

百年蔗红糖营养品质的综合评价分析

刘泽银¹, 许文¹, 陆斌², 黄小强^{1,3}, 吴水生^{1*}

(1. 福建中医药大学药学院, 福建福州 350122) (2. 福建省蔗百年农业科技发展有限公司, 福建南平 353599)
(3. 黄河科技学院医学院, 河南郑州 450063)

摘要: 为探究百年蔗红糖的成分和营养品质, 测定3批百年蔗红糖和14批市售红糖的理化指标、营养成分、活性成分及抗氧化活性, 并结合熵权法逼近理想排序法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)综合评价百年蔗红糖的营养价值。结果显示: 百年蔗红糖中含有还原糖分(9.10%)、蛋白质(1.54 g/100 g)、脂肪(1.30 g/100 g)、13种氨基酸(0.87 g/100 g)、12种矿物质元素(19 812.84 mg/kg), 其中人体必需氨基酸(0.16 g/100 g)及微量元素K(18 466.70 mg/kg)、Ca(629.33 mg/kg)、Fe(59.57 mg/kg)、Zn(12.18 mg/kg)含量均较高; 总黄酮、总多酚活性成分含量3.69 mg/g、5.69 mg/g; 抗氧化能力分析百年蔗红糖的半数清除率(Median Inhibition Concentration, IC₅₀)为15.01~16.44 mg/mL, 铁还原能力法(Ferric Reducing Antioxidant Power, FRAP)为0.053~0.063 mmol/g; 熵权TOPSIS综合分析显示红糖S1、S8、S12综合营养品质较佳, 可筛选为优质红糖。该研究通过构建熵权TOPSIS功能评价模型, 综合评红糖的营养价值, 以为红糖深加工及药用保健功能的产品开发提供一定的参考。

关键词: 红糖; 百年蔗; 营养成分; 活性成分; 抗氧化性; 熵权法; TOPSIS法

文章编号: 1673-9078(2023)10-213-224

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.10.1298

Comprehensive Evaluation of Nutritional Quality of Centennial Cane Brown Sugar

LIU Zeyin¹, XU Wen¹, LU Bin², HUANG Xiaoqiang^{1,3}, WU Shuisheng^{1*}

(1. College of Pharmacy, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou 350122, China)

(2. Fujian Zhebainian Agricultural Science and Technology Development Co. Ltd., Nanping 353599, China)

(3. College of Medical, Huanghe Science & Technology College, Zhengzhou 450063, China)

Abstract: To explore the composition and nutritional quality of the Centennial Cane brown sugar, the physicochemical indexes, nutritional constituents, active components and antioxidant activities of 3 batches of Centennial Cane brown sugar and 14 batches of commercially available brown sugar were determined. The nutritional value of Centennial Cane brown sugar was evaluated by the TOPSIS method. The results showed that the Centennial Cane brown sugar contained reducing sugar (9.10%), protein (1.54 g/100 g), fat (1.30 g/100 g), 13 amino acids (0.87 g/100 g) and 12 kinds of mineral elements (19 812.84 mg/kg). The contents of essential amino acids (0.16 g/100 g), and contents of trace elements, K (18 466.70 mg/kg), Ca (629.33 mg/kg), Fe (59.57 mg/kg) and Zn (12.18 mg/kg), were higher. The contents of total flavonoids and total polyphenols were 3.69 mg/g and 5.69 mg/g, respectively. The DPPH IC₅₀ and FRAP values of the Centennial Cane brown sugar were 15.01~16.44 mg/mL and 0.053~0.063 mmol/g, respectively. The comprehensive analysis of entropy weight TOPSIS showed that the comprehensive nutritional quality of brown sugars S1, S8 and S12 were better and can be selected as high-quality brown sugars. In this study, the nutritional value of brown sugar was comprehensively evaluated by constructing the entropy weight TOPSIS function evaluation model, to provide certain reference for brown sugar deep processing and the development of medicinal health functional products.

引文格式:

刘泽银, 许文, 陆斌, 等. 百年蔗红糖营养品质的综合评价分析[J]. 现代食品科技, 2023, 39(10): 213-224

LIU Zeyin, XU Wen, LU Bin, et al. Comprehensive evaluation of nutritional quality of centennial cane brown sugar [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(10): 213-224

收稿日期: 2022-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(81872990); 福建省卫生健康委青年科研项目(2019-1-66)

作者简介: 刘泽银(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 中药药效物质基础, E-mail: 1430086535@qq.com

通讯作者: 吴水生(1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 中药药效物质基础, E-mail: wushuishengwss@163.com

Key words: brown sugar; centennial sugarcane; nutrients; active constituents; inoxidizability; entropy method; TOPSIS method

红糖是我国重要的糖产品之一,以甘蔗为原料,经过清洗、榨汁、开泡、熬糖、出糖、打沙、成型等12道严格工序制成一种营养价值高的结晶糖^[1]。中医认为,红糖性温、味甘、入脾经,具有益气养血、活血化瘀、健脾暖胃、温宫养颜之效。红糖的药食历史悠久,在中医古籍李时珍撰著的《本草纲目》^[2]果部第三十三卷中的“砂糖”条下记载:“凝结如沙者为砂糖”,“砂糖性温,和脾缓肝,故治脾胃及泻肝药用为先导”,“和中助脾,缓肝气”。现今,红糖作为一种具有滋补保健的糖制品,以药用辅料的形式被广泛用于在中成药处方中,如《国家中成药标准汇编》^[3]中产妇产安合剂、妇康宝煎膏及阿胶远志膏;《中华人民共和国卫生部药品标准藏药第一册》^[4]中五味甘露滋补丸、九味石榴丸及安神丸等。近年来,大量研究表明,红糖保留了甘蔗原有的独特风味,除蔗糖以外还富含蛋白质、多种氨基酸、多酚、黄酮类成分及人体所需的钾、钙、铁、锌等微量矿物质元素的营养活性物质^[5-8],具有抗氧化、促进生长、保护细胞、预防糖尿病等活性,尤其是红糖中的多酚、黄酮类等活性因子发挥主要作用^[9-11]。可见,红糖具有丰富的药食价值和保健作用。

“百年蔗”是福建省知名品牌,产自福建省松溪县湛卢山脚下,是世界极为珍贵的甘蔗品种和濒危自然遗产。据资料记载,百年蔗种植于清朝雍正四年(1727年),距今已有近300年的历史,是全球甘蔗宿根寿命之最,享有“世界第一蔗”的美誉。并经考证,百年蔗为禾本科甘蔗属中国种(*Saccharum sinense* Roxb.)的竹蔗,是世界唯一具有发达的地下走茎和竹鞭块根,在甘蔗的栽培史上十分罕见,堪称“甘蔗的活化石”^[12-14]。目前,对于百年蔗红糖的主要成分和营养品质未见有详细研究报道。故本研究通过测定3批百年蔗红糖和14批市售红糖的理化指标、营养成分、活性成分含量及其1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-Diphenyl-2-Picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除能力、铁还原能力法2种抗氧化能力,并基于熵权TOPSIS法客观综合评价百年蔗红糖的营养价值,期为红糖深加工及药用保健功能的产品开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

芦丁(批号:100080-201610),中国食品药品质量检定研究院;没食子酸(批号:110831-201605),中国食品药品质量检定研究院;以上标准品的纯度均

大于95%;福林酚试剂(批号:J08GS154171),上海源叶生物有限公司;DPPH,上海源叶生物科技有限公司;FRAP法总抗氧化能力检测试剂盒,碧云天生物技术。盐酸、三乙醇胺、亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠、碳酸钠、甲醇均为分析纯。本文百年蔗红糖由合作企业提供,市场采集的样品根据红糖现有研究文献、市场调研、甘蔗产区等进行采样^[15-17],样品信息详见表1。

