体外消化对藜蒿叶多酚含量及抗氧化活性的影响

熊文，吴婷，曹伟伟，潘思轶，徐晓云
（华中农业大学食品科学技术学院，湖北武汉 430070）

摘要：本文研究了藜蒿叶提取物在模拟体外消化过程中酚酸含量、抗氧化活性以及对酪氨酸酶活力抑制率的变化。研究表明，经过模拟体外消化后藜蒿叶提取物中的绿原酸、1,5-双咖啡酰奎宁酸、3,4-双咖啡酰奎宁酸、3,5-双咖啡酰奎宁酸、4,5-双咖啡酰奎宁酸 5 种酚酸含量均显著性降低。总酚含量和 DPPH、FRAP、ABTS 抗氧化活性经过模拟体外消化后均显著性增加。消化后粗提物和纯化样总酚含量分别升高了 73.57%、23.79%，DPPH 抗氧化能力分别增强了 36.17%、53.29%，FRAP 抗氧化能力分别增强了 28.71%、15.45%，ABTS 清除自由基能力分别增强了 163.67%和 49.50%。此外，藜蒿叶粗提物对酪氨酸酶活力的抑制率在体外消化过程中也显著性增加，消化后粗提物的抑制率可达到 49.88%。从而可有效抑制黑色素生成，具有较好的美白潜力。因此，藜蒿叶提取物经体外消化后具有较好的抗氧化活性和抑制酪氨酸酶活力的能力，有望应用于美白产品的开发，该研究为藜蒿茎加工副产物-藜蒿叶的开发提供了借鉴。

关键词：藜蒿叶；体外消化；抗氧化；酪氨酸酶
文章篇号：1673-9078(2020)01-78-83 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.1.011

Effects of *in Vitro* Digestion on Phenolic Acid Content and Antioxidant Activity of *Artemisia selengensis* Turcz Leaves

XIONG Wen, WU Ting, CAO Wei-wei, PAN Si-yi, XU Xiao-yun
(College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The changes of phenolic acids content, antioxidant activity and tyrosinase inhibitory activity of *Artemisia selengensis* Turcz leaves extract *in vitro* digestion were studied. The results showed that content of chlorogenic acid, 3,4-dicaffeoylquinic acid, 3,5-dicaffeoylquinic acid, 4,5-dicaffeoylquinic acid and 1,5-dicaffeoylquinic acid decreased significantly after simulated digestion. Total phenolic acid content and antioxidant activities including DPPH, FRAP and ABTS increased significantly after *in vitro* simulated digestion. The contents of total phenolic acid in crude extract and purified sample were increased by 73.57%, 23.79%, respectively. The antioxidant capacity of DPPH, FRAP and free radical scavenging capacity of ABTS in crude extract and purified sample increased by 36.17% and 53.29%, 28.71% and 15.45%, 163.67% and 49.50%, respectively. In addition, the inhibitory rate of *Artemisia selengensis* Turcz leaves extract on tyrosinase activity increased significantly after *in vitro* digestion, the inhibition rate of crude extract could reach 49.88%, respectively, which could effectively inhibit melanin production and benefit for whitening. Therefore, *Artemisia selengensis* Turcz leaves extract exhibits good antioxidant activity and tyrosinase inhibitory activity after *in vitro* digestion, which has the potential to develop the whitening products. Results in this work provided a reference for the development of *Artemisia selengensis* Turcz leaves, a by-product of *Artemisia selengensis* Turcz stem processing.

Key words: *Artemisia selengnesis* leaves; *in vitro* digestion; antioxidant activity; tyrosinase

藜蒿（*Artemisia selengnesis* Turcz），菊科蒿属草本植物，又名水蒿、芦蒿等，富含膳食纤维、挥发性油、酚酸、维生素和矿物质等成分[1]，并被报道具有很好的药用价值，如抗氧化、抗菌、消炎、镇咳化痰、止血和加强人体免疫力等功效[2,3]。藜蒿仅其茎部被食用，藜蒿茎加工过程中产生大量的藜蒿叶副产物。研究表明藜蒿叶的总酚等活性成分的含量均高于藜蒿的其他部位，野生藜蒿叶的总酚含量也高于蓝莓、海藻等植物[4]。目前藜蒿叶已被鉴定出的主要酚酸有 5-咖啡酰奎宁酸、3,4-双咖啡酰奎宁酸、3,5-双咖啡酰奎宁酸和 4,5-双咖啡酰奎宁酸等[5]。

