

李宪秀, 何涛, 杨帆, 等. 食叶草的营养活性成分含量及生物活性分析 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 307–315. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040234

LI Xianxiu, HE Tao, YANG Fan, et al. Analysis of Nutritional Components, Functional Components and Bioactivity of Edible Dock[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(3): 307–315. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040234

· 分析检测 ·

食叶草的营养活性成分含量及生物活性分析

李宪秀^{1,2,3}, 何涛^{1,2,3}, 杨帆^{1,2,3}, 汪翀^{1,2,3}, 周怡^{1,2,3}, 沙如意^{1,2,3}, 毛建卫^{2,3,4,*}

(1. 浙江科技学院, 生物与化学工程学院, 浙江杭州 310023;

2. 浙江省农产品化学与生物加工技术重点实验室, 浙江杭州 310023;

3. 浙江省农业生物资源生化制造协同创新中心, 浙江杭州 310023;

4. 浙江工业职业技术学院, 浙江绍兴 312000)

摘要: 为探究食叶草的开发应用价值, 测定了食叶草中的主要营养成分和活性成分含量, 并通过检测食叶草提取物对自由基的清除能力、还原力和 α -葡萄糖苷酶活性抑制能力, 探究食叶草的抗氧化和降血糖活性。结果表明: 食叶草中的总蛋白含量高达 34.70 mg/100 mg (干重), 必需氨基酸含量和药用氨基酸含量分别占总氨基酸含量的 45% 和 65%, 氨基酸比值系数分 (SRC) 超过 68, 表明食叶草具有较高的营养保健价值; 总酚含量、总黄酮含量和超氧化物歧化酶比活力分别为 11.35 mg GAE/g (干重)、3.56 mg RE/g (干重) 和 15.24±3.40 U/mg pro; 苹果酸和草酸是食叶草中最主要的有机酸 (~89.24%); 食叶草提取物对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (DPPH) 自由基和 2,2-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸 (ABTS) 自由基的半数抑制浓度 (IC₅₀) 分别为 0.465 mg/mL 和 0.066 mg/mL, 当还原力 (吸光值) 达到 0.5 时的提取物浓度 (IC_{0.5}) 为 0.528 mg/mL, 且 α -葡萄糖苷酶活性抑制效果较好, 体现出良好的抗氧化活性和降血糖活性。以上研究结果可丰富食叶草的科学研究, 为其深入开发利用提供理论依据。

关键词: 食叶草, 营养成分, 活性成分, 抗氧化活性, 降血糖活性

中图分类号: TS201.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)03-0307-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040234



本文网刊:

Analysis of Nutritional Components, Functional Components and Bioactivity of Edible Dock

LI Xianxiu^{1,2,3}, HE Tao^{1,2,3}, YANG Fan^{1,2,3}, WANG Chong^{1,2,3}, ZHOU Yi^{1,2,3}, SHA Ruyi^{1,2,3}, MAO Jianwei^{2,3,4,*}

(1. School of Biological and Chemical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory for Chemical & Biological Processing Technology of Farm Product, Hangzhou 310023, China;

3. Zhejiang Provincial Collaborative Innovation Center of Agricultural Biological Resources Biochemical Manufacturing, Hangzhou 310023, China;

4. Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China)

Abstract: In order to explore the development and application of edible dock, the main nutrients and functional components contents were measured, and the antioxidant and hypoglycemic activities were evaluated by measuring the free radical scavenging ability, reducing power and α -glucosidase inhibitory of extract from edible dock. The results showed that the value of total protein reached about 34.70 mg/100 mg (dry weight), the ratios of essential amino acids and medicinal amino acids to total amino acids were respectively 45% and 65%, and the score of amino acid ratio coefficient (SRC) was over 68, indicating that the edible dock was a kind of plant of high nutritional value. The contents of total phenol, total flavonoid and

收稿日期: 2022-04-20

基金项目: 浙江省重点研发计划项目 (2017C02009); 浙江科技学院科研启动基金项目 (F701103K12)。

作者简介: 李宪秀 (1992-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 农业生物资源生化制造, E-mail: lixianxiu@zust.edu.cn。

* 通信作者: 毛建卫 (1964-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向: 农业生物资源生化制造, E-mail: zjhzjmw@163.com。

the specific activity of superoxide dismutase were 11.35 mg GAE/g (dry weight), 3.56 mg RE/g (dry weight) and 15.24±3.40 U/mg pro, respectively. Malic acid and oxalic acid were the main organic acid in edible dock (~89.24%). The values corresponding to the extract concentration required to scavenge 50% (IC₅₀) of 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) free radical and 2,2-azino-bis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonic acid) (ABTS) free radical were respectively 0.465 mg/mL and 0.066 mg/mL, and the extract concentration providing reducing power (absorbance) of 0.5 (IC_{0.5}) was about 0.528 mg/mL, which indicated that the edible dock possessed good antioxidant activity. Moreover, the extract of edible dock significantly inhibited α -glucosidase activity in experimental ranges, thus proving its favorable hypoglycemic activity. The above results can enrich the scientific research of edible dock and provide the theoretical foundation for its further development and utilization.

Key words: edible dock; nutritional components; functional components; antioxidant activity; hypoglycemic activity

食叶草 (*Rumex patientia* L.×*Rumex tianschanicus* A. LOS)学名食叶草酸模,又名食叶菜、蛋白草,是以鲁梅克斯 K-1 (*Rumex patientia* L.×*Rumex tianschanicus* cv. *Rumex* K-1)为母本,与父本巴天酸模 (*Rumex patientia* L.)进行杂交选育获得^[1-2]。食叶草生长快,产量高,每亩地年产量达 20 吨以上,是麦子、大米和玉米亩年产量的 20~80 倍,蛋白质含量尤其丰富,高达 30% 以上^[3]。

目前,有关食叶草的研究集中在育苗种植、毒理学及安全性评价等方面。植石灿等^[4]在选地、整地、施肥、播种育苗、田间管理、刈割收获方面对食叶草的高产优质种植技术进行了总结。郑旭等^[5]基于食叶草的耐盐碱特性,研究垄上栽培对盐碱地食叶菜根系生长和产量的影响,发现垄上栽培能够促进食叶草的地下根系发育和叶片生长,提高食叶草产量。楼敏涵等^[1]通过对食叶草粉进行致畸实验,证明了食叶草在实验浓度下对 SD 大鼠无母体毒性、致畸性和胚胎毒性,为食叶草的安全性评价提供了毒理学支持;此外,他们还通过对新鲜食叶草的成分分析评估了食叶草的食用安全性^[6]。种植技术的不断探索和安全性评估将会带动食叶草深加工产业的发展,其作为新食品原料的开发应用前景广阔。

