

张亚兰, 赵建诚, 杨振亚, 等. 不同品种箬竹叶生化成分及抗氧化能力分析 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 93-100. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080246

ZHANG Yalan, ZHAO Jiancheng, YANG Zhenya, et al. Analysis of Biochemical Components and Antioxidant Capacity of *Indocalamus* Leaves of Different Varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 93-100. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080246

· 研究与探讨 ·

不同品种箬竹叶生化成分及抗氧化能力分析

张亚兰^{1,2}, 赵建诚¹, 杨振亚¹, 石 瑞², 李 琴¹, 王衍彬¹, 贺 亮^{1,*}, 陈永健³

(1. 国家林业局竹笋工程技术研究中心, 浙江省林业科学研究院, 浙江杭州 310023;

2. 南京林业大学轻工与食品学院, 江苏南京 210037;

3. 浙江圣氏生物科技有限公司, 浙江湖州 313399)

摘 要:目的: 研究同一地区不同品种箬竹叶资源功能性成分含量及抗氧化能力的差异。方法: 以现有的 11 种箬竹叶资源为原料, 对其基本营养成分、黄酮、多糖、多酚、挥发油等功能组分进行含量及醇提取物抗氧化能力进行评价, 最后对数据进行权重分析并综合评分。结果: 同一地区不同品种箬竹叶的基本营养成分含量差异显著, 水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分四种成分的变异系数, 只有粗蛋白的为 13.93%, 其他三种变异系数不超过 10%。黄酮、多糖、多酚和挥发油四种功能性成分含量也存在显著差异, 其黄酮含量和多酚含量变异系数分别为 34.47% 和 38.04%; 多糖和挥发油含量变异系数分别为 28.03% 和 22.36%, 较黄酮和多酚含量差异小。其中长节箬竹叶的黄酮 (0.68%) 和多酚含量最高 (0.62%), 髯毛箬竹叶多糖含量最高 (0.69%), 阔叶箬竹叶挥发油含量最高 (0.64%)。抗氧化能力的结果显示不同箬竹叶的抗氧化能力差异较小, DPPH 自由基、超氧阴离子、羟自由基三种清除率的变异系数均不超过 10%。从四种功能性成分含量及抗氧化能力的权重分析分析结果看, 天目箬竹叶的综合评分最高 (0.8108), 可作为箬竹叶开发利用的首选材料。本研究的结果, 综合功能性成分含量及抗氧化能力的综合评分为箬竹叶的开发选品提供重要参考。

关键词: 不同品种, 箬竹叶, 营养成分, 功能性成分, 抗氧化能力, 权重分析

中图分类号: TS201.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)09-0093-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080246



本文网刊:

Analysis of Biochemical Components and Antioxidant Capacity of *Indocalamus* Leaves of Different Varieties

ZHANG Yalan^{1,2}, ZHAO Jiancheng¹, YANG Zhenya¹, SHI Rui², LI Qin¹, WANG Yanbin¹,
HE Liang^{1,*}, CHEN Yongjian³

(1. National Forestry Bureau Bamboo Shoot Engineering Technology Research Center, Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, China;

2. College of Light Industry and Food, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

3. Zhejiang Shengshi Biotechnology Co., Ltd., Huzhou 313399, China)

Abstract: Objective: To study the contents of functional components and antioxidant capacity of different varieties of *Indocalamus* leaves in same area. Methods: Using 11 existing species of *Indocalamus* leaves resources as raw materials, the contents of basic nutrients, flavonoids, polyphenols, polysaccharides, volatile oil and other functional components were evaluated as well as the antioxidant capacity of alcohol extracts. Then the data were analyzed by weight and scored comprehensively. Results: The results showed that there were significant differences among the content of basic nutrients in leaves of different *Indocalamus* varieties in the same area. The coefficient of variation of four components was 13.93% only for crude protein, and the coefficient of variation among the other three was no more than 10%. Same phenomenon was

收稿日期: 2021-08-25

基金项目: 浙江省省属科研院所扶持专项 (2022F1065-1) 和 (2021F1065-3); 浙江特色箬竹叶高值化绿色加工关键技术及功能产品研发 (2022SY07)。

作者简介: 张亚兰 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养, E-mail: 15623207393@163.com。

* 通信作者: 贺亮 (1979-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品精深加工, E-mail: kite006@163.com。

found in the four functional components as well. The variation coefficients of flavonoids and polyphenols were calculated for 34.47% and 38.04%, 28.03% and 22.36% were for that of polysaccharide and volatile oil contents, in which the difference was smaller than that of flavonoids and polyphenols. Among them, the contents of flavonoids (0.68%) and polyphenols (0.62%) in the leaves of *Indocalamus elongatus* were the highest. Polysaccharide (0.69%) in leaves of *Indocalamus barbatus* was the highest. And the content of volatile oil (0.64%) in broad-leaved *Indocalamus* broad-leaved was the highest. The antioxidant capacity assay indicated that there was indistinctly difference in antioxidant activity among those *Indocalamus* leaves, and the coefficient of variation among the scavenging rates of DPPH radical, superoxide anion and hydroxyl radical was less than 10%. From the weight analysis containing the content of four functional components and antioxidant activity, the comprehensive score of *Indocalamus* Tianmu was the highest (0.8108), which might be used as the preferred material for the development and utilization of *Indocalamus* leaves. From the above studies, this finding would provide an important information for the utilization of *Indocalamus* leaves.