表1 红糖样品信息表

Table 1 Information of brown sugar samples

样品	产地	批号
S1-1	福建南平	20210713
S1-2	福建南平	20210531
S1-3	福建南平	20210610
S2	广西桂林	20210720
S3	广西南宁	20210510
S4	广西桂林	20210701
S5	广西南宁	20210107
S6	云南昆明	20210326
S7	云南玉溪	20210702
S8	云南昆明	20210611
S9	浙江嘉兴	20210123
S10	浙江金华	20210615
S11	江苏南京	20210623
S12	广东佛山	20210524
S13	山东德州	20210521
S14	江苏徐州	20210620
S15	广东广州	20210508

主要仪器:UV-1800型紫外分光光度计,上海美谱达仪器有限公司;AR224CN电子天平,美国奥豪斯仪器常州有限公司;KQ-500DE型超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;HH-2型电热恒温水浴锅,国华电器有限公司;SC-04低速离心机,安徽中科中佳科学仪器有限公司;DHP-9052电热恒温培养箱,上海一恒科学仪器有限公司;TECAN多功能酶标仪,帝肯奥地利有限责任公司;Milli-Q超纯水仪,美国Millipore公司;pH计ST3100,美国奥克斯仪器常州有限公司、电热恒温鼓风干燥箱DHG-9076Y,上海精宏有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 红糖理化指标测定

国家标准 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》

(第二法减压干燥法); GB/T 10468-1989《水果和蔬菜产品 pH 值的测定方法》; GB/T 35887-2018《白砂糖试验方法》及参考文献^[18]; QB/T 2343.2-2013《赤砂糖试验方法》分别测定红糖样品水分、pH、色值、还原糖。

1.2.2 红糖中蛋白质、脂肪、氨基酸及矿物质元素含量测定

参照国家标准 GB 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》(第一法凯氏定氮法), GB 5009.6-2016《食品中脂肪的测定》(第二法酸水解法), GB 5009.124-2016《食品中氨基酸的测定》, GB 5009.268-2016《食品中多元素的测定》(第一法电感耦合等离子体质谱法 ICP-MS), GB 5009.92-2016《食品中钙的测定》(第三法)分别测定红糖样品蛋白质、脂肪、氨基酸和矿物质元素含量。

1.2.3 活性成分的含量测定

1.2.3.1 红糖样品的制备

精密称取不同批次红糖样品粉末 2 g, 置于 100 mL 锥形瓶中, 加入 25 mL 纯化水, 40 °C 超声提取 45 min, 3 000 r/min 离心 5 min, 取上清液加水定容至 25 mL, 摇匀, 0.45 μm 滤膜滤过, 得红糖样品溶液。

1.2.3.2 总黄酮含量测定

参考文献^[19]的方法, 稍加调整, 以芦丁为标准品 (0.4 mg/mL), 精密吸取 0.25、0.5、0.75、1、1.25、1.5 mL 的标准溶液与 2 mL 红糖溶液 (上述“1.2.2.1”红糖样品溶液稀释 2 倍) 至 10 mL 容量瓶, 加水 2 mL, 加入 5% NaNO₂ 溶液 0.4 mL, 反应 6 min 后加入 10% Al(NO₃)₃ 溶液 0.4 mL, 反应 6 min 后加入 10% NaOH 溶液 2 mL, 用纯化水定容至刻度线, 以纯化水为空白对照同法操作, 摇匀, 10 min 后于 510 nm 测定吸光值并绘制标准曲线, 代入标准曲线计算含量。

1.2.3.3 总多酚含量测定

参考文献^[20]的方法, 以没食子酸为标准品 (0.05 mg/mL), 精密吸取 0.5、1、1.5、2、2.5、3 mL 的标准溶液与 1 mL 红糖溶液 (上述“1.2.2.1”红糖样品溶液稀释 4 倍) 至 25 mL 容量瓶, 分别加纯化水至 5 mL, 混匀后加入 1 mL 福林酚显色剂 (1 mol/L), 摇匀, 反应 1 min, 再依次加 100 g/L Na₂CO₃ 溶液 8 mL, 用纯化水定容至刻度线, 以纯化水为空白对照同法操作, 摇匀, 20 °C 避光反应 2 h 后于 760 nm 测定吸光值并绘制标准曲线, 代入标准曲线计算含量。

1.2.4 体外抗氧化性

1.2.4.1 DPPH 自由基清除能力的测定

参考文献^[21]的方法, 精密称取 DPPH 粉末适量, 加入甲醇溶解制成 0.1 mmol/L 的 DPPH 溶液, 再分别加

入质量浓度为 80、40、20、10、5、2.5、1.25、0.625 mg/mL 的红糖样品溶液, 避光保存。取 0.1 mmol/L 的 DPPH 溶液 950 μL, 再加入 50 μL 质量浓度不同的红糖样品溶液, 混合, 加入 96 孔板中每个检测孔为 200 μL, 避光反应 30 min。另将 DPPH 溶液换为甲醇溶液, 重复上述操作, 以甲醇做空白对照。采用多功能酶标仪测定 519 nm 处的吸光值, 并计算清除率和 IC₅₀ 值。

$$S = \left(1 - \frac{As - Ab}{Ac - Ab'} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中:

S——清除率, %;

As——样品 + DPPH 溶液;

Ab——样品 + 甲醇溶液;

Ac——DPPH 溶液;

Ab'——甲醇溶液。

1.2.4.2 总还原能力的测定

参照 FRAP 法试剂盒说明书进行操作, 取 TPTZ 溶液、TPTZ 稀释液、检测缓冲液按 1:10:1 的比例混合, 配制完成 FRAP 工作液后 37 °C 孵育 5 min。精密称取 FeSO₄ 粉末配制成 0.075、0.15、0.3、0.6、0.9、1.2、1.5、2 mmol/L 的标准液, 以 FeSO₄ 标准溶液浓度为横坐标, 吸光值 A 为纵坐标绘制标准曲线。在 96 孔板中加入 180 μL FRAP 工作液, 加入 20 μL 浓度为 40、20、10、5、2.5 mg/mL 的红糖样品溶液, 室温下孵育 5 min。采用多功能酶标仪测定 593 nm 处的吸光值, 并得出 FRAP 值。

1.2.5 建立评价红糖的熵权 TOPSIS 模型

1.2.5.1 建立红糖原始评价矩阵

以红糖蛋白质、脂肪、必需氨基酸、非必需氨基酸、常量元素、微量元素、还原糖、总黄酮、总多酚及其 DPPH IC₅₀ 和 FRAP 值含量测定结果为评价指标, 形成的原始数据矩阵公式为:

$$Y = (x_{ij})_{m \times n} \quad (2)$$

式中:

x_{ij} ——第 j 个指标下第 i 个项目的评价值, 其取值范围 $1 \leq j \leq 11, 1 \leq i \leq 15$;

m ——样品批次 ($m = 15$);

n ——评价指标 ($n = 11$)。

1.2.5.2 建立标准数据归一化矩阵

由于红糖中 IC₅₀ 值属于逆向指标, 需对其逆向化处理, 逆向化公式为 (3), 红糖的 11 个评价指标的单位不同, 量程大小不一, 因此对原始数据指标将所有数据压缩在 0 到 1 之间, 即归一化处理, 归一化公式为 (4):

$$r_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - (x_{ij})}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (3)$$

$$p_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (4)$$

1.2.5.3 熵权法

依据红糖中各项指标归一化结果计算各评价指标的信息熵 (e_j)、信息效用值 (g_j)、熵权系数 (W_j)^[22-24], 计算公式分别为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (p_{ij} \times \ln p_{ij}) \quad (5)$$

$$g_j = 1 - e_j \quad (6)$$

$$W_j = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{j=1}^n e_j} \quad (0 \leq W_j \leq 1) \quad (7)$$

