

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.08.034

# 冲泡条件对湘西黄金茶生物活性成分及其抗氧化活性的影响

Effect of brewing conditions on bioactive compounds of Xiangxi golden tea and it's antioxidant activity

陈亮<sup>1,2</sup> 余佺<sup>2</sup> 游湘淘<sup>1</sup> 金旋鹭<sup>2</sup>

CHEN Liang<sup>1,2</sup> YU Ji<sup>2</sup> YOU Xiang-tao<sup>1</sup> JIN Xuan-lu<sup>2</sup>

丁家云<sup>2</sup> 麻成金<sup>1,2</sup> 姚茂君<sup>1,2</sup>

DING Jia-yun<sup>2</sup> MA Chen-jin<sup>1,2</sup> YAO Mao-jun<sup>1,2</sup>

(1. 吉首大学林产化工工程湖南省重点实验室, 湖南 张家界 427000;

2. 吉首大学茶叶科学研究所, 湖南 吉首 416000)

(1. Key Laboratory of Human Forest Products and Chemical Industry Engineering, Jishou University, Zhangjiajie, Hunan 427000, China; 2. Institute of Tea Science, Jishou University, Jishou, Hunan 416000, China)

**摘要:**在不同冲泡温度与时间条件下,通过紫外—可见分光光度计测定了黄金茶茶多酚、游离氨基酸的浸出变化规律,建立浸出动力学模型,并通过 DPPH 法、ABTS 法测定茶汤抗氧化性能。结果显示,冲泡温度为 60~90 ℃ 时,黄金茶茶汤中茶多酚、游离氨基酸含量及 DPPH、ABTS 清除率随温度升高而增加;冲泡时间为 1~30 min 时,茶汤中的茶多酚、游离氨基酸浓度及 DPPH、ABTS 清除率随时间延长而增加,30 min 后趋于稳定。茶多酚、游离氨基酸的浸出遵循二阶动力学反应,温度与浸出速率常数  $k$  有良好的线性关系,茶多酚表观活化能为  $4.3126 \times 10^4$  J/mol,游离氨基酸表观活化能为  $1.2389 \times 10^4$  J/mol。

**关键词:**黄金茶;冲泡条件;茶多酚;游离氨基酸;浸出动力学;抗氧化性能

**Abstract:** In different brewing temperature and time, the changes of tea polyphenols and free amino acids brewing from Xiangxi golden tea, which were detected by UV-visible spectrophotometer, was gotten, and the extraction kinetics model was established. The antioxidant properties were also determined by DPPH and ABTS clearance rate. Results, the concentration of tea polyphenols and free amino acids, DPPH and

ABTS clearance rate increased with the brewing temperature rising 60~90 ℃, and the brewing time prolonged 1~30 min, and which tended to be stable after 30 min. The Extraction rate of the tea polyphenols and amino acids followed a second-order reaction, and the extraction rate constant  $k$  and temperature had a good linear correlation. The apparent activation energy of polyphenols and free amino acids were  $4.3126 \times 10^4$  J/mol and  $1.2389 \times 10^4$  J/mol, respectively.

**Keywords:** golden tea; brewing conditions; tea polyphenols; free amino acids; extraction kinetics; antioxidant properties

绿茶具有缓解动脉粥样硬化、预防癌症、抗炎抑菌、抗衰老等<sup>[1-4]</sup>功效,其抗氧化能力是体现其功效的重要指标<sup>[5]</sup>。目前,普遍认为的功效因子有茶多酚、氨基酸、黄酮等生物活性成分,可有效清除自由基,抑制活性氧的形成<sup>[6]</sup>,从而对涉及氧化应激的病理起作用。在绿茶冲泡过程中,抗氧化物质通过冲泡浸出而进入茶汤,从而起抗氧化作用,而抗氧化物质因组成、含量的不同,表现出的抗氧化性能也不同。Draženka 等<sup>[7]</sup>发现绿茶中总酚类物质的浸出量与冲泡温度呈正相关,且茶汤的抗氧化能力与总酚类物质的浸出量直接相关。Pérez-Burillo 等<sup>[8]</sup>发现白茶多酚类物质的浸出量随冲泡时间和水温的增加而增加,茶汤清除自由基的能力呈线性增长,且在水温 98 ℃,冲泡时间 7 min 时,茶汤的感官品质及清除自由基的能力较好。以上研究主要集中在不同冲泡条件对茶汤