Key words: different varieties; *Indocalamus* leaves; nutritional composition; functional ingredients; antioxidant activity; weight analysis

箬竹(*Indocalamus*)为禾本科,箬竹属植物^[1],箬竹叶片的长、宽度适宜,并含有独特的香气,是千百年来我国端午节粽叶的主要来源。在很长一段时间里,箬竹叶作为粽叶仅为食材包装所使用,用后多被弃为厨余垃圾,很少有人考虑其功能性作用^[1]。近几年,人们开始对竹叶的功能性进行研究,箬竹叶营养价值丰富,富含多种微量元素,功能性成分。包括竹叶中多种多样的化学物质和生理能力成分。

研究表明,竹叶提取物中含有大量的酚类、酯类、黄酮、氨基酸及多种微量元素,具有抗氧化能力、抗衰老能力^[2],并可以调节人体循环系统和生理功能,还有抗菌、抑菌等功能^[3],对人体有重要作用。因此,对竹叶醇提取物进行抗氧化能力研究是有依据,并有研究价值的。目前,除了对竹叶提取物的生理功能有大量研究外,也有研究人员对箬竹叶的各种功能性成分进行了提取及研究,包括氨基酸、粗蛋白、粗脂肪、灰分等营养成分^[1]以及黄酮^[4-5]、多糖^[6-7]、矿物质^[8]、多酚^[9]等功能性成分。但这些研究是单一的,而且并未对多种箬竹叶的功能性成分差异进行具体分析。因此,本研究对不同品种箬竹叶的生化成分含量和抗氧化能力差异进行了分析。

本研究主要以浙江省林业科学研究院内浙江竹种园的11种箬竹资源为对象,不同种箬竹叶的总黄酮、多糖、多酚、挥发油四种功能性成分含量及其抗氧化能力能力差异。先利用国家标准测量其营养成分,再分别用不同的提取方法提取粗产品,即水提(多糖)和醇提(总黄酮、多酚)。利用标准品制备标准曲线,拟合回归方程,求得其含量。其次对其竹叶醇提取物进行DPPH自由基、超氧阴离子及羟自由基清除率的比较。最后综合各方面比较11种样品的优劣。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

11种箬竹叶(矮箬竹、髯毛箬竹、阔叶箬竹、长节箬竹、美丽箬竹、长耳箬竹、泡箬竹、华箬竹、天目箬竹、胜利箬竹和米箬竹)浙江省林业科学研究院竹类植物园;Al(NO₃)₃、芦丁、无水葡萄糖、NaNO₂、苯酚、Na₂CO₃、ZnSO₄、乙酸乙酯、邻苯三酚、FeSO₄、

没食子酸、DPPH、H₂O₂、正己烷、CH₂Cl₂ 分析纯,成都市科隆化学品有限公司;NaOH、浓硫酸 分析纯,杭州化学试剂有限公司(监制);95%乙醇 分析纯,杭州汇普化工仪器有限公司;福林酚试剂、盐酸 优级纯,国药集团化学试剂有限公司。

Sartorius BSA 224S 型电子天平 赛多利斯 Sartorius 科学仪器有限公司;DFT-150 多功能高速中药粉碎机 温州顶历医疗器械有限公司;真空冷冻干燥机 LABCONCO 公司;heating Bath B-491 水浴锅、Rotavapor R-210 旋转蒸发仪 BUCHI 公司;Centrifuge 5804R 冷冻离心机 Eppendorf 公司;超声波清洗机 南京赛飞生物科技有限公司;HITACHI U-1900 紫外可见分光光度计 株式会社日立制作所;HH-2K4 二列四孔型水浴锅 巩义市予华仪器有限公司;SHZ-D(Ⅲ)循环水式真空泵 巩义市予华仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品来源及处理 采集的样品全部来源于浙江省林业科学研究院竹类植物园,采集矮箬竹、髯毛箬竹、阔叶箬竹、长节箬竹、美丽箬竹、长耳箬竹、泡箬竹、华箬竹、天目箬竹、胜利箬竹和米箬竹的竹叶,对其水含量进行测定过后,放置在室温下,自然风干。最后使用粉碎机粉碎,装至密封袋中干燥保存。在开始实验前再进行烘干处理,采用绝干样品进行实验,减少实验误差。

1.2.2 竹叶营养成分含量的测定 所有成分的含量检测均采用最近几年公布的国家标准。其中,粗蛋白含量测定采用 GB 5009.5-2016 中的凯氏定氮法;采用 GB 5009.3-2016 中的直接干燥法测定含水量;粗脂肪测定采用 GB/T 14772-2008 中的直接滴定法;参照 GB 5009.4-2016 的方法测定灰分含量。

1.2.3 功能性成分提取及测定

1.2.3.1 多糖提取及含量测定 多糖提取:综合文献 [10-12] 的方法,采用简单的水提法。将蒸馏水与 11 种样品分别以料液比 1:20 进行均匀混合,90 ℃ 水浴水提 2 h。减压过滤,将滤渣丢弃,留下滤液,将

其在 60~70 °C 旋蒸仪上加热浓缩汁原体积至 1/3 后结束旋蒸, 按体积比 1:4 加入 95% 乙醇进行沉淀 24 h。将上清液(95% 乙醇)倒去少许后分装至 50 mL 离心管, 7500 r/min 离心 5 min。放入冷冻干燥机干燥 24 h, 得粗多糖。

多糖含量测定: 多糖含量参考张倩茹等^[13]的方法改进苯酚-硫酸法进行测定。制备 100 μg/mL 葡萄糖标准溶液, 分别取 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1 mL 葡萄糖溶液置于 20 mL 具塞试管中, 每支试管加蒸馏水补至 2 mL, 在通风橱中加入 1 mL 的 5% 苯酚溶液混匀, 然后快速加入 5 mL 浓硫酸混匀。室温静置 10 min, 放入 30 °C 水浴加热 20 min。在 490 nm 下(使用上述空白试剂试管调节零点)测定吸光值 ABS, 以吸光值为纵坐标, 葡萄糖浓度为横坐标, 拟合标准曲线为 $y=12.354x-0.0032$, $R^2=0.9994$ 。称取 11 种黄酮样品各 30 mg, 将其溶解并定容 10 mL。从每个样品溶液中吸取 0.2 mL 多糖待测液按照相同方法测定吸光度。

1.2.3.2 黄酮提取及含量测定 黄酮提取: 参考文献 [4,14] 的方法通过适当调整进行醇提。将 60% 乙醇与 11 种样品分别以料液比 1:30 进行均匀混合, 65 °C 水浴醇提 2 h。减压过滤, 保留滤液, 将其 60~65 °C 旋蒸浓缩至原体积 1/4 后分装至 20 mL 离心管, 封上封口膜后放入 -80 °C 冰箱冷冻 2 h, 最后放入冻干机 48 h, 得粗黄酮。