藜蒿叶中的咖啡酰奎宁酸类物质作为天然的膳食多酚类化合物，具有抗氧化、降血压、抗菌、抑制酪氨酸酶等药理活性[6,7]。酪氨酸酶是体内合成黑色素的

收稿日期：2019-08-27
基金项目：湖北省农业科技创新中心农产品加工与综合利用团队（2019-620-000-001-31）
作者简介：熊文（1996-），女，硕士，研究方向：农产品加工与贮藏工程
通讯作者：徐晓云（1970-），女，博士，教授，研究方向：农产品加工与贮藏工程

关键酶，当此酶的含量或活性过高时，黑色素聚集容易导致皮肤色斑的发生，而天然来源的多酚类化合物具有较好地抑制酪氨酸酶活力的能力[8]。因此，富含多酚的藜蒿叶提取物不仅具有较好的抗氧化效果，而且还有潜在的美白效果。

目前，关于藜蒿叶的研究主要集中在其本身的化学成分及体外活性方面，Lu Zhang 等[9]研究了不同溶剂提取的藜蒿叶具有较好的抗氧化能力，谢星[4]的研究表明藜蒿叶提取物具有抑制酪氨酸酶活力的能力。但目前通过体外消化模拟藜蒿叶提取物在体内的消化特性鲜有报道。酚酸在胃肠道吸收后被广泛代谢，通常转化为血浆代谢物，其生理活性也会发生变化[10]。体外消化模型是模拟食物摄入后经机体消化产生化学变化的手段，可为评价食品的体内活性提供借鉴。体外消化方法由于效率高、成本低，近年来在食品活性成分的研究中得到了广泛的应用。本研究选用藜蒿叶的粗提物及提纯样品进行模拟体外消化，并对消化各阶段总酚、多酚单体含量、抗氧化能力及抑制酪氨酸酶活力的能力进行了测定，为藜蒿叶作为美白产品的开发提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

藜蒿叶，由武汉荷香源农业发展有限公司提供；*α*-淀粉酶、大孔树脂 AB-8、Trolox（6-羟基-2,5,7,8-四甲基色烷-2-羧酸）、Folin-Ciocalteu（福林酚）试剂、*α*-葡萄糖苷酶、PNPG（对硝基苯-*α*-D-葡萄糖苷），购于上海源叶生物科技有限公司；酪氨酸酶、胃蛋白酶、胰蛋白酶，购于美国 Sigma-Aldrich 公司；ABTS（2,2′-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐）、L-多巴，购于上海梯希爱化成工业发展有限公司；1,5-双咖啡酰奎宁酸(1,5-diCQA)、3,4-双咖啡酰奎宁酸(3,4-diCQA)、3,5-双咖啡酰奎宁酸(3,5-diCQA)、4,5-双咖啡酰奎宁酸(4,5-diCQA)，购于上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

R-1001VN 旋转蒸发仪，郑州长城科工贸有限公司；MULTISKAN GO 多功能酶标仪，美国 Thermo Fisher 公司；KQ-300DA 超声波清洗器，昆山市超声仪器有限公司；SHB-Ⅲ循环水式多用真空泵，郑州长城科工贸有限公司；DLSB-5/20 低温冷却液循环泵，郑州长城科工贸有限公司；ZWE-110X50 恒温培养振荡器，上海智城分析仪器制造有限公司；AX124ZH 电子天平，奥豪斯仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 藜蒿叶粗提物和纯化样品的制备

取新鲜的藜蒿叶于 60 ℃烘箱干燥 24 h，然后粉碎过 40 目筛，称取 200 g 藜蒿叶干粉，按料液比 1:20 加入 50%乙醇溶液超声辅助提取，抽滤后将残渣重复提取 2 次，将过滤后得到的滤液合并，用真空旋转蒸发仪浓缩后经石油醚萃取脱色，剩余的水相经冷冻干燥后即得藜蒿叶粗提物。

