	EC	1.680	97.865
C	17.133	72.743	CAF	0.928	98.793
TPC	14.823	87.566	EGC	0.692	99.485
GCG	3.763	91.329	GC	0.362	99.848
CG	2.745	94.074	GA	0.106	99.953
ECG	2.112	96.185	TFC	0.047	100.000

表 11 四川黑茶综合评价得分及排名

Table 11 Comprehensive evaluation score and ranking of Sichuan dark tea

样品	得分	排名	样品	得分	排名	样品	得分	排名
S1	−3.15	21	S10	−4.01	24	S19	3.85	3
S2	1.08	10	S11	−5.06	26	S20	1.88	8
S3	−0.28	13	S12	−1.10	16	S21	3.11	4
S4	−0.71	14	S13	−1.87	19	S22	1.89	7
S5	0.95	11	S14	2.29	6	S23	6.66	2
S6	−3.50	22	S15	3.02	5	S24	1.17	9
S7	−3.97	23	S16	7.44	1	S25	−1.20	17
S8	−2.11	20	S17	−1.74	18	S26	−0.73	15
S9	−4.40	25	S18	0.41	12			

3 结论

杀青、渥堆、干燥等过程中,四川黑茶的简单儿茶素、酯儿茶素以及总多酚含量均存在显著降低的现象,而总黄酮、咖啡碱的含量变化较小,与前人[14]对其他产区黑茶的分析结果相近。此外研究发现四川产区内的黑茶活性成分含量差异较大,产品品质参差不齐,可能是由于黑茶产品的生产原料、生产工艺及贮藏条件等多种因素导致,这也从侧面反映四川黑茶的生产工艺及质量标准不统一。研究仅对四川市售的 26 个黑茶进行了活性成分及抗氧化能力分析,并未结合其生产工艺,因此有必要将黑茶品质与其生产工艺相结合进行深入研究,建立黑茶生产从原料到最终产品的规范化标准。

参考文献

[1] 宛晓春, 李大祥, 张正竹, 等. 茶叶生物化学研究进展[J]. 茶叶科学, 2015, 35(1): 1-10.
WAN Xiao-chun, LI Da-xiang, ZHANG Zheng-zhu, et al. Research advance on tea biochemistry[J]. Journal of Tea Science, 2015, 35(1): 1-10.

[2] 隋世江, 韩京峰, 隽英华. 超声波辅助提取绿茶中茶多酚的方法研究[J]. 辽宁农业科学, 2019, 5(3): 22-25.
SUI Shi-jiang, HAN Jing-feng, JUAN Ying-hua. Study on the assisted extraction of tea polyphenols in green tea by ultrasonic wave[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2019, 5(3): 22-25.

[3] 葛华, 吴峰, 赵安东, 等. 茶多酚抗菌抗炎及菌群调节作用的研究进展[J]. 生物技术通讯, 2019, 30(6): 845-850.
GE Hua, WU Feng, ZHAO An-dong, et al. Advances in anti- bacterial, anti- inflammatory and flora regulation of tea polyphenols[J]. Letters in Biotechnology, 2019, 30(6): 845-850.

[4] NASRIN R, SOMAYYEH A. Is there any association between green tea consumption and the risk of head and neck squamous cell carcinoma: Finding from a case-control study[J]. Archives of Oral Biology, 2019, 98(2): 280-284.

[5] 张姝萍, 王岳飞, 徐平. 茶多酚对动脉粥样硬化的预防作用与机理研究进展[J]. 茶叶科学, 2019, 39(3): 231-246.
ZHANG Shu-ping, WANG Yue-fei, XU Ping. Prevention of tea polyphenols on atherosclerosis and relative mechanisms[J]. Journal of Tea Science, 2019, 39(3): 231-246.

[6] 韦芳媚, 陈春, 李超, 等. 桑叶提取物、茶多酚及其复配物的抗氧化和降血糖活性[J]. 食品工业科技, 2018, 39(21): 305-311.
WEI Fang-mei, CHEN Chun, LI Chao, et al. Antioxidant and hypoglycemic activities of mulberry leaves extract, tea polyphenols and their compounds[J]. Science and Technology of Food Industy, 2018, 39(21): 305-311.