1.2.5.4 TOPSIS 法

将各指标权重与归一化规范矩阵相乘, 构建加权规范化决策矩阵 (A) 并确定评价指标正负理想解值 (A^+ 和 A^-)^[22-24], 计算公式分别为:

$$A = (P_{ij} \times W_j)_{mn};$$

$$A^+ = \max(A_{ij}) = [A_1^+, A_2^+, \dots, A_m^+];$$

$$A^- = \min(A_{ij}) = [A_1^-, A_2^-, \dots, A_n^-] \quad (8)$$

通过计算各评价对象分别与正负理想解的距离值 D^+ 和 D^- , 得到最优方案相对接近度 C_i 值, 即得到综合评价指数, 根据 C_i 值的大小进行排序来评定红糖营养品质。计算公式分别为:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (A_{ij}^+ - A_{ij})^2};$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (A_{ij}^- - A_{ij})^2} \quad (9)$$

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (10)$$

1.3 数据处理

本实验所得实验数据均为 3 次重复实验结果, 用平均值±标准偏差表示, 并采用 Excel 2019 及 SPSS 26.0 统计软件处理数据进行单因素方差分析, 不同小写字母表示差异达到 $P < 0.05$ 水平。

2 结果与分析

2.1 理化指标的测定结果

表 2 不同批次红糖的理化指标

Table 2 Physicochemical indexes of different batches of brown sugar

样品	水分/%	pH 值	色值/IU	还原性糖/%
S1-1	4.65±0.03 ^e	5.13±0.01 ^c	8 907.04±24.66 ^c	8.98±0.36 ^c
S1-2	4.69±0.08 ^e	5.10±0.09 ^c	8 831.66±54.40 ^c	9.13±0.20 ^c
S1-3	4.79±0.09 ^{de}	5.14±0.07 ^c	8 944.72±23.02 ^c	9.20±0.18 ^c
平均值	4.74±0.08	5.12±0.02	8 894.47±57.57	9.10±0.11
S2	4.52±0.00 ^f	4.62±0.12 ^d	6 319.10±33.30 ^f	4.20±0.63
S3	3.26±0.04 ⁱ	5.20±0.03 ^{bc}	6 344.22±46.20 ^f	8.35±0.13 ^d
S4	6.06±0.03 ^b	4.88±0.02 ^{dc}	6 846.73±50.01 ^e	5.11±0.88 ^g
S5	4.04±0.03 ^g	5.28±0.02 ^b	5 389.45±3.26 ^h	7.46±0.3 ^e
S6	4.90±0.06 ^d	5.08±0.12 ^{dc}	8 706.03±66.05 ^c	5.83±0.16 ^f
S7	5.56±0.12 ^c	5.04±0.02 ^c	5 929.65±17.29 ^g	10.21±0.19 ^b
S8	3.72±0.04 ^h	5.13±0.06 ^c	11 092.96±90.84 ^a	9.96±0.55 ^b
S9	6.21±0.13 ^a	4.84±0.03 ^{dc}	7 512.56±2.19 ^d	5.58±0.08 ^{fg}
S10	4.10±0.05 ^g	5.53±0.05 ^a	4 962.31±22.51 ⁱ	8.77±0.09 ^{cd}
S11	2.74±0.01 ^j	4.76±0.08 ^d	4 472.36±2.68 ^j	8.01±0.34 ^{de}
S12	4.13±0.03 ^g	5.18±0.01 ^{bc}	9 283.92 ±66.39 ^b	9.69±0.59 ^{bc}
S13	4.53±0.05 ^{ef}	5.03±0.06 ^c	5 276.38±34.50 ^{hi}	4.97±0.10 ^g
S14	2.01±0.02 ^k	5.25±0.03 ^{bc}	2 437.19±9.06 ^k	14.50±0.15 ^a
S15	3.72±0.15 ^h	5.04±0.06 ^c	7 613.07±15.7 ^d	7.37±0.09 ^e
平均值	4.25±1.19	5.06±0.23	6 584.71±2185.46	7.86±2.74

注: 同列不同小写字母表示具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

不同批次红糖的理化指标的参数见表 2, 从分析结果来看, 红糖中的水分含量差异不大, 其质量分数范围在 2.01%~6.21%, 百年蔗红糖的水分为 4.74%, 不同批次市售红糖水分含量平均为 4.25%。根据现行的红糖国家标准 (GB/T 35885-2018) 要求, 不同批红糖水分质量分数均 \leq 4.8%, 其中有个别红糖样品水分略高, 这可能与红糖在包装时水分控制偏高有关^[25]。由表 2 可知, 测定红糖 pH 值差异无明显差异, 其范围在 4.62~5.25 之间均为弱酸性, 研究表明其原因与高温下美拉德反应所产生的挥发性物质有关^[26]。从红糖的色值结果分析可见, 红糖的色值差异较为明显, 百年蔗红糖色值为 8 894.47 IU, 不同批次市售红糖色值平均为 6 584.71 IU。研究报道红糖的色源产生与甘蔗品种自身色素成分组成、制糖过程中酚类化合物的氧化, 蔗糖、果糖和葡萄糖的焦糖化, 还原糖与氨基酸的美拉德反应及蔗糖的碱性水解等有关^[27]。还原性糖是评价红糖重要的指标之一, 由表 2 可知不同批次红糖还原糖含量范围在 4.2%~14.50%, 百年蔗红糖平均含量为 9.10%。

2.1 蛋白质、脂肪、氨基酸的测定结果

蛋白质是人体生命活动的必需营养物质, 由表 3 可知, 从蛋白质和脂肪含量来看, 百年蔗红糖中蛋白质为 1.54 g/100 g, 脂肪为 1.30 g/100 g, 14 批市售红糖中蛋白质为 2.15 g/100 g, 脂肪为 1.24 g/100 g。氨基酸是一种重要的营养评价指标, 其参与风味物质的合成, 同时自身也具有呈味作用^[25]。据文献研究, 红糖中粗蛋白与氨基酸的呈现非常显著的正相关性, 所含的蛋白质越多其氨基酸含量也相应的越高, 并指出红糖的粗蛋白含量具有一定的区域差异性, 其原因可能是甘蔗品种和生产工艺差异所致^[28]。结果表 4 可知, 在百年蔗红糖中共检测出 13 种氨基酸, 包括 6 种非必需氨基酸 (Non-essential Amino Acids, NEAA) 和 7 种必需氨基酸 (Essential Amino Acids, EAA), 其含量分别为 0.71、0.16 g/100 g; 结果见表 4, 14 批市售红糖的 NEAA 与 EAA 分别为 0.73、0.09 g/100 g。百年蔗红糖中必需氨基酸含量丰富, 相较于市售红糖, 其含量是市售红糖的近 2 倍。百年蔗红糖中还含有 7 种对人体具有特殊医疗保健功效的药用氨基酸^[29], 其

总含量为 0.68 g/100 g, 占总氨基酸的 78.16%。从各氨基酸含量来看, 尤其是天冬氨酸和谷氨酸均高于其他种类的氨基酸, 分别所占总氨基酸的 43.67%、21.83%, 其研究结果与徐灵均等^[27]一致。研究表明, 天冬氨酸可作为电解质补充剂和营养增效剂, 有助于疲劳缓解和恢复^[30], 而谷氨酸参与机体代谢, 具有保护胃肠道的功能, 当人体吸收后, 形成的谷酰胺具有保护肝脏的作用^[31]。说明百年蔗红糖独特的食药属性, 对人体健康具有一定的保健效果。

