

赶黄草叶茶总黄酮、游离氨基酸及槲皮素 浸出动力学分析

Leaching kinetics analysis of total flavonoids, free amino acids
and quercetin from *Penthorum chinense* Pursh leaf tea

张梦瑞¹ 冉 旭^{1,2} 曾 里^{1,2} 贾利蓉^{1,2} 段飞霞^{1,2}

ZHANG Meng-rui¹ RAN Xu^{1,2} ZENG Li^{1,2} JIA Li-rong^{1,2} DUAN Fei-xia^{1,2}

(1. 四川大学轻工科学与工程学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学食品科学与技术

四川省高校重点实验室, 四川 成都 610065)

(1. College of Biomass Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

2. The Key Laboratory of Food Science and Technology of Ministry of Education of Sichuan Province,
Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

摘要:目的:探究赶黄草叶茶冲泡过程中总黄酮、游离氨基酸及槲皮素浸出量随冲泡时间和冲泡温度的变化规律。方法:通过紫外分光光度法、高效液相色谱法(HPLC)测定总黄酮、游离氨基酸和槲皮素浸出量,使用二阶动力学模型和阿伦尼乌斯公式进行动力学拟合、动力学参数计算。结果:在 60~100 ℃ 范围内冲泡 60 min,总黄酮浸出量和槲皮素浸出量随冲泡温度和冲泡时间的增加而增加;60~90 ℃ 范围内冲泡 60 min,游离氨基酸有相同的浸出规律,温度上升至 100 ℃ 冲泡 20 min 后,游离氨基酸热损失较多。二阶动力学模型能较好拟合三者的浸出情况,相关系数高,冲泡温度与二阶速率常数 k 线性关系良好,总黄酮、游离氨基酸、槲皮素浸出活化能分别为 16 628.201, 23 415.139, 14 975.396 J/mol。结论:赶黄草叶茶中的总黄酮、游离氨基酸和槲皮素浸出量随冲泡时间和冲泡温度变化显著,三者浸出在 60~90 ℃ 范围内符合二阶动力学模型,可使用该模型对其浸出量进行预测。

关键词:赶黄草;代用茶;动力学;总黄酮;游离氨基酸;槲皮素

Abstract: Objective: To explore the changes of the total flavonoids, free amino acids and quercetin extraction amount with

the brewing time and temperature during the brewing process of *Penthorum chinense* Pursh (PCP) leaf tea and fit the extraction kinetics equation of the three and calculate the kinetics parameters. **Methods:** The total flavonoids, free amino acids and quercetin were determined by ultraviolet spectrophotometry and high performance liquid chromatography (HPLC). The second-order kinetic model and Arrhenius formula were used to fit the kinetics and calculate the kinetic parameters. **Results:** The leaching amount of total flavonoids and quercetin increased with the increase of the temperature and the brewing time in the range of 60~100 ℃ for 60 min. When brewing for 60 min at 60~90 ℃, the free amino acids had the same leaching law. When the temperature rised to 100 ℃, the heat loss of free amino acids was large after brewing for 20 min. The second-order kinetic model could fit the leaching amount of the three substances well with the high correlation coefficient. Linear relationship between temperature and second-order rate constant k was good. The activation energies of total flavonoids, free amino acids and quercetin were 16 628.201, 23 415.139 and 14 975.396 J/mol. **Conclusion:** The extraction amount of total flavonoids, free amino acids and quercetin in PCP leaf tea changed significantly with the brewing time and temperature, and the extraction amount of the three was in line with the second-order kinetic model in the range of 60~90 ℃, which can be used to predict the extraction amount.

Keywords: *Penthorum chinense* Pursh; substitutional tea; dynamics; total flavonoids; freeamino acid; quercetin

基金项目:四川省生物医药重大专项(编号:2019KJT0007-2018SCDZX0005);(川大—泸州)科技创新研发项目(编号:2020CDLZ-13)

作者简介:张梦瑞,女,四川大学在读硕士研究生。

通信作者:冉旭(1968—),男,四川大学副教授,博士。

E-mail: ranxu01@sina.com

收稿日期:2022-09-22 **改回日期:**2023-03-15

赶黄草(*Penthorum chinense* Pursh)是虎耳草科扯根菜属扯根菜的干燥地上部分^[1],其叶属新食品原料,食用

形式为代用茶或饮料,具有防醉酒^[2]、抗氧化^[3]、抗炎^[4]等功能,能够用于预防或辅助治疗脂肪肝^[5-6]和化学性肝损伤^[7]。黄酮类物质是赶黄草发挥上述功能作用的重要物质基础,其中槲皮素含量较高,是赶黄草的主要功效成分^[8]。游离氨基酸是赶黄草茶叶的重要呈味物质,能为茶汤提供鲜味、苦味、甜味等多种风味^[9],影响茶汤的感官品质。