当前,人们对食叶草的认知和市场接受度较低^[4],尚需通过剖析食叶草的营养成分和生物活性来提高食叶草的市场认知度,促进其产业化加工利用。然而,有关食叶草营养成分分析的研究较少,且未见有关其生物活性评价的文献报道。新鲜食叶草含水率高,不耐储存^[7],因此本研究首先对新鲜食叶草进行冷冻干燥处理,然后对食叶草中的总蛋白、氨基酸、总酚、总黄酮、有机酸等营养活性成分含量进行检测分析,并通过体外实验探究食叶草的抗氧化和降血糖活性,旨在丰富食叶草的科学研究,为拓宽食叶草的综合利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜食叶草 采自 2021 年 11 月,由浙江食叶草农业科技有限公司提供;福林酚、甲醇、过硫酸钾 (K₂S₂O₈)、铁氰化钾 (K₃[Fe(CN)₆])、三氯化铁 (FeCl₃)、三氯乙酸 (C₂HCl₃O₂),草酸钠等均为分析

纯 国药集团化学试剂有限公司;混合氨基酸标准液 日本和光纯业工业株式会社;总超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 检测试剂盒 (WST-1 法)、总蛋白定量测定试剂盒 (BCA 法) 南京建成生物工程研究所;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、2,2-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸 (2,2-azino-bis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonic acid), ABTS)、对硝基苯- α -D-葡萄糖苷 (4-nitrophenyl α -D-glucopyranoside, pNPG)、阿卡波糖、 α -葡萄糖苷酶 (50 U/mg) 均为分析纯,美国 Sigma 公司;没食子酸、芦丁、抗坏血酸(均为分析纯)、乳酸、苹果酸、琥珀酸、柠檬酸等(色谱纯) 上海阿拉丁试剂有限公司。

KQ-300E 型超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司;XMTD-204 数显式电热恒温水浴锅 常州诺基仪器有限公司;LYO-1 真空冷冻干燥机 上海东富龙科技股份有限公司;SpectraMax iD5 多功能微孔读板酶标仪 美国 Molecular Devices 公司;L-8900 氨基酸自动分析仪 日本日立公司;Waters e2695 高效液相色谱仪 美国 Waters 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 食叶草提取液制备 将新鲜食叶草洗净沥干,置于-20℃冷冻 24 h,然后进行真空冷冻干燥。将冻干后的食叶草粉碎,过 80 目筛,密封后置于 4℃冰箱保存备用。每 10 g 新鲜食叶草可制备得到 1 g 冻干食叶草粉。称取一定质量的食叶草冻干粉末,按 1:26(w/v)固液比与去离子水混合均匀后,50℃超声波(功率 400 W)浸提 2 h,8000 r/min 离心 10 min,收集上清液。

1.2.2 营养成分含量测定

1.2.2.1 总蛋白含量测定 参照 GB/T 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的凯氏定氮法检测食叶草的蛋白质含量。

1.2.2.2 氨基酸含量测定 样品制备如下:称取 1 g 食叶草粉末置于水解管中,加入 10 mL 6 mol/L 的 HCl 和 3~4 滴重蒸酚,冷却 5 min 后将高纯氮气充入水解管,在氮气条件下将水解管封闭后放在干燥箱内 110℃水解 22 h。待水解管充分冷却后,将水解液倒入 25 mL 容量瓶中,然后用去离子水多次冲洗

水解管,将冲洗的液体倒入容量瓶定容,过滤。取 1 mL 滤液,放于 45 °C 真空干燥器内进行干燥,残留物加 1 mL 水溶解,再放于真空干燥箱内干燥,然后用 1 mL 0.02 mol/L 的柠檬酸-柠檬酸钠缓冲液溶解干燥后的残留物,再用 0.22 μm 的微孔滤膜过滤,采用氨基酸分析仪对滤液进行氨基酸种类及含量检测。

参考程勇杰等^[8]的方法,具体检测条件为:氨基酸分析仪配有磺酸型阳离子树脂分离柱(4.6 mm×60 mm×3 μm),检测器为荧光检测器,流动相为 0.02 mol/L 的柠檬酸-柠檬酸钠缓冲液,流速为 0.4 mL/min,分离柱和反应柱柱温分别为 57 °C 和 135 °C,进样量为 20 μL,通道一检测波长为 570 nm,通道二检测波长为 440 nm,采用外标法测定食叶草的氨基酸种类及含量。

氨基酸比值(RAA)、氨基酸比值系数(RC)和氨基酸比值系数分(SRC)的计算方法参照陈宏靖等^[9]的方法。

1.2.3 活性成分含量测定

1.2.3.1 总酚含量测定 采用福林酚法^[10]测定提取液中的总酚含量,以没食子酸当量(mg GAE/g(干重))表示。用去离子水配制一系列不同浓度的没食子酸标准液,分别吸取 100 μL 各浓度的没食子酸溶液加入 500 μL 10% 福林酚试剂中,充分振荡混匀,反应 3 min 后加入 400 μL 质量分数为 7.5% 的 Na₂CO₃ 溶液,置于 25 °C,120 r/min 下避光振荡反应 1 h。以不加没食子酸标准液的溶液为空白组,用酶标仪在波长为 765 nm 下测定溶液的吸光值。以没食子酸浓度为横坐标,各浓度对应的吸光值为纵坐标,绘制没食子酸标准曲线,标准曲线回归方程及决定系数分别为 $y=0.0049x+0.0552$, $R^2=0.9996$ 。将食叶草提取液进行适当稀释后,按照上述相同步骤,测定溶液吸光值,根据没食子酸标准曲线方程计算食叶草中的总酚含量。

1.2.3.2 总黄酮含量测定 采用亚硝酸钠(NaNO₂)-硝酸铝(Al(NO₃)₃)比色法^[11]测定总黄酮含量,以芦丁当量(mg RE/g(干重))表示。用 30% 乙醇配制浓度为 0.2 mg/mL 的芦丁标准液,取不同体积的标准液,用无水乙醇稀释后配制成不同浓度的芦丁工作液。分别吸取 0.5 mL 各浓度的芦丁工作液与 0.03 mL 5% 的 NaNO₂ 溶液混合,摇匀后放置 6 min,然后加入质量浓度为 10% 的 Al(NO₃)₃ 溶液 0.03 mL,混合均匀后静置 6 min,再加入 1 mol/L 的 NaOH 0.4 mL 和去离子水 0.04 mL,摇匀后静置 15 min,用酶标仪测定 510 nm 处溶液的吸光值。以芦丁溶液浓度为横坐标,吸光值为纵坐标,绘制标准曲线,标准曲线回归方程及决定系数分别为 $y=0.0051x+0.086$, $R^2=0.9995$ 。将食叶草提取液进行适当稀释后,根据上述步骤,测定溶液吸光值,根据芦丁标准曲线方程计算食叶草中的总黄酮含量。

