

甘薯地上部的营养分析及评价

董振学¹, 李一波¹, 李春英^{1,2,3*}, 孙义豪¹, 李家寅^{1,2,3}, 曲珊珊^{1,3}, 赵润芝¹, 陈明昊¹

(1. 河南农业大学食品科技学院, 河南郑州 450002)(2. 农业部大宗粮食重点实验室, 河南郑州 450002)

(3. 郑州市蔬菜加工贮藏与安全控制重点实验室, 河南郑州 450002)

摘要: 为了充分利用甘薯地上部并提高甘薯的附加值, 该研究对甘薯叶、柄和茎进行了营养成分分析, 并利用主成分分析法及隶属函数法进行了综合评价。研究表明, 甘薯地上部富含矿质, 蛋白质和膳食纤维营养素, 约 70% 的氨基酸属于药用氨基酸和味觉氨基酸, 其中, 叶中药用氨基酸占总氨基酸的 68.15%、柄部占 71.48%、茎部占 71.64%; 叶部中味觉氨基酸占总氨基酸的 67.25%、柄部占 72.17%、茎部占 72.64%。此外, 甘薯叶中蛋白质含量为 3.8%、锰含量为 134 mg/kg、镁含量为 4 509 mg/kg、钼含量为 0.24 mg/kg。叶中还富含多酚 (33.6 mg GAE/g, 其中黄酮 20.9 mg CE/g)、叶绿素 (叶绿素 a 含量为 91.8 mg/100 g、叶绿素 b 含量为 33.14 mg/100 g) 以及类胡萝卜素 (14.5 mg/100 g)。茎部以膳食纤维 (10.6%)、锌 (41.8 mg/kg)、硒 (0.16 mg/kg)、铬 (3.0 mg/kg) 以及铁 (376.0 mg/kg) 含量最高。柄部则富含钙 (27 648 mg/kg)、镁 (4 376 mg/kg)、钾 (26 152 mg/kg)、钼 (0.21 mg/kg)。综合营养品质评价结果显示, 甘薯地上部不同部位营养品质排序为叶 (0.92) > 茎部 (0.31) > 柄部 (0.19) ($P < 0.05$)。该研究结果为甘薯地上部叶、柄和茎的有效开发和综合利用提供了重要的理论数据, 为未来甘薯地上部的开发指明了方向。

关键词: 营养素; 主成分分析 (PCA); 综合评价; 地上部分; 甘薯

文章编号: 1673-9078(2024)08-131-139

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.8.0596

Nutritional Analysis and Evaluation of the Aerial Parts of Sweet Potato

DONG Zhenxue¹, LI Yibo¹, LI Chunying^{1,2,3*}, SUN Yihao¹, LI Jiayin^{1,2,3}, QU Shanshan^{1,3},
ZHAO Runzhi¹, CHEN Minghao¹

(1. College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

(2. Key Laboratory of Agricultural Ministry for Staple Food, Zhengzhou 450002, China)

(3. Key Laboratory of Vegetable Processing, Storage and Safety Control, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to make full use of the aerial parts of sweet potato and increase their added value, in this study, the nutritional components of sweet potato's leaves, stems and stalks were analyzed, and comprehensive evaluation via principal component analysis and membership function analysis was performed. The results showed that the aerial parts of sweet potatoes were rich in nutrients like minerals, proteins, and dietary fibers, with about 70% of the amino acids belonging to medicinal and taste-active amino acids. Among them, the amino acids used in traditional Chinese medicine accounted for 68.15% of the total amino acids for the leaves, 71.48% for the stalks, and 71.64% for the stems. The taste amino acids

引文格式:

董振学, 李一波, 李春英, 等. 甘薯地上部的营养分析及评价[J]. 现代食品科技, 2024, 40(8): 131-139.

DONG Zhenxue, LI Yibo, LI Chunying, et al. Nutritional analysis and evaluation of the aerial parts of sweet potato [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(8): 131-139.