将藜蒿叶粗提物溶于蒸馏水后用 AB-8 大孔树脂富集藜蒿叶多酚，先用蒸馏水洗脱 3BV(柱体积)除去糖和蛋白后，将 50%乙醇洗脱下的样品收集并用旋转蒸发仪进行浓缩，最后经冷冻干燥后即得到藜蒿叶的纯化样品。

1.3.2 体外模拟消化

参考 Minekus, M 等[11]的方法，并稍做修改。分别配置 5 mg/mL 的藜蒿叶粗提物及提纯样品，加入 200 μL *α*-淀粉酶溶液，37 ℃水浴振荡 5 min。将取出的样品用 1 mol/L HCl 调节 pH 至 2.0，加入 400 μL 胃蛋白酶溶液，37 ℃水浴振荡 2 h。取出样品后用 1 mol/L $NaHCO_3$ 调节 pH 至 6.5，加入 600 μL 胰蛋白酶溶液和 400 μL 胆盐溶液，37 ℃水浴振荡 2 h，最后调节样品 pH 至 7.0，并定容至 10 mL。各阶段消化做 4 组平行，消化后于-80 ℃冷冻使酶失活。

1.3.3 总酚含量的测定

采用 Folin-Ciocalteu 法测定总酚含量，参考 Bouayed, J.等[12]的方法并稍作修改，总酚含量以每克提取物中含有的没食子酸当量毫克数表示。

1.3.4 咖啡酰奎宁酸单体含量测定

将各阶段消化液冻干后用甲醇复溶，经 0.22 μm 滤膜过滤后使用 HPLC 法测定酚酸单体含量。色谱柱：Agilent Zorbax SB-C18 柱（250×4.6 mm，5 μm），流速：1 mL/min，柱温：25 ℃。流动相 A 为 0.1%（*V/V*）甲酸/水，流动相 B 为乙腈。梯度洗脱方法：0~10 min，10% B；10~15 min，15% B；15~17 min，18% B；17~37 min，18% B；37~42 min，50% B；42~48 min，65% B；48~52 min，80% B；52~58 min，80% B；58~62 min，10% B，检测波长 325 nm。

1.3.5 抗氧化能力的测定

1.3.5.1 DPPH 抗氧化实验

参考 Correa R 等[13]的方法，并稍作修改，在离心管中加入 0.2 mL 样品溶液和 1.8 mL DPPH·溶液，室温避光反应 20 min，于 517 nm 处测定其吸光度，记为 A_i；以等体积 80%甲醇溶液代替样品测定吸光度，

记为 A_0；测定 80%甲醇溶液在 517 nm 下的吸光度，记为 A_t；以 Trolox 为对照，体外消化样品对 DPPH·的清除率公式为：

$$\text{DPPH·清除率（\%）}=(1-\frac{A_i-A_t}{A_0-A_t})\times 100\%$$

以不同浓度的 Trolox 标准溶液对 DPPH·清除率作标准曲线，计算样品清除 DPPH·的能力，单位为 mg Trolox/g 干重。

1.3.5.2 FRAP (Fe^{2+}还原能力) 抗氧化实验

参照 Raquel Pulido 等[14]的方法，并稍作修改。吸取 400 μL 的样液，加入 1.6 mL FRAP 工作液后，充分混匀，反应 30 min 后于 593 nm 处测定吸光度。以 Trolox 标准溶液绘制标准曲线，样品的 FRAP 抗氧化值单位为每克干样品相当于 Trolox 的质量（mg Trolox/g 干重）。

1.3.5.3 ABTS 自由基抗氧化实验

参考 Olaniyi Amos Fawole 等[15]的方法，并稍作修改，将 0.8 mL ABTS 溶液加入含有 0.2 mL 样品溶液的离心管中充分混匀，30 ℃避光反应 6 min 后在 734 nm 处测定其吸光度，记为 A_i；以等体积 80%甲醇溶液代替样品溶液测定吸光度，记为 A_0；测定 80%甲醇溶液在 734 nm 下的吸光度，记为 A_t，计算 ABTS 自由基清除率，公式如下：

$$\text{ABTS自由基清除率（\%）}=(1-\frac{A_i-A_t}{A_0-A_t})\times 100\%$$

以不同浓度的 Trolox 溶液对 ABTS 自由基清除率作标准曲线，计算样品清除 ABTS 自由基的能力，即每克干样品相当于 Trolox 的质量（mg Trolox/g 干重）。