表 3 不同批次百年蔗红糖中基本营养成分的含量 (g/100 g)

Table 3 Content of basic nutrients in different batches of centennial brown sugar (g/100 g)

样品成分	S1-1	S1-2	S1-3	平均含量
蛋白质	1.50±0.08 ^a	1.55±0.05 ^a	1.58±0.15 ^a	1.54±0.04
脂肪	1.30±0.00 ^b	1.3±0.01 ^b	1.3±0.01 ^b	1.3±0.00
天冬氨酸*	0.38	0.45	0.32	0.38±0.07
丝氨酸*	0.026	0.022	0.034	0.027±0.00
谷氨酸**	0.17	0.22	0.17	0.19±0.02
蛋氨酸**	-	-	-	-
甘氨酸**	0.025	0.022	0.028	0.025±0.00
丙氨酸*	0.063	0.071	0.057	0.064±0.01
酪氨酸*	-	-	-	-
脯氨酸*	0.017	0.021	0.019	0.019±0.00
苏氨酸 [#]	0.023	0.023	0.025	0.024±0.00
缬氨酸 [#]	0.041	0.048	0.047	0.045±0.00
异亮氨酸 [#]	0.021	0.019	0.028	0.023±0.00
亮氨酸 [#]	0.028	0.029	0.033	0.03±0.00
苯丙氨酸 [#]	0.018	0.023	0.031	0.024±0.01
组氨酸 [#]	0.005 2	0.005 9	0.006 4	0.005 8±0.00
赖氨酸 [#]	0.010 9	0.009 6	0.010 2	0.01±0.00
精氨酸 [#]	-	-	-	-
药用氨基酸	0.65	0.77	0.62	0.68±0.08
必需氨基酸	0.15	0.16	0.18	0.16±0.02
非必需氨基酸	0.68	0.81	0.63	0.71±0.09
总氨基酸	0.83	0.96	0.81	0.87±0.08

注: 同列不同小写字母表示具有显著性差异 ($P<0.05$); “-”代表未检出, “*”代表非必需氨基酸, “#”代表必需氨基酸, “•”代表药用氨基酸。下表同。

表 4 不同批次市售红糖中基本营养成分的含量

Table 4 Contents of basic nutrients in different batches of commercial brown sugar (g/100 g)

成分	样品															平均含量
	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15		
蛋白质	2.38±0.22 ^d	1.78±0.10 ^f	2.56±0.02 ^{cd}	2.36±0.09 ^d	3.23±0.12 ^a	2.72±0.23 ^c	2.97±0.16 ^b	2.14±0.06 ^c	1.12±0.02 ⁱ	2.12±0.21 ^e	2.44±0.05 ^d	1.33±0.11 ^b	1.05±0.03 ⁱ	1.91±0.08 ^f	2.15±0.66	
脂肪	1.30±0.02 ^b	1.00±0.02 ^c	1.20±0.01 ^{abc}	1.10±0.05 ^{bc}	1.30±0.03 ^b	1.60±0.03 ^a	1.30±0.04 ^b	1.40±0.02 ^{ab}	1.60±0.03 ^a	1.30±0.04 ^b	1.50±0.07 ^a	0.80±0.05 ^c	1.20±0.01 ^{abc}	0.80±0.03 ^c	1.24±0.25	
天冬氨酸**	0.68	0.51	0.53	0.42	0.61	0.59	0.69	0.45	0.27	0.43	0.63	0.37	0.20	0.60	0.50±0.15	
丝氨酸*	0.021	0.020	0.019	0.012	0.024	0.021	0.024	0.012	0.009	0.018	0.025	0.013	0.005	0.020	0.02±0.01	
谷氨酸**	0.16	0.13	0.13	0.08	0.19	0.20	0.23	0.08	0.07	0.15	0.22	0.14	0.03	0.13	0.14±0.06	
蛋氨酸**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
甘氨酸**	0.017	0.013	0.016	0.01	0.017	0.013	0.023	0.011	0.011	0.015	0.022	0.008	0.004	0.021	0.014±0.01	
丙氨酸*	0.048	0.047	0.052	0.042	0.051	0.049	0.055	0.040	0.030	0.047	0.051	0.048	0.024	0.050	0.05±0.01	
酪氨酸*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
脯氨酸*	0.018	0.014	0.017	0.009	0.038	0.018	0.032	0.008	0.007	0.014	0.026	0.02	0.01	0.016	0.018±0.01	
苏氨酸 [#]	0.019	0.012	0.013	0.008	0.018	0.011	0.02	0.012	0.007	0.014	0.019	0.014	0.004	0.011	0.013±0.00	
缬氨酸 [#]	0.037	0.033	0.037	0.032	0.041	0.021	0.042	0.034	0.015	0.022	0.039	0.018	0.008	0.023	0.029±0.01	
异亮氨酸**	0.016	0.01	0.011	0.008	0.017	0.016	0.02	0.014	0.008	0.011	0.019	0.016	0.007	0.013	0.013±0.00	
亮氨酸*	0.020	0.015	0.018	0.012	0.022	0.016	0.018	0.012	0.011	0.015	0.016	0.013	0.007	0.017	0.015±0.00	
苯丙氨酸**	0.013	0.010	0.011	0.009	0.012	0.009	0.011	0.008	0.007	0.011	0.010	0.003	0.003	0.011	0.009±0.00	
组氨酸 [#]	0.005 3	0.003 3	0.004 3	0.003 6	0.004 8	0.004 7	0.004 7	0.003	0.002 3	0.003 3	0.004 5	0.002 1	0.001 2	0.004 3	0.004±0.00	
赖氨酸*	0.007	0.006 1	0.006 3	0.003 4	0.006 6	0.005 6	0.007 1	0.002 8	0.003 2	0.006	0.006 9	0.007 6	-	0.006	0.005 7±0.00	
精氨酸**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
药用氨基酸	0.91	0.69	0.72	0.54	0.87	0.85	1.00	0.58	0.38	0.64	0.92	0.56	0.26	0.80	0.69±0.22	
必需氨基酸	0.12	0.09	0.10	0.08	0.12	0.08	0.12	0.09	0.05	0.08	0.11	0.07	0.03	0.09	0.09±0.03	
非必需氨基酸	0.94	0.73	0.76	0.57	0.93	0.89	1.05	0.60	0.40	0.67	0.97	0.60	0.28	0.84	0.73±0.22	
总氨基酸	1.06	0.82	0.86	0.65	1.05	0.97	1.18	0.69	0.45	0.76	1.09	0.67	0.31 ⁱ	0.92	0.82±0.25	

2.2 矿物质元素的测定结果

矿物质是构成人体组织和维持生命活动必需的元素,分为常量元素和微量元素,由表5可知,在百年蔗红糖中共检测出12种矿物质元素,且不同批次红糖的常量元素的平均含量均呈现 $K > Ca > Mg$ 的特征,与徐灵均等^[27]的研究结果一致,其中K元素含量最高为18 466.7 mg/kg,其次是Ca元素含量为629.33 mg/kg,百年蔗红糖可作为补充钾钙元素较佳的选择。同时,从红糖中检测出对人体有益的微量元素包括Fe、Zn、Cu、Mn、Cr,市售红糖总含量为53.83 mg/kg,百年蔗红糖总含量为86.27 mg/kg,平均高于市售红糖的近2倍左右,而这些微量元素人体自身不能合成,需要从外界摄取。其中,Fe元素在百年蔗红糖中含量最高,为59.57 mg/kg;Zn、Mn元素次之,含量分别为12.18、13.63 mg/kg。有研究报道红糖中的Mn含量的范围在1.93~25.15 mg/kg,且在不同红糖含量差异显著,其原因可能与甘蔗品种、气候、土壤矿物元素含量、施肥状况等因素有关^[17,32]。科学研究证实,中药的药理与微量元素两者存在相关性,所含微量元素能引导药物归经,参与机