收稿日期: 2023-05-18

基金项目: 河南省农业厅乡村振兴项目 (30803068)

作者简介: 董振学 (2003-), 男, 本科生在读, 研究方向: 农产品加工及其副产物的综合开发, E-mail: 780043458@qq.com

通讯作者: 李春英 (1971-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 天然产物生理活性及农副产品综合利用研究, E-mail: cyli1008@163.com

accounted for 67.25% of the total amino acids for the leaves, 72.17% for the stalks, and 72.64% for the stems. Sweet potato leaves contained 3.8% protein, 134 mg/kg manganese, 4 509 mg/kg magnesium, and 0.24 mg/kg molybdenum while having abundant polyphenols (33.6 mg GAE/g; including flavonoids 20.9 mg CE/g), chlorophyll (91.8 mg/100 g chlorophyll-a, 33.14 mg/100 g chlorophyll-b), and carotenoids (14.5 mg/100 g). The stem contained the highest levels of dietary fiber (10.6%), zinc (41.8 mg/kg), selenium (0.16 mg/kg), chromium (3.0 mg/kg), and iron (376.0 mg/kg). The stalk was rich in calcium (27 648 mg/kg), magnesium (4 376 mg/kg), potassium (26 152 mg/kg), and molybdenum (0.21 mg/kg). The results of the comprehensive nutritional quality evaluation showed that the nutritional quality of different aerial parts of sweet potato was in this order leaf (0.92) > stem (0.31) > stalk (0.19) ($P < 0.05$). This study provides important theoretical data for the effective development and comprehensive utilization of the aerial parts, leaves, stalks, and stems of sweet potato, and points out the direction for future development of the aerial parts of sweet potato.

Key words: nutrients; principal component analysis (PCA); comprehensive evaluation; aerial parts; sweet potato

甘薯 (*Ipomoea batatas* L.) 是我国主要栽培的农作物之一^[1]。随着种植业的发展, 甘薯种植面积逐年增加, 甘薯叶、柄、茎等地上部分在每个生长季节反复收获 10~15 次, 成为高产植物资源^[2]。然而, 我国甘薯的利用大多是用作牲畜饲料或蔬菜, 大部分地上部分被遗弃在田地中, 这不仅导致环境污染, 也造成资源浪费^[3]。随着中国乡村振兴战略的推进, 人们越来越重视农业副产物的综合利用, 甘薯叶和叶柄作为矿物质、维生素和功能性微量成分的优质来源, 已被亚洲蔬菜研究和发展中心列为营养丰富的蔬菜之一^[3]。多项研究表明, 甘薯地上部富含酚类化合物和膳食纤维, 具有抗氧化、抗炎、抗肿瘤、抗肥胖、抗糖尿病、护肝和免疫调节等多种药理作用^[4]。人们试图通过对甘薯叶进行冻干, 制作冻干粉和饮料, 也有些地区将其作为新鲜蔬菜食用^[5]。研究表明, 甘薯叶多酚的抗氧化活性明显高于抗坏血酸、茶多酚和葡萄籽多酚^[6]。据 Frond 等^[7]报道, 紫甘薯中的总酚、总黄酮含量和抗氧化活性高于黑胡萝卜、茄子和红洋葱。而甘薯叶中的多酚含量远高于整个甘薯块茎的果肉组织和果皮中的多酚含量^[8], 以及其他常见蔬菜, 如菠菜、羽衣甘蓝、茄子、卷心菜、花椰菜、绿豌豆和生菜^[9,10]。因此, 甘薯叶作为天然抗氧化剂在食品和医药领域具有巨大的应用潜力^[9]。至今, 甘薯地上部的营养成分分析和药理作用研究主要集中在甘薯茎尖的多酚类化合物上, 而针对甘薯地上部各个部位的营养成分分布研究信息却较为稀缺, 这阻碍了对甘薯叶、柄、茎的综合利用开发, 影响了甘薯附加值的提高。