1.3.6 酪氨酸酶抑制活性的测定

参考 MeihuiFan 等[16]的方法，并稍作修改，取 20 μL 稀释后的样液（对照为 PBS），加入 100 μL 65 U/mL 酪氨酸酶溶液于酶标条上混匀，37 ℃条件下振动 2 min，孵育 3 min，再加入 50 μL 5 mmol/L L−多巴底物溶液，混匀后在 37 ℃条件下测定 490 nm 下吸光值的变化，样品组吸光值变化的斜率为 K_1，对照组吸光值变化的斜率为 K_0。计算样品对酪氨酸酶活力的抑制率公式为：

$$\text{酪氨酸酶抑制率（\%）}=(1-\frac{K_i}{K_0})\times 100\%$$

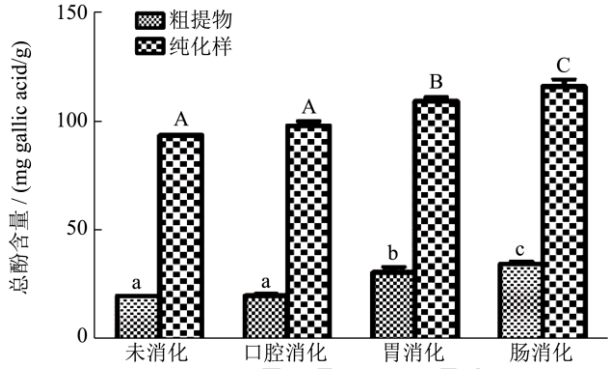
1.4 数据分析

所有试验均重复 4 次，采用 SPSS 16.0 软件进行方差分析，显著性水平设置为 $p<0.05$。

2 结果与讨论

2.1 藜蒿叶提取物体外消化对总酚及酚酸单体含量的影响

2.1.1 模拟体外消化过程中总酚含量的变化



注：不同的小写字母表示粗提物的消化样品间差异显著（$p<0.05$）；不同的大写字母表示纯化样的消化样品间差异显著（$p<0.05$），下同。

图 1 模拟体外消化过程中总酚含量的变化

Fig.1 The change of total phenolic acid content *in vitro* digestion

由图 1 可知，口腔消化对总酚含量没有显著影响，藜蒿叶粗提物和纯化样经过模拟胃消化和肠消化后总酚含量均显著升高，消化后粗提物总酚含量（以没食子酸当量计）从 20.09 mg/g 升高至 34.87 mg/g，升高了 73.57%；纯化样总酚含量（以没食子酸当量计）从 94.31 mg/g 升高至 116.75 mg/g，升高了 23.79%，该结果与葡萄籽多酚在体外胃肠消化后总酚增加 25.46%的结果一致[17]。有研究表明消化过程中多酚含量的改变主要与消化条件如 pH 值、温度等的改变有关，胃肠消化条件可能破坏了多酚与其他糖、蛋白连接的非共价键促进了多酚的释放[18]。因此，藜蒿叶提取物和纯化样经过体外消化后总酚含量显著性升高。

2.1.2 模拟体外消化过程中多酚单体含量的变化

由表 1、表 2 可知，仅藜蒿叶粗提物中的 3,4-diCQA 含量在体外消化时没有发生显著性变化，藜蒿叶粗提物和纯化样的其余多酚单体的含量在经过体外模拟消化后均显著性降低。消化后粗提物中绿原酸含量损失 70.53%，损失率最高，1,5-diCQA、3,5-diCQA、4,5-diCQA 损失率分别为 43.31%、50.00%、39.58%；纯化样中 3,5-diCQA 含量损失率最高，可达到 79.72%，绿原酸、3,4-diCQA、1,5-diCQA、4,5-diCQA 损失率分别为 47.31%、57.26%、73.24%、21.63%。这与研究模拟体外消化会导致山紫菀茶中咖啡酰奎宁酸类物质含量损失 21.9%~46.3%的结论一致[19]，这可能与酚类物质在胃肠环境中不稳定导致酚酸降解有关。与未