1.2.3.3 SOD 活力测定 首先,将食叶草提取液进行

适当稀释后,按照总蛋白定量测定试剂盒(BCA 法)的说明书步骤吸取各试剂置于 96 孔板中,混匀后置于 37 °C 孵育 30 min,于 562 nm 处读取吸光值,根据试剂盒说明书的计算方法得到提取液的蛋白质浓度(mg/mL)。然后,将食叶草提取液进行适当稀释后,按照总 SOD 测定试剂盒(WST-1 法)的说明书步骤吸取各试剂置于 96 孔板中,混匀后置于 37 °C 孵育 20 min,于 450 nm 处读取吸光值,根据试剂盒说明书的计算方法得到 SOD 抑制率,将在反应体系中 SOD 抑制率达到 50% 时所对应的酶量为一个 SOD 活力单位(U),根据试剂盒说明书计算得到 SOD 活力(U/mL),SOD 比活力为提取液中 SOD 总活力与蛋白质含量之比(U/mg pro)。

1.2.3.4 有机酸含量测定 参考王珍珍等^[12]的方法检测食叶草中的有机酸含量。检测条件:色谱柱为 AtlantisRR T3 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm);流动相 A 为甲醇,流动相 B 为 0.01 mol/L KH₂PO₄(pH2.7),流动相 A:流动相 B=2:98;流速为 1.0 mL/min;柱温为 20 °C;进样体积 10 μL;检测波长 210 nm;洗脱方式为等度洗脱;检测器为光电二极管阵列检测器。样品配制与检测:配制苹果酸、乳酸、柠檬酸和琥珀酸的混合标准溶液,其浓度均为 1.0 mg/mL,分别将其不稀释、稀释 2、5、10、20 倍,经 0.22 μm 微孔滤膜过滤后得到不同浓度的混合标准液,按照上述条件进样检测,以有机酸浓度为横坐标,峰面积为纵坐标,绘制标准曲线,标准曲线回归方程及决定系数如表 1 所示。

表 1 有机酸标准曲线
Table 1 Standard curves of organic acids

顺序	有机酸	标准曲线	决定系数(R ²)
1	苹果酸	$y=5.7 \times 10^6 x + 1.11 \times 10^4$	0.9951
2	乳酸	$y=4.49 \times 10^6 x - 3.83 \times 10^3$	0.9965
3	柠檬酸	$y=4.72 \times 10^6 x - 2.53 \times 10^4$	0.9968
4	琥珀酸	$y=3.28 \times 10^6 x - 9.18 \times 10^3$	0.9968

样品配制与检测:取离心后的食叶草提取液经 0.01 mol/L 的 KH₂PO₄(pH2.7)稀释 3 倍后,用 0.22 μm 微孔滤膜过滤,按照上述高效液相色谱检测条件进样检测提取液中的有机酸,将检测得到的有机酸峰面积带入表 1 中的标准曲线方程计算食叶草中的各个有机酸含量。

运用上述高效液相色谱法检测食叶草中的草酸含量时,易出现干扰峰,因此参考胡水清青等^[13]的方法检测食叶草中的草酸含量。用去离子水配制一系列不同浓度的草酸钠溶液,吸取 1 mL 与 80 μL 0.5 mg/mL FeCl₃ 溶液、800 μL 2 mol/L 的 KCl 缓冲液(pH2.0)和 48 μL 0.5%(w/v)的磺基水杨酸溶液混合均匀,显色 30 min 后,以去离子水为参比,用酶标仪在 510 nm 处测定吸光值。以草酸钠浓度为横坐标,各浓度对应的吸光值为纵坐标,绘制标准曲线,标

准曲线回归方程及决定系数分别为 $y=0.3351x+0.0047$, $R^2=0.9939$ 。将食叶草提取液稀释 5 倍,按上述方法检测提取液的吸光值,根据草酸钠标准曲线方程计算食叶草中的草酸含量。

1.2.4 抗氧化活性测定

1.2.4.1 样品制备 将食叶草提取液置于 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 冷冻 24 h 后,于真空冷冻干燥机进行冻干。

1.2.4.2 DPPH 自由基清除能力测定 参考范昊安等^[14]的 DPPH 自由基清除率检测方法,并作适当调整。用去离子水配制一系列不同浓度的食叶草提取物溶液(0.2~1.0 mg/mL)和抗坏血酸溶液(0.001~0.020 mg/mL)为待测溶液,取 0.6 mL 待测溶液与 1.2 mL 0.1 mmol/L 的 DPPH-甲醇溶液和 135 μL 50 mmol/L Tris-HCl 缓冲液(pH7.4)混匀,25 $^\circ\text{C}$ 恒温水浴避光反应 30 min,用酶标仪在 517 nm 下测定吸光值,通过公式(1)计算 DPPH 自由基清除能力:

$$\text{DPPH自由基清除率(\%)} = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中: A_0 为空白组对照吸光值,即去离子水+DPPH-甲醇溶液+Tris-HCl 缓冲液; A_1 为样品测定组吸光值,即样品+DPPH-甲醇溶液+Tris-HCl 缓冲液; A_2 为样品本底组吸光值,即样品+甲醇溶液+Tris-HCl 缓冲液。

1.2.4.3 ABTS 自由基清除能力测定 参考范昊安等^[14]的 ABTS 自由基清除率检测方法,并作适当调整。用 5 mmol/L 的 PBS 缓冲液(pH7.4)配制浓度为 7 mmol/L 的 ABTS 溶液,将一定质量的 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 加入 ABTS 溶液中,定容至最终浓度为 2.45 mmol/L,在室温下黑暗放置 12~16 h,使用前用 PBS 缓冲液对 ABTS 溶液进行适当稀释,使其在 734 nm 下的吸光值为 0.7 ± 0.02 。用去离子水配制一系列不同浓度的食叶草提取物溶液(0.025~0.200 mg/mL)和抗坏血酸溶液(0.001~0.010 mg/mL)为待测溶液,取 0.1 mL 待测溶液与 1 mL ABTS 稀释液混匀,在 30 $^\circ\text{C}$ 下避光反应 1 h,用酶标仪在 734 nm 下测定溶液吸光值,通过公式(2)计算 ABTS 自由基清除能力:

$$\text{ABTS自由基清除率(\%)} = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中: A_0 为空白对照组吸光值,即去离子水+ABTS 稀释液; A_1 为样品测定组吸光值,即样品+ABTS 稀释液; A_2 为样品本底组吸光值,即样品+PBS 缓冲液。

1.2.4.4 还原力测定 参考范昊安等^[14]的还原力检测方法,并作适当调整。用去离子水配制一系列不同浓度的食叶草提取物溶液(0.1~1.0 mg/mL)和抗坏血酸溶液(0.003~0.015 mg/mL)为待测溶液,取待测溶液 200 μL ,加入磷酸盐缓冲液(0.2 mol/L, pH6.6)至

