DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251220001
引用格式: 陈德文, 龚旭东, 毛兰珍, 等. 义乌红糖氨基酸及元素分布特征与风味物质对品质的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(6): 327–333.
CHEN DW, GONG XD, MAO LZ, *et al*. Study on the distribution characteristics of amino acids and elements in Yiwu brown sugar and the influences of flavor substances on quality [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(6): 327–333. (in Chinese with English abstract).

义乌红糖氨基酸及元素分布特征与风味物质对品质的影响研究

陈德文[1,2*], 龚旭东[2], 毛兰珍[2], 王正林[2], 朱斌超[2], 叶春彬[2], 王国栋[2]
[1. 杭州职业技术大学生态健康学院, 杭州 310018; 2. 义乌市产品(商品)质量检验研究院, 义乌 322000]

摘 要: 目的 探究义乌红糖氨基酸及元素分布特征与风味物质对品质的影响。**方法** 通过选取义乌主产区的具有代表性的 6 批次红糖, 利用氨基酸自动分析仪测定天冬氨酸、苏氨酸、丝氨酸等 16 种氨基酸含量, 利用电感耦合等离子体质谱仪测定钾、钠、铁等 17 种元素含量, 利用气相色谱-质谱仪测定癸醛、壬醛等挥发性风味物质。**结果** 义乌红糖钾、钠元素含量最高可分别达 1.43×10^4 mg/kg 和 928.00 mg/kg; 义乌红糖氨基酸总量范围为 0.452~1.390 g/100 g, 7 种必需氨基酸总量范围为 0.0875~0.1870 g/100 g; 二氢-3-羟基-4,4-二甲基-2(3H)-呋喃酮、壬醛、癸醛、乙酸被识别为红糖风味的关键贡献组分。**结论** 义乌红糖中钾、钠元素含量显著, 这一高钾低钠的元素分布特征对其矿物质营养价值具有决定性作用; 氨基酸总量及必需氨基酸总量的显著差异, 直接影响了红糖的滋味层次与营养品质; 二氢-3-羟基-4,4-二甲基-2(3H)-呋喃酮、壬醛、癸醛及乙酸作为关键风味贡献组分, 其构成与含量差异是形成义乌红糖独特香气品质的核心因素。综上, 义乌红糖的品质特性由其元素、氨基酸及挥发性风味物质的协同分布特征共同决定。

关键词: 义乌红糖; 氨基酸; 元素; 风味物质; 品质

Study on the distribution characteristics of amino acids and elements in Yiwu brown sugar and the influences of flavor substances on quality

CHEN De-Wen[1,2*], GONG Xu-Dong[2], MAO Lan-Zhen[2], WANG Zheng-Lin[2], ZHU Bin-Chao[2], YE Chun-Bin[2], WANG Guo-Dong[2]
[1. *College of Ecological Health*, *Hangzhou Polytechnic University*, *Hangzhou* 310018, *China*; 2. *Yiwu Product* (*Commodity*) *Quality Inspection and Research Institute*, *Yiwu* 322000, *China*]

ABSTRACT: Objective To explore the distribution characteristics of amino acids and elements in Yiwu brown sugar, as well as the influences of flavor substances on its quality. **Methods** The 6 representative batches of brown sugar from the main producing areas of Yiwu were selected. The content of 16 kinds of amino acids, such as aspartic acid, threonine and serine, were determined using an automatic amino acid analyzer. The content of 17 kinds of

收稿日期: 2025-12-20
基金项目: 义乌市科技计划项目(23-3-213)
第一作者/*通信作者: 陈德文(1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为质量安全与标准化。E-mail: 42030692@qq.com

elements, such as potassium, sodium and iron were measured using inductively coupled plasma mass spectrometry. Volatile flavor substances, such as decanal and nonanal, were detected using gas chromatography-mass spectrometry. **Results** The maximum content of potassium, sodium elements in Yiwu brown sugar could reach 1.43×10^4 mg/kg and 928 mg/kg, respectively. The total amino acid content of Yiwu brown sugar ranged from 0.452 to 1.390 g/100 g, and the total content of 7 kinds of essential amino acids ranged from 0.0875 to 0.187 g/100 g. Dihydro-3-hydroxy-4,4-dimethyl-2(3H)-furanone, nonanal, decanal and acetic acid were identified as key contributing components to the flavor of brown sugar. **Conclusion** Yiwu brown sugar exhibits significantly higher potassium and sodium content, with this high-potassium and low-sodium elemental distribution pattern playing a decisive role in its mineral nutritional value. The notable differences in total amino acid content and essential amino acids directly influence the flavor complexity and nutritional quality of the sugar. Key flavor contributors such as dihydro-3-hydroxy-4,4-dimethyl-2(3H)-furanone, nonanal, decanal, and acetic acid demonstrate that their compositional variations constitute the core factors shaping Yiwu brown sugar's distinctive aroma profile. In summary, the quality characteristics of Yiwu brown sugar are collectively determined by the synergistic distribution patterns of its elemental composition, amino acids, and volatile flavor compounds..