消化时相比，口腔消化对藜蒿叶多酚含量的影响小于胃肠消化对多酚的影响。口腔消化中纯化样3,4-diCQA损失率最高，为16.40%；胃肠消化后纯化样3,5-diCQA损失率最高，为75.93%。这表明，胃肠消化的环境可能更容易使藜蒿叶中的多酚化合物降解。因此，体外消化后，藜蒿叶提取物和纯化样的大部分酚酸含量显著性下降。

表1 藜蒿叶粗提物模拟体外消化各阶段多酚单体含量

Table 1 The phenolic acid content of *Artemisia selengensis Turcz* leaves extract *in vitro* digestion

项目	未消化/(mg/g)	口腔消化/(mg/g)	胃消化/(mg/g)	肠消化/(mg/g)	损失/%
绿原酸	1.9±0.09^{b}	1.90±0.09^{b}	0.74±0.03^{a}	0.56±0.09^{a}	70.53
3,4-diCQA	0.49±0.02^{b}	0.48±0.03^{ab}	0.41±0.03^{a}	0.44±0.04^{ab}	-
1,5-diCQA	1.27±0.01^{b}	1.28±0.02^{b}	0.73±0.13^{a}	0.72±0.01^{a}	43.31
3,5-diCQA	1.56±0.08^{c}	1.32±0.04^{b}	0.78±0.15^{a}	0.78±0.02^{a}	50.00
4,5-diCQA	0.48±0.02^{b}	0.47±0.03^{b}	0.36±0.04^{a}	0.29±0.06^{a}	39.58

注：仅比较同一化合物在各消化阶段的含量差异，不同的小写字母表示差异显著(p<0.05)。下表同。

表2 藜蒿叶纯化样模拟体外消化各阶段多酚单体含量

Table 2 The phenolic acid content of *Artemisia selengensis Turcz* leaves purified extract *in vitro* digestion

项目	未消化/(mg/g)	口腔消化/(mg/g)	胃消化/(mg/g)	肠消化/(mg/g)	损失/%
绿原酸	6.51±0.31^{c}	6.80±0.15^{c}	4.34±0.43^{b}	3.43±0.36^{a}	47.31
3,4-diCQA	6.34±0.07^{d}	5.30±0.24^{c}	3.78±0.65^{b}	2.71±0.36^{a}	57.26
1,5-diCQA	11.36±0.16^{d}	10.61±0.31^{c}	6.23±0.07^{b}	3.04±0.30^{a}	73.24
3,5-diCQA	14.25±0.05^{c}	13.71±0.64^{c}	8.02±0.49^{b}	2.89±0.12^{a}	79.72
4,5-diCQA	4.16±0.15^{b}	4.52±0.30^{b}	3.25±0.08^{a}	3.26±0.52^{a}	21.63

2.2 藜蒿叶提取物体外消化过程中抗氧化活性的变化

2.2.1 体外消化对藜蒿叶提取物清除DPPH自由基能力的影响

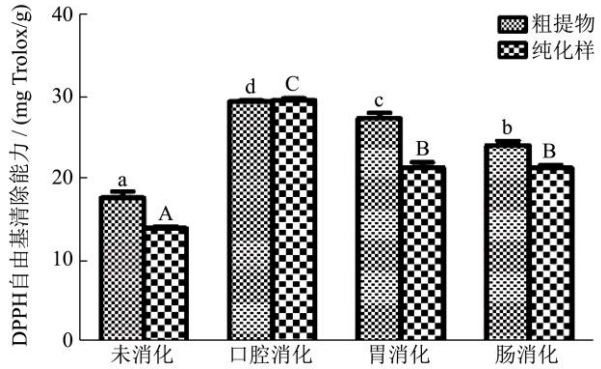


图2 体外消化过程中DPPH抗氧化能力的变化

Fig.2 Changes in DPPH antioxidant capacity *in vitro* digestion

由图2可知，经过口腔消化后，藜蒿叶粗提物及纯化样的清除DPPH自由基能力显著高于未消化样品，分别升高了66.73%和112.83%。胃肠消化后两种藜蒿叶提取物清除DPPH自由基能力均显著性下降，可能是因为胃肠环境如pH条件、酶的作用等导致酚类物质的降解从而使藜蒿叶提取物的抗氧化能力降低[20]。但与口腔消化前相比，消化后的粗提物和纯化样的DPPH抗氧化活性显著增大，分别升高了36.17%和53.29%，这与Guan-Lin Chen等[21]的研究结果一致，其研究表明苹果、香蕉和梨等29种水果经过体外模拟胃消化后DPPH抗氧化能力显著升高，模拟肠消化会削弱部分抗氧化能力，但仍显著高于未消化样。这表明体外消化后，藜蒿叶粗提物及纯化样清除DPPH自由基的能力升高。