黄酮含量测定: 参考相关文献 [15-16], 采用 $Al(NO_3)_3$ 络合分光光度法。分别取 200 μg/mL 芦丁标准溶液 0、0.25、0.5、1、2、3、4、5 mL 置于 20 mL 具塞试管中, 加 60% 乙醇补至 5 mL, 加 1 mL 50 g/L $NaNO_2$ 溶液, 室温静置 5 min。加 1.5 mL 100 g/L $Al(NO_3)_3$ 溶液, 室温静置 6 min。加 4 mL 200 g/L $NaOH$ 溶液, 室温静置 10 min。在 510 nm 下, 使用上述空白试剂试管调节零点, 记录吸光值, 以吸光值为纵坐标, 芦丁浓度为横坐标, 制作标准曲线为 $y=4.9395x-0.0055$, $R^2=0.9992$ 。分别称取 11 种样品 30 mg, 溶解于 20 mL 具塞试管中, 利用相同操作测定吸光度。

1.2.3.3 多酚提取及含量测定 多酚提取: 参考文献 [12,17-18] 得出的最佳提取条件, 采用超声波辅助醇提。将 50% 乙醇与 11 种样品分别以料液比 1:15 进行均匀混合, 超声提取 40 min。减压过滤, 将滤饼丢弃, 留下滤液即多酚待测液。向滤液加入沉淀剂 Zn^{2+} (硫酸锌:样品=0.5:1.6)来形成螯合物沉淀多酚, 并使用 7.5% $NaCO_3$ 溶液调节 pH6~6.5。沉淀完后, 将溶液分装离心, 留下沉淀, 加入适量 2 mol/L 盐酸转溶, 加入 10 mL 乙酸乙酯进行萃取, 收集乙酸乙酯层于梨形瓶中。将液体放在 65 °C 旋蒸仪上减压蒸馏至浸膏状。将梨形瓶放入 80 °C 干燥箱内干燥, 得高纯度多酚。

多酚含量测定: 采用 Folin-Ciocalteu 比色法^[19]

测定, 制备 0.234 mg/mL 没食子酸标准溶液, 分别取 0、0.1、0.25、0.5、0.75、1 mL 于 20 mL 具塞试管中, 加蒸馏水至 2 mL。加入 0.5 mL 福林酚试剂混匀, 室温静置 3 min。加入 4 mL 7.5% $NaCO_3$ 溶液, 混匀后室温静置 1 h。在 744 nm 下, 使用上述空白试剂试管调节零点, 测定吸光值 ABS, 以吸光值为纵坐标, 没食子酸浓度为横坐标, 拟合标准曲线为 $y=57.875x+0.0076$, $R^2=0.9997$ 。称取 11 种多酚待测样 30 mg 左右于 20 mL 具塞试管中, 按照相同的方法测定吸光度。

1.2.3.4 挥发油提取及含量测定 参考杨萍等^[20]的方法, 用同时蒸馏萃取法提取挥发油。分别取不同箬竹叶样品 60 g, 放入 1 L 的烧瓶中, 以样品:蒸馏水=1:8 加入蒸馏水, 连接在同时蒸馏萃取装置左侧样品进样口。在 250 mL 蒸馏瓶中加入 60 mL CH_2Cl_2 , 连接同时蒸馏萃取装置的右侧萃取剂进样口, 65 °C 水浴加热左侧装有 CH_2Cl_2 的烧瓶, 同时用电热套加热左侧装样品的烧瓶, 提取 8 h。将放置 CH_2Cl_2 的烧瓶取下, 将中间出口收集装置中的 CH_2Cl_2 于此烧瓶中, 使用 45 °C 旋转蒸发仪将 CH_2Cl_2 蒸出, 将挥发油避光 4 °C 保存。挥发油含量(%)=挥发油的质量/箬竹叶样品的质量×100。

1.2.4 竹叶醇提取物 参考刘怡菲^[21]的方法进行, 采用超声波辅助乙醇浸提法获得不同品种箬竹叶醇提取物。准确称取 11 种箬竹叶各 10 g 于 500 mL 烧瓶中。加入 30 倍体积的 60% 乙醇溶液, 45 °C 超声提取 1.5 h, 将浸提物进行真空抽滤, 收集滤液。将滤液于 55 °C 旋转蒸发仪去除大量乙醇后, 得箬竹叶醇提取物, 保存至 4 °C 冰箱中, 备用。

1.2.5 抗氧化能力测定

1.2.5.1 DPPH 自由基清除能力 DPPH 自由基清除率参照 Zhang 等^[22-23]的方法, 取 DPPH 样品用无水乙醇制备 0.2 mmol/L DPPH 乙醇溶液于 100 mL 棕色容量瓶中, 避光保存, 用蒸馏水分别将 11 种箬竹叶醇提取物稀释成质量浓度为 0.60 mg/mL, 取 2 mL 样品溶液与 3 mL 0.2 mmol/L DPPH 乙醇溶液于 10 mL 具塞试管中, 混匀后避光反应 1 h。在 517 nm 下测吸光值, 使用无水乙醇调零。DPPH 自由基清除率(%)=[1-(DPPH 样品混合液的吸光值-样品本身的吸光值)/DPPH 乙醇溶液吸光值]×100。

1.2.5.2 超氧阴离子清除能力 采用王紫薇等^[24]的方法, 将不同品种箬竹叶醇提取物用蒸馏水分别稀释为 0.50 mg/mL 醇提取物溶液, 取 1.0 mL 的醇提取物溶液于 10 mL 具塞试管中, 加入 4 mL Tris-HCl 缓冲液, 室温反应 20 min, 加入 0.3 mL 5 mmol/L 邻苯三酚溶液, 充分反应, 在 420 nm 下测吸光值, 用 1 mL 蒸馏水替代样品作为空白对照组。超氧阴离子清除率(%)=(1-样品混合液的吸光值/空白对照组的吸光值)×100。

1.2.5.3 羟自由基的清除能力 参考王紫薇等^[24]的

方法,将箬竹叶醇提取物用蒸馏水稀释成质量浓度为 0.50 mg/mL 醇提取物溶液,取 1 mL 醇提取物溶液于 20 mL 具塞试管中,加入 1 mL 0.75 mmol/L FeSO_4 、1.5 mL 磷酸盐缓冲液(pH=7.4)、1.5 mL 7.5 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液以及 1 mL 0.01% H_2O_2 溶液混匀,在 37 °C 水浴中反应半小时。在 510 nm 下测吸光值,用 1 mL 蒸馏水替代样品作为空白对照组。计算公式如下:羟自由基清除率(%)=[1-(样品混合溶液吸光值-样品本身吸光值)/空白对照组吸光值]×100。