**基金项目:**吉首大学校级科研项目资助(编号:Jdy1841)

**作者简介:**陈亮,男,吉首大学在读硕士研究生。

**通信作者:**姚茂君(1968—),男,吉首大学教授,硕士。

E-mail: yaomaojun@126.com

**收稿日期:**2019-05-07

中滋味成分浸出量、感官品质及抗氧化性能的影响,尚未见对绿茶(如黄金茶)中生物活性成分浸出规律及抗氧化性能的研究报道。

湘西黄金茶起源于湘西自治州保靖县葫芦镇黄金村,是湖南省优良的地方群体品种,也是湘西古老、特异、珍稀的地方茶树品种资源<sup>[9]</sup>。湘西黄金茶以其高氨基酸含量(高达 7.47%)<sup>[10]</sup>的特点,受国内外广大茶叶爱好者的青睐。试验拟以湘西黄金茶为研究对象,考察不同冲泡温度、时间下茶多酚、游离氨基酸的浸出量,并建立浸出动力学模型;采用 ABTS 法、DPPH 法测定茶汤体外抗氧化性能,并探讨不同冲泡温度、时间对其抗氧化性能的影响。旨在深入了解湘西黄金茶的营养价值,为湘西黄金茶深加工产品的开发提供指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

湘西黄金茶:湘西自治州保靖县葫芦镇黄金村提供;

茶多酚标准品:江苏永健医药科技有限公司;

L-谷氨酸标准品:合肥博美生物科技有限责任公司;

1,1-二苯基-2-三硝基(DPPH)、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS):阿拉丁试剂有限公司;

碳酸钠、Folin-酚试剂、没食子酸、无水乙醇、茛三酮等:分析纯。

#### 1.1.2 仪器与设备

紫外可见一分光光度计:UV-2450 型,日本岛津公司;

集热式恒温加热磁力搅拌器:DF-101T 型,上海力辰邦西仪器科技有限公司;

电子天平:FA224 型,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;

数字恒温水浴锅:HH-2 型,常州智博瑞仪器有限公司。

### 1.2 方 法

1.2.1 茶汤的制备 准确称取黄金茶 8 g,迅速加入到 1 600 mL 蒸馏水中,水温分别为 60,70,80,90 °C,以一定转速搅拌并保持恒温。分别在 1,2,3,4,5,10,15,20,25,30,40,50,60 min 时用无菌注射器吸取一定量的茶汤,经 0.45 μm 有机微孔滤膜过滤,迅速放入 4 °C 保存。

1.2.2 茶多酚含量的测定 采用何健等<sup>[11]</sup>方法并稍作修改。以没食子酸为标准品,分别配置 10,20,30,40,50 μg/mL 没食子酸标准溶液,绘制标准曲线( $y = 3.761x + 0.0065, R^2 = 0.9975$ )。取 1 mL 茶汤样品加入 5.0 mL 体积分数 10% Folin-酚试剂,摇匀,反应 10 min,

加入 4.0 mL 质量分数 7.5% 碳酸钠溶液,用蒸馏水定容至刻度,摇匀,于 30 °C 水浴恒温 1 h,避光冷却 10 min,测定 765 nm 处吸光值,以没食子酸当量 GAE 表示(mg GAE/mL)。

1.2.3 游离氨基酸含量的测定 采用 Yin 等<sup>[12]</sup>方法并稍作修改。以谷氨酸为标准品,分别配置 40,60,80,100,120 μg/mL 的谷氨酸标准溶液,绘制标准曲线( $y = 2.3942x - 0.0979, R^2 = 0.9971$ )。吸取茶汤样品 1 mL,分别加入磷酸盐缓冲液(0.05 mol/L, pH 8.0),质量分数 2% 茛三酮溶液 0.5 mL,沸水浴 15 min,冷却至室温,蒸馏水定容至 25 mL,避光反应 10 min,测定 570 nm 处吸光值,以谷氨酸当量 GLU 表示(mg GLU/mL)。