2.5 mL,然后加入 2.5 mL 1%(w/v) $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$,混合均匀,50 $^\circ\text{C}$ 下恒温水浴 30 min,再加入 2.5 mL 10%的 $\text{C}_2\text{HCl}_3\text{O}_2$,混合均匀。静置 10 min,立即取 2.5 mL 上清液,加入 2.5 mL 去离子水和 0.5 mL 0.1% FeCl_3 ,混匀。以去离子水为空白对照,用酶标仪在 700 nm 下测定溶液的吸光值,以吸光值大小表示还原力的高低。

1.2.5 降血糖活性测定 通过样品对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制率高高低表示降血糖活性的大小^[15-16]。参照 Su 等^[15]的方法检测 α -葡萄糖苷酶活性的抑制率,并作适当调整。用 0.2 mol/L 的 PBS 缓冲液(pH6.8)配制一系列不同浓度的食叶草提取物溶液和阿卡波糖溶液,取 20 μL 待测样品溶液加入于 96 孔板中,然后加入 10 μL 0.2 U/mL α -葡萄糖苷酶液,混合均匀,置于 37 $^\circ\text{C}$ 下恒温孵育 20 min。然后加入 40 μL 底物溶液(5 mmol/L p-NPG 溶液)和 50 μL 0.2 mol/L PBS 缓冲液(pH6.8),置于 37 $^\circ\text{C}$ 恒温孵育 30 min。然后加入 100 μL 1 mol/L 的 Na_2CO_3 溶液,使反应终止,用酶标仪在 405 nm 处检测溶液的吸光值。通过公式(3)计算 α -葡萄糖苷酶活性的抑制率:

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶活性抑制率(\%)} = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

式中, A_0 为空白对照组吸光值,即用 PBS 缓冲液代替样品溶液; A_1 为样品测定组吸光值; A_2 为样品本底组吸光值,即用 PBS 缓冲液代替 α -葡萄糖苷酶液。

1.3 数据处理

所有实验均重复三次,结果用平均值 \pm 标准偏差表示,采用 IBM SPSS Statistics 26 进行统计分析,使用 Origin 2016 软件绘制实验结果图。

2 结果与分析

2.1 营养活性成分含量分析

2.1.1 蛋白质和氨基酸 蛋白质和氨基酸是食叶草中含量较多且人体赖以生存的营养物质^[6],氨基酸作为蛋白质的分解产物是评价食叶草营养价值和风味的重要指标,因此对食叶草中蛋白质和氨基酸进行了检测,其中氨基酸检测结果如表 2 所示。食叶草的总蛋白含量高达 $32.50 \pm 0.14\text{ mg}/(100\text{ mg}(\text{干重}))$,与文献中报道的酸模(*Rumex acetosa* L.)^[17]的蛋白质含量($\sim 35.7\%$)相当;与蛋白质含量丰富的构树叶相比,食叶草的蛋白质含量明显高于构树叶中的蛋白质含量($19.22\% \sim 26.10\%$)^[18],表明食叶草具备以草代粮的潜力。由表 2 可知,食叶草含有 17 种氨基酸,氨基酸总量约为 $261.27\text{ mg}/\text{g}(\text{干重})$,其中必需氨基酸所占比例约为 45%,约是齿果酸模($\sim 30\%$)^[19]的 1.5 倍。食物蛋白营养价值的优劣主要取决于所含必需氨基酸的种类、数量和组成比例,其组成比例越接近人体需要氨基酸的比例,则其质量就越优。食叶

表 2 食叶草的氨基酸含量
Table 2 Amino acid content in edible dock

氨基酸	含量(mg/g(干重))
天冬氨酸Asp ^{bc}	25.42±1.54
苏氨酸Thr ^a	11.70±0.45
丝氨酸Ser ^d	11.63±0.69
谷氨酸Glu ^{bc}	37.66±4.29
甘氨酸Gly ^{bd}	16.52±1.64
丙氨酸Ala ^d	17.78±1.57
半胱氨酸Cys ^a	0.75±0.28
缬氨酸Val ^a	16.13±1.96
甲硫氨酸Met ^{ab}	2.97±0.32
异亮氨酸Ile ^a	13.32±1.27
亮氨酸Leu ^{ab}	26.32±1.72
酪氨酸Tyr ^{abc}	9.44±3.38
苯丙氨酸Phe ^{abc}	13.73±0.39
赖氨酸Lys ^{ab}	21.97±2.93
组氨酸His	7.19±0.71
精氨酸Arg ^b	14.69±0.56
脯氨酸Pro ^d	14.04±3.02
总氨基酸	261.27±26.73
必需氨基酸	116.33±12.70
药用氨基酸	168.73±16.78
鲜味氨基酸	63.08±5.83
甜味氨基酸	59.97±6.93
芳香族氨基酸	23.17±3.78

注: ^a: 必需氨基酸; ^b: 药用氨基酸; ^c: 鲜味氨基酸; ^d: 甜味氨基酸; ^e: 芳香族氨基酸。

草的必需氨基酸所占比例接近世界卫生组织/联合国粮食及农业组织(WHO/FAO)的规定值(40%),是优良的蛋白质来源。食叶草中含有 9 种药用氨基酸^[20],占氨基酸总量的 65%,由此表明食叶草可作为药用价值较高的植物蛋白资源。食叶草的 3 种味觉氨基酸(鲜味氨基酸、甜味氨基酸和芳香族氨基酸)总量约占氨基酸总含量的 56%,其中鲜味氨基酸和甜味氨基酸的含量高于芳香族氨基酸,由此证明食叶草独特的气味可能与高含量的味觉氨基酸有关,这也意味着食叶草蛋白产品风味极具开发潜力。

氨基酸组成比例不足或过剩均会限制蛋白质的营养价值,WHO/FAO 提出用氨基酸比值系数法评价蛋白质的平衡性。氨基酸比值系数法,即以必需氨基酸模式谱为标准,通过计算各个样品中的 RAA、RC 和 SRC 值,并通过评分的高低来判断蛋白质的

营养价值。RAA 值和 RC 值越接近 1,表明食物中必需氨基酸的组成比例越接近 WHO/FAO 的推荐值。食叶草中的必需氨基酸的 RAA、RC、SRC 值如表 3 所示,并列出了齿果酸模^[19]、大豆^[21]和绿豆^[22]的相应数值进行比较。从表中看出,食叶草的半胱氨酸(Cys)和甲硫氨酸(Met)的 RC 值均为最低,对氨基酸生理平衡产生的负影响最大,为第一限制氨基酸;其它氨基酸含量均与 WHO/FAO 的推荐值相当(RAA 值和 RC 值接近 1)。因此,若食用食叶草,需和富含 Cys 和 Met 的食物复配,提高必需氨基酸的平衡性。SRC 值越接近 100,表明氨基酸的营养价值越接近标准蛋白,蛋白质的营养价值越高。食叶草蛋白的 SRC 值高于齿果酸模蛋白的 SRC 值,与绿豆蛋白的 SRC 值相近,低于大豆蛋白的 SRC 值。以上结果表明,食叶草中的氨基酸种类丰富,人体必需氨基酸种类齐全且含量较高,营养价值和药用价值较高。

