

袁建民, 杨晓琼, 许智萍, 孔维喜, 宋子波, 赵琼玲, 瞿文林, 雷琥, 何璐. 干热河谷甜角和酸角氨基酸组成及矿质元素含量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27 (2): 374-379

Yuan JM, Yang XQ, Xu ZP, Kong WX, Song ZB, Zhao QL, Qu WL, Lei X, He L. Characteristics of amino acid composition and mineral elements for *Tamarindus indica* L. in an arid-hot valley, Southwest China [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2021, 27 (2): 374-379

元谋干热河谷甜角和酸角氨基酸组成及矿质元素含量

袁建民^{1,2} 杨晓琼^{1,2} 许智萍^{1,2} 孔维喜^{1,2} 宋子波³ 赵琼玲^{1,2} 瞿文林^{1,2} 雷琥^{1,2} 何璐^{1,2}✉

¹云南省农业科学院热区生态农业研究所 元谋 651300

²云南元谋干热河谷植物园 元谋 651300

³云南猫哆哩集团 玉溪 659288

摘要 为了解不同类型酸角果肉中氨基酸组成及矿质元素含量特征及差异,选取云南干热河谷甜角和酸角果肉(干粉)为研究对象,采用全自动氨基酸分析仪和电感耦合等离子体发射光谱仪测定分析其中水解氨基酸和19种矿质元素含量。结果显示,甜角和酸角中氨基酸种类丰富,均含有16种氨基酸(胱氨酸未检出),酸角(2.23%)氨基酸总量高于甜角(1.75%),二者含量较高的均为天门冬氨酸(Asp)、谷氨酸(Glu)和脯氨酸(Pro);不同类型酸角中必需氨基酸占比表现为酸角(35.9%)高于甜角(34.0%);药用氨基酸含量丰富,占比表现为甜角(57.9%)高于酸角(55.9%);支链氨基酸占比为酸角(20.1%)高于甜角(17.2%);甲硫氨酸+胱氨酸(Met + Cys)是甜角和酸角中的第一限制性氨基酸,甜角(67.78)的氨基酸比值系数分(SRC)高于酸角(61.72);甜角和酸角中富含多种矿质元素,Ca、Mg、Fe、Zn含量较高,总体而言,除了K元素外,甜角中各元素含量普遍高于酸角,且重金属含量属于安全范围。本研究表明干热河谷不同类型酸角果肉的氨基酸组成及矿质元素含量特征存在一定差异,甜角和酸角具有较高营养、保健和医疗功效,结果可为酸角和甜角的推广及开发利用提供科学依据。(图1表5参40)

关键词 酸角;氨基酸;矿质元素;营养评价;元谋干热河谷

Characteristics of amino acid composition and mineral elements for *Tamarindus indica* L. in Yuanmou arid-hot valley

YUAN Jianmin^{1,2}, YANG Xiaoqiong^{1,2}, XU Zhiping^{1,2}, KONG Weixi^{1,2}, SONG Zibo³, ZHAO Qionglin^{1,2}, QU Wenlin^{1,2}, LEI Xiao^{1,2} & HE Lu^{1,2}✉

¹ Tropical Eco-agricultural Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Yuanmou 651300, China

² Dry-hot Valley Botanic Garden, Yuanmou 651300, China

³ Yunnan Maoduoli Group Food Co., Ltd., Yuxi 659288, China

Abstract This research explored the characteristics and differences in amino acid composition and mineral element content in different *Tamarindus indica* L. germplasm resources. The two main varieties of *T. indica* (sweet and sour types) in the Yunnan arid-hot valley were compared. The pulps were dried into powders as the test samples. The contents of hydrolyzed amino acids and 19 mineral elements were determined using an automatic amino acid analyzer and inductively coupled plasma emission spectrometer (ICP-OES). The results showed that 16 amino acids (cystine not detected) were found in all *T. indica* samples, and the total amino acid content of the sour type (2.23%) was much higher than that of the sweet type (1.75%). The contents of aspartic acid (Asp), glutamic acid (Glu), and proline (Pro) were much higher than those of other amino acid components in the different cultivars. The essential amino acids were found in *T. indica*, which accounted for 34.0% to 35.9% of the total amino acid content. The content of medicinal amino acids was rich, accounting for 55.9% to 57.9% total content, while the branched amino acids accounted for 17.2% to 20.1% total content. Methionine and cystine were the first limiting amino acids in *T. indica*. The score of the ratio coefficient of the sweet type was higher (67.78) than that of the sour type (61.72). The mineral element content was also higher in the sweet type compared to that of the sour type. The contents of Ca, Mg, Fe, and Zn were higher than those of the other elements, and the content of heavy metal elements was within the safe range. In conclusion, the amino acid composition and mineral element content

收稿日期 Received: 2021-01-15 接受日期 Accepted: 2021-03-13

国家重点研发计划项目(2017YFC0505106-1)和云南省重大科技专项计划项目(2019ZG00903)资助 Supported by the National Key R&D Program of China (2017YFC0505106-1) and the Key Science and Technology Project of Yunnan, China (2019ZG00903)

✉通讯作者 Corresponding author (E-mail: 506318023@qq.com)

of *T. indica* germplasm resources in the arid-hot valley differed. *T. indica* fruits exhibited higher nutritional, health, and medical effects. These results provide a scientific basis for the development and utilization of *T. indica*.