总黄酮和游离氨基酸的溶出属于固-液扩散传质过程,符合二阶动力学方程^[10],其浸出量随冲泡温度和冲泡时间的变化而变化。黄明军等^[11]在 100 ℃ 下熬煮青砖茶,发现总黄酮在前 25 min 溶出较快,25~45 min 时溶出率增加较为平缓。陈亮等^[12]发现湘西黄金茶中游离氨基酸浸出量在 90 ℃ 冲泡 30 min 后趋于稳定,浸出过程符合二阶动力学定律。

目前有关赶黄草代用茶溶出规律的研究较少。研究拟探索槲皮素浸出量与总黄酮浸出量的关系,寻找一定范围内二者之间的换算系数,通过总黄酮含量快速预测茶汤中槲皮素含量,以期赶黄草功效成分的水提工艺优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

赶黄草茶叶:四川醇香茶业有限公司;

槲皮素标准品(HPLC≥98%)、谷氨酸标准品(纯度≥99%)、水合茚三酮(纯度≥99%):北京索莱宝科技有限公司;

甲醇:色谱级,上海麦克林生化科技有限公司;

磷酸、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾:分析纯,成都科龙化工试剂厂。

1.2 主要仪器与设备

高效液相色谱仪:1260 Infinity II 型,美国安捷伦科技公司;

紫外可见分光光度计:UV-1800PC 型,上海美谱达仪器有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-6 型,常州金南仪器制造有限公司;

电子天平:FA20048 型,上海精科天美科学仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备 称取赶黄草茶叶 10 g,投入预设温度分别为 60,70,80,90,100 ℃ 的 1 500 mL 热水中,开启计时,置于等温水浴中恒温冲泡,分别于 1,2,3,4,6,8,10,15,20,25,30,40,50,60 min 取样,过 0.22 μm 滤膜后低温贮藏备用。

1.3.2 槲皮素浸出量测定 参照亢振等^[13]的方法并修改。

(1) 色谱条件:色谱柱为 InertSustain C₁₈ 柱(4.6 mm×

250 mm, 5 μm);流动相为甲醇—0.2% 磷酸水溶液(V_{甲醇}:V_{磷酸水}为 55:45);检测波长 370 nm;柱温 30 ℃;流速 1.0 mL/min,进样量 20 μL。

(2) 标准曲线绘制:以甲醇溶解,配制 2 mg/mL 槲皮素标准品储备液。取储备液用甲醇稀释,使槲皮素进样量分别为 0.025,0.5,1,1.5,2,3,4 μg,过 0.45 μm 有机相滤膜后置于进样瓶中,按色谱条件进样,测定其峰面积,绘制进样量—峰面积标准曲线($y = 1\,175.876\,89x - 3.285\,49$, $R^2 = 0.999$)。

1.3.3 总黄酮浸出量测定 采用硝酸铝显色法^[14]。以芦丁为标准品绘制标准曲线方程为 $y = 0.420\,29x + 0.044\,27$, $R^2 = 0.999$ 。

1.3.4 游离氨基酸浸出量测定 按 GB/T 8314—2013 执行。以谷氨酸作为标准品绘制标准曲线方程为 $y = 2.390\,99x - 0.165\,51$, $R^2 = 0.997$ 。

1.3.5 二阶动力学拟合 使用二阶动力学方程对总黄酮、游离氨基酸及槲皮素的浸出情况进行拟合。二阶动力学方程变形式为:

$$\frac{t}{C_t} = \frac{1}{kC_n^2} + \frac{t}{C_n}, \quad (1)$$

式中:

t ——冲泡时间,min;

k ——二阶浸出速率常数,g/(mg·min);

C_t ——冲泡 t 时间时,茶叶活性成分浸出量,mg/g;

C_n ——冲泡达到平衡时,茶叶活性成分浸出量,mg/g。

以 t/C_t 为纵坐标, t 为横坐标,作图并进行线性拟合,所得斜率为 $1/C_n$,截距为 $1/(k \cdot C_n^2)$,可分别求得二阶浸出速率常数 k 和平衡浓度 C_n ,得到反应的二阶动力学方程。

将 k 代入阿伦尼乌斯公式[式(2)],计算反应的活化能。

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT}, \quad (2)$$

式中:

k ——二阶浸出速率常数,g/(mg·min);

A ——前因子,g/(mg·min);

E_a ——活化能,J/mol;

R ——摩尔气体常量,8.314 5 J/(mol·K);