1.3 数据处理

对实验数据通过 Excel 以及 SPSS 19.0 整理分析。不同品种的每个成分含量测 3 次,结果取 3 次测定值的平均值,用平均值±标准差(mean±SD)表示。

2 结果与分析

2.1 不同品种箬竹叶营养成分含量差异

不同箬竹叶营养成分含量见表 1, 11 种箬竹叶的水分含量在 30%~40% 之间,粗蛋白含量在 20% 左右,粗脂肪含量在 5% 左右,灰分在 13%~16% 之间。不同品种的营养成分含量差异大小,通过变异系数来体现,变异系数没有量纲,可以进行更为客观的比较^[25]。同一地区不同品种的各营养成分含量存在显著差异($P<0.05$),四种营养成分的变异系数,只有粗蛋白的为 13.93%,其他三种变异系数不超过 10%。不同箬竹叶的水分含量变异系数是 6.96%,华箬竹的水分含量最高,达 39.86%±0.20%;而矮箬竹的水分含量最低,仅 31.67%±0.23%。不同箬竹叶粗蛋白含量的变异系数是 13.93%,含量最高的是矮箬竹,有 26.12%±0.41%;其次是米箬竹,含有 24.72%±0.49%;而含量最低的是美丽箬竹,仅有 16.68%±0.42%。不同箬竹叶粗脂肪含量的变异系数是 7.53%,含量最高的是胜利箬竹,达到 5.21%±0.06%;其次是阔叶箬竹含有 5.18%±0.08%;而粗脂肪含量最低的是天目箬竹,仅有 4.10%±0.07%。不同品种灰分含量的变异

系数是 4.87%,含量最高的是阔叶箬竹,含有 15.17%±0.04%,其次是长节箬竹,含有 15.06%±0.03%;而含量最低的是米箬竹,仅含有 13.15%±0.02%。从表 1 可以看出,11 种箬竹叶的四种基本营养成分中,水分、粗脂肪、灰分这三种成分的含量两两相较差异较小,粗蛋白含量的差异性较大。

2.2 不同品种箬竹叶功能性成分含量差异

不同箬竹叶功能性成分含量见表 2,多酚含量波动最大,在 0.17%~0.62% 范围内;多糖含量在 0.24%~0.69% 之间,黄酮含量在 0.25%~0.68% 之间,也有较大变化幅度;挥发油含量在 0.36%~0.64% 之间,变化幅度较小。不同箬竹叶黄酮含量的变异系数为 34.47%,长节箬竹的黄酮含量最高,为 0.68%±0.07%,其次是阔叶箬竹有 0.67%±0.06%;而黄酮含量最低的泡箬竹,仅有 0.25%±0.03%。含量最高的比含量最低的高出不止 3 倍,可见其含量差异之大。11 个品种中多糖含量最高的是髯毛箬竹,含有 0.69%±0.04%;而含量最低的是米箬竹,仅有 0.24%±0.02%。不同品种多糖含量的变异系数是 28.03%。对于多酚含量的结果,其变异系数是 38.04%,含量最高的是长节箬竹(0.62%±0.09%),其次是胜利箬竹有 0.54%±0.06%;多酚含量最低的是米箬竹,仅有 0.17%±0.01%。长节箬竹多酚含量是米箬竹的近 4 倍,差异明显。不同品种挥发油含量的变异系数是 22.36%,含量最高的是阔叶箬竹,为 0.64%±0.05%,其次是天目箬竹有 0.59%±0.05%;挥发油含量最低的是胜利箬竹,仅有 0.36%±0.03%。从表中结果也可以看出,同一地区不同品种四种功能性成分中箬竹叶挥发油含量的差异性并不大,相较而言,黄酮、多糖和多酚含量的差异就明显较大。

2.3 不同品种箬竹叶抗氧化能力差异

表 3 表示了同一地区不同箬竹叶抗氧化能力的差异,箬竹叶醇提取物对 DPPH 自由基、超氧阴离子及羟自由基清除率可以表示抗氧化的能力。不同箬

表 1 不同箬竹叶营养成分含量差异

Table 1 Differences of nutrient contents in different *Indocalamus* leaves

| 竹叶品种 | 水分 | | 粗蛋白 | | 粗脂肪 | | 灰分 | |
|------|-------------------------|-------|--------------------------|--------|------------------------|-------|-------------------------|-------|
| | 含量(%) | 变异系数 | 含量(%) | 变异系数 | 含量(%) | 变异系数 | 含量(%) | 变异系数 |
| 矮箬竹 | 31.67±0.23 ⁱ | | 26.12±0.41 ^a | | 4.72±0.06 ^c | | 13.92±0.02 ^e | |
| 髯毛箬竹 | 38.12±0.14 ^b | | 19.25±0.46 ^f | | 5.03±0.06 ^b | | 14.83±0.03 ^d | |
| 阔叶箬竹 | 33.79±0.16 ^b | | 23.14±0.61 ^c | | 5.18±0.08 ^a | | 15.17±0.04 ^a | |
| 长节箬竹 | 37.24±0.21 ^e | | 19.05±0.52 ^{fg} | | 4.66±0.07 ^c | | 15.06±0.03 ^b | |
| 美丽箬竹 | 34.75±0.22 ^f | | 16.68±0.42 ^b | | 4.72±0.05 ^c | | 13.86±0.02 ^b | |
| 长耳箬竹 | 35.60±0.11 ^e | 6.96% | 21.67±0.39 ^d | 13.93% | 4.43±0.07 ^d | 7.53% | 14.28±0.03 ^e | 4.87% |
| 泡箬竹 | 36.87±0.17 ^d | | 18.28±0.38 ^e | | 4.26±0.06 ^c | | 13.19±0.02 ^j | |
| 华箬竹 | 39.86±0.20 ^a | | 20.39±0.44 ^e | | 4.68±0.08 ^c | | 13.79±0.04 ⁱ | |
| 天目箬竹 | 32.64±0.17 ⁱ | | 18.22±0.54 ^g | | 4.10±0.07 ^f | | 14.93±0.04 ^e | |
| 胜利箬竹 | 34.44±0.11 ^g | | 19.81±0.57 ^{ef} | | 5.21±0.06 ^a | | 14.22±0.03 ^f | |
| 米箬竹 | 38.37±0.15 ^b | | 24.72±0.49 ^b | | 4.44±0.05 ^d | | 13.15±0.02 ^j | |