2.2.2 体外消化对藜蒿叶提取物铁离子还原能力FRAP的影响

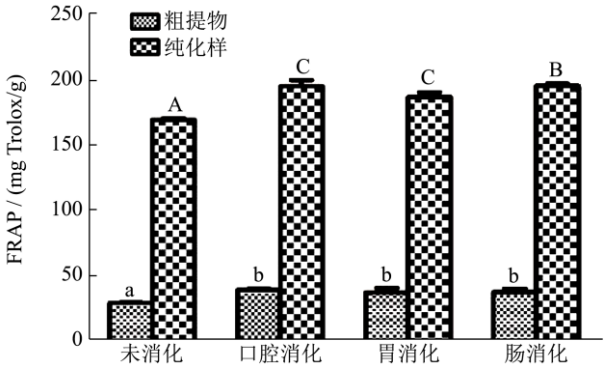


图3 体外消化过程中铁离子还原能力的变化

Fig.3 Changes in Fe^{2+} reducing ability *in vitro* digestion

由图3可知，藜蒿叶粗提物经过口腔消化后铁离子还原能力显著升高，FRAP抗氧化能力（以Trolox当量计）从28.94 mg/g升至38.54 mg/g，升高了33.17%，且经过模拟胃肠消化后铁离子还原能力没有

发生显著性改变。藜蒿叶纯化样在经过口腔消化后铁离子还原能力显著升高，经过模拟肠消化后显著性降低，但较未消化时抗氧化能力从 169.24 mg/g 升至 195.39 mg/g，升高了 15.45%。因此，模拟体外消化均有利于藜蒿叶粗提物及纯化样铁离子还原能力的增加。该结果与 Peter C 等[22]研究番茄汁、甜菜汁等经过胃肠消化后抗氧化能力显著高于未消化时的变化结果一致。

2.2.3 体外消化对藜蒿叶提取物清除 ABTS 自由基能力的影响

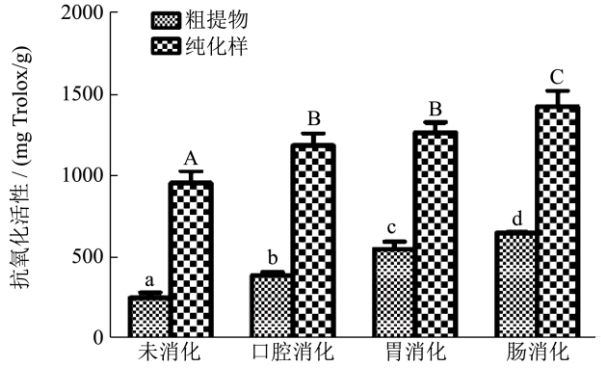


图 4 体外消化过程中清除 ABTS 自由基能力的变化

Fig.4 Changes in scavenging ABTS free radical capacity *in vitro* digestion

由图 4 可知，模拟体外消化后，藜蒿叶粗提物及纯化样清除 ABTS 自由基能力均显著性升高，与口腔消化前相比，粗提物及纯化样 ABTS 抗氧化能力（以 Trolox 当量计）分别升高了 163.67%、49.50%。藜蒿叶粗提物及纯化样在体外消化条件下有较好的 ABTS 自由基清除能力，可能是由于消化过程中提取物中活性物质的释放[23]和酚酸分解为抗氧化能力更强的化合物[24]。这与 Zhiyong He 等[25]研究含多酚的果汁-牛奶饮料在体外消化过程中 ABTS 自由基清除能力显著升高的结果一致。