Keywords *Tamarindus indica* Linn.; amino acid; mineral element; nutritional evaluation; arid-hot Valley

酸角 (*Tamarindus indica* Linn.) 又名罗望子、酸豆, 苏木科酸豆属常绿乔木, 原产热带非洲, 目前广泛分布于全世界热带、亚热带地区, 川滇两省的金沙江干热河谷是我国酸角的主产区^[1]。甜角属于酸角的变异类型, 具有果荚大、果肉厚、味甜的特点, 于1999年由中科院资源昆虫研究所从泰国引进, 主要在干热河谷和云南南部种植^[2]。酸角和甜角集多种用途于一身, 是治理干热河谷区域沙化和水土流失的优质树种, 其果肉富含糖类、有机酸、维生素、氨基酸及矿质元素等成分, 是加工饮料和保健食品的天然原料, 具有抗氧化、抗炎、抑菌、保肝、降血糖、治疗关节炎、抗癌等药理作用^[3-5]; 种子可制多糖; 花可做西餐沙拉; 叶片可食用或作漂白剂; 木材质地坚硬, 可制高档家具^[1, 6-7]。因此, 甜角和酸角具有很高的食用、药用、经济和生态价值。

氨基酸是生物体内构成蛋白质的基本单位, 与生物的生命活动密切相关, 对于调节人体代谢健康及环境可持续具有重要作用^[8-10]。氨基酸含量与酸角口感、风味、药理作用、营养价值等密切相关^[11-12]。因此, 氨基酸是酸角品质鉴定的重要指标之一。酸角中含有丰富的矿质元素, 矿质元素对人体健康, 维持人体物质代谢平衡具有重要作用^[13-14]。目前关于酸角和甜角的研究主要集中于种苗繁育^[15]、栽培管理^[16-17]、资源保护^[18]、化学成分^[19]和药理作用^[3-7]等方面, 而关于甜角和酸角中氨基酸和矿质元素的系统研究鲜见报道。本研究以不同类型(甜型和酸型)酸角为研究对象, 利用氨基酸分析仪和电感耦合等离子体发射光谱仪, 测定甜角和酸角果肉中氨基酸和矿质元素组成及含量, 并对其营养价值进行综合评价, 以期指导酸角功能性新食品的开发, 为酸角资源的综合利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 研究区概况及样品采集 酸角树种植于云南省楚雄州元谋县元马镇南城街150号的云南省农业科学院热区生态农业研究所的酸角国家种质资源圃(101°88'E, 25°69'N), 该区为气候干燥炎热且终年无霜的金沙江干热河谷坝区, 属于南亚热带干热季风气候。年平均气温约21.5℃, 年平均降雨量600-800 mm, 干湿季节明显, 90%年降雨量集中在6-10月, 年平均蒸发量达3 500 mm。酸角林树种单一, 林下无其他植物配置, 株行距为6 m × 6 m。土壤类型为砂壤土, 土壤容重1.48 g/cm³, 田间持水量为19.35%, pH 6.5, 土壤有机碳0.63%, 全氮0.05%, 全磷199.81 mg/kg, 全钾5 094.64 mg/kg, 钙109.64 mg/kg, 镁295.36 mg/kg, 硫216.58 mg/kg, 钠153.36 mg/kg, 铁10 497.50 mg/kg, 锰106.79 mg/kg, 硼21.79 mg/kg, 锌14.64 mg/kg, 铜12.86 mg/kg, 铝674.64 mg/kg, 铬9.64 mg/kg, 镍13.21 mg/kg, 铅、钴、硒、硅、钼和镉均未检出(数据尚未发表)。试验于2020年3月-5月进行, 所采集的酸角材料均为成熟果实, 生长于元谋干热河谷同一环境条件下, 栽培管理措施条件一致, 树龄均为10年以上。随机选取5-7株树, 每株随机采集30-40个成熟果荚, 每株树的果荚混合后作为1个样品, 封口袋密封后带回实验室进行检测分析。将采摘的果荚用清水冲洗吹干后, 去壳, 去核, 取果肉干燥, 于60-65℃下烘至恒重, 混合粉碎过0.25 mm筛, 密封保存, 备用。

1.1.2 主要试剂 浓盐酸、浓硝酸均为优级纯, 重庆川东化工有限公司; 30%过氧化氢, 优级纯, 天津市化学试剂; 柠檬酸缓冲液A、柠檬酸缓冲液B、再生液D、样品稀释液、茚三酮、钾钠缓冲液、17种氨基酸混合溶液标准品(2.5 μmol/mL), 均为赛卡姆(北京)科学仪器有限公司; 甲醇, 色谱纯, 默克公司; 多元素混合标准溶液(24种元素)及K、Ca、Na、P、S、Se、Si、Mo等单元素标准溶液, 购自国家有色金属及电子材料分析测试中心; 氮气、氩气纯度(≥ 99.999%); 实验室用水均为超纯水(电阻率 ≥ 18.2 MΩ·cm)。

1.1.3 仪器和设备 使用的主要仪器设备为S-433D型全自动氨基酸分析仪, 德国Sykam公司; LC-DCY-24G干式氮吹仪, 力辰科技公司; 电感耦合等离子体发射光谱仪, 型号PQ-9000, 德国耶拿; 微波消解仪, Milestone Ethos up, 意大利迈尔斯特通; 超纯水仪, UPH-IV-20T, 中国优普; 1/10000电子分析天平, ATX224, 日本岛津; 恒温干燥箱, GZX-9140MBE, 上海博讯; 移液枪, RAININ, 美国瑞宁; 行星式球磨机, QM3SP, 南京驰顺。

1.2 方法

1.2.1 氨基酸含量测定 参照Themelis等的方法^[20]利用微波消解仪对供试样品进行水解氨基酸的提取, 采用全自动氨基酸分析仪进行测定分析。精确称取事先制备好的2种酸角果肉干粉样品各0.2 g, 利用样品纸将其送至聚四氟乙烯消解罐底部, 加入6 mol/L的盐酸10.0 mL, 吹入氮气, 封管; 于160℃条件下微波水解30 min, 冷却20 min, 冷却后开管, 定容至50 mL, 用0.45 μm滤膜过滤; 吸取0.5 mL滤液置于EP管中, 置于氮吹仪60℃条件下进行干燥, 对残留物进行复溶2-3次, 充分干燥。最终在管中加入1.0 mL pH 2.2的样品稀释液进行溶解, 混匀, 用0.45 μm滤膜过滤。样品提取后置于2.0 mL棕色样品瓶中, 放入氨基酸分析仪进行分析, 进样量为0.05 mL。测定条件: 色谱柱(LCA K06/Na, 磺酸基强酸性阳离子交换树脂, 4.6 mm × 150 mm长柱, 7 μm填料); 洗脱泵0.45 mL/min + 衍生泵0.25 mL/min; 柱温58-74℃梯度控温; 反应器温度130℃; 570 nm和440 nm双通道检测。