KEY WORDS: Yiwu brown sugar; amino acid; element; flavor substance; quality

0 引 言

义乌红糖, 作为国家地理标志保护产品, 是义乌乃至浙江地区重要的特色农产品。其以色泽嫩黄带青、质地松软、纯净无渣的独特品质在市场上享有盛誉。红糖产业不仅是当地农业经济的支柱, 更通过红糖麻花、红糖酥饼等衍生加工品形成了完整的产业链。据统计, 2023 年义乌市糖蔗种植面积达 8800 亩, 产糖 5214 吨, 包括下游产业在内, 总产值约 4 亿元, 从业人员近 5 万人次。这一数据凸显了红糖产业在推动乡村振兴与地方经济发展中的重要作用。红糖独特的风味品质不仅是其感官价值的核心, 更是决定消费者接受度与市场竞争力的关键因素。研究表明, 红糖的风味特征并非仅由蔗糖的甜味主导, 而是源于氨基酸、矿物质元素及挥发性风味物质等多种组分的复杂互作[1−6]。目前, 关于红糖营养成分与风味物质的研究已取得一定进展, 但多集中于单一类别的成分分析[7−12]。例如, 部分研究仅测定了红糖中的常规营养成分[13−18]或元素含量[19−21], 侧重于营养价值的定量描述; 另一部分研究则仅对挥发性风味物质进行了初步鉴定与种类分析[22−27], 但鲜有聚焦于特定产区(如义乌)的地域特色解析, 导致对地理标志产品内在品质构成的针对性研究不足。鉴于此, 本研究以义乌传统红糖为研究对象, 采用现代分析技术测定其氨基酸组成、矿物质元素含量及挥发性风味物质构成, 探讨 3 者之间的内在联系, 为义乌红糖品质提升与标准化生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

红糖: 共 6 批次, 其中, 样品 1~4 为义乌市义亭镇红糖主产地的专业合作社提供; 样品 5~6 为义乌市佛堂镇红糖主产区的专业合作社提供, 原料为义蔗 1 号甘蔗, 采收时间为 2023 年 12 月。采用电动机械榨汁与义乌传统锅灶煎熬相结合的加工方法, 锅灶为传统的"一"字型铁锅长灶, 一般为 9~11 口, 按口径从大到小排列。加工工艺流程为压榨→过滤沉淀→烧制(煮沸)→捞糖沫→熬糖→舀糖→做糖→成品红糖。

盐酸、硝酸、柠檬酸钠(优级纯)、苯酚、茚三酮溶液(分析纯)(国药集团化学试剂有限公司); 2-辛醇(纯度 98%, 上海麦克林生化科技股份有限公司); 钠、镁、镍、铝、钾、钙、钛、铬、锰、铁、铜、锌、镉、锡、铅(质量浓度为 1000 mg/L)、汞、砷(质量浓度为 100 mg/L)标准物质(国家标准物质研究中心); 天冬氨酸、苏氨酸、丝氨酸、谷氨酸、半胱氨酸、甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸、组氨酸、赖氨酸、精氨酸 16 种单个氨基酸标准品(纯度≥98%, 美国 MERCK 公司)。

1.2 仪器与设备

8890 气相色谱-7000 D 质谱仪(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、HP-5MS 色谱柱(30 mm×0.25 mm, 0.25 μm)(美国安捷伦科技有限公司); DVB/CAR/PDMS 固相微萃取头(solid-phase microextraction, SPME)(50/30 μm, 1 cm, 美国 Supelco 公司); iCAP™ TQ ICP-MS 电感耦合等离子体质谱仪 (inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS)(美国赛默飞世尔科技公司); L-8900 全自动氨基酸分析仪、2622 SC-PH 色谱柱(4.6 mm× 60 mm, 日本日立公司); MARS5 微波消解仪(美国 CEM-MARS 公司); MX 204 电子分析天平[精度 0.0001 g, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]; Syncore Polyvap 平行蒸发仪(瑞士 BUCHI 公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　红糖氨基酸含量测定方法