T ——热力学温度,K。

以 $\ln k$ 为纵坐标, $1/T$ 为横坐标,作图并进行线性拟合,所得斜率为 $-E_a/R$,截距为 $\ln A$,可求得反应的活化能 E_a 。

1.4 数据统计与分析

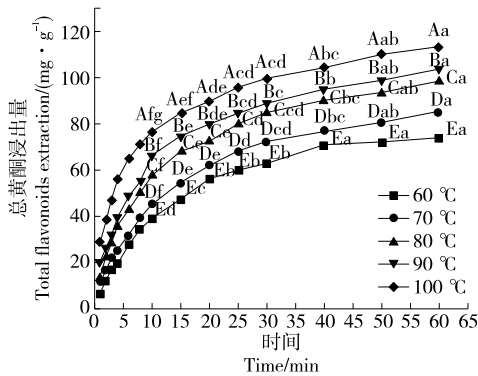
使用 Excel 2016 软件进行数据整理和计算,Origin 2021 软件进行图像绘制,SPSS 24.0 软件进行显著性分析,每组试验重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 总黄酮浸出动力学

由图1可知,在60~100℃范围内,随着冲泡温度的增加,总黄酮浸出量增加,各温度存在相似的浸出变化趋势,但随冲泡时间的变化速率有所不同。其中0~20 min浸出速率较快,且浸出速率随温度提高增加明显,从60℃的2.82 mg/(g·min)增加至100℃的4.48 mg/(g·min);20~60 min总黄酮浸出量仍有增加,但浸出速率变慢,受冲泡温度影响较小,从60℃的0.44 mg/(g·min)变化至100℃的0.59 mg/(g·min)。当冲泡10~60 min时,冲泡温度总能显著影响总黄酮浸出量,而冲泡时间对总黄酮浸出量的影响在前30 min显著,30~60 min时显著性降低。

黄酮类物质具有易溶于醇、微溶于水的特点,提高温度可在一定范围内增大其在水中的溶解度,但受自身结构影响,分子间引力大^[15],温度对溶解度的提升有限。此外,以槲皮素为主的黄酮类物质在100℃以下具有较好的热稳定性,在此温度下进行长时间冲泡,不会对其活性结构造成严重破坏,能够较好地维持生物活性^[16]。因此,可以通过提高冲泡温度及延长冲泡时间的方式增加总黄



大写字母不同表示同一冲泡时间,不同冲泡温度下差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示同一冲泡温度,不同冲泡时间下差异显著($P<0.05$)

图1 冲泡温度和冲泡时间对总黄酮浸出量的影响
Figure 1 Effects of brewing temperature and time on total flavonoids extraction

酮的浸出量。

由图2可知,各温度下总黄酮浸出的 t/C_t 与冲泡时间线性良好,相关系数 $R^2>0.99$,符合二阶动力学规律,适合使用二阶动力学方程进行拟合。

由表1可知,二阶浸出速率常数 k 随冲泡温度的升高持续增大,说明高温能加速黄酮类物质的溶出;饱和浸出量 C_n 随冲泡温度的升高不断增大,说明高温能够提高黄酮类物质的溶出率。100℃下冲泡60 min时,总黄酮浸出量为113.300 mg/g,与理论值(119.904 mg/g)接近,此时总黄酮已接近饱和浸出量。冲泡60 min时,总黄酮浸出量均能达到饱和浸出量的80%以上,可验证以60 min作为冲泡终点较为合理。

2.2 游离氨基酸浸出动力学

由图3可知,游离氨基酸浸出量在冲泡前30 min快速持续上升,冲泡30 min左右接近平衡,冲泡30~60 min时增量较小。60~90℃时,随着冲泡温度的上升,游离氨基酸浸出量增加;温度上升至100℃时,前20 min浸出规律与90℃时的较为接近,后40 min游离氨基酸浸出量均低于90℃时的,当冲泡时间为20~60 min时,游离氨基酸浸出量不再随冲泡时间的增加持

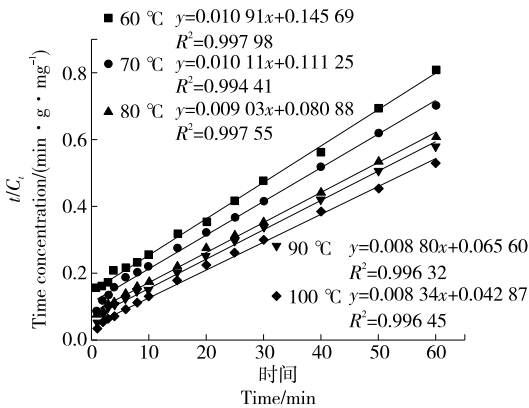


图2 不同冲泡温度下总黄酮浸出 t/C_t 与冲泡时间的线性关系

Figure 2 The linear relationship between the concentration of total flavonoids and the brewing time at different temperatures