1.2.4 黄金茶中生物活性成分浸出动力学模型 茶汤中茶多酚、游离氨基酸等生物活性成分在冲泡过程中为典型的固-液相扩散传质过程,满足二阶动力学方程<sup>[13]</sup>,如式(1)所示。

$$\frac{dC_t}{dt} = k(C_t - C_\infty), \quad (1)$$

式中:

$k$ ——二阶浸出速率常数, mL/(mg·min);

$C_t$ —— $t$  时刻茶汤中生物活性成分的浓度, mg/mL;

$C_\infty$ ——茶汤中生物活性成分的饱和浓度, mg/mL。

将式(1)线性变换并积分,代入边界条件  $t = 0 \sim t$ ,  $C_t = 0 \sim C$ , 得:

$$C_t = \frac{kC_\infty^2 t}{1 + C_\infty k t}. \quad (2)$$

将式(2)线性变换得:

$$\frac{t}{C_t} = \frac{1}{kC_\infty^2} + \frac{t}{C_\infty}. \quad (3)$$

由式(3)可知,二阶浸出速率常数  $k$  由  $t/C_t$ 、 $C_t$ 、 $C_\infty$  决定,以  $t/C_t - t$  作回归直线图,由该直线的斜率与截距可求得饱和浓度  $C_\infty$  和二阶速率常数  $k$ 。

根据 Arrhenius 方程可知,浸出速率常数  $k$  与温度  $T$  间的关系如式(4)所示。

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT}, \quad (4)$$

式中:

$A$ ——前因子, mL/(mg·min);

$R$ ——摩尔气体常量, 8.314 5 J/(mol·K);

$T$ ——热力学温度, K;

$E_a$ ——活化能, J/mol。

根据 Arrhenius 方程,以  $\ln k - 1/T$  作图可得  $E_a$  与  $A$ 。

1.2.5 DPPH 清除率的测定 参考郭虹雯等<sup>[14]</sup>方法并稍作修改。取 0.1 mL 茶汤样品与无水乙醇稀释后的

DPPH 溶液 3.9 mL 混合均匀,室温静置 30 min,测定 517 nm 处吸光值。绘制没食子酸工作液标准曲线( $y = 1\ 070.8x + 16.304, R^2 = 0.992\ 2$ ),样品的 DPPH 清除率用没食子酸当量 GAE 表示(mg GAE/mL)。

1.2.6 ABTS 清除率的测定 参考 Šilarová 等<sup>[15]</sup>方法并稍作修改。将 7 mmol/L ABTS 与 2.45 mmol/L 过硫酸钾充分混合后避光放置 12~16 h,得 ABTS 母液,使用时用无水乙醇溶液稀释至 734 nm 处吸光度为(0.80 ± 0.02),即为 ABTS 工作液。将 3 mL ABTS 工作液与 30 μL 茶汤待测液充分混匀,25 °C 避光反应 10 min,测定 734 nm 处吸光值。绘制没食子酸工作液标准曲线( $y = 661.4x - 4.433, R^2 = 0.994\ 2$ ),样品的 ABTS 清除率用没食子酸当量 GAE 表示(mg GAE/mL)。

### 1.3 数据分析

各试验处理均设 3 次重复。采用 Excel 2016、SPSS 20.0 对数据进行统计学分析,并用 One-way ANOVA 进行多重比较分析,利用 Origin 8.0 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 冲泡条件对茶汤中茶多酚含量的影响

由图 1 可知,同一冲泡时间下,茶多酚浓度随冲泡温度的升高逐渐增加,浸出速率也逐渐增大,0~1 min,60~90 °C 水温下,茶多酚的浸出速率分别为 0.029 3,0.035 2,0.059 2,0.084 7 mg GAE/(mL · min);同一冲泡温度下,