1.2.2 氨基酸营养评价 酸角果肉(干粉)中氨基酸营养价值的评价, 参照世界卫生组织和联合国粮农组织(WHO/FAO, 1973年)提出的方法^[21-22]进行综合评价。其涉及的指标包括氨基酸得分(amino acid score, AAS)、氨基酸比值系数(ratio coefficient, RC)以及比值系数分(score of RC, SRC)。此处的氨基酸总量是指17种组成蛋白质的主要氨基酸(除色氨酸)的总和。计算公式依次为

氨基酸得分(AAS) = (样品中氨基酸含量/参考模式氨基酸含量) × 100;

氨基酸比值系数(RC) = 某一种氨基酸得分/氨基酸得分的均值;

比值系数分(SRC) = 100 × (1 - CV);

上述公式中CV是RC的变异系数, CV = 标准差/氨基酸得分均值; 而必需氨基酸中AAS值最低的氨基酸即为第一限制性氨基酸(first limiting amino acid)。

1.2.3 矿质元素测定 精确称取2种类型酸角果肉(干粉)样品各0.2 g, 加入6 mL浓硝酸和2 mL过氧化氢, 密封, 参照袁建民等的方法^[23]置于微波消解仪中进行微波消解, 冷却后

进行赶酸(160 ℃),用2%硝酸定容至50 mL,0.45 μm滤膜过滤,利用电感耦合等离子体发射光谱仪对样品中Ca、K、P、S、Mg、Na、Fe、Mn、B、Zn、Cu、Mo、Ni、Cr、Pb、Cd、Co、Se、Si共19种元素含量进行测定,同时做空白试验,每个元素重复测定3次。

1.3 数据处理

氨基酸含量数据处理步骤是首先对标准氨基酸图谱进行准确积分,然后编辑标准校准文件,设置校准文件参数,编辑校准文件内容,最后根据系统软件中的比尔定律计算出样品氨基酸含量。所有数据均为3次重复的平均值±标准差。采用Excel 2003软件对所有原始数据进行初步整理,采用SPSS 20.0软件对数据进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 甜角和酸角中氨基酸的组成和含量

图1A显示,标样中17种氨基酸峰分离明显,峰面积合适。图1B和1C显示,除胱氨酸(Cys)无峰、甲硫氨酸(Met)和酪氨酸(Tyr)峰面积较小外,其他氨基酸峰面积较大。对2种类型酸角的氨基酸检测结果(表1)表明,甜角和酸角中氨基酸种类较齐全,均包含16种氨基酸(胱氨酸未检出),氨基酸总含量分别为1.75%和2.23%,酸角的氨基酸总量显著高于甜角。甜角中,氨基酸含量前3位依次为天门冬氨酸、谷氨酸、脯氨酸,占氨基酸总量的36.6%;酸角中氨基酸含量前3位依次是天门冬氨酸、脯氨酸、谷氨酸,占氨基酸总量的39.9%,含量最高的天门冬氨酸在甜角和酸角中含量差异显著。

表2显示,不同类型酸角各组分的氨基酸含量存在差异。酸角(35.9%)中必需氨基酸含量略高于甜角(34.0%);非必需氨基酸含量在酸角与甜角间的含量则相反。鲜味氨基酸主要包括天门冬氨酸和谷氨酸,酸角(25.7%)中的鲜味氨基酸含量与甜角(25.7%)相接近,说明酸角和甜角在鲜味口感方

表1 两种酸角水解氨基酸的组成与含量(N=3)

Table 1 The hydrolyzed amino acid composition and contents of two *Tamarindus indica* (N=3)

氨基酸 Amino acid	含量 Content	
	甜角 Sweet type	酸角 Sour type
天门冬氨酸 Asp	0.25 ± 0.05 ^b	0.34 ± 0.04 ^a
苏氨酸 Thr	0.08 ± 0.02 ^b	0.11 ± 0.02 ^a
丝氨酸 Ser	0.09 ± 0.02 ^a	0.10 ± 0.01 ^a
谷氨酸 Glu	0.20 ± 0.03 ^b	0.23 ± 0.04 ^a
甘氨酸 Gly	0.10 ± 0.00 ^b	0.12 ± 0.02 ^a
丙氨酸 Ala	0.13 ± 0.03 ^b	0.15 ± 0.02 ^a
胱氨酸 Cys	0.00 ± 0.00 ^a	0.00 ± 0.00 ^a
缬氨酸 Val	0.11 ± 0.01 ^b	0.17 ± 0.03 ^a
甲硫氨酸 Met	0.02 ± 0.00 ^a	0.02 ± 0.00 ^a
异亮氨酸 Ile	0.06 ± 0.00 ^b	0.10 ± 0.01 ^a
亮氨酸 Leu	0.13 ± 0.02 ^b	0.18 ± 0.02 ^a
酪氨酸 Tyr	0.04 ± 0.01 ^a	0.05 ± 0.00 ^a
苯丙氨酸 Phe	0.08 ± 0.01 ^b	0.11 ± 0.01 ^a
组氨酸 His	0.08 ± 0.01 ^a	0.04 ± 0.01 ^b
赖氨酸 Lys	0.11 ± 0.02 ^a	0.12 ± 0.01 ^a
精氨酸 Arg	0.08 ± 0.01 ^a	0.07 ± 0.02 ^a
脯氨酸 Pro	0.19 ± 0.02 ^b	0.32 ± 0.02 ^a
总含量 Total	1.75	2.23

同行不同小写字母表示不同类型间差异显著($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences between the plants ($P < 0.05$).