样品前处理: 称取义乌红糖样品 1.0 g, 精确至 0.1 mg, 在水解管内加 12 mL 的 6 mol/L 盐酸溶液, 加入苯酚 3~4 滴后, 将水解管放入冷冻剂中, 冷冻 3~5 min , 然后抽真空至 0 Pa 、充入氮气, 立即拧紧螺丝盖, 再将水解管放进水解炉内, 水解 22 h 后, 取出冷却至室温, 将水解液过滤, 转移至 50 mL 容量瓶, 并加水定容混匀, 接着准确吸取 1.0 mL 滤液移入到 15 mL 试管内, 用平行蒸发仪在 45 ℃加热环境下减压干燥, 残留物用 2 mL 水溶解, 再减压蒸干, 最后加入 2.0 mL 的柠檬酸钠缓冲溶液(pH 2.2)溶解蒸干物, 溶解液过 0.22 μm 滤膜后, 转移至进样瓶[6,7,14,17]。

氨基酸分析仪条件: 色谱柱: 2622 SC-PH (4.6 mm×60 mm), 注射体积: 500 μL, 反应温度 135 ℃。

1.3.2　红糖元素测定方法

样品前处理 称取义乌红糖样品 0.5 g(精确至 0.1 mg)于微波消解内罐中, 加入 5 mL 硝酸, 加盖放置过夜, 旋紧罐盖, 在 120 ℃消解 10 min, 再升温至 150 ℃消解 10 min, 最后升温至 190 ℃消解 20 min, 冷却后取出, 缓慢打开罐盖排气, 将消解罐放在控温电热板上, 于 100 ℃ 加热赶酸 30 min 后, 将消解液用水定容至 25 mL 待测[19–21]。

ICP-MS 条件: 等离子体气流速 15.0 L/min; 载气流速 1.17 L/min; 采样深度 8 mm; 射频功率 1300 W, 分析时间 0.1 s; 雾化室温度 2.0 ℃; 测点数 3; 重复次数 3 次。

1.3.3　红糖挥发性风味物质测定方法

样品前处理: 参考文献[22,27–30]方法并稍作修改。分别准确称取红糖 3 g(粉末粒状)置于 20 mL 密封顶空瓶中, 加入 2-辛醇(1 μL, 1 mg/mL)作为内标, 充分混合。

SPME 条件: 萃取时间 50 min; 加热温度 60 ℃; 老化时间 3 min; 老化温度 250 ℃; 解吸附时间 5 min; 加热时间 15 min。

色谱条件: 色谱柱: HP-5MS (30 mm×0.25 mm, 0.25 μm); 进样口温度: 250 ℃; 分流模式: 不分流; 载气: 氦气(纯度≥99.999%), 不分流模式, 流速: 1.0 mL/min; 升温程序: 程序升温: 50 ℃保持 1min, 以 4 ℃/min 升至 120 ℃, 保持 2 min, 以 4 ℃/min 升至 200 ℃, 保持 2 min, 以 15 ℃/min 升至 250 ℃, 保持 5 min。

质谱条件: 电子轰击离子源, 电子能量 70 eV, 离子源温度为 230 ℃, 传输线温度为 280 ℃, 质量扫描范围为 m/z 29~450 amu。

1.4　数据处理

挥发性风味物质的计算通过软件内置的 NIST.20 标准谱库进行检索, 在总离子流色谱图的色谱峰中挑选出挥发性化合物, 含量以 2-辛醇作为内标, 采用半定量方法通过公式(1)进行计算。

$$m=\frac{A_{\mathrm{i}}}{A_{\mathrm{is}}}\times m_{\mathrm{is}} \tag{1}$$

式中: A_{i} 和 A_{is} 分别为样品中挥发性化合物和内标的峰面积; m 和 m_{is} 分别为样品中挥发性化合物和内标的含量, μg/g。

氨基酸含量的计算, 通过氨基酸标准品证书获得 CalMol 的值, 再根据公式(2)换算成氨基酸的含量, g/100 g。

$$X=\frac{50\times \mathrm{CalMol}}{w\times a\times 100000} \tag{2}$$

式中: X为某氨基酸的含量; 50 为系数; CalMol 为某氨基酸的峰面积除以比值, 通过氨基酸标准品证书获得; w 为样品质量, g; a 为回收率, %; 取鱼肉中的标准质控品, 测定 3 次取其平均值, 再除以指定值即为回收率。