注: 同列不同小写字母者表示差异显著($P<0.05$), 表2~表3同。

表 2 不同箬竹叶功能性成分含量差异

Table 2 Differences in contents of functional components in different *Indocalamus* leaves

| 原料 | 多糖 | | 黄酮 | | 多酚 | | 挥发油 | |
|------|-------------------------|--------|--------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|
| | 含量(%) | 变异系数 | 含量(%) | 变异系数 | 含量(%) | 变异系数 | 含量(%) | 变异系数 |
| 矮箬竹 | 0.58±0.03 ^{bc} | | 0.42±0.02 ^{cd} | | 0.41±0.06 ^c | | 0.37±0.02 ^c | |
| 髯毛箬竹 | 0.69±0.04 ^a | | 0.38±0.01 ^{cde} | | 0.44±0.03 ^{bc} | | 0.38±0.03 ^c | |
| 阔叶箬竹 | 0.46±0.02 ^{de} | | 0.67±0.06 ^a | | 0.51±0.05 ^b | | 0.64±0.05 ^a | |
| 长节箬竹 | 0.43±0.03 ^{ef} | | 0.68±0.07 ^a | | 0.62±0.09 ^a | | 0.47±0.04 ^b | |
| 美丽箬竹 | 0.52±0.06 ^{cd} | | 0.44±0.03 ^c | | 0.47±0.07 ^{bc} | | 0.37±0.03 ^c | |
| 长耳箬竹 | 0.66±0.05 ^a | 28.03% | 0.35±0.02 ^{de} | 34.47% | 0.51±0.06 ^b | 38.04% | 0.43±0.05 ^{bc} | 22.36% |
| 泡箬竹 | 0.46±0.05 ^{de} | | 0.25±0.03 ^e | | 0.20±0.02 ^d | | 0.39±0.03 ^c | |
| 华箬竹 | 0.38±0.04 ^f | | 0.36±0.03 ^{de} | | 0.19±0.02 ^d | | 0.40±0.05 ^{bc} | |
| 天目箬竹 | 0.64±0.06 ^{ab} | | 0.57±0.06 ^b | | 0.52±0.05 ^b | | 0.59±0.05 ^a | |
| 胜利箬竹 | 0.38±0.04 ^f | | 0.33±0.03 ^{ef} | | 0.54±0.06 ^{ab} | | 0.36±0.03 ^c | |
| 米箬竹 | 0.24±0.02 ^e | | 0.27±0.03 ^{fe} | | 0.17±0.01 ^d | | 0.39±0.04 ^c | |

表 3 不同箬竹叶抗氧化能力差异

Table 3 The difference in antioxidant activity of different *Indocalamus* leaves

| 竹叶品种 | DPPH 自由基 | | 超氧阴离子 | | 羟自由基 | |
|------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|--------------------------|-------|
| | 清除率(%) | 变异系数 | 清除率(%) | 变异系数 | 清除率(%) | 变异系数 |
| 矮箬竹 | 53.76±0.27 ⁱ | | 41.88±0.36 ^d | | 66.54±0.48 ^b | |
| 髯毛箬竹 | 59.58±0.39 ^e | | 42.04±0.33 ^d | | 73.08±0.62 ^c | |
| 阔叶箬竹 | 58.22±0.29 ^f | | 45.40±0.44 ^b | | 68.23±0.57 ^{bc} | |
| 长节箬竹 | 63.02±0.40 ^b | | 40.15±0.31 ^e | | 77.24±0.41 ^a | |
| 美丽箬竹 | 60.34±0.42 ^d | | 39.09±0.26 ^f | | 71.26±0.46 ^{de} | |
| 长耳箬竹 | 65.07±0.33 ^a | 5.70% | 38.86±0.24 ^f | 7.86% | 72.12±0.65 ^d | 5.99% |
| 泡箬竹 | 58.12±0.22 ^f | | 36.12±0.30 ^h | | 69.05±0.43 ^f | |
| 华箬竹 | 56.95±0.35 ^e | | 43.25±0.37 ^c | | 67.75±0.55 ^{bc} | |
| 天目箬竹 | 62.16±0.25 ^c | | 47.26±0.34 ^a | | 75.93±0.49 ^b | |
| 胜利箬竹 | 63.44±0.37 ^b | | 37.50±0.28 ^g | | 70.84±0.54 ^c | |
| 米箬竹 | 55.84±0.32 ^h | | 42.28±0.19 ^d | | 62.01±0.52 ⁱ | |

竹叶 DPPH 自由基清除率的范围为 53.76%~65.07%，变异系数为 5.70%，清除率最高的是长耳箬竹，达到 65.07%±0.33%；此外，长节箬竹、胜利箬竹、天目箬竹都有较高的清除率，分别是 63.02%±0.40%、63.44%±0.37%、62.16%±0.25%；清除率最低的是矮箬竹，为 53.76%±0.27%。不同箬竹叶超氧阴离子清除率的范围是 36.12%~47.26%，变异系数为 7.86%，清除率最高的是天目箬竹，达 47.26%±0.34%；其次是阔叶箬竹，达到 45.40%±0.44%；最低的是泡箬竹，清除率为 36.12%±0.30%。箬竹叶羟自由基清除率在 62.01%~77.24%，变异系数为 5.99%，清除率最高的是长节箬竹，达到 77.24%±0.41%；其次是天目箬竹，达到 75.93%±0.49%；最低的是米箬竹，清除率为 62.01%±0.52%。11 种品种中，DPPH 自由基、超氧阴离子、羟自由基三种清除率的变异系数均不超过 10%。相较于功能性成分含量差异，抗氧化能力的差异相对较小，变幅并不大。

2.4 不同箬竹叶权重分析及综合评分

2.4.1 抗氧化能力权重分析 为了方便进行最终的权重分析和综合评分，所以先将抗氧化能力归纳为一组数据。把 DPPH 自由基、超氧阴离子及羟自由基

清除率，设为同等重要。每组数据的最大值作为 1，最小值作为 0，然后将所有数据归一化。由于重要程度相同，则公式为 $Y=Y_1 \times 1/3 + Y_2 \times 1/3 + Y_3 \times 1/3$ 。