面差异不大。药用氨基酸主要包括天门冬氨酸、谷氨酸、甘氨酸、甲硫氨酸、亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、精氨酸,甜角(57.9%)中药用氨基酸含量略高于酸角(55.9%),说明酸角可能具有更高的保健价值。支链氨基酸(缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸)作为氮的载体,可刺激胰岛素和生长激素的产生,从而促进合成代谢,预防蛋白分解和肌肉丢失,酸角(20.1%)中支链氨基酸的含量高于甜角(17.2%)。芳香族氨基酸(缬氨酸、亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸和精氨酸)通过酶促反应可赋予食品特殊的气味和风味,酸角(31.5%)中芳香族氨基酸含量与甜角(31.5%)一致。

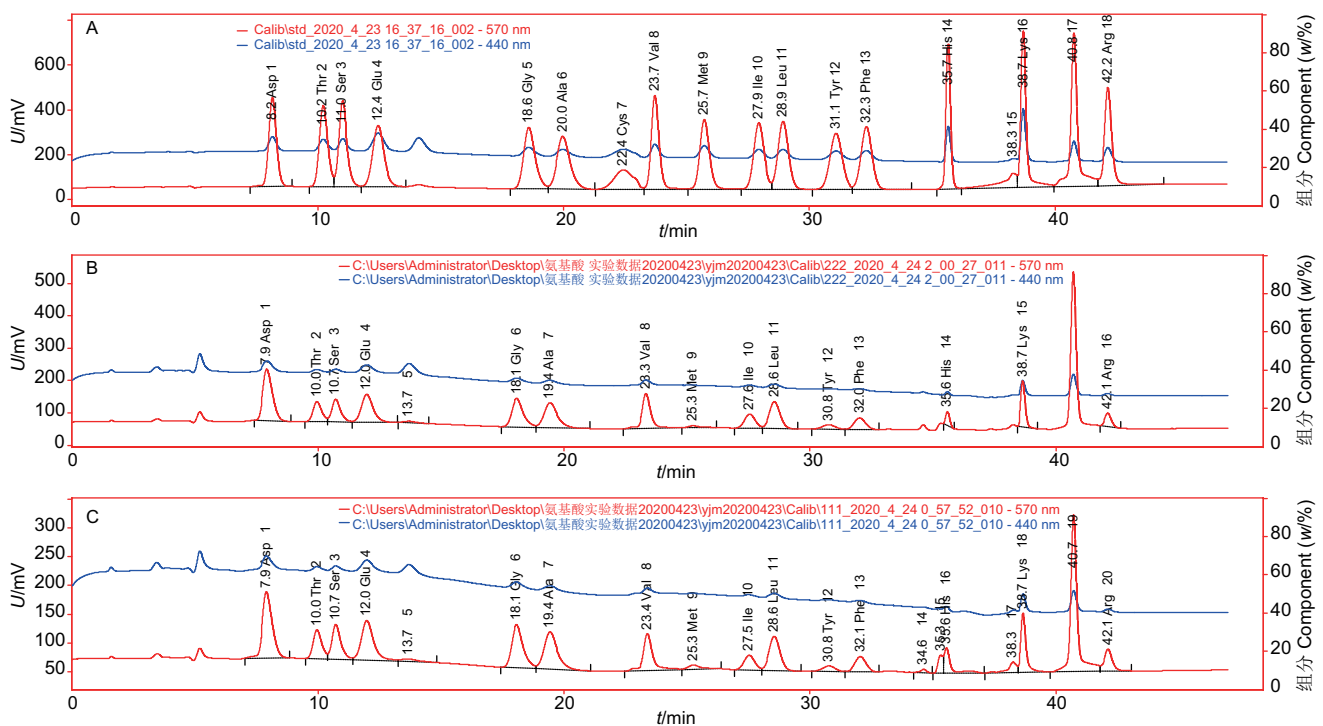


图1 氨基酸分析色谱图。A-C分别表示标准氨基酸色谱图及甜角、酸角水解氨基酸色谱图。

Fig. 1 Content analysis of amino acid components. A-C indicate standard amino acid components, and the hydrolyzed amino acid components of two different types of *Tamarindus indica*, respectively.

表2 两种酸角各组分氨基酸比较
Table 2 Comparison in amino acid contents of two *Tamarindus indica*

氨基酸 Amino acid	甜角 Sweet type		酸角 Sour type	
	含量 Content	占总氨基酸比 Ratio	含量 Content	占总氨基酸比 Ratio
必需氨基酸 Essential amino acid	0.59	34.0	0.80	35.9
非必需氨基酸 Nonessential amino acid	1.15	66.0	1.43	64.1
鲜味氨基酸 Delicious amino acid	0.45	25.7	0.57	25.7
药用氨基酸 Medicinal amino acid	1.01	57.9	1.25	55.9
支链氨基酸 Branched amino acid	0.30	17.2	0.45	20.1
芳香氨基酸 Aromatic amino acid	0.55	31.5	0.70	31.5

2.2 甜角和酸角氨基酸营养评价

表3显示, 酸角和甜角苏氨酸、缬氨酸、亮氨酸、酪氨酸+苯丙氨酸的含量均高于参考的模式氨基酸含量, 而甲硫氨酸+胱氨酸的含量则均低于参考模式氨基酸含量. 此外, 异亮氨酸含量则表现为甜角低于参考模式氨基酸含量, 酸角则相反; 赖氨酸含量则表现为甜角高于参考模式氨基酸含量, 酸角则相反, 其平均值均接近于参考模式氨基酸含量.