本研究秉承着从甘薯块茎生产为实际的出发点, 针对生产的甘薯地上部的叶、柄、茎进行基本营养成分、氨基酸组成、矿物质营养、总酚、黄酮、

叶绿素和类胡萝卜素含量的分析, 以明确甘薯地上部各部位营养成分的分布情况。同时, 通过主成分分析和隶属函数法对其营养价值进行综合评价, 为甘薯地上部的综合开发提供了理论数据和参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

甘薯叶、柄、茎, 于 2021 年 9 月 20 日采自河南省南阳市玉薯坊食品有限公司甘薯基地, 采样当天一部分进行了水分测定, 其余部分放置 55 °C 烘干, 采用超细微粉碎机制粉, 备用。

焦性没食子酸, 儿茶酚购自美国 Sigma-Aldrich 公司, 其他试剂均为分析纯, 购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

G8410A 电感耦合等离子体质谱仪, 美国安捷伦公司; MARS6 微波消解仪, 美国 CEM 公司; UV-2600 紫外分光光度计, 北京普析有限公司; 超细微粉碎机, 广州欣加特机械设备有限公司; HITACHIL-8900 全自动氨基酸分析仪, 日本日立公司。

1.3 方法

1.3.1 基本营养成分分析

水分含量测定参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》直接干燥法; 粗蛋白参照 GB 5009.5-2010《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》凯氏定氮法; 粗脂肪参照 GB 5009.6-2003《食品中脂肪的测定》索氏抽提法; 膳食纤维参照 GB 5009.88-2008《食品中膳食纤维的测定》

酸碱消除法；灰分参照 GB 5009.4-2010《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》550 °C 灼烧法测定并计算其含量。

1.3.2 氨基酸组分分析

准确称取 1.000 g 样品，加入质量浓度 6 mol/L 盐酸 8 mL，于 105 °C 消解 24 h，采用氨基酸自动分析仪分析样品中 17 种氨基酸的含量。采用自动进样方式，共进样 5 次，日立专用离子交换树脂（3 μm），色谱柱为 4.6 mm×60 mm，压力 0~20 MPa，流量 0.000~0.999 mL/min。

1.3.3 矿质元素含量分析

样品采用微波消解法消解后，采用电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）进行分析。射频功率 1 550 W，电压 1.80 V，雾化室温度 -5 °C，冷却气流量 15 L/min，辅助气流量 0.8 L/min，载气流量 0.9 L/min，采样锥为铂锥，采样深度 8 mm，蠕动泵转速为 0.3 r/s，积分时间 1.0 s。

1.3.4 总酚含量测定

样品提取液中加入 2 wt.% Na₂CO₃ 溶液混合，放置 3 min，然后加入体积分数 50% Folin-Ciocalteu 试剂混合后放置 1 h。利用紫外-可见分光光度计在 750 nm 处测定吸光值。标准样品采用焦性没食子酸。

1.3.5 总黄酮含量测定

样品提取液中加入 5 wt.% 亚硝酸钠溶液 300 μL，摇匀，静置 5 min，然后加入 10 wt.% 硝酸铝溶液 300 μL，摇匀，静置 6 min。最后加入质量浓度 1 mol/L 氢氧化钠 2 mL，蒸馏水 1.4 mL，混匀，放置 15 min，利用紫外-可见分光光度计在 510 nm 处测定其吸光值。标准样品采用儿茶酚。

1.3.6 色素含量测定

参照冉海榕^[11]稍作修改。样品中加入体积分数 50% (V/V) 丙酮-乙醇溶液，暗处浸提 24 h，取出后加入一定量的硫酸镁固体试剂，过滤取上清液，分别在 665、649、470 nm 处测定吸光值。提取液色素浓度 C (mg/L) 的计算公式采用 Lichtenthaler 法。

$$C_a = \frac{(12.25 \times A_{665} - 2.79 A_{646}) \times V \times 100}{m} \quad (1)$$

$$C_b = \frac{(21.50 \times A_{646} - 5.10 A_{663}) \times V \times 100}{m} \quad (2)$$

$$C_c = \frac{(1000 \times A_{470} - 1.82 C_a - 85.02 C_b) \times V \times 100}{229m} \quad (3)$$