从最终的得值可以看出(表 4)，天目箬竹竹叶醇提取物的抗氧化能力最强，得分达 0.8856；此外长节箬竹、长耳箬竹、髯毛箬竹的竹叶醇提取物的抗氧化能力相对较强，得分分别为 0.7113、0.6182、0.5795；而矮箬竹的抗氧化能力最弱，仅得分 0.0991。

2.4.2 功能性成分及抗氧化能力权重分析 诸多研究^[23,26]可以看出，黄酮作为箬竹叶的主要功能性成分，重要性更高。因此，将黄酮含量的重要性设为最高，多糖含量、多酚含量及抗氧化能力次之，挥发油含量的重要性最低。由此，进行权重分析。

2.4.2.1 功能性成分数据归一化 将每组数据的最大值作为 1，将所有数据归一化，见表 5。

2.4.2.2 功能性成分、抗氧化能力权重分析及综合评分 使用 AHP 层次分析法^[27-28]确定权重系数，根据箬竹叶功能性成分含量及抗氧化能力在之后工业上的应用，决定其重要程度。将黄酮含量设为重要，多糖含量、多酚含量及抗氧化能力设为比较重要，挥发油含量设为比较不重要。构成两两比较优先判断矩阵(表 6)。

表4 抗氧化能力数据归一化

Table 4 Normalization of antioxidant activity data

| 竹叶品种 | DPPH自由基清除率Y ₁ | 超氧阴离子清除率Y ₂ | 羟自由基清除率Y ₃ | 抗氧化能力Y |
|------|--------------------------|------------------------|-----------------------|--------|
| 矮箬竹 | 0.0000 | 0.0000 | 0.2974 | 0.0991 |
| 髯毛箬竹 | 0.5146 | 0.4971 | 0.7269 | 0.5795 |
| 阔叶箬竹 | 0.3943 | 0.8208 | 0.4084 | 0.5412 |
| 长节箬竹 | 0.8187 | 0.3150 | 1.0000 | 0.7113 |
| 美丽箬竹 | 0.5818 | 0.2129 | 0.6074 | 0.4673 |
| 长耳箬竹 | 1.0000 | 0.1908 | 0.6638 | 0.6182 |
| 泡箬竹 | 0.3855 | 0.4085 | 0.4622 | 0.4187 |
| 华箬竹 | 0.2821 | 0.6137 | 0.3769 | 0.4242 |
| 天目箬竹 | 0.7427 | 1.0000 | 0.9140 | 0.8856 |
| 胜利箬竹 | 0.8559 | 0.0597 | 0.5798 | 0.4985 |
| 米箬竹 | 0.1839 | 0.5202 | 0.0000 | 0.2347 |

注: Y₁、Y₂、Y₃分别代表DPPH自由基、超氧阴离子、羟自由基清除率的归一化结果, Y代表抗氧化能力分析结果。

表5 功能性成分含量数据归一化

Table 5 Normalization of functional ingredient content data

| 竹叶品种 | 黄酮含量A | 多糖含量B | 多酚含量C | 挥发油含量D |
|------|--------|--------|--------|--------|
| 矮箬竹 | 0.3953 | 0.7556 | 0.5333 | 0.0357 |
| 髯毛箬竹 | 0.3023 | 1 | 0.6000 | 0.0714 |
| 阔叶箬竹 | 0.9767 | 0.4889 | 0.7556 | 1.0000 |
| 长节箬竹 | 1 | 0.4222 | 1.0000 | 0.3929 |
| 美丽箬竹 | 0.4419 | 0.6222 | 0.6667 | 0.0357 |
| 长耳箬竹 | 0.2326 | 0.9333 | 0.7556 | 0.2500 |
| 泡箬竹 | 0 | 0.4889 | 0.0667 | 0.1071 |
| 华箬竹 | 0.2558 | 0.3111 | 0.0444 | 0.1429 |
| 天目箬竹 | 0.7442 | 0.8889 | 0.7778 | 0.8214 |
| 胜利箬竹 | 0.186 | 0.3111 | 0.8222 | 0.0000 |
| 米箬竹 | 0.0465 | 0 | 0.0000 | 0.1071 |

表6 功能性成分及抗氧化能力优先判断矩阵

Table 6 Functional ingredients and antioxidant activity priority judgment matrix

| 指标 | 黄酮含量A | 多糖含量B | 多酚含量C | 抗氧化能力Y | 挥发油D |
|--------|--------|-------|-------|--------|------|
| 黄酮含量A | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 多糖含量B | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 多酚含量C | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 抗氧化能力Y | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 挥发油D | 0.3333 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1 |

根据优先判断矩阵使用 SPSS 在线分析系统, 计算(计算方式参考李慧敏^[29])得出各指标权重系数, 黄酮含量 A 为 0.3485, 多糖含量 B、多酚含量 C 及抗氧化能力 Y 均为 0.1846, 挥发油 D 为 0.0978。经一致性检验得出 CR=0.0022<0.1, 表明各指标的优先判断矩阵具有一致性, 所得权重系数有效。则其综合评分结果 Z=0.3485×A+0.1846×(B+C+Y)+0.0978×D。

从图 1 可以看出, 天目箬竹得分最高, 有 0.8108, 此外还有两种箬竹叶的评分较高, 分别是长节箬竹和阔叶箬竹, 分别得分 0.7808 和 0.7678; 髯毛箬竹、美丽箬竹、长耳箬竹得分稍低, 分别得分 0.5147、0.4817、

0.5314; 矮箬竹和胜利箬竹相比较得分更低, 得分 0.3975 和 0.3661; 得分更低的是泡箬竹 0.1903 分和华箬竹 0.2471 分; 得分最低的是米箬竹, 仅得分 0.0700。从综合评分的结果看出, 天目箬竹的得分最高, 是最好的加工原材料。尽管天目箬竹叶在功能性成分含量的单项中并不是最高的, 但多项综合之后, 却是最高。加上其醇提取物的抗氧化能力是最高的, 使其成为加工的首选箬竹叶原料。