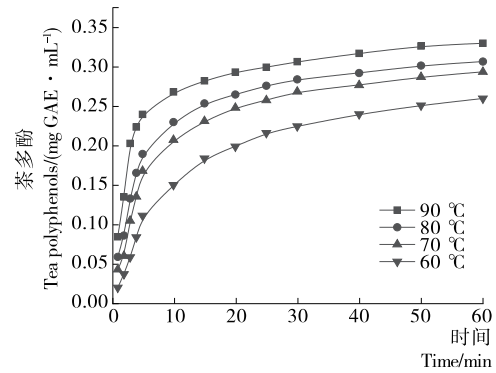


图 1 冲泡温度与时间对茶汤中茶多酚的影响

Figure 1 Effect of the brewing temperature and time on tea polyphenols from Xiangxi golden tea

黄金茶茶汤中茶多酚浓度与冲泡时间呈正相关,浸出速率与冲泡时间呈负相关。当水温为 90 °C 时,冲泡 30 min 后茶多酚浓度趋于稳定,30~60 min 内茶多酚浓度无明显变化,约为 0.330 1 mg GAE/mL。一般来说,冲泡水温的升高、时间的延长,有利于茶多酚的浸出,但随着水温不断升高、冲泡时间不断延长,茶叶细胞破裂物质浸出的同时,茶多酚的氧化聚合反应也很剧烈,使茶多酚的浸出速率呈先增加后减小趋势<sup>[16]</sup>。

方差分析结果(表 1)显示,冲泡时间与水温对茶多酚浸出量的影响均极显著( $P < 0.01$ ),依次为冲泡温度 > 冲泡时间。

表 1 茶多酚浸出量方差分析

Table 1 Variance analysis of the amount of tea polyphenols

方差来源	离均差平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
冲泡温度	0.345	12	$2.875 \times 10^{-2}$	125.375	$1.299 \times 10^{-25}$
冲泡时间	0.040	3	$1.335 \times 10^{-2}$	58.219	$6.913 \times 10^{-14}$
误差	$8.256 \times 10^{-3}$	36	$2.293 \times 10^{-4}$		

### 2.2 冲泡条件对茶汤中氨基酸含量的影响

由图 2 可知,游离氨基酸的浸出趋势与茶多酚类似。同一冲泡温度下,一定时间内,茶汤中游离氨基酸浓度随冲泡时间的延长而逐渐增加,浸出速率逐渐减小,冲泡水温为 90 °C 时,0~1 min 游离氨基酸浸出速率达 0.092 1 mg GLU/(mL · min),4~5 min 游离氨基酸浸出速率为 0.021 8 mg GLU/(mL · min),25~30 min 游离氨基酸浸出速率为 0.001 4 mg GLU/(mL · min),30 min 后游离氨基酸浓度趋于稳定,30~60 min 游离氨基酸浸出速率仅为 0.000 7 mg GLU/(mL · min)。同一冲泡时间下,游离氨基酸浓度随冲泡温度的升高而增大,且温度越高,氨基酸浸出速率越大。60~90 °C 水温冲泡,

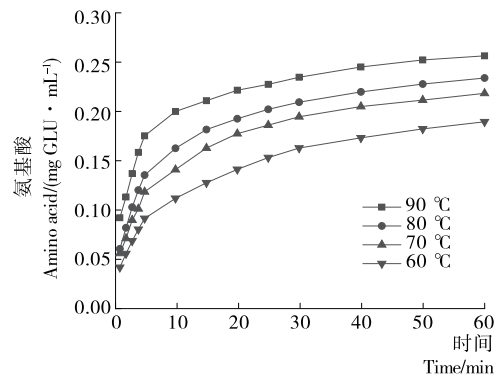


图 2 冲泡温度与时间对茶汤中氨基酸的影响

Figure 2 Effect of the brewing temperature and time on amino acid from Xiangxi golden tea

0~1 min 游离氨基酸浸出速率分别为 0.092 1, 0.060 5, 0.048 9, 0.041 8 mg GLU/(mL · min)。根据相似相溶原理, 游离氨基酸易溶于水, 随冲泡温度的升高, 分子运动越活跃, 越有利于游离氨基酸与水形成氢键, 促使游离氨