[7] NOZOMI T, SHUTARO I, AKIYOSHI S, et al. Bidirectional ventricular tachycardia induced by caffeine poisoning[J]. American Journal of Emergency Medicine, 2019, 37(11): 2118.e1-2118.e3.

[8] 杨金川, 白雪梅. HPLC 法同时测定茶叶中儿茶素类和咖啡因的含量[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(2): 99-102.
YANG Jin-chuan, BAI Xue-mei. Simultaneous determination of catechins and caffeine content in tea by HPLC [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2020, 48(2): 99-102.

[9] WU Fu-fang, LIU Rui-rui, SHEN Xiao-bao, et al. Study on the interaction and antioxidant activity of theophylline and theobromine with SOD by spectra and calculation[J]. Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy, 2019, 215: 354-362.

[10] 赵熙, 郑红发, 包小村, 等. 六大茶类的工艺创新与机具配置[J]. 茶叶通讯, 2013, 40(4): 21-25.
ZHAO Xi, ZHENG Hong-fa, BAO Xiao-cun, et al. Processing innovation and mechanical equipment of six teas[J]. Tea Communication, 2013, 40(4): 21-25.

[11] 蒋萍萍, 武琳琳, 王铁龙, 等. 黑茶的研究进展[J]. 农产品加工, 2020, 22(3): 73-78.
JIANG Ping-ping, WU Lin-lin, WANG Tie-long, et al. Research progress of black tea[J]. Farm Products Processing, 2020, 22(3): 73-78.

[12] 李张伟. 凤凰单丛茶老枞茶树和新枞茶树茶叶的香气和生化成分比较[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(5): 228-234.
LI Zhang-wei. Comparison of aroma chemical components between old and new tea trees of Fenghuang dancong tea[J]. Food

and Fermentation Industries, 2019, 45(5): 228-234.

[13] 曹永, 赵谋明, 赵甜甜, 等. 不同黑茶提取物功能性成分分析及活性评价[J]. 食品科学, 2017, 38(18): 54-59.
CAO Yong, ZHAO Mou-ming, ZHAO Tian-tian, et al. Functional components and activities of different dark tea extracts[J]. Food Science, 2017, 38(18): 54-59.

[14] 王斌, 邓慧芸, 吴茂, 等. 安化黑茶水溶性成分高效液相色谱指纹图谱及定量分析[J]. 食品科学, 2017, 38(20): 125-130.
WANG Bin, DENG Hui-yun, WU-Mao, et al. HPLC fingerint and quantitadve analysis of water-soluble components in Anhua dark tea[J]. Food Science, 2017, 38(20): 125-130.

[15] 刘婷婷, 齐桂年, 邹瑶, 等. 四川黑茶渥堆过程中主要品质成分及酶类活性变化[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(4): 112-116.
LIU Ting-ting, QI Gui-nian, ZOU Yao, et al. Variations in quaiity ingredients and primary enzymes activities of Sichuan dark tea during post-fermentation[J]. Joumal of South China Agricultural University, 2015, 36(4): 112-116.

[16] 朱超锋, 黄诗林, 孙柳青, 等. 香蕉皮多酚物质提取工艺优化及其抗氧化性研究[J]. 广东化工, 2019, 46(11): 34-36.
ZHU Chao-feng, HUANG Shi-lin, SUN Liu-qing, et al. Optimization of extraction technology of polyphenols from banana peel and the research of its oxidation resistance[J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(11): 34-36.

[17] 宋莹, 刘思含, 尝霞, 等. 紫薯粉发酵工艺优化及抗氧化能力分析[J]. 食品与机械, 2020, 36(1): 216-229.
SONG Ying, LIU Si-han, CHANG Xia, et al. Optimization of fermentation process and analysis of antioxidant capacity of purple sweet potato powder[J]. Food & Machinery, 2020, 36(1): 216-229.

[18] 夏陈, 向卓亚, 朱永清, 等. 不同品种青稞中总多酚、总黄酮含量及抗氧化性比较[J]. 食品与机械, 2020, 36(6): 162-165.
XIA Chen, XIANG Zhuo-ya, ZHU Yong-qing, et al. Comparative analysis of total flavonoids, total polyphenols and antioxidant properties in different varieties of Hulless barley[J]. Food & Machinery, 2020, 36(6): 162-165.