2.3 体外消化过程对藜蒿叶提取物抑制酪氨酸酶活力的影响

由图 5 可知，藜蒿叶粗提物经口腔消化后抑制酪氨酸酶能力显著增强，胃肠消化阶段的条件对其抑制作用无影响，消化后抑制酪氨酸酶能力从 26.48%升高至 49.88%。经肠液消化后，藜蒿叶纯化样对酪氨酸酶的抑制率显著高于经口腔消化和胃消化的纯化样，对酪氨酸酶的抑制率升高至 62.56%，这可能与肠液消化条件下纯化样中不同酚酸间的相互作用[26]抑制酪氨酸酶的活力有关。酪氨酸酶是动物体黑色素产生的关键酶，抑制其活性可以减少黑色素的生成[27]。因此经过体外消化后的藜蒿叶提取物是较好的天然酪氨酸酶抑制剂，有预防皮肤色斑的功效。

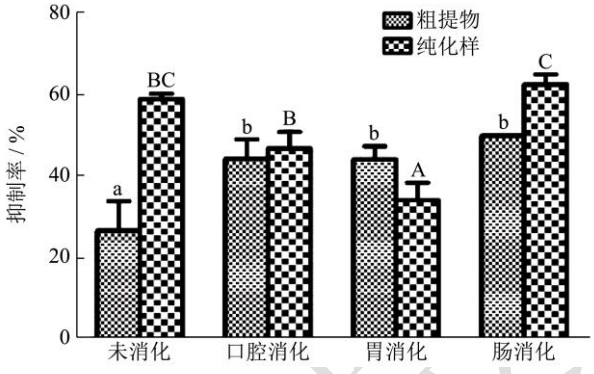


图 5 体外消化过程中对酪氨酸酶活力抑制作用的变化

Fig.5 Changes in inhibition of tyrosinase activity *in vitro* digestion

3 结论

本实验研究了藜蒿叶提取物模拟体外消化过程中酚酸类物质的含量、抗氧化活性以及抑制酪氨酸酶活力的变化。研究结果表明，除粗提物中的 3,4-diCQA，体外消化会造成藜蒿叶提取物中绿原酸和咖啡酰奎宁酸类酚酸单体含量的下降，损失率均在 21.63%以上，这与体外消化环境导致此类酚酸的降解有关；体外消化促进了藜蒿叶提取物的 ABTS、DPPH 和 FRAP 抗氧化能力的升高，这可能是由于模拟胃肠的消化液有利于活性物质的释放以及酚酸前体水解成抗氧化活性更强的化合物，但还有待进一步的研究；此外，藜蒿叶粗提物经过体外消化后抑制酪氨酸酶活力的能力显著性升高，消化后粗提物的酪氨酸酶抑制率达到 49.88%。因此，经过体外消化后的藜蒿叶提取物不仅具有较好的抗氧化能力，而且具有较好的抑制酪氨酸酶活力的能力，是一种天然有效的美白原料。

参考文献

[1] 付明,牛友芽,胡兴,等.藜蒿成分及开发利用[J].安徽农业科学,2008,36(7):2803-2804
FU Ming, NIU You-ya, HU Xing, et al. Composition and exploitation of *Artemisia selengensis* [J]. Anhui Agricultural Science, 2008, 36(7): 2803-2804

[2] 彭琳.藜蒿有效成分分离分析方法及其药用机理研究[D].长沙:湖南大学,2011
PENG Lin. Separation and analysis of active ingredients from *Artemisia selengensis* and study on its medicinal mechanism [D]. Changsha: Hunan University, 2011

[3] Kim A R, Ko H J, Chowdhury M A, et al. Chemical constituents on the aerial parts of *Artemisia selengensis* and

their IL-6 inhibitory activity [J]. Archives of Pharmacal Research, 2015, 38(6): 1059-1065

[4] 谢星.藜蒿中 α-葡萄糖苷酶抑制剂的筛选、分离纯化及其抑制机理初探[D].南昌:南昌大学,2018
XIE Xing. Screening, isolation and purification of alpha-glucosidase inhibitors from *Artemisia selengensis* and preliminary study on their inhibition mechanism [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018

[5] Zhang L, Tu Z, Xie X, et al. Antihyperglycemic, antioxidant activities of two acer palmatum cultivars, and identification of phenolics profile by UPLC-QTOF-MS/MS: new natural sources of functional constituents [J]. Industrial Crops and Products, 2016, 89: 522-532