元素含量的计算通过仪器自带的软件计算。图表用仪器内置的软件制作, 实验重复 3 次, 取平均值。

2　结果与分析

2.1　氨基酸的组成特征

义乌红糖中氨基酸组成见表 1。从表 1 可以看出, 共检测到 16 种氨基酸, 各样品总氨基酸含量: 样品 1 为 0.896 g/100 g、样品 2 为 1.389 g/100 g、样品 3 为 0.872 g/100 g、样品 4 为 0.452 g/100 g、样品 5 为 0.689 g/100 g、样品 6 为 0.543 g/100 g, 平均含量为 0.807 g/100 g, 样品中氨基酸总量范围为 0.452~1.390 g/100 g, 天冬氨酸和谷氨酸含量最高, 分别为 0.2234~0.8288 g/100 g 和 0.0768~0.2008 g/100 g。检测到苏氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸共 7 种必需氨基酸, 7 种必需氨基酸总量范围为 0.0875~0.1870 g/100 g, 且必需氨基酸约占总氨基酸含量的 14.7%, 以苯丙氨酸和缬氨酸为主, 分别占总氨基酸的 2.94%和 3.90%。非必需氨基酸中, 天冬氨酸含量最高, 可达 0.8288 g/100 g, 谷氨酸、天冬氨酸等鲜味氨基酸合计占比达 68.8%, 具有明显的鲜味特征; 各样品间氨基酸组成差异明显, 样品 2 总含量最高, 可能是受原料甘蔗品种及加工工艺影响所致。样品 4 总含量最低, 可能与其熬制过程中的高温导致部分氨基酸降解有关。

2.2　元素的分布特征

义乌红糖中元素组成见表 2。从表 2 可以看出, 17 种元素中, 钾、钙、钠、镁、锌、铝、钛、锰、铁有检测值, 而镍、铜、砷、镉、锡、铬、铅、汞均为未检出, 其含量低于方法定量限, 与 GB 2762—2025《食品安全国家标准 食品中污染物限量》相比, 铅、镉、砷等重金属元素均低于限量要求。检出元素中钾含量最高, 其次为钠、镁、钙等, 锌、铁、锰等元素在不同样品中差异较大, 可能与原料来源或加工工艺有关。钾含量检测范围为 7.80×10^{3}~1.43×10^{4} mg/kg, 6 个样品的平均值为 1.15×10^{4} mg/kg,

表 1 义乌红糖中氨基酸含量(n=3) (g/100 g)

Table 1 Amino acid content in Yiwu brown sugar (n=3) (g/100 g)

氨基酸	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4	样品 5	样品 6
天冬氨酸	0.3880	0.8288	0.5067	0.2234	0.3930	0.2581
苏氨酸	0.0101	0.0222	0.0125	0.0080	0.0092	0.0111
丝氨酸	0.1870	0.0470	0.0206	0.0123	0.0154	0.0165
谷氨酸	0.1268	0.2008	0.1301	0.0768	0.1125	0.0875
甘氨酸	0.0167	0.0272	0.0200	0.0129	0.0148	0.0164
丙氨酸	0.0524	0.0654	0.0401	0.0222	0.0427	0.0314
半胱氨酸	0.0000	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
缬氨酸	0.0299	0.0479	0.0348	0.0221	0.0284	0.0258
甲硫氨酸	0.0036	0.0063	0.0048	0.0029	0.0031	0.0038
异亮氨酸	0.0106	0.0205	0.0144	0.0081	0.0100	0.0114
亮氨酸	0.0155	0.0291	0.0208	0.0137	0.0137	0.0197
酪氨酸	0.0052	0.0094	0.0081	0.0068	0.0039	0.0056
苯丙氨酸	0.0222	0.0286	0.0248	0.0217	0.0190	0.0260
赖氨酸	0.0149	0.0225	0.0169	0.0128	0.0128	0.0159
组氨酸	0.0066	0.0138	0.0082	0.0049	0.0058	0.0065
精氨酸	0.0063	0.0147	0.0090	0.0035	0.0050	0.0070
氨基酸总量	0.8958	1.389	0.8719	0.4519	0.6892	0.5428

表 2 义乌红糖中的元素含量(n=3) (g/100 g)

Table 2 Element content in Yiwu brown sugar (n=3) (g/100 g)