式中：

C_a ——叶绿素 a 的质量浓度，mg/L；

C_b ——叶绿素 b 的质量浓度，mg/L；

C_c ——类胡萝卜素的质量浓度，mg/L；

A_{665} ——提取液在 665 nm 处的吸光值；

A_{649} ——提取液在 649 nm 处的吸光值；

A_{470} ——提取液在 470 nm 处的吸光值；

V ——溶液总体积，L；

m ——样品质量，g；

229——类胡萝卜素在 470 nm 处的吸光系数。

1.4 数据处理

每组实验重复三次，测定结果以平均值 (±S.D.) 表示，并采用 SPSS 26.0 统计软件、Design Expert 8.0 分析，通过 ANOVA 和邓肯 (Duncan) 多重比较法进行样品间的显著性差异分析 ($P < 0.05$)，绘图采用 Origin 2021 软件。

2 结果与分析

2.1 基本营养成分分析

甘薯茎叶再生能力强，生长期长，一年中可以采收十多次，我国甘薯地上部的年生产量高达 150 亿吨以上，然而，除少量的甘薯茎叶被利用外，大部分被废弃掉，浪费资源大^[10]。为了更好的开发利用好甘薯地上部，本研究针对甘薯地上部叶、柄、茎部分别进行了基本营养成分含量测定，其结果如表 1 所示。

表 1 甘薯地上部不同部位的基本营养成分含量

Table 1 Basic nutrient content in different parts of sweet potato aerial parts (%)

部位	水分	蛋白质	脂肪	纤维素	灰分
叶	67.9 ± 3.1 ^a	3.8 ± 0.08 ^c	2.3 ± 0.1 ^a	6.0 ± 0.3 ^b	1.9 ± 0.06 ^b
柄	89.3 ± 4.5 ^c	0.5 ± 0.06 ^a	4.5 ± 0.1 ^b	2.2 ± 0.1 ^a	1.4 ± 0.06 ^a
茎	78.9 ± 3.3 ^b	0.9 ± 0.03 ^b	2.0 ± 0.08 ^a	10.6 ± 0.3 ^c	1.2 ± 0.03 ^a

注：同列不同字母表示存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

新鲜的甘薯地上部中水分含量分别为叶 67.9%、柄 89.3%、茎 78.9%。甘薯地上部不同部位的蛋白质含量范围为 0.5%~3.8%，粗脂肪为 2.0%~4.5%，纤维素为 2.2%~10.6%，灰分为 1.2%~1.9%，其中甘薯叶中蛋白质和灰分含量最高，分别为 3.8% 和 1.9%，膳食纤维含量也较高，为 6.0%，甘薯柄中粗脂肪含量最高，为 4.5%，茎部的纤维素含量最高，为 10.6%。通过灰分含量可初步推测，甘薯地上部

可能富集大量矿质营养元素。综上所述,甘薯叶是很好的高蛋白素材,而甘薯柄部和茎部,考虑其生物量,也可以作为良好的蛋白新素材开发利用。甘薯柄中粗脂肪含量高,有待于深入研究其脂质种类及其营养价值。

2.2 氨基酸组成分析

甘薯地上部富含蛋白质,为了评价其蛋白质的营养价值,对其蛋白质的氨基酸组成进行了分析,其结果如表2所示。

由表2可见,甘薯叶中共检出16种氨基酸,总含量为11.82 mg/g,其中谷氨酸含量最高,占总量的20.49%,其次是酪氨酸,为14.93%。必需氨基酸的含量占叶中总氨基酸含量的33.25%,儿童必需氨基酸(组氨酸+精氨酸)含量占总含量的8.17%。甘薯柄部16种氨基酸的总含量为21.68 mg/g,其中酪