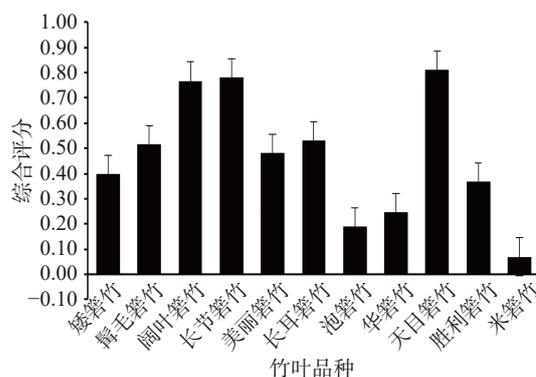


图1 功能性成分及抗氧化能力权重分析综合评分

Fig.1 Comprehensive score analysis of functional ingredients and antioxidant activity weights

3 结论

研究结果中出现了几种功能性成分单项数据很高的箬竹叶品种, 如果进行单独提取某方面的研究, 可以选择单项含量较高的品种。比如, 黄酮含量最高的是长节箬竹和阔叶箬竹, 分别为 0.68±0.07% 和 0.67±0.06%; 多糖含量最高的是髯毛箬竹, 含有 0.69±0.04%; 多酚含量最高的是长节箬竹, 含有 0.62±0.09%, 明显高于其他品种; 挥发油含量最高的阔叶箬竹, 含量为 0.64±0.05%。抗氧化能力最强的是天目箬竹, 得分 0.8856。

功能性成分含量的单项差异和综合评分的结果可以为箬竹叶的开发选品提供重要参考。阔叶箬竹和长节箬竹这两种的综合评分很可观, 仅比天目箬竹的综合评分低 0.043 和 0.030, 而且这两种的黄酮含量很高, 是非常好的开发原料。从不同箬竹叶的营养成分差异中, 可以看出箬竹叶是一种蛋白质提取的有效来源, 而粗脂肪的存在无论对于蛋白质提取还是其他功能性成分的提取都是一种阻碍, 所以对于箬竹叶的加工, 还是需要粗脂肪含量更低的品种。天目箬竹的粗脂肪含量最低, 并且最终在功能性成分及抗氧化能力综合评分中得分最高。所以天目箬竹的竹叶是综合开发的最佳选材。

参考文献

[1] 李冬林, 金雅琴, 王文君, 等. 箬竹叶营养成分分析[J]. 江苏林业科技, 2021, 48(1): 41-45. [LI Donglin, JIN Yaqin, WANG Wenjun, et al. Analysis of nutritional components of *Indocalamus* leaves[J]. *Jiangsu Forestry Science and Technology*, 2021, 48(1): 41-45.]

[2] NIRMALA C, BISHT M S, BAJWA H K, et al. Bamboo: A

rich source of natural antioxidants and its applications in the food and pharmaceutical industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 77: 91–99.

[3] 张英. 天然功能性添加剂——竹叶提取物[J]. 精细与专用化学品, 2002(7): 20–22. [ZHANG Ying. Natural functional additive-bamboo leaf extract[J]. Fine and Special Chemicals, 2002(7): 20–22.]

[4] 李宇, 罗彩凤, 田碧英. 箬竹叶黄酮的提取及功能饮料的研制[J]. 食品工业, 2014, 35(3): 122–125. [LI Yu, LUO Caifeng, TIAN Biying. Extraction of flavonoids from *Indocalamus* leaves and development of functional beverage[J]. Food Industry, 2014, 35(3): 122–125.]

[5] 苏春花, 王福升, 丁雨龙. 长节箬竹叶总黄酮提取工艺[J]. 林业科技开发, 2010, 24(5): 87–90. [SU Chunhua, WANG Fusheng, DING Yulong. Extraction process of total flavonoids from *Indocalamus longiauritus* leaves[J]. Forestry Science and Technology Development, 2010, 24(5): 87–90.]

[6] 周先泰, 陈蓉, 齐娜. 竹叶多糖提取分离及体外抗氧化自由基的研究[J]. 广州化工, 2021, 49(6): 80–83, 111. [ZHOU Xiantai, CHEN Rong, QI Na. Extraction and separation of bamboo leaf polysaccharides and study on antioxidant free radicals *in vitro*[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2021, 49(6): 80–83, 111.]

[7] 陈致印, 许泽文, 何佳慧, 等. 早竹竹叶多糖的提取及其抑菌作用[J]. 现代化农业, 2017(2): 35–38. [CHEN Zhiyin, XU zewen, HE Jiahui, et al. Extraction of polysaccharide from early bamboo leaves and its antibacterial effect[J]. Modern Agriculture, 2017(2): 35–38.]

[8] 喻谨. 箬竹属竹叶化学成分研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014(2): 1–231. [YU Jin. Study on chemical constituents of *Indocalamus* leaves[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014(2): 1–231.]

[9] 苏春花, 刘国华, 王福升, 等. 箬竹叶片能力成分含量的季节变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2471–2476. [SU Chunhua, LIU Guohua, WANG Fusheng, et al. Seasonal variation of active component content in *Indocalamus* leaves[J]. Journal of Applied Ecology, 2011, 22(9): 2471–2476.]

[10] 喻谨, 岳永德, 汤锋, 等. 不同地区竹叶中多糖的提取测定[J]. 生物质化学工程, 2014, 48(3): 40–43. [YU Jin, YUE Yongde, TANG Feng, et al. Extraction and determination of polysaccharides from bamboo leaves in different regions[J]. Biomass Chemical Engineering, 2014, 48(3): 40–43.]

[11] 张航航, 王文渊. 竹叶中多种能力成分同步提取的研究[J]. 食品与发酵科技, 2014, 50(4): 42–45, 102. [ZHANG Hanghang, WANG Wenyuan. Study on simultaneous extraction of multiple active components from bamboo leaves[J]. Food and Fermentation Technology, 2014, 50(4): 42–45, 102.]

[12] 王文渊, 张航航, 周振华, 等. 从竹叶中同步提取多糖、茶多酚和黄酮的研究[J]. 应用化工, 2014, 43(5): 835–838, 846. [WANG Wenyuan, ZHANG Hanghang, ZHOU Zhenhua, et al. Study on simultaneous extraction of polysaccharides, tea polyphenols and flavonoids from bamboo leaves[J]. Applied Chemical Industry, 2014, 43(5): 835–838, 846.]