表3 两种酸角必需氨基酸的组成比例
Table 3 Composition ratios of essential amino acids of two *Tamarindus indica*

氨基酸 Amino acid	甜角 Sweet type	酸角 Sour type	平均值 Average	WHO/FAO
苏氨酸 Thr	4.8	4.7	4.8	4.0
缬氨酸 Val	6.3	7.5	6.9	5.0
甲硫氨酸+胱氨酸 Met + Cys	1.1	0.7	0.9	3.5
异亮氨酸 Ile	3.4	4.4	3.9	4.0
亮氨酸 Leu	7.4	8.2	7.8	7.0
酪氨酸+苯丙氨酸 Tyr + Phe	6.9	7.1	7.0	6.0
赖氨酸 Lys	6.3	5.4	5.9	5.5

表4显示, 甜角和酸角中, 甲硫氨酸+胱氨酸的AAS和RC均为最小, RC值分别为0.33和0.20, 酸角小于甜角, 且均小于1, 而其他必需氨基酸的RC值均接近或高于1, 说明甲硫氨酸和胱氨酸明显偏离氨基酸模式谱, 根据氨基酸平衡理论可确定甲硫氨酸和胱氨酸为甜角和酸角种质中的第一限制氨基酸. 此外, 甜角(67.78)的氨基酸比值系数分(SRC)高于酸角(61.72), 说明甜角的营养价值相对较高, 具有潜在利用价值.

2.3 甜角和酸角中矿质元素

表5显示, 甜角和酸角中Ca、K、Mg、P、S、Fe、Zn、Mn、B、Cu、Na含量较为丰富, Ni、Co、Cr、Pb、Cd、Mo、Si、Se元素含量较低或未检出. 其中Ca、K、Mg、P含量均大于1 000 mg/kg; Fe、Zn含量均大于300 mg/kg; S、Mn、B、Cu、Na含量介于50-300 mg/kg. Ca、K、P、Fe、Zn、Mn、B、Cu、Na在不同类型酸角间差异显著. 总体上, 甜角中除了K元素外, 各元素含量均较高于酸角. 食物中K含量高有利于降低高血压, 预防癌症, 说明酸角在这方面有一定优势. Ca能调节人体各组织器官的正常生理功能, 是人体脑神经元代谢不可缺少的重要元素, 缺钙可影响神经传导, 使神经、肌肉的兴奋性失调. 甜角中Ca含量高达18 710 mg/kg, 显著高于酸角, 说明甜角是食物中良好的Ca来源.

重金属元素方面, Cr含量为2.25-2.50 mg/kg, Pb含量为

表4 两种酸角必需氨基酸营养价值指标的比较
Table 4 Comparison in nutritional value indexes of essential amino acids in two *Tamarindus indica*

氨基酸 Amino acid	氨基酸得分 AAS		氨基酸比值系数 RC	
	甜角 Sweet type	酸角 Sour type	甜角 Sweet type	酸角 Sour type
苏氨酸 Thr	1.19	1.18	1.20	1.12
缬氨酸 Val	1.26	1.50	1.26	1.43
甲硫氨酸+胱氨酸 Met + Cys	0.33	0.21	0.33	0.20
异亮氨酸 Ile	0.86	1.10	0.86	1.05
亮氨酸 Leu	1.06	1.17	1.06	1.12
酪氨酸+苯丙氨酸 Tyr + Phe	1.14	1.19	1.15	1.14
赖氨酸 Lys	1.14	0.99	1.15	0.94
X均值 X average	1.00	1.05		
比值系数分 SRC	67.78	61.72		

表5 两种酸角矿质元素含量比较 (w/mg kg⁻¹ DW, N = 3)
Table 5 Comparison in mineral elements of two *Tamarindus indica* (w/mg kg⁻¹ DW, N = 3)

矿质元素 Mineral element	甜角 Sweet type	酸角 Sour type
Ca	18710.00 ± 160.23 ^a	9762.50 ± 150.31 ^b
K	2490.00 ± 16.32 ^b	4462.50 ± 15.36 ^a
Mg	4930.00 ± 23.50 ^a	4922.50 ± 23.28 ^a
P	2212.50 ± 85.36 ^b	2355.00 ± 82.31 ^a
S	66.38 ± 4.62 ^a	60.90 ± 9.46 ^a
Fe	621.75 ± 10.35 ^a	558.25 ± 12.31 ^b
Mn	215.00 ± 3.65 ^a	52.50 ± 8.36 ^b
B	97.50 ± 2.55 ^a	80.00 ± 2.68 ^b
Zn	700.00 ± 20.34 ^a	322.50 ± 18.65 ^b
Cu	90.00 ± 2.32 ^a	50.00 ± 1.65 ^b
Na	145.50 ± 2.36 ^a	54.40 ± 1.95 ^b
Ni	20.50 ± 1.56 ^a	20.00 ± 1.67 ^a
Co	5.00 ± 0.35 ^a	2.50 ± 0.42 ^a
Cr	2.50 ± 0.15 ^a	2.25 ± 0.13 ^a
Pb	2.60 ± 0.03 ^a	2.50 ± 0.05 ^a
Cd	-	-
Mo	-	-
Si	-	-
Se	-	-

同行不同小写字母表示不同类型间差异显著 ($P < 0.05$); “-”表示未检出. Different lowercase letters indicate significant differences between the plants ($P < 0.05$); “-” indicate not detected.

2.50-2.60 mg/kg, Cd未检出. 参考国标GB2762-2017 (食品中污染物限量标准)可知, 甜角和酸角中Cr含量略偏高于乳制品 (2.0 mg/kg), Pb含量低于干菊花 (5.0 mg/kg) 和茶叶 (5.0 mg/kg), 因此, 甜角和酸角食用安全风险较低.

3 讨论与结论

氨基酸在植物中具备多种功能, 除了是蛋白质生物合成的基本物质外, 还参与多种生理过程, 如植物的生长发育、细胞内pH调控、代谢能量的产生、氧化还原反应、逆境胁迫以及信号转导等^[24], 特别是必需氨基酸, 只能从食物中获取, 以维持人体正常生理功能. 因此, 氨基酸组成及含量是影响食物营养品质的重要指标之一. 本研究发现甜角和酸角中均含有16种氨基酸 (胱氨酸未检出), 氨基酸总量为1.75%-2.23%, 高于无花果^[25]、樱桃番茄^[26], 与余甘子^[27]、刺梨^[28]接近. 甜角和酸角中天门冬氨酸、谷氨酸、脯氨酸含量均较高, 排前3位, 这与紫果西番莲^[29]中的氨基酸组分类似. 谷氨酸可预防胃肠道损伤, 参与睡眠和觉醒过程, 在营养代谢、能量供应、氧化应激及信号转导方面起重要作用^[30-31]; 天门冬氨酸可调节肝功能, 保护心肌, 在神经内分泌系统和神经系统的发育中具有