元素	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4	样品 5	样品 6
钾	7.80×10^3	1.43×10^4	9.80×10^3	1.26×10^4	1.10×10^4	1.26×10^4
钙	238.00	288.00	444.00	294.00	280.00	440.00
钠	457.00	928.00	501.00	513.00	130.00	832.00
镁	242.00	292.00	488.00	344.00	384.00	480.00
锌	6.38	3.10	9.81	2.28	3.75	2.76
铝	14.70	34.80	11.20	6.77	11.80	36.00
钛	19.60	33.10	34.60	28.60	22.10	38.90
锰	23.40	28.20	37.20	27.10	41.20	27.20
铁	56.50	56.70	57.40	45.40	50.60	75.60

注: 砷的定量限为 0.030 mg/kg, 汞的定量限为 0.003 mg/kg, 镍的定量限为 0.500 mg/kg, 铬的定量限为 0.200 mg/kg, 锡的定量限为 0.030 mg/kg, 镉的定量限为 0.005 mg/kg, 铜的定量限为 0.200 mg/kg, 铅的定量限为 0.050 mg/kg。

样品 2 的钾含量最高, 较高的钾含量可能提升红糖的营养价值, 但可能对风味影响。钠含量为 130.00~928.00 mg/kg, 均值为 560.00 mg/kg, 样品 2 的钠含量最高, 钠能增强甜味, 但过量可能带来咸味, 可能略微影响风味平衡。镁与钙的平均含量分别为 372.00 mg/kg 和 331.00 mg/kg。微量元素锌、铁、锰平均值分别为 4.68 mg/kg、57.00 mg/kg 和 30.70 mg/kg, 也是必需矿物质。铝、钛等非必需元素检出值较低, 分别为 6.77~36.00 mg/kg 和 19.60~38.90 mg/kg。镍、铜、砷、镉、锡、铬、铅、汞有毒元素均未检测, 其含量低于方法定量限, 与 GB 2762—2025 相比, 铅、镉、砷、汞、铬、锡重金属元素均低于限量要求, 表明该红糖产品在重金属污染方面安全性较高。义乌红糖特征元素钾/钠、镁/钙、钛/铝、铁/锰、铁/锌比值范围分别为 15.10~84.60、1.01~1.37、0.80~5.00、1.00~3.00、5.85~27.40 可为产地溯源与品质控制提供科学依据。

2.3 风味物质组成

义乌红糖中挥发性风味物质组成及含量见表 3。样品

中检测到 28 种挥发性化合物, 主要包括酯类、醇类、醛类、酮类、酸类及杂环化合物等。具体含量如表 3 所示, 壬醛、癸醛、二氢-3-羟基-4,4-二甲基-2(3H)-呋喃酮在所有样品中均有检出, 为义乌红糖风味的关键贡献组分, 部分样品中含有 5-甲基-2-呋喃甲醇、1-(1H-吡咯-2-基)乙酮; 乙酸在样品 1、2、3、5 中含量较高, 可能带来酸香; 邻苯二甲酸二乙酯在所有样品中均检出, 经证实, 所检出的邻苯二甲酸二乙酯均源于其聚乙烯保鲜膜包装。

表 3　义乌红糖中的挥发性风味物质(μg/kg)
Table 3　Volatile flavor substances in Yiwu brown sugar (μg/kg)