氨酸的含量最高,占总量的25.63%,其次是谷氨酸,为17.00%。必需氨基酸的含量占柄中总氨基酸含量的28.71%,儿童必需氨基酸含量占总含量的6.64%。甘薯茎中共检出17种氨基酸,其总量为11.66 mg/g,其中谷氨酸和酪氨酸的含量均很高,分别为22.93%和20.28%。必需氨基酸的含量占茎中总氨基酸含量的28.11%,儿童必需氨基酸含量占总含量的6.63%。在儿童的成长过程中,氨基酸扮演着矿物质和微量元素“搬运工”。然而,与成人相比,儿童的必需氨基酸种类除了成人的必需氨基酸之外,还包括组氨酸和精氨酸。这是因为儿童体内无法合成足够的组氨酸和精氨酸来满足生长激素的分泌以及胶原蛋白等蛋白质的正常合成。这种情况严重影响了儿童的神经系统和机体的正常发育。因此,甘薯的柄和叶是儿童摄入必需氨基酸的理想蔬菜来源。

表2 甘薯地上部不同部位氨基酸组成分析

Table 2 Analysis of amino acid composition in different parts of sweet potato aerial parts

氨基酸	AA	叶		柄		茎	
		含量/(mg/g)	相对含量/%	含量/(mg/g)	相对含量/%	含量/(mg/g)	相对含量/%
天冬氨酸	Asp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.12
谷氨酸	Glu	2.42	20.49	3.69	17.00	2.67	22.93
丝氨酸	Ser	0.56	4.78	1.04	4.80	0.53	4.54
甘氨酸	Gly	0.70	5.91	1.26	5.81	0.68	5.82
组氨酸	His	0.30	2.53	0.49	2.27	0.25	2.18
精氨酸	Arg	0.67	5.64	0.95	4.37	0.52	4.45
苏氨酸	Thr	0.54	4.54	0.86	3.99	0.46	3.97
丙氨酸	Ala	0.71	6.00	1.18	5.42	0.64	5.46
脯氨酸	Pro	0.70	5.92	1.21	5.58	0.67	5.72
酪氨酸	Tyr	1.76	14.93	5.56	25.63	2.36	20.28
缬氨酸	Val	0.33	2.82	0.49	2.27	0.28	2.39
甲硫氨酸	Met	0.78	6.63	1.26	5.82	0.67	5.71
半胱氨酸	Cys	0.07	0.56	0.09	0.40	0.05	0.39
异亮氨酸	Ile	0.51	4.33	0.82	3.79	0.43	3.72
亮氨酸	Leu	0.74	6.28	1.17	5.40	0.63	5.39
苯丙氨酸	Phe	0.55	4.68	0.85	3.94	0.44	3.81
赖氨酸	Lys	0.47	3.96	0.76	3.50	0.36	3.13
总氨基酸	Total	11.82	100	21.68	100	11.66	100
必需氨基酸	EAA	3.93	33.25	6.22	28.71	3.28	28.11
非必需氨基酸	NEAA	7.89	66.75	15.46	71.29	8.38	71.89
儿童必需氨基酸	CE	0.97	8.17	1.44	6.64	0.77	6.63
氨基酸评分	AAS	82.07 (缬氨酸)		75.21 (缬氨酸)		88.17 (缬氨酸)	

注:表中数据用平均值表示。

表3 甘薯地上部不同部位的氨基酸特性分析

Table 3 Analysis of amino acid characteristics of different parts of the upper part of sweet potato

部位	必需氨基酸组成/%		药用氨基酸组成/%	味觉氨基酸含量/(mg/g)			组成/%
	EAA/NEAA	EAA/T	MAA/T	UAA	SAA	AAA	
叶	49.80	33.25	68.51	2.42	3.21	2.31	67.25
柄	40.26	28.71	71.47	3.69	5.55	6.41	72.17
茎	39.10	28.11	71.64	2.68	2.97	2.8	72.64