表1 总黄酮浸出二阶动力学参数

Table 1 Second order kinetic parameters of total flavonoids extraction

温度 $T/^\circ\text{C}$	二阶浸出速率常数 $k/$ ($\times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	饱和浸出量 $C_n/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	冲泡60 min 浸出量 $C_{60}/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	C_{60}/C_n
60	0.817	91.659	74.042	0.808
70	0.919	98.912	85.366	0.863
80	1.008	110.742	98.545	0.890
90	1.181	113.636	103.614	0.912
100	1.623	119.904	113.300	0.945

续上升,20~50 min 时浸出量变化较小,60 min 时浸出量有所下降。60~90 ℃ 冲泡 10~60 min 时,冲泡温度对游离氨基酸浸出量影响显著($P<0.05$),100 ℃ 下冲泡 10 min 的浸出量与 90 ℃ 冲泡 10 min 的无显著差异,但冲泡时间继续延长,游离氨基酸浸出量较 90 ℃ 时的显著下降。氨基酸热稳定性较差,长时间高温处理易造成其降解损失^[17]。单治国等^[18]研究发现,短时间冲泡氨基酸溶出量随冲泡温度的升高而增大,长时间冲泡氨基酸溶出量迅速下降,高温长时间冲泡不利于氨基酸的溶出。

由图 4 可知,60~90 ℃ 下的游离氨基酸浸出 t/C_t 与冲泡时间线性良好,相关系数 R^2 均 >0.995 ,符合二阶动力学规律。由表 2 可知,二阶浸出速率常数 k 随冲泡温度的升高而增大,表明在 60~90 ℃ 时,提高温度有利于游离氨基酸的浸出。饱和浸出量 C_n 随冲泡温度的升高呈上升趋势,但上升幅度较小,结合 100 ℃ 下的游离氨基酸溶出曲线分析,可能是因为长时间高温在促进茶叶中氨基酸浸出的同时,又破坏了茶汤中部分已浸出氨基酸结构,最终导致游离氨基酸总浸出量上升幅度较小。60 min 时, C_{60}/C_n 随冲泡温度的增加而增大,90 ℃ 下冲泡 60 min 能达到饱和浸出量的 91.4%。

2.3 冲泡温度与浸出速率常数的关系

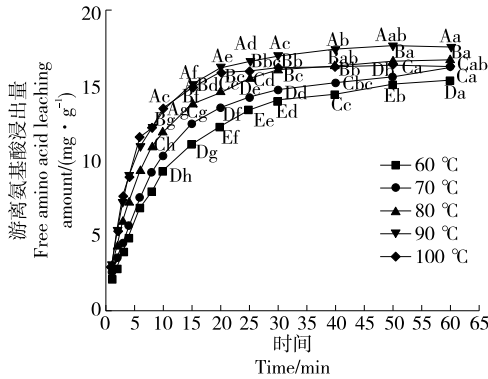
由图 5 可知,总黄酮浸出拟合方程为 $y = -1\,999.903\,94x - 1.161\,37$, $R^2 = 0.889\,27$; 游离氨基酸

浸出拟合方程为 $y = -2\,816.181\,28x + 3.289\,9$, $R^2 = 0.986\,2$ 。通过阿伦尼乌斯公式计算得到总黄酮浸出活化能 $E_a = 16\,628.201\text{ J/mol}$,游离氨基酸浸出活化能 $E_a = 23\,415.139\text{ J/mol}$ 。活化能是反应物分子达到活化状态所需要的最小能量,活化能越低表示反应在一定条件下越容易发生。游离氨基酸浸出的活化能大于总黄酮,说明其更难浸出,可能与其在赶黄草叶茶中的含量较低,固液两相间浓度差较小有关。

2.4 槲皮素浸出动力学

感官评价结果显示,赶黄草叶茶冲泡 10 min 以下口感最佳,高温冲泡 10 min 以上茶汤苦涩味及生青味重,茶汤饮用品质下降;对茶汤中的成分进行检测发现,低温短时间冲泡不利于茶叶中功效成分的溶出,此时茶汤无法发挥理想的功能作用、功效成分利用率不高,资源浪费严重。

由图 6 可知,槲皮素浸出量随冲泡时间的增加而增加,前 50 min 浸出速率较快,冲泡时间对浸出量的影响在各温度下均差异显著($P<0.05$);50~60 min 时浸出速率下降,此时间段内的浸出量在 60~90 ℃ 范围内随冲泡温度的增加而显著提升,100 ℃ 下冲泡 50 min 后槲皮素变化不显著,冲泡至 60 min 浸出可接近平衡状态。冲泡温度的提升对槲皮素浸出量的增加影响显著($P<0.05$),当冲泡温度为 100 ℃ 时,槲皮素浸出量在各冲泡时间段内