[19] 邓俊琳, 朱永清, 夏陈, 等. 绞股蓝中 6 种多酚化合物的 HPLC 检测及其醇提液的抗氧化活性[J]. 食品科学, 2019, 40(14): 265-269.
DENG Jun-lin, ZHU Yong-qing, XIA Chen, et al. Phenolic contents and antioxidant activity in methanol extracts from *Gynostemma pentaphyllum* (Thumb.) Makino[J]. Food Science, 2019, 40(14): 265-269.

[20] 支红峰, 杨璐, 胡中豪, 等. 超高效液相色谱同时测定绿茶中 10 种活性物质[J]. 食品工业, 2019, 40(2): 306-309.
ZHI Hong-feng, YANG Lu, HU Zhong-hao, et al. Simultaneous determination of 10 active substances in green tea using ultra high performance liquid chromatography[J]. The Food Industry, 2019, 40(2): 306-309.

[21] JIANG Hao, YU Feng, QIN Li, et al. Dynamic change in amino acids, catechins, alkaloids, and gallic acid in six types of tea processed from the same batch of fresh tea (*Camellia sinensis* L.) leaves[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2019, 77: 28-38.

[22] YE Yu-long, YAN Jiang-na, CUI Ji-lai, et al. Dynamic changes in amino acids, catechins, caffeine and gallic acid in green tea during withering[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2017, 66: 98-108.

[23] PARK J H, LEE J M, CHOY J, et al. Effect of far-infrared heater on the physicochemical characteristics of green tea during processing[J]. Journal of Food Biochemistry, 2010, 33(2): 149-162.

[24] ANANINGSIH V K, SHARMA A, ZHOU Wei-biao. Green tea catechins during food processing and storage: A review on stability and detection[J]. Food Research International, 2013, 50(2): 469-479.

[25] NATTHAWUDDHI D, YUKIHARU O. The influence of processing conditions on catechin, caffeine and chlorophyll contents of green tea (*Camelia sinensis*) leaves and infusions[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 116: 1-8.

[26] TANMOY S, VIJAYAKUMAR C, SHRILEKHA D, et al. Assessing biochemical changes during standardization of fermentation time and temperature for manufacturing quality black tea[J]. Journal of Food Science & Technology, 2015, 52(4): 2 387-2 393.

[27] XU Jie, HU Feng-lin, WAN Xiao-chun, 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(11): 176-184.

[28] 林鹏飞, 贾小舟, 祁燕, 等. 酚酸类化合物研究进展[J]. 广东化工, 2017, 44(1): 50-52.
LIN Peng-fei, JIA Xiao-zhou, QI Yan, et al. Research progress on phenolic acids[J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(1): 50-52.

[29] 王引航, 李俊含, 孙晋德, 等. 匀浆负压空化法提取棕榈藤酚酸类化合物及其光热稳定性研究[J]. 植物学研究, 2018, 7(1): 37-44.
WANG Yin-hang, LI Jun-han, SUN Jin-de, et al. Homogenate negative pressure cavitation extraction of phenolic acid from rattan and stability analysis of being heated and being UV irradiation[J]. Botanical Research, 2018, 7(1): 37-44.

[30] 夏宇, 王梦茹, 杨奎, 等. 匀浆辅助负压空化提取楠竹叶总黄酮及其稳定性研究[J]. 植物学研究, 2018, 7(1): 21-28.
XIA Yu, WANG Meng-ru, YANG Kui, et al. Homogenate-assisted negative-pressure cavitation extraction of total flavonoids from phyllostachys pubescens leaves for stability analysis[J]. Botanical Research, 2018, 7(1): 21-28.

[31] 赵熙, 黄浩, 钟妮, 等. 响应面法优化黑毛茶渥堆工艺及其品质评价[J]. 植物学研究, 2020, 47(2): 275-281.
ZHAO Xi, HUANG Hao, ZHONG Ni, et al. Optimization of pile-fermentation process for dark green tea by response surface methodology and evaluation of its quality[J]. Botanical Research, 2020, 47(2): 275-281.