2.1.2 总酚、总黄酮和 SOD 酚类物质、黄酮类物质和 SOD 是食叶草重要的活性成分,与抗氧化活性和降血糖活性密切相关^[16,23]。因此,对食叶草的这几种成分分别进行了检测。结果可知,食叶草中的总酚含量约为 11.35±0.31 mg GAE/g(干重),分别是野生型和人工栽培型小酸模(*Rumex acetosella* L.)^[24]水提物中总酚含量的 3.9 倍和 6.4 倍。食叶草总黄酮含量为 3.56±0.24 mg RE/g(干重),是长盾酸模(*Rumex scutatus* L.)^[25]总黄酮含量的 2.4 倍;与新鲜食叶草^[6]相比,本文食叶草中的总黄酮含量(~35.60 mg/100 g(鲜重))与新鲜食叶草(~40.67 mg/100 g)有所差异,这可能是由于食叶草采摘时间不同以及本文食叶草经过冷冻干燥处理所致。食叶草含有丰富的 SOD 酶,比活力为 15.24±3.40 U/(mg pro),与母本鲁梅克斯 K-1^[26]的 SOD 比活力(13.35 U/mg pro)相近。

2.1.3 有机酸 食叶草中的有机酸含量如图 1 所示。采用高效液相色谱法共检测得到四种有机酸,分别为苹果酸、乳酸、柠檬酸和琥珀酸,其中苹果酸含量(~24.08 mg/g(干重))处于较高水平,约是白菜茎叶中苹果酸含量(~6.02 mg/g(干重))^[27]的 4 倍。草酸为抗营养因子,易与矿物质元素结合形成不溶性的草酸盐,且草酸含量高的蔬菜具有酸涩感^[13]。经磺基水杨酸铁络合物比色法检测到食叶草中的草酸含量约为 63.00 mg/g(干重),低于常见蔬菜如菠菜^[28]、马

表 3 食叶草与其它植物中必需氨基酸的 RAA、RC 和 SRC 值比较

Table 3 Comparison of RAA, RC and SRC of essential amino acids in edible dock and other plants

研究对象	参数	Thr	Val	Met+Cys	Ile	Leu	Phe+Tyr	Lys	SRC
食叶草	RAA	1.12	1.24	0.41	1.27	1.44	1.48	1.53	68.33
	RC	0.92	1.02	0.34	1.05	1.19	1.22	1.26	
齿果酸模 ^[19]	RAA	0.93	1.35	0.16	1.39	1.27	1.02	0.95	58.19
	RC	0.92	1.33	0.15	1.38	1.26	1.01	0.94	
大豆 ^[21]	RAA	0.73	0.64	0.77	0.84	0.81	0.97	1.08	83.56
	RC	0.88	0.77	0.93	1.01	0.98	1.17	1.30	
绿豆 ^[22]	RAA	0.42	0.26	0.38	0.25	0.39	0.63	0.46	71.36
	RC	0.86	0.91	0.86	0.97	0.96	1.68	0.75	

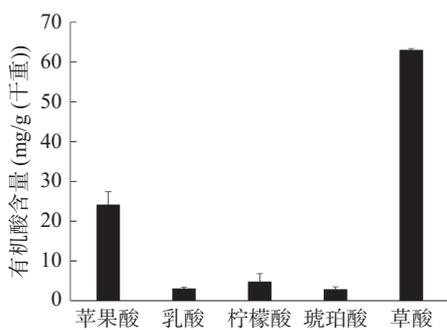


图1 食叶草的有机酸含量

Fig.1 Organic acid content in edible dock

齿苋^[13]中的草酸含量,表明食用食叶草的健康风险较菠菜、马齿苋等高草酸蔬菜低。由图1可知,食叶草中的有机酸组成以草酸为主,苹果酸次之,二者共占总有机酸含量的89.24%;乳酸、柠檬酸和琥珀酸含量较低,三者之和占有有机酸含量的10%左右。

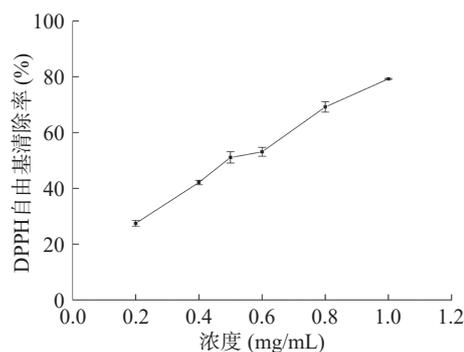
以上营养活性成分检测结果表明,食叶草富含多种营养活性成分,抗营养因子草酸含量低于常见高草酸蔬菜,这为后续研究其生物活性奠定了理论基础。

2.2 抗氧化活性分析

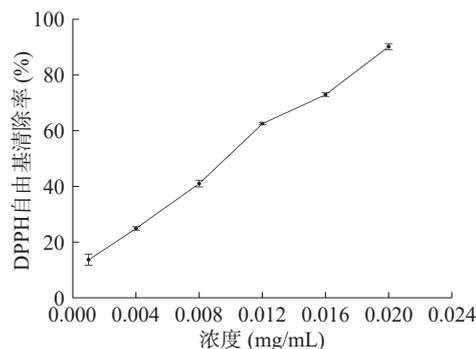
由于食叶草中酚类、黄酮类物质含量较高,且SOD活力较强,这些物质均与食叶草的抗氧化能力有关。因此,通过多种体外抗氧化模型对食叶草提取物的抗氧化活性进行了评价,包括DPPH自由基清除率、ABTS自由基清除率和还原力,并将计算得到自由基半数抑制浓度(IC_{50})以及在还原力测定中吸光值为0.5时对应的样品浓度($IC_{0.5}$)与抗坏血酸的抗氧化效果进行比较。

从图2中看出,随着食叶草提取物浓度的提高,对DPPH自由基清除率随之增大。当提取物浓度达到1 mg/mL时,DPPH自由基清除率达到80%,与相同浓度下野生型酸模(*Rumex acetosella* L.)的DPPH自由基清除率相当,高于人工栽培型酸模的DPPH自由基清除率^[24]。样品清除自由基的 IC_{50} 值越低,表明其抗氧化活性越强。食叶草提取物清除DPPH自由基的 IC_{50} 值为 0.465 ± 0.028 mg/mL,高于阳性对照抗坏血酸的 IC_{50} 值(0.008 ± 0.001 mg/mL),表明食叶草提取物对DPPH自由基的清除效果比抗坏血酸弱。然而,与其它酸模如*Rumex vesicarius* L.^[29]相比,食叶草提取物对DPPH自由基的 IC_{50} 值低于*Rumex vesicarius* L.提取物的 IC_{50} 值(~ 2.90 mg/mL),这可能与食叶草中的总酚含量较高有关。