挥发性化合物	CAS 号	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4	样品 5	样品 6
乙酸-3-甲氧基-2-丁酯	1000151-29-7	0.08	0.72	/	1.73	/	/
丙酸 2-羟基-2-甲基-乙酯	80-55-7	2.44	/	7.15	/	/	4.60
乙二酸二甲酯	553-90-2	/	1.33	/	/	/	/
乙亚胺酸乙酯	1000-84-6	/	/	4.85	0.39	/	/
1,2-丙二醇二甲酸酯	53818-14-7	/	/	/	/	/	6.66
邻苯二甲酸二乙酯	84-66-2	6.90	4.40	8.34	6.45	3.77	5.78
2-丁基-1-辛醇	40780-64-1	/	1.10	/	/	/	/
3-甲氧基-2-丁醇	53778-72-6	11.38	/	/	/	/	/
5-甲基-2-呋喃甲醇	3857-25-8	/	2.66	/	6.74	/	8.99
2-丁基-1-辛醇	3913-02-8	/	0.69	/	/	/	/
反式-1,2-环辛二醇	42565-22-0	/	0.80	/	/	/	/
反式-2-环己烯-1,4-二醇	41513-32-0	/	1.48	/	/	/	/
α,*α*-二甲基-苯甲醇	617-94-7	/	/	0.79	/	/	0.70
3-戊醇	584-02-1	/	/	1.49	/	/	/
2-甲基-4-戊烯-2-醇	624-97-5	/	/	8.30	0.86	21.37	/
环癸醇	1502-05-2	/	/	/	/	/	0.95
癸醛	112-31-2	1.10	0.78	1.24	0.87	0.84	1.91
壬醛	124-19-6	2.17	2.49	3.01	3.38	4.56	3.32
乙酸	64-19-7	9.59	5.56	6.37	0.63	2.83	/
二氢-3-羟基-4,4-二甲基-2(3H)-呋喃酮	79-50-5	5.27	5.24	6.99	6.54	9.66	6.36
1-环己基-4,4-二乙氧基-2-丁炔-1-酮	55402-05-6	3.14	/	/	/	/	/
6-甲基-2-庚酮	928-68-7	/	/	1.20	/	/	/
2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮	28564-83-2	/	/	/	1.79	/	0.97
2,5-双(1,1-二甲基乙基)-苯酚	5875-45-6	/	0.49	/	/	/	/
3,5-双(1,1-二甲基乙基)-苯酚	1138-52-9	/	/	/	0.47	/	/
1,1-二甲基联胺	57-14-7	41.18	/	/	/	/	/
1-(1H-吡咯-2-基)-乙酮	1072-83-9	/	0.68	/	1.15	0.89	1.75
1,2-二甲氧基-丙烷	7778-85-0	/	/	/	/	6.16	/

注: /表示未检出。

3　讨论与结论

本研究通过对 6 批次义乌红糖样品的系统性分析, 揭示了其氨基酸、元素及挥发性风味物质的组成特征, 并初步探讨了 3 者之间的内在联系及其对红糖整体品质的塑造作用。研究发现义乌红糖的氨基酸总量(平均 0.807 g/100 g)和钾含量处于较高水平, 其鲜味氨基酸(天冬氨酸+谷氨酸)占比明显, 二者总量占氨基酸总量的比例高达 68.8%, 这构成了义乌红糖鲜爽滋味的核心化学基础, 这可能是其区别于其他产区红糖(如广西、云南红糖)的重要特征之一, 体现了地理标志产品特有的“地域风味”物质基础。同时, 检测到了苯丙氨酸、缬氨酸等 7 种必需氨基酸, 赋予红糖一

定的营养价值。元素分析显示，钾、钠、镁、钙等宏量元素含量丰富，锌、铁、锰等微量元素也有检出，这些元素不仅是重要的矿物质营养素，也可能在红糖熬制过程中扮演着催化剂的角色。未检出有毒重金属元素，证实了其食用安全性，符合 GB 2762—2025 的要求。元素间的比值特征亦呈现一定规律性，如钾/钠比值介于 15.10~84.60，表明产品低钠高钾的矿物配比优势，有助于调节人体血压平衡。镁/钙比值稳定在 1.01~1.37，反映土壤母质中镁钙迁移的均一性。值得注意的是，铁与锌的比值范围为 5.85~27.40，表明锌的富集程度相对稳定，有利于改善膳食中微量元素的平衡。钾元素的高含量与甘蔗对土壤钾的吸收能力较强密切相关，而钠、镁、钙的存在则有助于提升红糖的风味与营养价值[3–9]。微量元素分布的差异性反映出产地土壤条件及加工方式对红糖品质的重要影响，也为溯源与质量控制提供了科学依据。

挥发性风味物质鉴定出包括醛类(如壬醛、癸醛)、酮类[如二氢-3-羟基-4,4-二甲基-2(3H)-呋喃酮]、酯类、醇类及杂环化合物(如 5-甲基-2-呋喃甲醇)等 28 种化合物，这些风味物质的形成与氨基酸和元素的存在密切相关，所检出的壬醛、癸醛、二氢-3-羟基-4,4-二甲基-2(3H)-呋喃酮等与文献[23-26]报道的红糖关键风味物质有重叠，但同时也发现了如 5-甲基-2-呋喃甲醇等可能更具产区或工艺特色的组分。富含的氨基酸，尤其是天冬氨酸、谷氨酸以及苯丙氨酸等，是美拉德反应和斯特雷克尔降解的关键前体物质，在加热过程中可生成吡嗪、呋喃、醛类等特征香气成分[2,12]。本研究中检测到的 5-甲基-2-呋喃甲醇、1-(1H-吡咯-2-基)乙酮等杂环化合物正是此类反应的典型产物。因此，义乌红糖独特的风味(焦甜、鲜香略带烘烤香)并非单一成分所致，而是其特定的氨基酸谱、元素分布与复杂熬制工艺共同作用下，经由系列化学反应形成的综合性感官体验。