[13] 张倩茹, 凌蕾, 何芋歧, 等. 苯酚硫酸法测定茵药艾纳香中

多糖含量[J]. 中国民族民间医药, 2019, 28(14): 30–32. [ZHANG Qianru, LING Lei, HE Yuqi, et al. Determination of polysaccharide content of *Blumea balsamifera* by phenol sulfuric acid method[J]. Chinese National and Folk Medicine, 2019, 28(14): 30–32.]

[14] 崔健. 箬竹属植物黄酮类物质与挥发性成分的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011. [CUI Jian. Study on flavonoids and volatile components of *Indocalamus*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.]

[15] 李水芳, 文瑞芝, 李忠海. 箬竹叶总黄酮含量的测定[J]. 中南林业学院学报, 2006(4): 128–131. [LI Shuifang, WEN Ruizhi, LI Zhonghai. Determination of total flavonoids in *Indocalamus* leaves[J]. Journal of Central South Forestry University, 2006(4): 128–131.]

[16] 乐薇, 杨文婷, 吴格格, 等. 箬叶总黄酮提取工艺优化及比较[J]. 北方园艺, 2015(16): 131–134. [LE Wei, YANG Wenting, WU Gege, et al. Optimization and comparison of extraction processes of total flavonoids from *Indocalamus* leaves[J]. Northern Horticulture, 2015(16): 131–134.]

[17] 王保金, 吴长俊, 房兆龙. 竹叶茶多酚超声提取及保鲜效果研究[J]. 广东农业科学, 2013, 40(10): 107–108, 158. [WANG Baojin, WU Changjun, FANG Zhaolong. Study on ultrasonic extraction and preservation of tea polyphenols from bamboo leaves[J]. Guangdong Agricultural Science, 2013, 40(10): 107–108, 158.]

[18] 苏春花, 罗金岳, 王福升. 长节箬竹叶茶多酚微波辅助提取工艺[J]. 林业科技开发, 2011, 25(3): 102–105. [SU Chunhua, LUO Jinyue, WANG Fusheng. Microwave assisted extraction technology of tea polyphenols from *Indocalamus longieensis* leaves[J]. Forestry Science and Technology Development, 2011, 25(3): 102–105.]

[19] 彭映林, 谢丹, 李媛, 等. 黑茶中茶多酚的提取及其含量测定方法的研究进展[J]. 广东化工, 2019, 46(19): 110–111, 138. [PENG Yinglin, XIE Dan, LI Yuan, et al. Research progress on extraction and content determination of tea polyphenols in black tea[J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(19): 110–111, 138.]

[20] 杨萍, 刘洪波, 潘佳佳, 等. 不同季节毛竹竹叶挥发油成分与抑菌效果比较研究[J]. 核农学报, 2015, 29(2): 313–320. [YANG Ping, LIU Hongbo, PAN Jiajia, et al. Comparative study on volatile oil composition and antibacterial effect of Moso bamboo leaves in different seasons[J]. Journal of Nuclear Agriculture, 2015, 29(2): 313–320.]

[21] 刘怡菲. 玉竹不同部位功能性成分测定及其抗氧化能力研究[J]. 辽宁林业科技, 2019(1): 6–9, 74. [LIU Yifei. Determination of functional components and antioxidant activity of different parts of *Polygonatum odoratum*[J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 2019(1): 6–9, 74.]

[22] ZHANG Youwei, ZHANG Hui, WANG Li, et al. Influence of the degree of hydrolysis (DH) on antioxidant properties and radical-scavenging activities of peanut peptides prepared from fermented peanut meal[J]. European Food Research and Technology, 2011, 232(6): 941–950.

[23] 欧阳吾乐, 雷福红, 杨亚晋, 等. 4 种竹叶营养成分分析及其黄酮提取物体外抗氧化能力研究[J]. 天然产物研究与开发,

- 2019, 31(10): 1669–1674,1830. [OUYANG Wule, LEI Fuhong, YANG Yajin, et al. Analysis of nutritional components of four kinds of bamboo leaves and study on *in vitro* antioxidant activity of flavonoids[J]. Research and Development of Natural Products, 2019, 31(10): 1669–1674,1830.]
- [24] 王紫薇, 涂明锋, 叶文峰, 等. 淡竹叶黄酮提取工艺优化及抗氧化性研究[J]. 山东化工, 2020, 49(2): 17–20. [WANG Ziwei, TU Mingfeng, YE Wenfeng, et al. Optimization of extraction process and antioxidant activity of flavonoids from *Phyllostachys pubescens* leaves[J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(2): 17–20.]
- [25] 张慧君, 袁于舒, 张岩, 等. 不同西瓜品种性状及变异系数的调查分析[J]. 北方园艺, 2021(16): 33–39. [ZHANG Huijun, YUAN Yushu, ZHANG Yan, et al. Investigation and analysis on traits and variation coefficients of different watermelon varieties[J]. Northern Horticulture, 2021(16): 33–39.]
- [26] ABEYSINGHE D T, KUMARA K A H, KAUSHALYA K A D, et al. Phytochemical screening, total polyphenol, flavonoid content, *in vitro* antioxidant and antibacterial activities of Sri Lankan varieties of *Murraya koenigii* and *Micromelum minutum* leaves[J]. Heliyon, 2021, 7(7): e07449.
- [27] JOELLA A, EGIDIO Q, GOVERDE R M P, et al. A hybrid delphi-AHP multi-criteria analysis of moving block and virtual coupling railway signalling[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 129: 103250.
- [28] YUN C, JIA Y, SHAHBAZ K. The spatial framework for weight sensitivity analysis in AHP-based multi-criteria decision making[J]. Environmental Modelling and Software, 2013, 48: 129–140.
- [29] 李慧敏, 郑淘, 曾艺琼, 等. AHP-CRITIC 权重分析法综合优选玉竹全粉改性工艺[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(5): 138–146. [LI Huimin, ZHENG Tao, ZENG Yiqiong, et al. Comprehensive optimization of modified technology of *Polygonatum odoratum* whole powder by AHP-CRITIC weighted evaluation[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(5): 138–146.]