图3表明,食叶草提取物对ABTS自由基的清除率在所测定的浓度范围内呈现出良好的量效关系,当提取物浓度为0.1 mg/mL时,其ABTS自由基清除率为57%,是浓度为0.125 mg/mL的土耳其产酸模(*Rumex conglomeratus* P.)提取物对ABTS自由基清除效果($\sim 11\%$)^[30]的5倍以上。食叶草提取物对ABTS自由基 IC_{50} 值(0.066 ± 0.003 mg/mL)高于抗



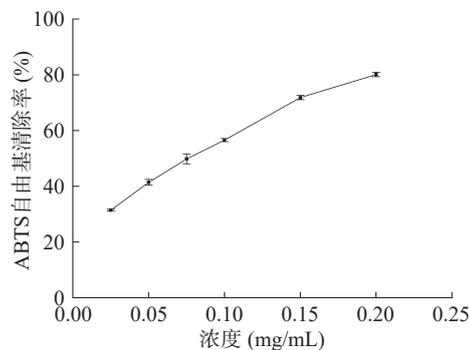
(a) 食叶草提取物



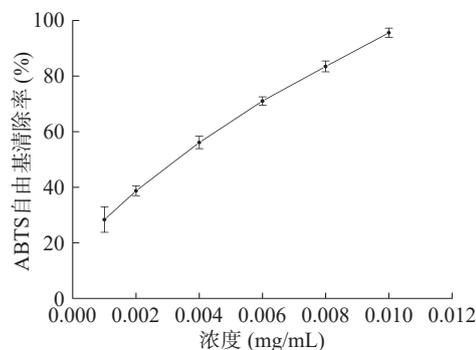
(b) 抗坏血酸

图2 食叶草提取物(a)和抗坏血酸(b)的DPPH自由基清除能力

Fig.2 DPPH radical scavenging ability of edible dock extract (a) and ascorbic acid (b)



(a) 食叶草提取物



(b) 抗坏血酸

图3 食叶草提取物(a)和抗坏血酸(b)的ABTS自由基清除能力

Fig.3 ABTS radical scavenging ability of edible dock extract (a) and ascorbic acid (b)

坏血酸的 IC_{50} 值(0.003 ± 0.001 mg/mL),低于突尼斯酸模(*Rumex roseus* L.)的 IC_{50} 值(~ 0.393 mg/mL)^[31],

表明食叶草提取物对 ABTS 自由基的清除效果优于 *Rumex roseus* L。

食叶草提取物的还原力变化如图 4 所示。从图中看出,随着提取物浓度的升高,其还原力呈现上升趋势,当浓度达到 1.0 mg/mL 时,还原力达到 1 以上。食叶草提取物还原力的 $IC_{0.5}$ 值(0.528 ± 0.017 mg/mL) 低于抗坏血酸的 $IC_{0.5}$ 值(0.008 ± 0.001 mg/mL)。与文献中报道的其它植物相比,食叶草的 $IC_{0.5}$ 值仅为 *Rumex vesicarius* L.(~ 7.13 mg/mL)^[29] 的 7%,与鹿蹄草 (*Pyrola incarnata* Fisch.) 水提物的 $IC_{0.5}$ 值(~ 0.525 mg/mL)^[32] 相近。

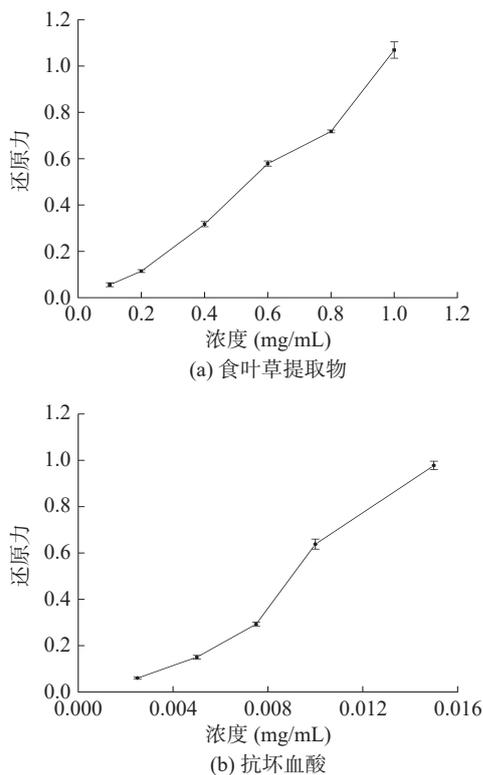


图 4 食叶草提取物(a)和抗坏血酸(b)的还原力
Fig.4 Reducing power of edible dock extract (a) and ascorbic acid (b)

2.3 降血糖活性分析

α -葡萄糖苷酶是一种碳水化合物水解酶,可将二糖水解为葡萄糖,促进碳水化合物的消化吸收。抑制 α -葡萄糖苷酶的活性可延缓碳水化合物的消化,降低人体肠道对葡萄糖的吸收,从而降低胰岛素和餐后血糖水平,达到控制 II 型糖尿病的效果^[33]。食叶草提取物和阳性对照阿卡波糖的 α -葡萄糖苷酶活性抑制能力如图 5 所示,两种样品对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制能力均随着样品浓度的升高而增大。食叶草提取物对 α -葡萄糖苷酶活性的 IC_{50} 值为 1.588 ± 0.050 mg/mL,高于阿卡波糖的 IC_{50} 值(1.155 ± 0.057 mg/mL)。当食叶草提取物浓度为 2 mg/mL 时,其对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制率约为 78%,与阿卡波糖的抑制效果相近;当浓度为 2.5 mg/mL 时,食叶草提取物对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制率为阿卡波糖的 82%。与其它酸模相比,浓度为 2 mg/mL 的食

叶草提取物对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制率约是浓度为 3 mg/mL 的 *Rumex vesicarius* L.提取物抑制率的 3.9 倍^[34]。山药、桑叶、茶叶是目前公认的具有降血糖活性的天然植物。根据相关文献报道,山药水提物浓度达到 100 mg/mL 时,对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制率为 53.1%^[35];桑叶水提物浓度达到 125 mg/mL 时,对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制效果^[36]与浓度为 2 mg/mL 的食叶草提取物相同;浓度为 2.5 mg/mL 的普洱茶提取物对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制率为 52%^[37],低于相同浓度的食叶草提取物的抑制效果($\sim 75\%$)。