体微循环,促进机体酶和激素的代谢^[33]。Fe元素参与血液中血红蛋白、肌红蛋白的生成,是人体造血功能必不可少的原料;Zn元素是参与人体生长发育最重要的元素,是多种人体活化酶的有效成分,尤其是促进新陈代谢和免疫器官发育的重要元素;Mn元素参与人体骨骼造血,具有增强机体活力的作用^[34]。这些微量元素可能是百年蔗红糖具有益气养血、活血化瘀的功效缘由之一,但其机制还尚未明确。同时,我们还测定了Pb、As、Hg有害元素,并根据国家标准GB 2762-2017《食品中污染物限量》中Pb的限量不超过0.5 mg/kg,As的限量不超过0.5 mg/kg,百年蔗红糖的Pb、As、Hg含量均在允许范围内,说明百年蔗红糖品质是较为安全的。

2.3 活性成分的测定结果

多酚类和黄酮类化合物是影响红糖品质主要的活性成分,具有抗氧化、抗菌及保护细胞活性等生物功能^[35]。多酚类化合物被氧化而变成红褐色是红糖色源产生的原因之一,是影响红糖品质的重要指标之一^[36]。研究报道,糖蜜中含有丰富的类黄酮衍生物,并且比其他甘蔗副产物具有更高的抗氧化活性^[37]。

表5 不同批次百年蔗红糖的矿物质元素含量

Table 5 Mineral element content of different batches of centennial brown sugar (mg/kg)

成分	样品			平均含量
	S1-1	S1-2	S1-3	
K	18 500±130 ^a	18 600±340 ^a	18 300±240 ^a	18 466.7±152.75
Ca	612±48 ^f	679±52 ^f	597±63 ^f	629.33±43.66
Na	247±13.22	194±50.17	227±15.20	213.67±17.39
Mg	292±12.77 ^{cd}	313±15.21 ^{cd}	326±18.95 ^{cd}	313.67±12.01
P	100±2.75	93.6±4.68	98.8±1.22	97.47±3.40
Fe	58.9±0.33 ^a	59.7±0.37 ^a	60.1±0.66 ^a	59.57±0.61
Zn	11.4±0.12 ^a	12.82±0.36 ^a	12.33±0.04 ^a	12.18±0.72
Cu	0.60±0.01 ^e	0.61±0.02 ^{de}	0.61±0.02 ^{de}	0.61±0.00
Mn	13.1±0.08 ^{il}	13.8±0.17 ^{ijkl}	14.0±0.02 ^k	13.63±0.47
Cr	0.27±0.02 ^f	0.25±0.02 ^{fg}	0.33±0.01 ^{de}	0.28±0.04
Se	-	-	-	-
Pb	0.08±0.00 ^{ef}	0.11±0.02 ^b	0.09±0.00 ^{de}	0.09±0.01
As	0.02±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00
Hg	-	-	-	-
常量元素	19 724±143 ^{ab}	19 880±160 ^a	19 549±128 ^b	19 726.47±166.76
微量元素	84.27±0.46 ^{bc}	87.18±1.55 ^a	87.36±1.02 ^a	86.27±1.85
总矿物质元素	19 808±140 ^b	19 967±178 ^{ab}	19 636±98 ^b	19 812.84±166.47

表6 不同批次市售红糖的矿物质元素含量

Table 6 Mineral element content of different commercial batches of brown sugar (mg/kg)

成分	样品							
	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
K	10 800±189 ^c	9 800±300 ^e	9 360±210 ^f	9 220±310 ^{fg}	10 200±90 ^d	10 240±250 ^d	11 000±390 ^c	7 980±203 ^h
Ca	2 350±247 ^{bce}	2 240±153 ^{bce}	2 100±79 ^{ce}	1 130±129 ^{ef}	2 210±113 ^{bce}	2 330±192 ^{bce}	2 950±164 ^a	1 950±223 ^{ce}
Na	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30
Mg	556±1.23 ^b	625±34.20 ^{ab}	301±10.24 ^{cd}	249±0.23 ^d	332±1.98 ^c	260±6.77 ^d	642±33.25 ^{ab}	424±56.01 ^{bcd}
P	<60	<60	<60	<60	<60	<60	<60	<60
Fe	22.10±1.05 ^{def}	25.30±1.83 ^{cef}	22.00±1.66 ^{efg}	28.20±0.26 ^{ce}	15.80±0.88 ^{fg}	18.40±0.56 ^f	24.80±0.61 ^{de}	49.10±0.02 ^b
Zn	3.29±0.32 ^f	6.66±0.23 ^c	2.35±0.33 ^g	5.28±0.31 ^{de}	4.9±0.09 ^e	4.98±0.06 ^e	5.13±0.16 ^{de}	7.63±0.05 ^b
Cu	1.28±0.04 ^a	1.00±0.07 ^b	0.77±0.01 ^c	0.75±0.06 ^{bcd}	1.24±0.12 ^a	0.22±0.05 ^g	1.29±0.03 ^a	0.70±0.00 ^{de}
Mn	14.8±0.09 ^{ij}	14.7±0.02 ^j	19.9±0.00 ^e	19.6±0.03 ^f	14.8±0.05 ^{ij}	13.5±0.01 ^l	16.3±0.01 ^h	24.4±0.02 ^c
Cr	0.26±0.02 ^{fg}	0.27±0.02 ^f	0.57±0.05 ^a	0.49±0.01 ^b	0.29 ^{ef}	0.22±0.01 ^g	0.44±0.02 ^c	0.36±0.01 ^d
Se	-	-	-	-	-	-	-	-
Pb	0.10±0.00 ^c	0.09±0.00 ^d	0.09±0.01 ^{de}	0.10±0.00 ^e	0.10±0.00 ^{cd}	0.11±0.00 ^b	0.07±0.00 ^g	0.10±0.00 ^{cd}
As	0.03±0.00	0.05±0.00	0.03±0.00	0.04±0.00	0.04±0.00	0.04±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00
Hg	-	-	-	-	-	-	-	-
常量元素	13 706±131 ^e	12 665±189 ^f	11 761±166 ^g	10 599±102 ^h	12 742±187 ^f	12 830±204 ^f	14 592±271 ^d	10 354±126 ^{hi}
微量元素	41.73±1.33 ⁱ	47.93±2.01 ^{sh}	45.59±0.44 ^h	54.31±1.56 ^f	37.03±1.88 ⁱ	37.32±0.67 ^j	47.96±0.33 ^{sh}	82.18±1.03 ^c
总矿物质元素	13 748±145 ^e	12 713±163 ^f	11 807±177 ^g	10 653±113 ^{hi}	12 779±192 ^f	12 867±203 ^f	14 640±278 ^d	10 436±143 ^{hi}