注: T, 总氨基酸 (Total); MAA, 药用氨基酸 (Medicinal Amino Acid); UAA, 鲜味氨基酸 (Umami Amino Acid); SAA, 甜味氨基酸 (Sweet Amino Acid); AAA, 芳香族氨基酸 (Aromatic Amino Acid); 注: 重复次数 $n=3$, 表中数据用平均值表示。其中, 药用氨基酸: 苏氨酸、缬氨酸、甲硫氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸; 鲜味氨基酸: 天冬氨酸、谷氨酸; 芳香族氨基酸: 酪氨酸、苯丙氨酸。

表4 甘薯地上部不同部位矿质元素含量

Table 4 Mineral element content in different parts of the upper part of sweet potato

矿质元素	叶	柄	茎	
常量元素 含量/(mg/kg)	Ca	15 915 ± 411.0 ^b	27 648 ± 572.7 ^a	14 291 ± 459.6 ^b
	Mg	4 509 ± 98.6 ^a	4 376 ± 175.6 ^a	3 535 ± 51.1 ^b
	K	26 003 ± 382.3 ^a	26 152 ± 478.8 ^a	16 345 ± 151.7 ^b
	Na	467 ± 38.1 ^b	141 ± 29.9 ^c	651 ± 20.9 ^a
微量元素含 量/(mg/kg)	Fe	85 ± 13.8 ^b	92.9 ± 8.7 ^b	376 ± 32.2 ^a
	Mn	134 ± 15.7 ^c	35.5 ± 5.6 ^b	55.1 ± 0.8 ^a
	Zn	22.4 ± 0.6 ^b	14.4 ± 0.3 ^b	41.8 ± 2.8 ^a
	Se	0.04 ± 0.00 ^b	—	0.16 ± 0.03 ^a
	Mo	0.24 ± 0.03 ^a	0.21 ± 0.01 ^a	0.17 ± 0.01 ^b
	Cr	1.14 ± 0.11 ^b	1.36 ± 0.17 ^b	3.00 ± 0.08 ^a

注: —表示未检出, 检出限为 0.01 mg/kg; 重复次数 $n=3$, 同行不同字母表示存在显著性差异 ($P<0.05$)。

根据 2007 年 FAO/WHO 提出的氨基酸模式^[12]计算, 甘薯叶、柄、茎部氨基酸的评分分别为 82.1、75.2 和 88.2, 其第一限制性氨基酸均为缬氨酸。欧行奇等^[13]研究报道, 新鲜甘薯茎叶的蛋白质含量达 3.7%~3.8%, 其氨基酸评分为 76.1%~83.9%, 与本研究结果相同, 而第一限制性氨基酸为赖氨酸, 这与本研究使用的甘薯品种和种植地区不同有关^[14]。一些常见蔬菜中, 茼蒿、茺荑、生菜、香椿、菠菜、空心菜、油菜、芹菜等大部分蔬菜的第一限制性氨基酸是含硫氨基酸 (蛋氨酸 + 半胱氨酸), 茺荑、生菜等是蛋氨酸, 油菜、空心菜等是半胱氨酸, 甘薯叶、柄作为优质高蛋白质蔬菜, 可以与其他种类的蔬菜很好的氨基酸互补, 提高膳食氨基酸的营养价值。

为了更好的了解甘薯地上部氨基酸的营养、保健和味觉特性, 对叶、柄、茎的必需氨基酸、药用氨基酸以及味觉氨基酸组成进行了分析, 其结果如表 3 所示。

由表 3 可见, 甘薯叶中所含必需氨基酸与非必需氨基酸的比例约为 1:2, 柄和茎部分别为 1:2.5 和 1:2.6, 氨基酸的营养价值为中等以上。甘薯地上部中含有 68.51%~71.64% 的药用氨基酸和 67.25%~72.64% 的味觉氨基酸, 是具有多种药理功效, 且具有鲜味、甜味和芳香味。甘薯茎由于采收期大多是在甘薯生长后期, 木质化的甘薯茎很少被利用, 因此营养方面的研究报道甚少。本研究发现, 甘薯茎中必需氨基酸和药用氨基酸的所占比例与甘薯柄类似, 味觉氨基酸的含量与甘薯叶类似, 故在食品开发甘薯叶、柄的同时, 甘薯茎也有望用于食品或动物饲料的开发利用。