本研究样本量均来自同一产季，可能未能完全涵盖义乌红糖因年份、小产区、加工细微差别所带来的全部变异等局限性。下一步，通过扩大样本量，构建模型(如偏最小二乘回归分析)或控制实验(如添加特定氨基酸或元素进行模拟熬制)来定量验证氨基酸、元素与特定挥发性风味物质之间的因果关系进行机理探究。综上所述，本研究从多组分关联视角揭示了义乌红糖的化学物质基础及其对品质的影响，为其品质控制、工艺传承与创新、品牌保护与价值提升提供了重要的理论依据和数据参考。

参考文献

[1] 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.
CHE XN, CHEN HJ, WANG B, *et al*. Research progress on nutritional component evaluation and health functions of brown sugar [J]. China Condiment, 2020, 45(9): 194–200.

[2] 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 ZY, XU W, LU B, *et al*. Comprehensive evaluation and analysis of nutritional quality of century sugarcane brown sugar [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(10): 213–224.

[3] PAYET B, SHUM-CHEONG-SING A, SMADJA J. Assessment of antioxidant activity of cane brown sugars by ABTS and DPPH radical scavenging assays: Determination of their polyphenolic and volatile constituents [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(26): 10074–10079.

[4] 徐灵均, 袁义明, 胡晓苹. 红糖在我国的现状及其与精制砂糖的对比分析[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(10): 209–214.
XU LJ, YUAN YM, HU XP. Current situation of brown sugar in China and comparative analysis with refined sugar [J]. Food Research and Development, 2017, 38(10): 209–214.

[5] PING QT, LI JW, LIN JY, *et al*. Discussion of correlation between crude protein, nonprotein nitrogen and amino acid content in brown sugar [J]. Sugarcane and Canesugar, 2018(1): 39−44.

[6] JAFFE WR. Nutritional and functional components of non centrifugal cane sugar: A compilation of the data from the analytical literature [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2015, 43(2): 194–202.

[7] 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): 125–130.
XU LJ, YAN YM, FENG AIG, *et al.* Comparison of physicochemical properties between traditional brown sugar [J]. Food science, 2018, 39(7): 125–130.

[8] SHANG YH, XIE CF, MENG LD, *et al*. Polyphenol profiles and antioxidant activities of non-centrifugal sugars derived from different varieties of membrane-clarified sugarcane juice [J]. Sugar Tech, 2022, 24: 614–625.

[9] 王智能, 杨柳, 沈石妍, 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.
WANG ZN, YANG L, SHEN SY, *et al*. Study on quality differences of brown sugar made from different sugarcane varieties [J]. Food Research and Development, 2021, 42(7): 33–38.

[10] GARCIA JM, NARVAEZ PC, HEREDIA FJ, *et al*. Physicochemical and sensory (aroma and colour) characterisation of a non-centrifugal cane sugar (Panela) beverage [J]. Food Chemistry, 2017, 228: 7–13.

[11] YANG T, WANG ZN, YANG L, *et al.* Effects of different press degree of sugarcane on nutritional composition of sugarcane juice and brown sugar [J]. Sugarcane and Canesugar, 2020, 49(4): 47−52.

[12] NAKNEAN P, MEENUNE M. Impact of clarification of palm sap and processing method on the quality of palm sugar syrup (*Borassus Flabellifer* Linn.) [J]. Sugar Tech, 2015, 17(2): 195–203.

[13] 韩美仪, 刘婧, 胡娜, 等. 红糖生产与贮藏过程美拉德反应及其对红糖品质与安全性的研究进展[J]. 中国调味品, 2023, 48(3): 210–215.
HAN MY, LIU J, HU N, *et al*. Maillard reaction in the production and storage of brown sugar and its research progress on the quality and safety of brown sugar [J]. China Condiment, 2023, 48(3): 210–215.

[14] ASIKIN Y, HIROSE N, TAMAKI H, *et al*. Effects of different drying-solidification processes on physical properties, volatile fraction, and antioxidant activity of non-centrifugal cane brown sugar [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 66: 340–347.