重要作用^[32]；脯氨酸作为一种信号分子，具有保护核酸和蛋白质、维持生物膜及清除活性氧等功能^[33]。因此，酸角和甜角是开发氨基酸功能性食品的潜在原料。

对成人而言，必需氨基酸共有8种，必需氨基酸的种类和含量直接影响生长发育和生命活动，缺乏其中任何一种，人体的正常生命代谢就会受阻，甚至导致疾病的发生^[8-10]。甜角和酸角中7种必需氨基酸齐全（色氨酸未检测），分别占氨基酸总量的34.0%和35.9%，略低于刺梨（36.16%-39.54%）^[28]，但高于无花果（21.2%-30.06%）^[25]。药用氨基酸一般含量较低，却是维持人体氮平衡的必需成分，具有一定药理作用^[34]。甜角和酸角药用氨基酸种类丰富，分别占氨基酸总量的57.9%和55.9%，以天门冬氨酸、谷氨酸和亮氨酸为主，与余甘子药用氨基酸比值（53.1%-70.9%）^[35]接近。芳香氨基酸可赋予食品特殊风味，甜角和酸角中芳香族氨基酸含量占比均为31.5%，接近于香水莲花茶（28.98%-35.94%）^[36]和黑枸杞（34.37%-35.48%）^[37]，可见，甜角和酸角不仅具有较好的口感风味，保健和药用价值也较高。

现代营养学理论认为，膳食蛋白质的氨基酸组成是营养质量的重要指标，其中必需氨基酸组成与人体必需氨基酸的组成越接近，说明其营养价值越高^[38]。氨基酸比值系数（RC）和比值系数分（SRC）是蛋白质营养评价的重要指标。RC > 1表示该氨基酸相对过剩，RC < 1表示该氨基酸相对不足，RC最小的氨基酸则为限制氨基酸；RC值越集中，则变异系数（CV）越接近0，SRC值则越大，表示食物中蛋白质营养价值越高；反之，其蛋白质营养价值越差。本研究结果显示，除了甲硫氨酸+胱氨酸的RC值偏小外，其余必需氨基酸的RC值均在1左右，与1973年WHO/FAO提出的氨基酸参考模式相接近，说明甜角和酸角中必需氨基酸含量较均衡，营养价值较高，其中甜角的SRC值（67.78）高于酸角（61.72），且高于紫果西番莲（59.5）、香蕉（56.9）、芒果（62.0）等水果^[29]，暗示甜角可能

具有更高的营养价值。研究表明甲硫氨酸+胱氨酸是甜角和酸角中的第一限制性氨基酸，提示今后食用或开发酸角产品时，应根据第一限制性氨基酸，科学搭配其他食品，做到营养互补，合理利用。

矿质元素对疾病的预防和治疗具有重要作用，酸角作为药食同源特色植物，其果实中矿质元素不仅有一定食用价值，而且与其有效化学成分或活性成分的合成及药用价值密切相关，对人体健康具有极其重要的意义^[9-10]。有证据表明，缺乏铁和锌会导致DNA损伤并导致癌症^[14]。本试验中甜角和酸角富含多种矿质元素，富含Ca、Mg、Fe、Zn，这4种元素明显高于同为干热河谷环境条件下生长的特色植物余甘子果实^[39]，Ca、Fe、Zn含量约是余甘子的5-10倍，Mg含量约为余甘子的8-10倍，酸角素有“钙王”之称，Ca含量高达9 762.50-18 710 mg/kg，而该研究区土壤中Ca的背景值为109.64 mg/kg，富集系数范围达89.0-170.6，这可能与酸角富集Ca元素的特性有关。甜角和酸角中重金属Cr、Pb、Cd含量均较低，属安全范围，说明甜角和酸角较为安全，食用性较好，适当摄入可补充人体需要的矿质元素。

综上所述，酸角除了具有固土截流、涵养水源、绿化荒山、净化空气、增加土壤有机碳库、减少温室气体排放等生态价值外^[10-11, 40]，因其果实富含多种氨基酸和矿质元素，还具有较高的食用与药用价值，适宜人体健康，具有较高的开发利用潜力。本研究表明干热河谷条件下不同类型酸角果肉的氨基酸组成及矿质元素含量存在一定差异，这可能与种质本身遗传特性有关^[2]。氨基酸组成及矿质元素含量还与土壤环境、气候变化、发育时期等因素有关^[35]，今后有必要扩大采样区域（金沙江、元江和怒江干热河谷等）及样本量，加强酸角各器官各发育时期的氨基酸组成及矿质元素含量动态响应研究，深入探讨酸角开花结实过程中的氨基酸代谢和矿质元素代谢机理。

参考文献 [References]