基酸浸出。

方差分析结果(表 2)显示, 冲泡温度与时间对茶汤中游离氨基酸浸出量的影响均极显著( $P < 0.01$ ), 依次为冲泡时间 > 冲泡温度。

表 2 游离氨基酸浸出量方差分析

Table 2 Variance analysis of the amount of free amino acid

方差来源	离均差平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
冲泡温度	0.141	12	$1.171 \times 10^{-2}$	233.797	$2.239 \times 10^{-30}$
冲泡时间	0.039	3	$1.303 \times 10^{-2}$	260.326	$1.877 \times 10^{-24}$
误差	$1.802 \times 10^{-3}$	36	$5.006 \times 10^{-5}$		

2.3 茶汤中抗氧化物质浸出动力学模型

由图 3 可知, 不同冲泡温度下, 冲泡时间与茶多酚、游离氨基酸浓度的比值( $t/C_t$ )随冲泡时间( $t$ )的增大基本呈直线上升趋势。各拟合曲线的相关系数均 > 0.99, 线性关系良好, 说明黄金茶汤中茶多酚、游离氨基酸的浸出满足二阶动力学方程, 具体动力学参数见表 3。

表 3 茶汤中生物活性成分浸出动力学参数

Table 3 Kinetic parameters for the extraction of chemical constituents from tea infusion

化学成分	温度/ ℃	$k$ / (mL · mg <sup>-1</sup> · min <sup>-1</sup> )	$C_{\infty}$ / (mg · mL <sup>-1</sup> )
茶多酚	60	0.269 4	0.312 6
	70	0.489 2	0.324 9
	80	0.666 8	0.329 5
氨基酸	60	1.012 2	0.344 1
	70	0.738 0	0.203 6
	80	0.861 7	0.228 9
	90	0.919 0	0.244 2
	90	1.206 0	0.274 6

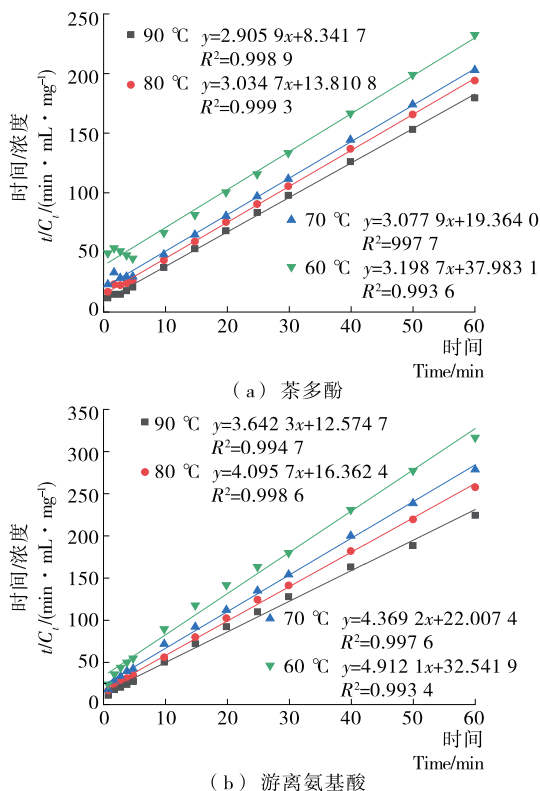


图 3 不同冲泡温度下茶汤生物活性成分浓度与冲泡时间的线性关系

Figure 3 Linearized plots of tea bioactive compounds concentrations on different brewing temperatures to time

由表 3 可知, 茶汤中茶多酚、游离氨基酸的饱和浓度( $C_{\infty}$ )、二阶释放速率常数( $k$  值)随冲泡温度的升高而增大。升高温度, 生物活性成分溶解度增加, 从而导致物质浸出率增大<sup>[17]</sup>。

由图 4 可知, 温度与浸出速率常数  $k$  有良好的线性关系( $R_{茶多酚}^2 = 0.9872$ ,  $R_{氨基酸}^2 = 0.9455$ ), 由线性回归方程可得茶多酚  $E_a = 4.3126 \times 10^4$  J/mol, 游离氨基酸  $E_a = 1.2389 \times 10^4$  J/mol。活化能越小, 浸出速率越快, 游离氨基酸在茶汤中的浸出速率大于茶多酚。由于氨基酸为小分子化合物, 根据相似相溶原理, 易溶于水, 温度升高, 促进其与水分子发生氢键缔合, 形成稳定构型的二聚体<sup>[18]</sup>。