成分	样品						平均含量
	S10	S11	S12	S13	S14	S15	
K	3 280±70 ^k	8 980±150 ^g	12 200±230 ^b	7 700±160 ^h	5 320±90 ^j	7 280±170 ⁱ	8 811.43±2365.26
Ca	520±30 ^f	1 300±59 ^e	2 450±266 ^b	1 890±163 ^{ce}	430±58 ^f	990±117 ^{ef}	1 774.29±768.20
Na	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30
Mg	122±2.98 ^e	367±2.55 ^c	656±20.30 ^{ab}	657±12.54 ^a	134±9.50 ^e	478±2.69 ^b	414.50±191.11
P	<60	<60	<60	<60	<60	<60	<60
Fe	12.80±0.34 ^g	33.20±4.88 ^{bcd}	44.90±5.02 ^{bcd}	42.60±1.09 ^b	14.40±0.08 ^{fg}	22.30±1.32 ^{cde}	26.85±11.54
Zn	3.46±0.09 ^f	5.08±0.12 ^e	5.41±0.03 ^{de}	7.44±0.10 ^b	6.55±0.13 ^c	7.21±0.01 ^b	5.38±1.60
Cu	0.84±0.04 ^c	0.78±0.00 ^c	0.84±0.02 ^c	0.46±0.04 ^f	1.02±0.00 ^b	0.30±0.004 ^g	0.82±0.33
Mn	24.8±0.03 ^c	14.9±0.01 ⁱ	20.9±0.01 ^d	32.4±0.51 ^{bc}	36.2±0.36 ^a	18.5±0.03 ^g	20.41±6.93
Cr	0.46±0.02 ^c	0.47±0.01 ^b	0.23±0.02 ^g	0.30±0.00 ^e	0.44±0.01 ^c	0.35±0.01 ^d	0.37±0.11
Se	-	-	-	-	-	-	-
Pb	0.12±0.00 ^a	0.01±0.00 ^h	0.08±0.00 ^{ef}	0.09±0.00 ^e	0.08±0.00 ^f	0.08±0.00 ^{ef}	0.09±0.03
As	0.05±0.00	0.04±0.00	0.04±0.00	0.03±0.00	0.04±0.00	0.04±0.00	0.04±0.01
Hg	-	-	-	-	-	-	-
常量元素	3 922±49 ^l	10 647±201 ^h	15 306±297 ^c	10 247±142 ⁱ	5 884±189 ^k	8 748±160 ^j	11 000.21±3175.80
微量元素	42.36±0.79 ⁱ	54.42±1.38 ^f	72.27±0.90 ^d	83.20±2.01 ^c	58.61±3.44 ^e	48.7±0.35 ^g	53.83±15.26
总矿物质元素	3 965±134 ^l	10 701±252 ^h	15 378±304 ^c	10 330±159 ^j	5 943±277 ^k	8 797±210 ^j	11 054.17±3175.28

由表7可知,从总黄酮来看,根据上述方法芦丁标准曲线为: $Y=12.064X+0.0164$, $r^2=0.9998$, 红糖总黄酮含量范围为 0.56~3.69 mg/g, 与市售红糖相比百年蔗红糖的总黄酮含量最高, 达到 3.69 mg/g。

从总多酚来看, 根据上述方法以没食子酸为标准

品的曲线为: $Y=103.4X+0.0189$, $r^2=0.9991$, 红糖总多酚含量最高可以达到 7.49 mg/g, 含量范围为 1.90~7.49 mg/g, 在百年蔗红糖中总多酚含量为 5.69 mg/g, 研究表明其含量的高低, 可能与甘蔗的压榨程度的有关^[38]。

表7 不同批次红糖的活性成分含量

Table 7 Content of active ingredients in different batches of brown sugar (mg/g)

样品	总黄酮含量	总多酚含量	样品	总黄酮含量	总多酚含量
S1-1	3.47±0.16 ^b	5.57±0.55 ^{bc}	S7	2.77±0.17 ^c	4.52±0.35 ^d
S1-2	3.69±0.11 ^a	5.69±0.42 ^{bc}	S8	2.88±0.04 ^c	7.50±0.64 ^a
S1-3	3.59±0.14 ^{ab}	5.44±0.28 ^c	S9	1.85±0.04 ^f	4.31±0.21 ^{de}
平均含量	3.69±0.11	5.69±0.42	S10	2.13±0.11 ^e	3.75±0.33 ^e
S2	1.89±0.05 ^f	4.53±0.12 ^d	S11	0.56±0.12 ^h	2.57±0.14 ^f
S3	2.09±0.11 ^e	4.40±0.23 ^{de}	S12	2.48±0.08 ^d	6.04±0.46 ^b
S4	2.11±0.09 ^e	5.44±0.10 ^c	S13	1.22±0.09 ^g	2.94±0.16 ^f
S5	2.46±0.08 ^d	3.99±0.11 ^e	S14	1.27±0.06 ^g	1.90±0.09 ^g
S6	2.78±0.09 ^c	5.28±0.25 ^{cd}	S15	2.45±0.14 ^d	4.77±0.28 ^d

表8 不同批次红糖在不同浓度下 DPPH 自由基清除率及 IC₅₀ 值Table 8 DPPH free radical scavenging rate and IC₅₀ value of different batches of brown sugar at different concentrations (%)

样品	80 mg/mL	40 mg/mL	20 mg/mL	10 mg/mL	5 mg/mL	2.5 mg/mL	1.25 mg/mL	DPPH IC ₅₀ (mg/mL)
S1-1	93.56	84.54	57.44	35.76	23.77	16.81	13.73	16.21
S1-2	95.22	88.19	59.89	37.34	28.87	16.76	13.22	15.01
S1-3	94.69	83.11	54.77	40.01	27.16	15.28	12.98	16.44
S2	94.52	74.44	51.25	34.16	26.25	19.55	17.48	18.31
S3	90.13	64.70	44.41	31.03	22.82	18.49	14.27	24.77
S4	89.69	73.03	44.99	28.56	12.28	4.62	0.39	21.44
S5	85.77	62.13	43.79	35.61	27.18	21.96	19.24	22.74
S6	98.69	84.04	54.88	38.14	26.82	20.69	17.27	16.63
S7	92.19	62.08	37.57	33.99	29.20	25.93	13.86	29.12
S8	93.18	87.15	59.83	37.78	23.19	15.91	12.93	13.74
S9	74.17	56.36	33.40	21.09	17.54	11.64	7.22	33.69
S10	88.55	66.00	44.18	30.32	25.90	21.88	18.69	24.73
S11	75.49	52.16	36.67	27.52	22.37	19.03	16.71	36.58
S12	96.63	84.84	61.64	41.76	30.27	21.83	16.17	13.63
S13	73.29	45.60	26.38	14.94	8.10	1.37	1.39	44.76
S14	75.97	52.24	47.34	23.22	12.22	7.40	3.30	30.13
S15	83.60	69.62	42.48	30.49	15.17	9.93	6.75	21.98

2.4 抗氧化能力的测定

2.4.1 DPPH 自由基清除能力的测定结果分析

半数清除率 (Median Inhibition Concentration, IC₅₀) 值是 DPPH 清除率达到 50% 时的样品浓度值, IC₅₀ 值越小, 表明抗氧化能力越强。研究表明, 在制糖过程中获得的甘蔗汁、糖浆和糖蜜等, 都是具有很强抗氧化活性的酚类物质重要来源^[39-41]。在 Payet 等^[42] 研究结果中, 红糖对 DPPH 自由基清除的能力与总酚含量以及黄酮类含量具有较高相关性。Ali 等^[43] 认为酚类成分如对羟基苯甲酸、对羟基苯甲醛、香草酸、丁香酸和阿魏酸等含量在糖蜜中比其他甘蔗产品更为丰富。结果如表 8、9 所示, 红糖具有很强的抗氧化能力,