大写字母不同表示同一冲泡时间,不同冲泡温度下差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示同一冲泡温度,不同冲泡时间下差异显著($P<0.05$)

图 3 冲泡温度和冲泡时间对游离氨基酸浸出量的影响
Figure 3 Effects of brewing temperature and time on the amount of free amino acids leached

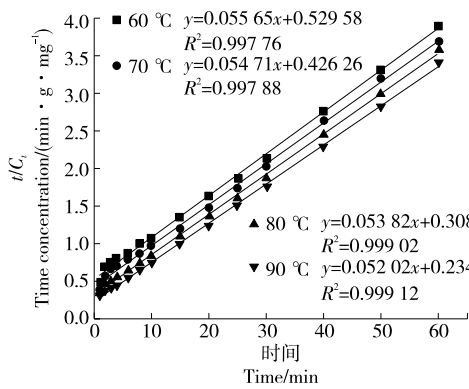


图 4 不同冲泡温度下游离氨基酸浸出 t/C_t 与冲泡时间的线性关系
Figure 4 The linear relationship between the concentration of free amino acid leaching time and the brewing time at different temperatures

表 2 游离氨基酸浸出二阶动力学参数

Table 2 Second order kinetic parameters of free amino acid leaching

温度 $T/^\circ\text{C}$	二阶浸出速率常数 $k/(\times 10^{-3}\text{ g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	饱和浸出量 $C_n/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	冲泡 60 min 浸出量 $C_{60}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	C_{60}/C_n
60	5.848	17.969	15.362	0.855
70	7.022	18.278	16.203	0.886
80	9.397	18.580	16.729	0.900
90	11.539	19.223	17.570	0.914

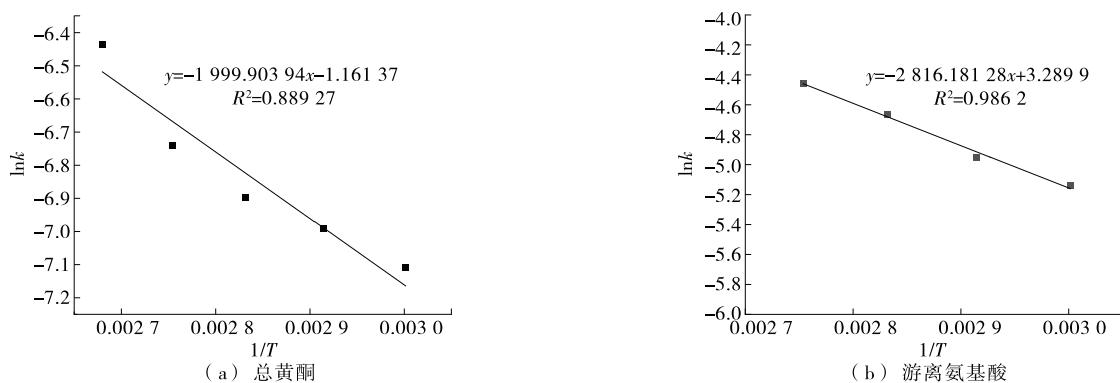
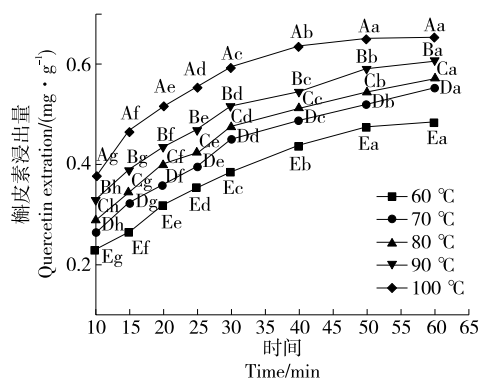


图5 冲泡温度与浸出速率常数的关系

Figure 5 Relationship between temperature and leaching rate constant



大写字母不同表示同一冲泡时间,不同冲泡温度下差异显著 ($P < 0.05$);小写字母不同表示同一冲泡温度,不同时间冲泡间下差异显著 ($P < 0.05$)

图6 冲泡温度和冲泡时间对槲皮素浸出量的影响

Figure 6 Effects of brewing temperature and time on quercetin extraction

均显著高于其他组,说明高温能有效提高槲皮素的浸出速率和浸出率。

由图7可知,以100 °C为例,冲泡前40 min 槲皮素与总黄酮的浸出规律相近,40~60 min 时槲皮素浸出量趋于稳定,总黄酮浸出量仍有上升,可能与赶黄草中其他黄酮类物质的浸出有关。计算各冲泡温度各冲泡时间下槲皮素浸出量与总黄酮浸出量的比值,发现在60~100 °C 下冲泡10~60 min 时,槲皮素浸出量约为总黄酮浸出量的0.5%~0.6%,且该比例随冲泡时间的延长而增大,随冲泡温度的升高而减小。实际操作中常用硝酸铝显色法测定总黄酮含量,HPLC法测定槲皮素含量,前者较后者有操作简便、检测速度快、设备条件要求低的优势,借助此结论可通过测定总黄酮含量推算槲皮素含量,从而完成对槲皮素含量的快速预测。