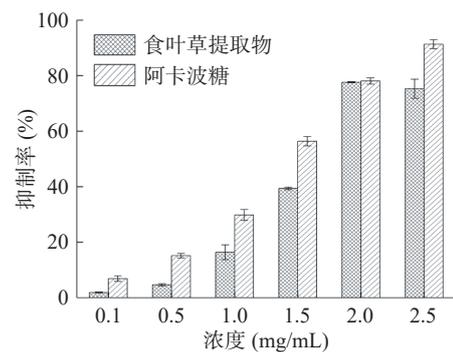


图 5 食叶草提取物和阿卡波糖的 α -葡萄糖苷酶活性抑制能力

Fig.5 Inhibitory activity against α -glucosidase of edible dock extract and acarbose

3 结论

本文检测了食叶草中的总蛋白、总酚、总黄酮、有机酸含量和 SOD 酶活力,分析了食叶草的氨基酸组成和含量,最后通过自由基清除能力、还原力和 α -葡萄糖苷酶活性抑制能力实验评价了食叶草的抗氧化和降血糖活性。研究表明,食叶草中的总酚、总黄酮、总蛋白含量以及 SOD 酶活力较高,苹果酸和草酸为主要有机酸。食叶草中的氨基酸种类齐全,含有 17 种氨基酸,其中必需氨基酸所占比例接近 WHO/FAO 标准规定值(40%),药用氨基酸和味觉氨基酸含量较高,氨基酸评价得分较高,具有优良的营养保健价值和风味开发潜力。抗氧化活性研究表明,食叶草提取物对 DPPH 自由基、ABTS 自由基的清除能力和还原力大小均呈现浓度正相关,表现出良好的抗氧化活性。食叶草提取物对 α -葡萄糖苷酶活性具有较强的抑制作用,其 IC_{50} 值约为 1.588 mg/mL;当浓度为 2 mg/mL 时,食叶草对酶活性的抑制率与阿卡波糖相近,表明食叶草具有一定的降血糖活性。因此,食叶草作为一种营养丰富的植物,具有良好的抗氧化和抗糖尿病潜力,开发利用前景广阔,本研究可为开发食叶草在食品、药品等领域的应用提供科学依据。

参考文献

- [1] 楼敏涵,张丽婧,梅松,等. 食叶草粉对 SD 大鼠的致畸性研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(3): 945-950. [LOU M H, ZHANG L J, MEI S, et al. Study on the teratogenicity of edible

- dock powder on SD rats[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2021, 12(3): 945-950.]
- [2] 陈伟. 食叶草的营养价值及产品开发展进[J]. *农产品加工*, 2018(7): 63-64, 67. [CHEN W. Study on nutritional value and development of edible leaf weed and research progress on edible leaf weed products. [J]. *Farm Products Processing*, 2018(7): 63-64, 67.]
- [3] 柏绿山, 杨秀丽. 食叶草(蛋白草)拓展粮食新资源战略意义[J]. *农业开发与装备*, 2018(9): 53, 55. [BO L S, YANG X L. Strategic significance of edible leaf weed (protein leaf) to develop new food resources[J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2018(9): 53, 55.]
- [4] 植石灿, 李育军, 何潮安, 等. 食叶草蔬菜的高产优质种植及加工研究[J]. *长江蔬菜*, 2020(4): 52-56. [ZHI S C, LI Y J, HE C A, et al. Study on the high output, high quality of edible dock planting and processing[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2020(4): 52-56.]
- [5] 郑旭, 李斌, 张万银, 等. 垄上栽培对盐碱地食叶草根系生长和产量的影响[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(2): 470-478. [ZHENG X, LI BIN, ZHANG W Y, et al. Effects of cultivation patterns on the root growth and foliage yield of *Rumex hanus* by[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(2): 470-478.]
- [6] 楼敏涵, 曲雪峰, 张丽婧, 等. 新食品原料食叶草的安全性评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(10): 3919-3926. [LOU M H, QU X F, ZHANG L J, et al. Safety evaluation of edible dock as a new food raw material[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2021, 12(10): 3919-3926.]
- [7] 周昕, 黄秋连, 王健, 等. 添加乳酸菌剂和糖蜜对不同含水量食叶草青贮发酵品质及体外干物质消失率的影响[J]. *动物营养学报*, 2021, 33(3): 1594-1606. [ZHOU X, HUANG Q L, WANG J, et al. Effect of adding lactic bacteria and molasses on fermentation quality and *in vitro* dry matter disappearance rate of *Rumex hanus* by silage with different moisture contents[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(3): 1594-1606.]
- [8] 程勇杰, 陈小伟, 张沙沙, 等. 柘树植物酵素中氨基酸分析及抗氧化性能研究[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(6): 1-7, 12. [CHENG Y J, CHEN X W, ZHANG S S, et al. Analysis of amino acids and *in vitro* antioxidant activity of *Cudrania tricuspidata* Jiaosu[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(6): 1-7, 12.]
- [9] 陈宏靖, 阳丽君, 宋涛. 闽产7种叶菜氨基酸组成分析及营养评价[J]. *海峡预防医学杂志*, 2021, 27(1): 8-11. [CHEN H J, YANG L J, SONG T. Analysis on amino acid composition and nutritional evaluation of seven kinds of leaf vegetables in Fujian, China[J]. *Strait Journal of Preventive Medicine*, 2021, 27(1): 8-11.]
- [10] 魏征, 赵雅娇, 黄羽, 等. 响应面法优化超声波辅助提取圆叶葡萄鞣花酸和总酚工艺[J]. *食品科学*, 2015, 36(12): 29-35. [WEI Z, ZHAO Y J, HUANG Y, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of ellagic acid and total phenols from muscadine (*Vitis rotundifolia*) by response surface methodology[J]. *Food Science*, 2015, 36(12): 29-35.]
- [11] 化洪苓, 尹文哲, 张智, 等. 刺五加发酵茶工艺优化及其抗氧化活性[J]. *食品科学技术学报*, 2018, 36(3): 56-65. [HUA H L, YIN W Z, ZHANG Z, et al. Optimization of antimicrobial process of *Acanthopanax senticosus* fermented tea[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 36(3): 56-65.]
- [12] 王珍珍, 沙如意, 王高坚, 等. HPLC法同时测定食用植物酵素中12种有机酸[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(19): 279-285. [WANG Z Z, SHA R Y, WANG G J, et al. Simultaneous determination of twelve organic acids in edible plant source Jiaosu by HPLC[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(19): 279-285.]
- [13] 胡水清青, 杜红梅. 10个马齿苋类型的脂肪酸和草酸含量分析[J]. *广西植物*, 2019, 39(11): 1550-1557. [HU S Q Q, DU H M. Content analysis of fatty acids and oxalic acid in ten different types of purslane (*Portulaca oleracea*) [J]. *Guihaia*, 2019, 39(11): 1550-1557.]
- [14] 范昊安, 沙如意, 方晟, 等. 苹果梨酵素发酵过程中的褐变与抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2020, 41(14): 116-123. [FAN H A, SHA R Y, FANG S, et al. Browning and antioxidant activity of apple-pear Jiaosu during fermentation[J]. *Food Science*, 2020, 41(14): 116-123.]
- [15] SU K Y, MAO X L, AI L P, et al. *In vitro* assessment of anti-diabetic potential of four kinds of dark tea (*Camellia sinensis* L.) protein hydrolysates[J]. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2019, 92: 57-63.]
- [16] 李榕娣, 庄远杯, 魏爱红, 等. 不同蕨菜制品醇提物体外抗氧化及降血糖活性研究[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(19): 56-63. [LI R D, ZHUANG H Y, WEI A H, et al. Antioxidant and hypoglycemic activities of ethanol extracts from different products of *Blechnum orientale* L. *in vitro* [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(19): 56-63.]
- [17] 黄渭. 酸模作为黄粉虫饲料的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013. [HUANG W. The research on *Rumex acetosa* L. as the feed of *Tenebrio molitor* L. [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2013.]
- [18] 张红, 陈凤鸣, 黄兴国, 等. 构树叶的营养价值及其在动物生产中的应用研究进展[J]. *动物营养学报*, 2020, 32(9): 4086-4092. [ZHANG H, CHEN F M, HAUNG X G, et al. Nutritional value of *Broussonetia papyrifera* leaf and its application in animal production[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(9): 4086-4092.]
- [19] 刘娜. 齿果酸模主要营养成分分析及营养特性评价[D]. 郑州: 河南农业大学, 2011. [LIU N. Research on nutrients and nutritional value analysis in *Rumex dentatua* [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2011.]
- [20] 姜仲茂, 乌云塔娜, 王森, 等. 不同产地野生长柄扁桃仁氨基酸组成及营养价值评价[J]. *食品科学*, 2016, 37(4): 77-82. [JIANG Z M, WUYUN T N, WANG S, et al. Amino acid composition and nutritional quality evaluation of wild *Amygdalus pedunculatus* Pall. Kernels from different growing regions[J]. *Food Science*, 2016, 37(4): 77-82.]
- [21] 郭如鑫, 王有琼, 张重权, 等. 辣木蛋白质与氨基酸组成分析及营养评价[J]. *云南农业大学学报: 自然科学版*, 2020, 35(2): 324-331. [GUO R X, WANG Y Q, ZHANG Z Q, et al. Protein and amino acid composition analysis and nutritional evaluation of *Moringa oleifera* Lam[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2020, 35(2): 324-331.]