采用 SPSS 26.0 计算各个样品的 IC₅₀ 值, 其不同批次红糖的 IC₅₀ 值范围为 13.63~44.76 mg/mL, 百年蔗红糖的 IC₅₀ 为 15.01~16.44 mg/mL。在一定的实验浓度范围内, 红糖对 DPPH 自由基均有一定清除作用, 当质量浓度达到 80 mg/mL 时, 百年蔗红糖清除率达到 93.56%~95.22%, 并且不同批次的红糖样品溶液对 DPPH 清除的能力不同, 其清除率均随着红糖浓度增大而增大。

2.4.2 铁还原能力的测定结果分析

总抗氧化能力的测定原理是酸性条件下抗氧化物可以还原 Fe³⁺-TPTZ 产生蓝色 Fe²⁺-TPTZ 的能力, 在一定波长处, 通过测定吸光度的变化对铁离子还原性进行定量, 从而得出红糖的抗氧化值。本研究 FRAP

法结果用总抗氧化能力根据 FeSO_4 标准溶液的浓度来表示, FRAP 值越大抗氧化能力越强。根据上述方法, 以 FeSO_4 为标准溶液进行线性拟合, 得到回归方程: $Y=1.109X+0.0164$, $r^2=0.9991$, 根据标准曲线得不同

批次不同浓度红糖的 FRAP 值。由表 9 可知, FRAP 值范围为 0.019~0.090 mmol/g, 百年蔗红糖的 FRAP 值为 0.053~0.063 mmol/g, 并且在一定实验浓度范围内, FRAP 值随着红糖浓度增大而增大。

表 9 不同批次红糖在不同浓度下 FRAP 值

Table 9 FRAP values of different batches of brown sugar at different concentrations

样品	40 mg/mL	20 mg/mL	10 mg/mL	5 mg/mL	2.5 mg/mL	FRAP 值/(mmol/g)
S1-1	2.16	1.18	0.65	0.34	0.21	0.059
S1-2	1.99	1.02	0.59	0.35	0.19	0.053
S1-3	2.23	1.21	0.73	0.40	0.25	0.063
S2	1.89	1.03	0.56	0.30	0.17	0.052
S3	1.94	1.08	0.59	0.31	0.18	0.054
S4	2.16	1.19	0.63	0.33	0.18	0.059
S5	1.76	0.96	0.51	0.28	0.16	0.048
S6	2.39	1.39	0.74	0.39	0.21	0.068
S7	1.92	1.03	0.54	0.29	0.16	0.051
S8	3.11	1.83	1.01	0.53	0.29	0.090
S9	1.97	1.09	0.58	0.32	0.18	0.054
S10	1.70	0.91	0.49	0.26	0.05	0.046
S11	1.05	0.56	0.29	0.09	0.02	0.028
S12	2.50	1.41	0.74	0.38	0.21	0.069
S13	1.08	0.55	0.30	0.14	0.05	0.019
S14	0.88	0.47	0.25	0.12	0.02	0.024
S15	2.02	1.10	0.60	0.33	0.18	0.055

表 10 权重系数计算结果

Table 10 Weight calculation results

序号	评价指标	信息熵值 e	信息效用值 g	权重系数 w/%
1	IC ₅₀	0.9564	0.0436	5.96
2	蛋白质	0.9215	0.0785	10.73
3	脂肪	0.9315	0.0685	9.36
4	必需氨基酸	0.9497	0.0503	6.88
5	非必需氨基酸	0.9500	0.0500	6.83
6	常量元素	0.9497	0.0503	6.87
7	微量元素	0.8674	0.1326	18.12
8	还原糖	0.9122	0.0878	12.00
9	总多酚	0.9526	0.0474	6.48
10	总黄酮	0.9418	0.0582	7.95
11	FRAP	0.9354	0.0646	8.83

2.5 熵权 TOPSIS 法的营养品质综合评价分析

熵权 TOPSIS 法是一种结合熵权法和 TOPSIS 法的综合评价方法。首先通过熵权法客观获得各评价指标的权重, 权重是指在综合评价过程中各指标所占的重要程度, 通过计算信息熵得出权重系数。信息熵代表了系统的无序程度, 系统越无序, 指标信息熵越小,

其离散程度越大, 可提供的有效信息量就越大, 该指标在综合评价中所占权重就越高^[23]。计算结果见表 10, 各项指标权重系数为 $W_j=\{5.96, 10.73, 9.36, 6.88, 6.83, 6.87, 18.12, 12.00, 6.48, 7.95, 8.83\}$; 接着通过 TOPSIS 法构建评价模型, 计算出各评价指标最优方案和最劣方案的距离 D_i^+ 和 D_i^- , 同时计算与最优方案接近程度 (C_i) 值进行排序, C_i 值越大表示评价

结果越好,排名越高,结果见表 11,各个红糖样品的相对接近度为 $C_i = \{0.675, 0.396, 0.373, 0.409, 0.414, 0.455, 0.459, 0.578, 0.561, 0.344, 0.369, 0.694, 0.434, 0.401, 0.368\}$,其结果显示红糖 S1、S8、S12 综合营养品质较佳,可筛选为优质红糖。

表 11 红糖营养品质综合评价排序

Table 11 Ranking of comprehensive quality evaluation of brown sugar nutritional quality

样品	正理想解距离 D^+	负理想解距离 D^-	相对接近度 C	排序结果
S1	0.122	0.253	0.675	2
S2	0.226	0.148	0.396	11
S3	0.209	0.124	0.373	12
S4	0.210	0.145	0.409	9
S5	0.193	0.136	0.414	8
S6	0.219	0.183	0.455	6
S7	0.209	0.178	0.459	5
S8	0.159	0.218	0.578	3
S9	0.161	0.206	0.561	4
S10	0.245	0.129	0.344	15
S11	0.213	0.124	0.369	13
S12	0.101	0.230	0.694	1
S13	0.232	0.178	0.434	7
S14	0.232	0.155	0.401	10
S15	0.217	0.127	0.368	14

3 结论

红糖含有多种对人体有益的活性成分,是一种具有独特风味、丰富营养物质和高生物活性的甘蔗副产物。通过对百年蔗红糖和市售红糖的理化指标、营养成分、活性成分以及抗氧化活性的测定及分析,百年蔗红糖中蛋白质含量为 1.54 g/100 g,脂肪含量为 1.30 g/100 g,氨基酸总含量为 0.87 g/100 g,矿物质元素的总含量为 19 812.84 mg/kg,还原糖含量为 9.10%,总黄酮含量为 3.69 mg/g,总多酚含量为 5.69 mg/g。通过比较分析,其百年蔗红糖含有多种营养活性物质,其中人体必需氨基酸以及 K、Ca、Fe、Zn 等微量矿物质元素均高于市售红糖;经抗氧化能力分析,百年蔗红糖具有一定的抗氧化能力,其 DPPH IC_{50} 为 15.01~16.44 mg/mL,FRAP 值为 0.053~0.063 mmol/g;经熵权 TPOSIS 综合分析显示红糖 S1、S8、S12 综合营养品质较佳,可筛选为优质红糖。甘蔗是世界范围内种植量前三的农作物,百年蔗红糖作为一种具有良好的中医药功效和独特食药属性,是中药药剂“药辅合一”的典型代表,因此对药用红糖保健产品的开发具有

潜在价值。本研究通过对其理化指标、营养成分、活性成分以及抗氧化活性进行测定分析,构建熵权 TOPSIS 功能评价模型,排除主观因素,系统客观的综合评红糖营养价值,更加科学合理为百年蔗红糖的药用开发及产业化应用提供一定的参考。