由图8可知,槲皮素浸出的 t/C_t 与冲泡时间线性良好, $R^2 > 0.99$,符合二阶动力学规律。由表3可知,二阶浸出速率常数 k 随冲泡温度的增大而增大,表明提高冲泡温度能增加槲皮素的浸出速率;饱和浸出量 C_n 随冲泡

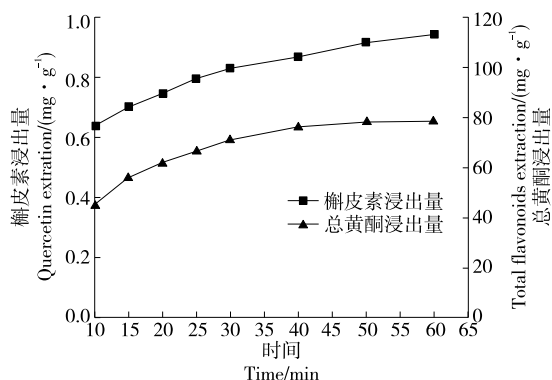


图7 总黄酮和槲皮素浸出量变化规律

Figure 7 Variation of total flavonoids and quercetin extraction

温度的升高而增大,说明高温能够提升槲皮素的浸出率,与试验结果一致。100 °C 冲泡60 min, C_{60}/C_n 达到84.4%,仍有提升空间,实际操作时可再适当延长冲泡时间,以增加槲皮素浸出率。

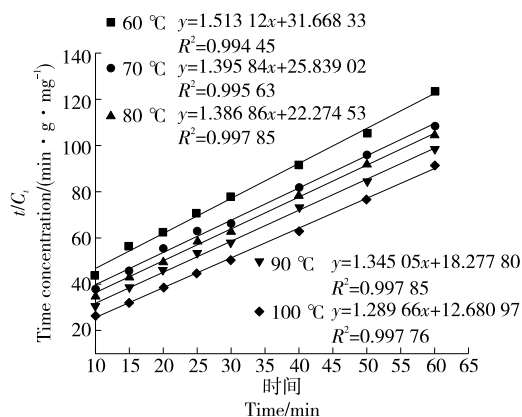
图8 不同冲泡温度下槲皮素浸出 t/C_t 与冲泡时间的线性关系

Figure 8 The linear relationship between the concentration of quercetin and the brewing time at different temperatures

表 3 槲皮素浸出二阶动力学参数

Table 3 Second order kinetic parameters of quercetin leaching

温度 $T/^{\circ}\text{C}$	二阶浸出速率常数 $k/(\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	饱和浸出量 $C_n/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	冲泡 60 min 浸出量 $C_{60}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	C_{60}/C_n
60	0.072	0.661	0.485	0.734
70	0.075	0.716	0.553	0.772
80	0.086	0.721	0.573	0.794
90	0.099	0.743	0.607	0.816
100	0.131	0.775	0.655	0.844

由图 9 可知,槲皮素浸出拟合方程为 $y = -1\ 801.118\ 1x - 2.707\ 27$, $R^2 = 0.875\ 14$ 。使用阿伦尼乌斯公式进行计算,得到槲皮素浸出的活化能为 $E_a = 14\ 975.396\ \text{J/mol}$,略小于总黄酮浸出活化能($E_a = 16\ 628.201\ \text{J/mol}$),说明槲皮素的浸出难度低于赶黄草中黄酮类物质的平均水平,与其他黄酮类物质相比,更容易浸出。

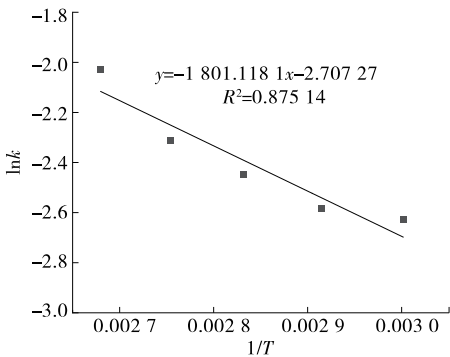


图 9 冲泡温度与槲皮素浸出速率常数的关系

Figure 9 Relationship between temperature and leaching rate constant of quercetin