2.4 冲泡条件对茶汤抗氧化性能的影响

由图 5 可知, 茶汤中 DPPH、ABTS 清除率在 0~10 min 内随冲泡时间的延长与水温的增加而不断增加, 冲泡 10 min 时, 茶汤中 DPPH、ABTS 清除率随冲泡时间的延长缓慢增加并逐渐趋于稳定, 此时不同冲泡温度(60, 70, 80, 90 °C)茶汤的 DPPH 清除率分别为 0.037 9, 0.054 8, 0.061 2, 0.067 1 mg GAE/mL, ABTS 清除率分

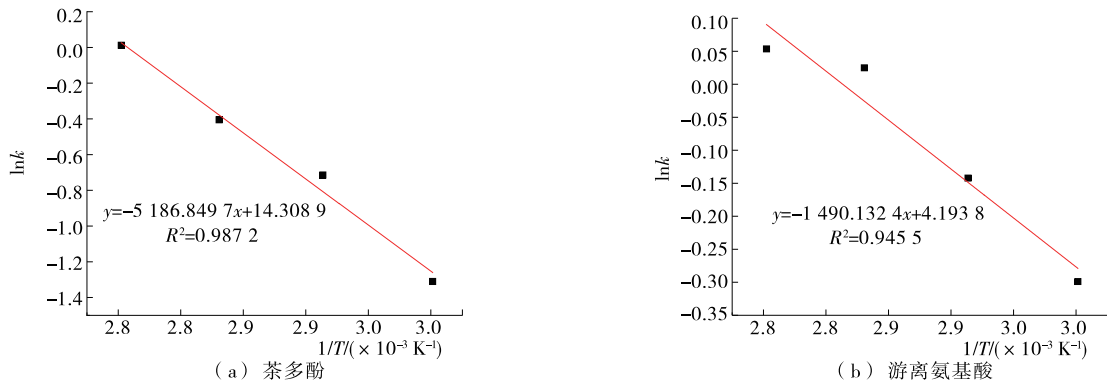


图4 温度与浸出速率常数的关系

Figure 4 Relationship between temperature and the dissolution rate constant

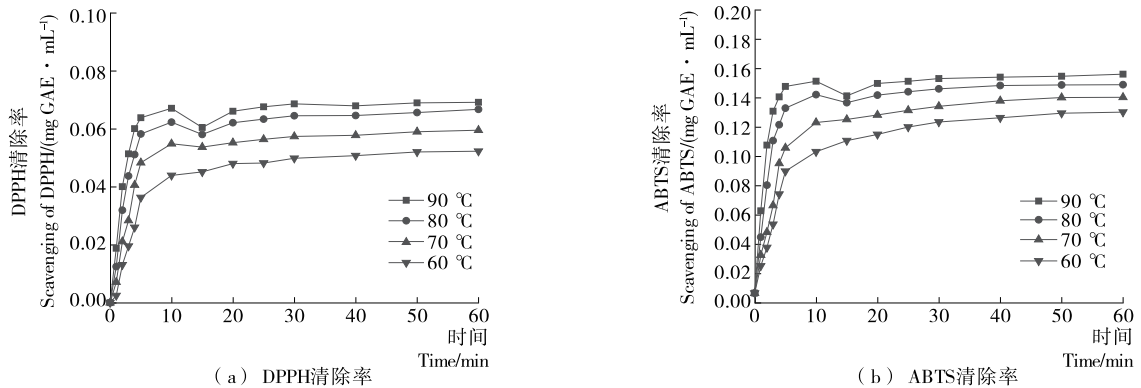


图5 冲泡温度与时间对黄金茶茶汤抗氧化性能的影响

Figure 5 Effects of brewing temperature and time on antioxidant properties of tea infusion