[15] 蔡玮琦, 左雯雯, 陆杨, 等. 红糖、白砂糖、赤砂糖与黑糖的 HPLC 指

纹图谱与化学模式识别[J]. 食品科学, 2021, 42(6): 250–255.
CAI WQ, ZUO WW, LU Y, *et al*. HPLC fingerprints and chemical pattern recognition of brown sugar, white granulated sugar, light brown sugar and black sugar [J]. Food Science, 2021, 42(6): 250–255.

[16] ASIKIN Y, TAKAHARA W, TAKAHASHI M, *et al*. Compositional and electronic discrimination analyses of taste and aroma profiles of non-centrifugal cane brown sugars [J]. Food Analytical Methods, 2017, 10: 1844–1856.

[17] MEEROD K, WEERAWATANAKORN M, PANSAK W. Impact of sugarcane clarification on physicochemical properties, some nutraceuticals and antioxidant activities of non-centrifugal sugar [J]. Sugar Tech, 2019, 21(3): 471–480.

[18] LEE JS, RAMALINGAM S, JO IG, *et al*. Comparative study of the physicochemical, nutritional, and antioxidant properties of some commercial refined and non-centrifugal sugars [J]. Food Research International, 2018, 109: 614–625.

[19] 王一鸣, 刘丽萍, 刘洋, 等. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定红糖中无机元素及其分析评价[J]. 中国无机分析化学, 2025, 15(3): 433–440.
WANG YM, LIU LP, LIU Y, *et al.* Determination of inorganic elements in brown sugar by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and its analytical evaluation [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2025, 15(3): 433–440.

[20] 刘俊丽, 马宝营, 杨丹, 等. 山东省市售鲜蛋矿质元素分布特征及重金属膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(20): 140–148.
LIU JL, MA BY, YANG D, *et al*. Distribution characteristics of mineral elements and dietary exposure risk assessment of heavy metals in commercially available fresh eggs in Shandong Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(20): 140–148.

[21] 杨伟, 李蓉, 范晓旭, 等. 稀酸微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定红糖中六种营养元素[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(24): 261–264.
YANG W, LI R, FAN XX, *et al*. Determination of six nutritional elements in brown sugar by rare acid microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(24): 261–264.

[22] 杨婷, 王智能, 杨柳, 等. 红糖挥发性成分中关键香气成分分析及综合评价[J]. 中国调味品, 2022, 47(9): 163–169.
YANG T, WANG ZN, YANG L, *et al*. Analysis and comprehensive evaluation of key aroma components in volatile components of brown sugar [J]. China Condiment, 2022, 47(9): 163–169.

[23] 杨婷, 王智能, 杨柳, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱分析红糖和赤砂糖挥发性风味成分差异[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(15): 4824–4831.
YANG T, WANG ZN, YANG L, *et al*. Analysis of volatile flavor component differences in brown sugar and raw sugar by gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(15): 4824–4831.

[24] CHEN EB, SONG HL, ZHAO SN, *et al*. Comparison of odor compounds of brown sugar, muscovado sugar, and brown granulated sugar using GC-O-MS [J]. LWT, 2021, 142: 111–117.

[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.
YANG T, SHEN SY, WANG ZN, *et al.* Comparative analysis of nutritional and aromatic components of brown sugar processed by different methods [J]. Food Industry Science and Technology, 2021, 42(19): 43–55.

[26] CHEN E, ZHAO S, SONG H, *et al*. Analysis and comparison of aroma compounds of brown sugar in Guangdong, Guangxi and Yunnan using GC-O-MS [J]. Molecules, 2022, 27(18): 5878.

[27] 刘翰扬. 加热工序对膜法红糖香气影响及增香研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
LIU HY. Study on the effect of heating process on the aroma of membrane red sugar and aroma enhancement [D]. Nanning: Guangxi University, 2019.

[28] SHANG YH, XIE CF, MENG LD, *et al*. Polyphenol profiles and antioxidant activities of non-centrifugal sugars derived from different varieties of membrane-clarified sugarcane Juice [J]. Sugar Tech, 2022, 24: 614–625.

[29] 黄苏婷, 杭方学, 韦春波, 等. 红糖的挥发性香气成分分析[J]. 中国调味品, 2019, 44(3): 152–157.
HUANG ST, HANG FX, WEI CB, *et al*. Analysis of volatile aroma components in brown sugar [J]. China Condiment, 2019, 44(3): 152–157.

[30] WANG L, WANG P, DENG W, *et al*. Evaluation of aroma characteristics of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) juice using gas chromatography-mass spectrometry and electronic nose [J]. LWT, 2019, 108: 400–406.

(责任编辑: 冯东慧　安香玉)