- 赵一鹤, 杨时宇, 李昆. 世界酸角研究现状及进展[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2005, 20 (1): 65-72 [Zhao YH, Yang SY, Li K. Advances in the researches of *Tamarindus indica* L. in the world [J]. *J Yunnan Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 2005, 20 (1): 65-72]
- 王兵益, 杨光映, 李体初, 杨时宇, 赵一鹤. 酸角及3个甜角品种的果实形态特征及营养成分分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2014, 36 (2): 294-298 [Wang BY, Yang GY, Li TC, Yang SY, Zhang YH. Pod morphology and main nutritional components of *Tamarindus indica* Linn. [J]. *J Yunnan Univ (Nat Sci Ed)*, 2014, 36 (2): 294-298]
- Komakech R, Kim Y, Matsabisa GM, Kang Y. Anti-inflammatory and analgesic potential of *Tamarindus indica* Linn. (Fabaceae): a narrative review [J]. *Integr Med Res*, 2019, 8: 181-186
- Menezes PPA, Trevisan SCC, Barbalho SM, Guiguer EL. *Tamarindus indica* L. a plant with multiple medicinal purposes [J]. *J Pharm Phytochem*, 2016, 5: 50-54
- Sundaram MS, Hemshekhar M, Santhosh MS, Paul M, Sunitha K, Thushara RM, NaveenKumar SK, Naveen S, Devaraja S, Rangappa KS, Kemparaju K, Girish KS. *Tamarind* seed (*Tamarindus indica*) extract ameliorates adjuvant-induced arthritis via regulating the mediators of cartilage/bone degeneration, inflammation and oxidative stress [J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 11117
- Mukherjee D, Khan NA. A new enzyme system in the *Tamarind* [J]. *Nature*, 1959, 184: 1140-1141
- Zhang X, Wang L, Xie F, Yaseen A, Chen B, Zhang GL, Wang MK, Shen XF. A polysaccharide TKP-2-1 from *Tamarind indica* L.: purification, structural characterization and immunomodulating activity [J]. *J Funct Foods*, 2021, 78: 104384
- Green CL, Lamming DW. Regulation of metabolic health by essential dietary amino acids [J]. *Mech Ageing Dev*, 2019, 177: 186-200
- Kunu P. *Tamarindus indica* and its health related effects [J]. *Asian Pac J Trop Biomed*, 2014, 4 (9): 676-681
- Tilman D, Clark M. Global diets link environmental sustainability and human health [J]. *Nature*, 2014, 515: 518-522
- Havinga RM, Hartl A, Sarah P, Prehler S, Buchmann C, Vogl CR. *Tamarindus indica* L. (Fabaceae): patterns of use in traditional African medicine [J]. *J Ethnopharmacol*, 2010, 127 (3): 573-588
- 刘海刚, 段曰汤, 何璐, 仲金楠, 马开华, 沙毓沧. 酸角品质评价指标的选择[J]. 热带作物学报, 2011, 32 (9): 1610-1614 [Liu HG, Duan YT, He L, Zhong JN, Ma KH, Sha YC. Selection of quality evaluation indices for *Tamarind* [J]. *Chin J Trop Crops*, 2011, 32 (9): 1610-1614]
- Pecina V, Brtnický M, Baltazár T, Juříčka D, Kynický J, Galiová MV. Human health and ecological risk assessment of trace elements in urban soils of 101 cities in China: a meta-analysis [J]. *Chemosphere*, 2021, 267: 129215
- Ames B, Wakimoto P. Are vitamin and mineral deficiencies a