别为 0.103 3, 0.123 2, 0.142 2, 0.151 4 mg GAE/mL。

冲泡温度的升高、时间的延长,使茶多酚浓度逐渐增加,浸出速率也逐渐增大,从而导致茶汤的抗氧化活性逐渐增大<sup>[19]</sup>。但水温过高、冲泡时间过长,会出现多酚氧化现象,致使茶多酚浸出速率下降,对 DPPH、ABTS 清除速率下降。此外,茶汤的抗氧化能力还受 V<sub>c</sub>、黄酮类化合物、游离氨基酸、茶多糖等生物活性成分的影响<sup>[20]</sup>。

### 3 结论

试验探究了冲泡条件对湘西黄金茶茶多酚、游离氨基酸浸出规律及其抗氧化性能的影响。结果表明,黄金茶茶汤中茶多酚、游离氨基酸浓度与冲泡时间及水温均显著相关( $P < 0.01$ ),茶汤 DPPH、ABTS 清除率随冲泡温度的增加而增加,30 min 后趋于稳定。冲泡黄金茶茶汤中茶多酚、游离氨基酸的浸出满足二阶动力学方程,且温度与浸出速率常数  $k$  有良好的线性关系,游离氨基酸在茶汤中的浸出速率大于茶多酚。后续需进一步探讨不同冲泡条件对生物活性成分的浸出规律与黄金茶感官品质、抗氧化能力之间的关系,阐明茶叶中生物活性成分的

浸出规律,为黄金茶深加工产品开发、消费者科学饮茶提供理论参考。

### 参考文献

- [1] WANG Chen-jing, LIU Jun-tian, GUO Fang. (-)-Epigallocatechin gallate inhibits endothelin-1-induced C-reactive protein production in vascular smooth muscle cells[J]. Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology, 2010, 107 (2): 669-675.
- [2] MOHAN N, KARMAKAR S, BANIK N L, et al. SU5416 and EGCG work synergistically and inhibit angiogenic and survival factors and induce cell cycle arrest to promote apoptosis in human malignant neuroblastoma SH-SY5Y and SK-N-BE2 cells[J]. Neurochemical Research, 2011, 36 (8): 1383-1396.
- [3] KIM H S, QUON M J, KIM J A. New insights into the mechanisms of polyphenols beyond antioxidant properties; lessons from the green tea polyphenol, epigallocatechin 3-gallate[J]. Redox Biology, 2014, 2: 187-195.
- [4] BASTIANETTO S, KRANTIC S, CHABOT J G, et al.