参考文献

- [1] 吴松海,张树河,李和平,等.福建省红糖产业存在问题及发展对策[J].福建热作科技,2021,46(2):62-65.
- [2] 李时珍撰.本草纲目[M].太原:山西科学技术出版社,2014.
- [3] 国家药品监督管理局.国家中成药标准汇编[M].北京:人民卫生出版社,2002.
- [4] 中华人民共和国卫生部药典委员会.中华人民共和国卫生部药品标准:藏药第一册[M].北京:人民卫生出版社,1995.
- [5] 徐灵均,袁义明,胡晓苹.红糖在我国现状及与其与精制砂糖的对比分析[J].食品研究与开发,2017,38(10):209-214.
- [6] 车夏宁,陈海军,王宝,等.红糖营养成分评估与健康功效研究进展[J].中国调味品,2020,45(9):194-200.
- [7] 保国裕,蓝艳华,朱绍熹.甘蔗原汁红糖的活性营养物与开发应用优势[J].甘蔗糖业,2015,1:30-36.
- [8] Jaffé W R. Nutritional and functional components of non centrifugal cane sugar: a compilation of the data from the analytical literature [J]. Journal of Food, 2015, 43(2): 194-202.
- [9] Ji J, Yang X, Flavell M, et al. Antioxidant and anti-diabetic functions of a polyphenol-rich sugarcane extract [J]. Journal of the American College of Nutrition, 2019, 38(8): 670-680.
- [10] Cifuentes J, Salazar V A, Cuellar M, et al. Antioxidant and neuroprotective properties of non-centrifugal cane sugar and other sugarcane derivatives in an in vitro induced parkinson's model [J]. Antioxidants (Basel), 2021, 10(7): 1040-1062.
- [11] Kinjo Y, Takahashi M, Hirose N, et al. Anti-stress and antioxidant effects of non centrifuged cane sugar, Kokuto, in restraint-stressed mice [J]. Journal of Oleo Science, 2019, 68(2): 183-191.
- [12] 徐绍智,林智勃.百年蔗[J].中国农业科学,1961,8:46-47.
- [13] 赖昊拓,林清辉,吴琦欣.松溪百年蔗重现新生机[N].福建日报,2022-05-23(003).
- [14] 福建省松溪县农业农村局.松溪竹蔗:世界第一蔗[J].农产品市场,2022,1:22-25.
- [15] 彭崇,王凤林,秦昌鲜,等.甘蔗品种对手工红糖品质的影响[J].安徽农业科学,2019,47(11):163-165.
- [16] 王智能,杨柳,石妍,等.不同品种甘蔗制成的红糖品质差异研究[J].食品研究与开发,2021,42(7):33-38.
- [17] 李廷洋,饶萍,贺尔奇,等.不同甘蔗品种对红糖的营养成分

- 影响分析[J].甘蔗糖业,2021,50(4):49-53.
- [18] Asikin Y, Kamiya A, Mizu M, et al. Changes in the physicochemical characteristics, including flavour components and Maillard reaction products, of non-centrifugal cane brown sugar during storage [J]. Food Chemistry, 2014, 149(8): 170-177.
- [19] 蓝梦柳,杨利利,严桂杰,等.泽泻不同部位药食功能成分分析比较[J].食品科学,2020,41(20):167-174.
- [20] 张芳铭,滕海辉,金永学,等.红糖总多酚的提取测定及体外抗氧化作用[J].食品与发酵工业,2020,46(11):231-237.
- [21] 杨利利,蓝梦柳,陈国翔,等.泽泻不同部位提取物体外抗氧化活性的比较研究[J].福建中医药,2019,50(5):20-22.
- [22] Kou X, Chen Q, Li X, et al. Quantitative assessment of bioactive compounds and the antioxidant activity of 15 jujube cultivars [J]. Food Chem, 2015, 173: 1037-1044.
- [23] 郝佳旭,李元增,范晓,等.基于熵权 TOPSIS 法综合评价苹果质量[J].中国药房,2022,33(17):2087-2092.
- [24] 梁秋萍,严学迎.基于熵权 TOPSIS 法不同品种甜樱桃营养品质综合评价[J].食品研究与开发,2021,42(16):59-64.
- [25] 杨婷,沈石妍,王智能,等.不同加工方式红糖营养成分与香气成分分析比较[J].食品工业科技,2021,42(19):43-55.
- [26] 陈瑞荣,胡彪,班雯婷,等.甘蔗红糖的生产品质监测[J].甘蔗糖业,2019,3:60-65.
- [27] 徐灵均,袁义明,冯爱国,等.传统红糖与精制赤砂糖理化性质比较[J].食品科学,2018,39(7):125-129.
- [28] 平秋婷,李家威,林建宇,等.红糖中粗蛋白、非蛋白氮及氨基酸含量相关性探讨[J].甘蔗糖业,2018,1:39-44.
- [29] 温立香,袁冬寅,欧淑琼,等.广西三个产区虫茶主要茶特征成分、挥发性成分分析及氨基酸营养评价[J].食品工业科技,2022,43(20):1-12.
- [30] 王芳,林颖,谭小宣,等.2 种市售羊肚菌氨基酸组成及营养价值评价[J].现代食品,2021,6:120-126.
- [31] 沈石妍,王智能,杨柳,等.膜法红糖加工中纳滤甘蔗植物水品质的分析[J].食品工业科技,2023,44(4):41-49.
- [32] Guerra M J, Mujica M V. Physical and chemical properties of granulated canesugar "panelas" [J]. Food Science and Technology, 2010, 30(1): 250-257
- [33] 孙晓峰,陈东昊,郑建珍.义乌红糖中微量元素的测定与补血相关性分析[J].微量元素与健康研究,2020,37(6):45-47.
- [34] 马彦平,石磊,何源.微量元素铁、锰、硼、锌、铜、钼营养与人体健康[J].肥料与健康,2020,47(5):12-17.
- [35] 李清岚,崔春,王炜.甘蔗糖蜜和甜菜糖蜜中主要活性物质及其生理功能研究进展[J].食品与机械,2021,37(4):207-211.
- [36] 保国裕,蓝艳华.红糖色源物的探讨[J].甘蔗糖业,2017,1:52-56.
- [37] Guan Y, Tang Q, Fu X, et al. Preparation of antioxidants from sugarcane molasses [J]. Food Chem, 2014, 152: 552-557.
- [38] 杨婷,王智能,杨柳,等.甘蔗不同压榨程度对蔗汁和红糖营养成分的影响[J].甘蔗糖业,2020,49(4):47-52.
- [39] Mauricio D J, Novoa A V, Linares A F, et al. Antioxidant activity of phenolics compounds from sugar cane (*Saccharum officinarum* L.) juice [J]. Plant Foods Hum Nutr, 2006, 61(4): 187-192.
- [40] Abbas S R, Sabir S M, Ahmad S D, et al. Phenolic profile, antioxidant potential and DNA damage protecting activity of sugarcane (*Saccharum officinarum*) [J]. Food Chem, 2014, 147: 10-16.
- [41] Takahashi M, Ishmael M, Asikin Y, et al. Composition, taste, aroma, and antioxidant activity of solidified noncentrifugal brown sugars prepared from whole stalk and separated pith of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) [J]. Journal of Food Science, 2016, 81(11): 2647-2655.
- [42] Payet B, Shum C S A, Smadja J. Comparison of the concentrations of phenolic constituents in cane sugar manufacturing products with their antioxidant activities [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(19): 7270-7276.
- [43] Ali S E, El G R, Mocan A, et al. Profiling metabolites and biological activities of sugarcane (*Saccharum officinarum* Linn.) juice and its product molasses via a multiplex metabolomics approach [J]. Molecules, 2019, 24(5): 934.