[6] 吴卫华,康桢,欧阳冬生,等.绿原酸的药理学研究进展[J].天然产物研究与开发,2006,18(4):691-694
WU Wei-hua, KANG Zhen, OU YANG Dong-sheng, et al. Advances in pharmacology of chlorogenic acid [J]. Research and Development of Natural Products, 2006, 18(4): 691-694

[7] Ludwig I A, Paz de Peña M, Concepción C. Catabolism of coffee chlorogenic acids by human colonic microbiota [J]. Biofactors, 2013, 39(6): 623-632

[8] 吴颖,崔彬淯,王露,等.5 种天然植物提取物抗氧化性和酪氨酸酶抑制作用的比较[J].现代食品科技,2018,34(10): 81-86
WU Ying, CUI Bin-yu, WANG Lu, et al. Comparison of antioxidant activity and tyrosinase inhibition of five natural plant extracts [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(10): 81-86

[9] Zhang L, Tu Z, Wang H, et al. Metabolic profiling of antioxidants constituents in *Artemisia selengensis* leaves [J]. Food Chemistry, 2015, 186: 123-132

[10] Correa V G, Gonçalves G A, de Sá-Nakanishi A B, et al. Effects of *in vitro* digestion and *in vitro* colonic fermentation on stability and functional properties of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) beverages [J]. Food Chemistry, 2017, 237: 453-460

[11] Minekus M, Alminger M, Alvito P, et al. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food-an international consensus [J]. Food & Function, 2014, 5(6): 1113-1124

[12] Bouayed J, Hoffmann L, Bohn T. Total phenolics, flavonoids, anthocyanins and antioxidant activity following simulated gastro-intestinal digestion and dialysis of apple varieties: Bioaccessibility and potential uptake [J]. Food Chemistry, 2011, 128(1): 14-21

[13] Corrêa R C G, de Souza A H P, Calhelha R C, et al. Bioactive formulations prepared from fruiting bodies and submerged culture mycelia of the Brazilian edible mushroom *Pleurotus ostreatoroseus* Singer [J]. Food & Function, 2015, 6(7): 2155- 2164

[14] Pulido R, Bravo L, Saura-Calixto F. Antioxidant activity of dietary polyphenols as determined by a modified ferric reducing/antioxidant power assay [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(8): 3396-3402

[15] Fawole O A, Opara U L. Stability of total phenolic concentration and antioxidant capacity of extracts from pomegranate co-products subjected to *in vitro* digestion [J]. BMC Complementary and Alternative Medicine, 2016, 16(1): 358

[16] Fan M, Zhang G, Hu X, et al. Quercetin as a tyrosinase inhibitor: Inhibitory activity, conformational change and mechanism [J]. Food Research International, 2017, 100: 226-233

[17] Tagliazucchi D, Verzelloni E, Bertolini D, et al. *In vitro* bio-accessibility and antioxidant activity of grape polyphenols [J]. Food Chemistry, 2010, 120(2): 599-606

[18] 刘国艳,张洁,徐鑫,等.体外消化对芹菜黄酮混合物和单体的含量及抗氧化应激能力的影响[J].食品科学,2018,39(18): 8-14
LIU Guo-yan, ZHANG Jie, XU Xin, et al. Effects of *in vitro* digestion on the content of flavonoid mixtures and monomers in celery and their antioxidant stress ability [J]. Food Science, 2018, 39(18): 8-14

[19] Cha K H, Song D G, Kim S M, et al. Inhibition of gastrointestinal lipolysis by green tea, coffee, and gomchui (*Ligularia fischeri*) tea polyphenols during simulated digestion [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(29): 7152-7157

[20] Ortega-Vidal J, Ruiz-Riaguas A, Fernández-de Córdova M L, et al. Phenolic profile and antioxidant activity of Jasonia glutinosa herbal tea: Influence of simulated gastrointestinal *in vitro* digestion [J]. Food Chemistry, 2019, 287: 258-264

[21] Chen G L, Chen S G, Zhao Y Y, et al. Total phenolic contents of 33 fruits and their antioxidant capacities before and after *in vitro* digestion [J]. Industrial Crops and Products, 2014, 57: 150-157

（下转第 287 页）