- [22] 王芳, 乔璐, 张庆庆, 等. 桑叶蛋白氨基酸组成分析及营养价值评价[J]. *食品科学*, 2015(1): 225–228. [WANG F, QIAO L, ZHANG Q Q, et al. Amino acid composition and nutritional evaluation of mulberry leaves[J]. *Food Science*, 2015(1): 225–228.]
- [23] 丛罕. 小麦苗中超氧化物歧化酶(SOD)分离纯化及其抗氧化活性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013. [CONG J. Separation and purification of superoxide dismutase (SOD) and antioxidant activity study from wheat seedlings[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2013.]
- [24] ISBILIR S S, SAGIROGLU A. Total phenolic content, anti-radical and antioxidant activities of wild and cultivated *Rumex acetosella* L. extracts[J]. *Biological Agriculture and Horticulture*, 2013, 29(4): 219–226.
- [25] SAVRAN A, ZENGİN G, AKTUMSEK A, et al. Phenolic compounds and biological effects of edible *Rumex scutatus* and *Pseudoempervivum sempervivum*: Potential sources of natural agents with health benefits[J]. *Food & Function*, 2016, 7: 3252–3262.
- [26] 陈爱萍. 营养酸模超氧化物歧化酶的提纯和理化性质的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2003. [CHEN A P. Study on purification and characterization of superoxide dismutase from *Rumex K-1* (*Rumex patientia* × *R. tianschanicus* cv. *Rumex K-1*)[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2003.]
- [27] 谢文明, KO K Y, LEE K S. 土壤和白菜中低分子量有机酸的气相色谱分析[J]. *岩矿测试*, 2009, 28(2): 97–100. [XIE W M, KO K Y, LEE K S. Determination of low molecular weight organic acids in soils and cabbages by gas chromatography[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2009, 28(2): 97–100.]
- [28] 刘晓霞. 氮营养对不同菠菜基因型草酸积累的影响及其机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. [LIU X X. Effect of nitrogen nutrition on oxalate accumulation in different spinach genotypes and corresponding mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.]
- [29] BEDDOU F, BEKHECHI C, KSOURI R, et al. Potential assessment of *Rumex vesicarius* L. as a source of natural antioxidants and bioactive compounds[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2014, 52(6): 3549–3560.
- [30] KILIC I, YESILOGLU Y, BAYRAK Y, et al. Antioxidant activity of *Rumex conglomeratus* P. collected from Turkey[J]. *Asian Journal of Chemistry*, 2013, 25(17): 9683–9687.
- [31] CHELLY M, CHELLY S, SALAH H B, et al. Characterization, antioxidant and protective effects of edible *Rumex roseus* on erythrocyte oxidative damage induced by methomyl[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 14: 229–243.
- [32] YAO X H, ZHANG D Y, ZU Y G, et al. Free radical scavenging capability, antioxidant activity and chemical constituents of *Pyrola incarnata* Fisch. leaves[J]. *Industrial Crops & Products*, 2013, 49: 247–255.
- [33] VALENCIA-MEJIA E, BATISTA K A, FERNANDEZ J, et al. Antihyperglycemic and hypoglycemic activity of naturally occurring peptides and protein hydrolysates from easy-to-cook and hard-to-cook beans (*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. *Food Research International*, 2019, 121: 238–246.
- [34] REDDY N S, SABBANI V, CHODAY V. *In vitro* and *in vivo* antidiabetic activity of *Rumex vesicarius* leaves extract in streptozotocin induced diabetic albino wister rats[J]. *Journal of Diabetes & Metabolism*, 2017, 8(6): 1–4.
- [35] 吴玥霖, 魏然, 曾里, 等. 四种天然产物对 α -葡萄糖苷酶抑制作用的研究[J]. *食品工业科技*, 2010(9): 130–131, 134. [WU Y L, WEI R, ZENG L, et al. Inhibition of 4 kinds of natural products on α -glucosidase[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2010(9): 130–131, 134.]
- [36] 代君君, 吴传华, 肖林珍, 等. 桑树不同组织的水提取物对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用研究[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(5): 466–469. [DAI J J, WU C H, XIAO L Z, et al. Study on the inhibiting effects of the aqueous extract from different mulberry organizations on the α -glucosidase[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(5): 466–469.]
- [37] 杨新河, 黄建安, 刘仲华, 等. 普洱茶对 α -葡萄糖苷酶活性影响的研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(12): 122–124. [YANG X H, HUANG J A, LIU Z H, et al. Effect of Pu Erh tea on the activity of α -glucosidase[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(12): 122–124.]