- major cancer risk? [J]. *Nat Rev Cancer*, 2002, **2**: 694-704
- 15 马天晓, 姚顺阳, 刘震, 王艳梅. 酸角研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2012, **31** (6): 6-11 [Ma TX, Yao SY, Liu Z, Wang YM. Research progress on *Tamarindus indica* L. [J]. *Chin Wild Plant Res*, 2012, **31** (6): 6-11]
- 16 何光熊, 王艳丹, 宋子波, 樊博, 张梦寅, 史亮涛. 坡向和坡位对酸角生殖枝特征的影响[J]. 江西农业学报, 2019, **31** (5): 28-32 [He GX, Wang YD, Song ZB, Fan B, Zhang MY, Shi LT. Effects of slope direction and slope position on reproductive branch traits of *Tamarindus indica* [J]. *Acta Agric Jiangxi*, 2019, **31** (5): 28-32]
- 17 王春雪, 何光熊, 宋子波, 樊博, 张梦寅, 方海东, 王艳丹, 史亮涛. 元江元谋干热河谷土壤氮磷水平对酸角叶片氮磷含量及光合的影响[J]. 生态学报, 2019, **38** (3): 710-718 [Wang CX, He GX, Song ZB, Fan B, Zhang MY, Fang HD, Wang YD, Shi LT. Effects of soil nitrogen and phosphorus levels on tamarind leaf nitrogen and phosphorus contents and photosynthesis in Yuanjiang and Yuanmou dry-hot valley [J]. *Chin J Ecol*, 2019, **38** (3): 710-718]
- 18 瞿文林, 马开华, 宋子波, 段曰汤, 雷斌, 金杰, 赵琼玲, 何璐, 沙毓沧. 酸角种质资源的保护和利用研究进展[J]. 热带作物学报, 2020, **41** (1): 202-209 [Qu WL, Ma KH, Song ZB, Duan YT, Lei X, Jin J, Zhao QL, He L, Sha YC. Advances in protection and utilization of *Tamarindus indica* L. germplasm resources [J]. *Chin J Trop Crops*, 2020, **41** (1): 202-209]
- 19 李维熙, 王葳, 杨柏荣, 张璐, 苏薇薇, 王文静. 酸角的化学成分及生物活性研究现状[J]. 国际药学研究杂志, 2016, **43** (4): 697-704 [Li WX, Wang W, Yang BR, Zhang L, Su WW, Wang WJ. Current research status on chemical components and biological activities of *Tamarindus indica* Linn. [J]. *J Int Pharm Res*, 2016, **43** (4): 697-704]
- 20 Themelis T, Gotti R, Orlandini S, Gatti R. Quantitative amino acids profile of monofloral bee pollens by microwave hydrolysis and fluorimetric high performance liquid chromatography [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2019, **173**: 144-153
- 21 Pellett PL, Young VR. Nutritional evaluation of protein foods [J]. *Food Nutr*, 1980, **4**: 154
- 22 FAO, WHO, ESN. Energy and protein requirements: report of a joint FAO/WHO Ad Hoc expert committee [M]. WHO, 1973
- 23 袁建民, 何璐, 杨晓琼, 许智萍, 孔维喜. 香叶天竺葵不同部位中19种无机元素分布规律研究[J]. 江西农业学报, 2019, **31** (11): 98-104 [Yuan JM, He L, Yang XQ, Xu ZP, Kong WX. Distribution of 19 inorganic elements in different parts of *Pelargonium graveolens* [J]. *Acta Agric Jiangxi*, 2019, **31** (11): 98-104]
- 24 Hildebrandt TM, Nesi AN, Araújo WL, Braun HP. Amino acid catabolism in plants [J]. *Mol Plant*, 2015, **8**: 1563-1579
- 25 孙锐, 贾明, 杨莉, 孙蕾. 山东引种无花果氨基酸及矿物元素成分分析与评价[J]. 食品工业科技, 2015, **36** (19): 352-356 [Sun R, Jia M, Yang L, Sun L. Amino acid and minerals element composition analysis and evaluation of figs in Shandong [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, **36** (19): 352-356]
- 26 程远, 万红建, 姚祝平, 叶青静, 王荣青, 杨悦俭, 周国治, 阮美颖. 不同品种桃番茄氨基酸组成及风味分析[J]. 核农学报, 2019, **33** (11): 2177-2185 [Cheng Y, Wan JH, Yao ZP, Ye QJ, Wang RQ, Yang YJ, Zhou GZ, Ruan MY. Comparative analysis of the amino acid constitution and flavor quality in different cherry tomato varieties [J]. *J Nuc Agric Sci*, 2019, **33** (11): 2177-2185]
- 27 刘凤书, 侯开卫, 李绍家, 杨臣武, 赵幸. 余甘子的保健价值及开发利用前景[J]. 自然资源学报, 1993, **4**: 299-306 [Liu FS, Hou KW, Li SJ, Yang CW, Zhao P. The health-protecting value of *Phyllanthus emblica* L. and its prospects for exploitation and utilization [J]. *J Nat Res*, 1993, **4**: 299-306]
- 28 鲁敏, 安华明, 赵小红. 无籽刺梨与刺梨果实中氨基酸分析[J]. 食品科学, 2015, **36** (14): 118-121 [Ru M, An HM, Zhao XH. Analysis of amino acids in *Rosa sterilis* and *Rosa roxburghii* fruits [J]. *Food Sci*, 2015, **36** (14): 118-121]
- 29 何洁, 莫仁甫, 劳水兵, 覃国新, 廖洁. 紫果西番莲和其它5种水果中氨基酸组分分析[J]. 食品工业科技, 2018, **39** (6): 298-300 [He J, Mo RF, Lao SB, Qin GX, Liao J. Analysis of amino acid composition in purple passionfruit and other 5 fruits [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, **39** (6): 298-300]
- 30 Yoo HC, Yu YC, Sung Y, Han JM. Glutamine reliance in cell metabolism [J]. *Exp Mol Med*, 2020, **52**: 1496-1516
- 31 Tian Z, Liang M. Renal metabolism and hypertension [J]. *Nat Com*, 2021, **12**: 963
- 32 D'Aniello A. D-aspartic acid: an endogenous amino acid with an important neuroendocrine role [J]. *Brain Res Rev*, 2007, **53**: 215-234
- 33 Burke L, Guterman I, Gallego RP, Britton RG, Burschowsky D, Tufarelli C, Rufini A. The Janus-like role of proline metabolism in cancer [J]. *Cell Death Discov*, 2020, **6**: 104
- 34 李瑞美, 何炎森. 不同类型果蔗品种资源氨基酸等营养成分分析[J]. 热带作物学报, 2017, **38** (1): 171-174 [Li RM, He YS. Analysis of amino acid component and nutritious elements of different chewing cane varieties [J]. *Chin J Trop Crops*, 2017, **38** (1): 171-174]
- 35 赵琼玲, 金杰, 沙毓沧, 罗会英, 瞿文林, 段曰汤, 雷斌. 不同来源地的余甘子果实氨基酸组成及含量分析[J]. 中国农学通报, 2017, **33** (36): 78-84 [Zhao QL, Jin J, Sha YC, Luo HY, Qu WL, Duan YT, Lei X. Composition and content of amino acid of *Phyllanthus emblica* L. fruit from different sources [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2017, **33** (36): 78-84]
- 36 周琦, 祝遵凌. 香水莲花茶氨基酸组成及矿质元素分析评价[J]. 热带作物学报, 2018, **39** (11): 2296-2303 [Zhou Q, Zhu ZL. Analysis and evaluation of amino acid and mineral elements for *Nymphaea hybrida* Tea [J]. *Chin J Trop Crops*, 2018, **39** (11): 2296-2303]
- 37 王建友, 王琴, 刘凤兰, 毛金梅, 李勇, 蒋江照, 韩宏伟. 新疆尉犁县野生黑果枸杞与黑杞一号的营养成分及氨基酸分析[J]. 食品工业科技, 2017, **38** (22): 306-309 [Wang JY, Wang Q, Liu FL, Mao JM, Li Y, Jiang JZ, Han HW. The analysis of nutrient content and amino acid in wild and Heiqi No.1 *Lycium ruthenicum* Murr. [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2017, **38** (22): 306-309]
- 38 朱圣陶, 吴坤. 蛋白质营养价值评价: 氨基酸比值系数法[J]. 营养学报, 1988, **2**: 187-190 [Zhu ST, Wu K. Nutritional evaluation of protein [J]. *Acta Nutr Sin*, 1988, **2**: 187-190]
- 39 袁建民, 何璐, 杨晓琼, 许智萍, 赵琼玲, 瞿文林, 雷斌, 孔维喜. ICP-OES法测定余甘子不同器官中11种微量元素[J]. 热带农业科学, 2019, **39** (7): 79-86 [Yuan JM, He L, Yang XQ, Xu ZP, Zhao QL, Qu WL, Lei X, Kong WX. Determination of eleven trace elements in different organs of *Phyllanthus emblica* L. by ICP-OES [J]. *Chin Trop Agric*, 2019, **39** (7): 79-86]
- 40 王艳丹, 何光熊, 宋子波, 张梦寅, 杨湙冉, 史亮涛. 酸角人工林不同坡位土壤有机碳及其活性组分的变化[J]. 土壤, 2020, **52** (6): 1256-1262 [Wang YD, He GX, Song ZB, Zhang MY, Yang HZ, Shi LT. Study on soil organic carbon and its active fractions at different slope sites of *Tamarindus indica* plantation [J]. *Soils*, 2020, **52** (6): 1256-1262]