3 结论

试验表明,赶黄草中的总黄酮、游离氨基酸和槲皮素浸出量受到冲泡温度和冲泡时间的影响,浸出规律满足二阶动力学方程。在 60~100 $^{\circ}\text{C}$ 冲泡 60 min,总黄酮和槲皮素浸出量随冲泡温度和冲泡时间的增加而增加,60 min 时的浸出量接近理论饱和浸出量;在 60~90 $^{\circ}\text{C}$ 冲泡 60 min,游离氨基酸有相同的浸出规律,温度上升至 100 $^{\circ}\text{C}$ 冲泡 20 min 后游离氨基酸热损失较多,不宜在此温度下浸提游离氨基酸。二阶动力学模型能较好地拟合三者的浸出情况,相关系数高,冲泡温度与二阶速率常数 k 线性关系良好,总黄酮、游离氨基酸、槲皮素浸出活化能分别为 16 628.201,23 415.139,14 975.396 J/mol 。此外,60~100 $^{\circ}\text{C}$ 下冲泡 10~60 min,槲皮素浸出量约为总黄酮浸出量的 0.5%~0.6%,比值较为稳定,可用于槲皮素含量的预测。试验只研究了冲泡时间和冲泡温度对赶黄草

中功效成分浸出的影响,建立了功效成分浸出动力学模型,但在实际冲泡或工业生产浸提过程中,冲泡茶水比、茶叶粉碎与否、茶粉粒度等也是影响功效成分浸出的重要因素,后续需要进一步对其他因素的影响进行探索,并建立更加完善的动力学模型,使之能够适用于更多场景,提高其应用价值。

参考文献

[1] 中国科学院植物研究所. 中国高等植物科属检索表[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 772-784.
Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences. Chinese higher plant families search list[M]. Beijing: Science Press, 1979: 772-784.

[2] 成需, 顾慧莹, 宋敏. 赶黄草对预防醉酒及解酒效能研究[J]. 慢性病学杂志, 2006(5): 142-144.
CHENG P, GU H Y, SONG M. A clinical study of atorvastatin in treatment of unstable angina[J]. Chronic Pathematology Journal, 2006(5): 142-144.

[3] 王寒冬. 赶黄草总黄酮的提取纯化和抗氧化活性研究[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2018: 43-48.
WANG D H. Extraction, purification and antioxidant activity of total flavonoids from *Penthorum chinense* Pursh[D]. Ya'an Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2018: 43-48.

[4] YU N, WANG J Q, YU X Q, et al. Chemical constituents of the roots of *Eupatorium chinense* and their anti-inflammatory activities [J]. Phytochemistry Letters, 2022, 48: 11-14.

[5] 程建安, 袁媛, 俞圆, 等. 赶黄草总黄酮对酒精性脂肪肝小鼠肝保护作用的代谢组学研究[J]. 中国现代应用药学, 2021, 38(24): 3 160-3 166.
CHENG J A, YUAN Y, YU Y, et al. Metabolomics study on the liver protection effect of total flavone extract from *Penthorum chinense* Pursh on alcoholic fatty liver in mice[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2021, 38(24): 3 160-3 166.

[6] 覃俊媛, 李梦婷, 杨雪, 等. 赶黄草总黄酮对非酒精性脂肪肝小鼠肝功能和脂质代谢的影响[J]. 成都中医药大学学报, 2017, 40(4): 33-36.
QIN J Y, LI M T, YANG X, et al. Effects of total flavonoids of *Penthorum chinense* Pursh on liver function and lipid metabolism