- Possible involvement of programmed cell death pathways in the neuroprotective action of polyphenols[J]. *Current Alzheimer Research*, 2011, 8(5): 445-451.
- [5] 陈挺强, 刘淑敏, 黄惠华. 绿茶与红茶浸提液功能性成分含量和抗氧化能力的差异研究[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(10): 141-146.
- [6] KANWAR J, TASKEEN M, MOHAMMAD I, et al. Recent advances on tea polyphenols[J]. *Frontiers in Bioscience*, 2012, 4(4): 111.
- [7] DRAŽENKA K, DUNIA H, ANA B, et al. Green tea preparation and its influence on the content of bioactive compounds[J]. *Food Research International*, 2010, 43(1): 167-176.
- [8] PEREZBURILLO S, GIMENEZ R, RUFIANHENARES J A, et al. Effect of brewing time and temperature on antioxidant capacity and phenols of white tea: Relationship with sensory properties[J]. *Food Chemistry*, 2018, 248(15): 111-118.
- [9] 黄秀琼, 柴硕, 黎娜, 等. 保靖黄金茶品质季节变化规律初探[J]. *茶叶通讯*, 2014, 41(2): 22-24.
- [10] 黄怀生, 粟本文, 赵熙, 等. 保靖黄金茶香气成分分析[J]. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2011, 37(3): 271-274.
- [11] 何健, 印伟. 茶叶中茶多酚的提取工艺及其含量测定[J]. *中国药业*, 2011, 20(13): 31-32.
- [12] YIN Jun-feng, XU Yong-quan, YUAN Hai-bo, et al. Cream formation and main chemical components of green tea infusions processed from different parts of new shoots[J]. *Food Chemistry*, 2009, 114(2): 665-670.
- [13] FERNANDO C D, SOYSA P. Extraction kinetics of phytochemicals and antioxidant activity during black tea (*Camellia sinensis* L.) brewing [J]. *Nutrition Journal*, 2015, 14(1): 74.
- [14] 郭虹雯, 赵惠茹, 倪莉, 等. 武夷岩茶多酚组分及其抗氧化活性[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(12): 325-331.
- [15] PETRA Š, LENKA C E, MILAN M. Fast gradient HPLC/MS separation of phenolics in green tea to monitor their degradation[J]. *Food Chemistry*, 2017, 237(15): 471-480.
- [16] 王万秋, 叶扬, 张宝林, 等. 不同冲泡条件对平山雨花茶茶多酚释放含量的影响[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(6): 64-68.
- [17] XU Yong-quan, JI Wei-bin, YU Pei-gen, et al. Effect of extraction methods on the chemical components and taste quality of green tea extract[J]. *Food Chemistry*, 2018, 248(15): 146-154.
- [18] 屈绍广, 王昶昊, 施云海, 等. 用状态方程模拟氨基酸水溶液的热力学性质[J]. *华东理工大学学报: 自然科学版*, 2015, 41(3): 281-286.
- [19] 韩延超, 陈杭君, 邵海燕, 等. 冲泡条件对西湖龙井抗氧化特性的影响及相关性分析[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(10): 134-142.
- [20] ESHITA S, ROBIN J, ASHU G. l-Theanine: An astounding sui generis integrant in tea[J]. *Food Chemistry*, 2018, 242(1): 601-610.
- 
- (上接第 147 页)
- [18] GHABOOS S H, ARDABILI S M, KASHANINEJAD M, et al. Combined infrared-vacuum drying of pumpkin slices[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53(5): 2 380-2 388.
- [19] 宋小勇. 远红外辅助热泵干燥对铁棍山药片品质影响[J]. *核农学报*, 2015, 29(7): 1 337-1 343.
- [20] YAO Zhi-ming, MAGUER M L. Mathematical modelling and simulation of mass transfer in osmotic dehydration processes[J]. *Nursing Clinics of North America*, 1997, 8(4): 575-586.
- [21] 杨爱金, 刘璇, 毕金峰, 等. 食品干燥过程中水分扩散特性的研究进展[J]. *食品与机械*, 2012, 28(5): 247-250.
- [22] SANJU N N, LOZANO M, GARC A-PASCUAL P, et al. Dehydration kinetics of red pepper (*Capsicum annum* L var Jaranda)[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2003, 83(7): 697-701.
- [23] DARVISHI H, NAJAFI G, HOSAINPOUR A, et al. Far-infrared drying characteristics of mushroom slices [J]. *Chemical Product & Process Modeling*, 2013, 8(2): 107-117.
- [24] 高鹤, 易建勇, 毕金峰, 等. 番木瓜中短波红外干燥特性[J]. *食品科学*, 2015, 36(7): 30-35.
- [25] 孙传祝, 石东岳, 王相友, 等. 单片物料厚度对胡萝卜红外薄层干燥水分迁移的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(13): 53-59.
- [26] XU Fang-fang, JIN Xin, ZHANG Lu, et al. Investigation on water status and distribution in broccoli and the effects of drying on water status using NMR and MRI methods[J]. *Food Research International*, 2017, 96: 191-197.
- [27] LV Wei-qiao, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Smart NMR method of measurement of moisture content of vegetables during microwave vacuum drying[J]. *Food & Bio-process Technology*, 2017, 10(12): 2 251-2 260.
- [28] KRISHNAMURTHY K, KHURANA H K, SOOJIN J, et al. Infrared heating in food processing: An overview[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety*, 2010, 7(1): 2-13.
- [29] 李娜, 李瑜. 利用低场核磁共振技术分析冬瓜真空干燥过程中的内部水分变化[J]. *食品科学*, 2016, 37(23): 84-88.
- [30] XU Cong-cong, LI Yun-fei, YU Hua-ning. Effect of far-infrared drying on the water state and glass transition temperature in carrots[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 136(6): 42-47.