- for non-alcoholic fatty liver disease in mice[J]. Journal of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, 2017, 40(4): 33-36.
- [7] TAO W L, YUE X, YE R L, et al. Hepatoprotective effect of the *Penthorum chinense* Pursh extract against the CCl_4 -induced acute liver injury via NF- κ B and p38-MAPK pathways in dogs [J]. Animals, 2022, 12(5): 569-569.
- [8] 朱一伦, 李芑, 张大永, 等. 赶黄草营养成分及活性成分分析[J]. 食品工业, 2017, 38(7): 175-179.
- ZHU Y L, LI P, ZHANG D Y, et al. Analysis of nutritional components and active ingredient of *Penthorum chinense* Purch[J]. The Food Industry, 2017, 38(7): 175-179.
- [9] 王星月, 杨潇然, 张紫涵, 等. 赶黄草叶茶制备工艺及其对风味、功效成分溶出的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(2): 241-252.
- WANG X Y, YANG X R, ZHANG Z H, et al. *Penthorum chinense* Pursh leaf tea preparation technology and its influence on flavor and functional ingredients dissolution [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(2): 241-252.
- [10] DILANKA F C, PREETHI S. Extraction kinetics of phytochemicals and antioxidant activity during black tea (*Camellia sinensis* L.) brewing [J]. Nutrition Journal, 2015, 14(1): 74.
- [11] 黄明军, 杨新河, 覃彩芹, 等. 青砖茶 4 种品质成分溶出动力学研究[J]. 湖北工程学院学报, 2016, 36(6): 37-41.
- HUANG M J, YANG X H, QIN C Q, et al. Study on the digestion kinetics of four quality components in the Qingzhuan brick tea[J]. Journal of Hubei Engineering University, 2016, 36(6): 37-41.
- [12] 陈亮, 余佶, 游湘淘, 等. 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[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 183-188.
- CHEN L, YU J, YOU X T, et al. Effect of brewing conditions on bioactive compounds of Xiangxi golden tea and it's antioxidant activity[J]. Food & Machinery, 2019, 35(8): 183-188.
- [13] 亢振, 柳春娣, 刘晓燕, 等. HPLC 法同时测定赶黄草中槲皮素、山柰酚及乔松素含量[J]. 国际中医中药杂志, 2019(8): 863-866.
- KANG Z, LIU C D, LIU X Y, et al. Simultaneous determination of three compounds in *Penthorum chinense* Pursh by HPLC [J]. International Journal of Traditional Chinese Medicine, 2019(8): 863-866.
- [14] 余昕, 朱烨, 向芬, 等. 不同采收期赶黄草中总黄酮的含量测定[J]. 泸州医学院学报, 2010, 33(4): 370-372.
- YU X, ZHU Y, XIANG F, et al. Determination of total flavones of *Penthorum* at different harvset time[J]. Journal of Luzhou Medical University, 2010, 33(4): 370-372.
- [15] 石慧霞. 槲皮素等几种黄酮类化合物的结构性质研究[D]. 成都: 四川大学, 2007: 33-35.
- SHI H X. Study on the structures and properties of quercetin and some other flavonoids [D]. Chengdu: Sichuan University, 2007: 33-35.
- [16] 张娇娇. 槲叶中槲皮素水热法提取工艺的优化研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020: 27-37.
- ZHANG J J. Optimization of hydrothermal extraction process of quercetin from mistletoe leaves [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020: 27-37.
- [17] 王雅琪, 兰继平, 伍振峰, 等. 板蓝根多糖及总氨基酸热稳定性及不同提取方式影响分析[J]. 江西中医药大学学报, 2016, 28(1): 60-63.
- WANG Y Q, LAN J P, WU Z F, et al. Study on heat stability of polysaccharides and total amino acids from radix isatis by different extraction technology[J]. Journal of Jiangxi University of Chinese Medicine, 2016, 28(1): 60-63.
- [18] 单治国, 张春花, 满红平, 等. 冲泡条件对不同等级普洱熟茶氨基酸溶出量的影响[J]. 茶叶通讯, 2022, 49(2): 240-244.
- SHAN Z G, ZHANG C H, MAN H P, et al. Effects of different brewing conditions on the dissolution of amino acid in Pu'er ripe tea[J]. Journal of Tea Communication, 2022, 49(2): 240-244.
- (上接第 118 页)
- [18] 魏心如, 韩敏义, 王鹏, 等. 热处理对鸡胸肉剪切力与蒸煮损失的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(3): 629-633.
- WEI X R, HAN M Y, WANG P, et al. Effect of pretreatment conditions on Warner-Bratzler shear force and cooking loss of chicken breast[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2014, 30(3): 629-633.
- [19] 董超, 张松山, 张丽, 等. 响应面法优化儿童牦牛肉排无磷保水剂工艺[J]. 食品与发酵科技, 2018, 54(4): 25-32.
- DONG C, ZHANG S S, ZHANG L, et al. Optimization of non-phosphate water preserving compound of children's yak steak by response surface methodology[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2018, 54(4): 25-32.
- [20] 李升升, 靳义超. 加热介质和时间对牦牛肉品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(10): 174-178.
- LI S S, JIN Y C. Effect of heating medium and time on the quality of yak meat[J]. Food & Machinery, 2017, 33(10): 174-178.
- [21] 金鑫, 刘少伟, 高邈宸, 等. 豌豆蛋白双螺杆挤压参数对其停留时间分布的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(7): 74-80.
- JIN X, LIU S W, GAO Y C, et al. Effect of extrusion parameters on the residence time distribution of pea protein during twin-screw extrusion process[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(7): 74-80.
- [22] 高扬, 管立军, 李家磊, 等. 高水分挤压纤维化蛋白不同储藏方式对品质特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(9): 151-156.
- GAO Y, GUAN L J, LI J L, et al. Effect of storage method on the quality characteristics of high moisture extrusion textured vegetable protein [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(9): 151-156.