2.3 矿质元素组成分析

甘薯地上部不同部位的矿质元素分布状况如表 4 所示。

甘薯地上部含有丰富的 Ca、Mg、K 等常量元素和 Fe、Mn、Zn、Mo、Cr 等微量元素, 是良好

的矿质营养素来源。甘薯叶和柄中的 Mg (平均 4 442.5 mg/kg) 和 K (平均 26 077.5 mg/kg) 高于甘薯茎中 Mg 25.7% 和 K 59.5%, 尤其是甘薯柄中的 K/Na 为 185.5, 是甘薯叶 (55.7) 的 3.3 倍和甘薯茎 (25.1) 的 7.4 倍, 是当今膳食结构中推荐的高钾低钠蔬菜。甘薯叶中富含 Mn (134 mg/kg), 分别高于甘薯茎 (55.1 mg/kg) 和甘薯柄 (35.5 mg/kg) 2.4 倍和 3.8 倍。甘薯叶和柄中含有 0.24 mg/kg 和 0.21 mg/kg 的 Mo 元素, 高于甘薯茎的 41.2% 和 23.5%。甘薯柄中除含有丰富的 Mg、K、Mo 外, 还富含 Ca (27 648 mg/kg), 高于甘薯叶 (15 915 mg/kg) 73.7% 和甘薯茎 (14 291 mg/kg) 93.5%, 是人类补钙优质的食材。在甘薯地上部, 甘薯茎中 Fe 含量最高, 为 376.0 mg/kg, 是甘薯叶和柄的 4 倍以上。甘薯茎中 Zn 的含量为 41.8 mg/kg, 约是甘薯叶的 2 倍和甘薯柄的 3 倍, 而且, 还含有 0.16 mg/kg 的 Se 和 3.00 mg/kg 的 Cr。

矿质元素是关乎人类生长发育、造血以及免疫的重要营养素。Ca 不仅能加强骨骼、牙齿密度之外, 与 K 相拮抗利于心肌收缩, 维持心跳节律; 中和酸性物质和解毒作用; 激活 ATP 等多种酶活性, 调节新陈代谢^[13]。K/Na 比值高, 对高血压、动脉粥样硬化、心脑血管疾病具有一定的预防作用。甘薯叶富含 K 元素, 具有体外抗肾结石作用, 可用于治疗肾结石病^[14]。Mg 作为多种酶的激活剂, 参与蛋白质、脂肪、核酸等生物大分子合成以及葡萄糖降解、脂肪代谢和 Vc 的合成。Mn 元素对胆固醇的合成、糖代谢和脂肪代谢都有重要作用。Zn 与味觉氨基酸合成味觉素, 增强食欲, 增强机体免疫力、促进机体生长发育; Mo 具有活化铁质、防止贫血、协助机体代谢、促进正常发育、增强机体免疫力的生理作用; Cr 对预防动脉粥样硬化、冠心病、高血压、脑血管疾病具有十分重要的作用。Se 是一种具有抗氧化作用的矿质元素, 具有保肝护肝、增强机体免疫力的功效。甘薯茎尖具有降低胆固醇和解毒作用^[12], 可能与其含有较高的 Ca、Mg 以及 Mn 有一定的关系^[14]。甘薯茎尖中钾、镁、铁等含量均高于常见蔬菜, 且甘薯品种和种植土壤不同, 甘薯地上部的矿物质含量相差较大^[14]。不同采收期甘薯茎叶中矿物质含量差异也较大, 尤其 Fe、Mn、Mg、Se、K 等含量的积累不同, 分布部位也有差异^[15]。甘薯叶和柄作为高 Ca、Mg、K、Mn、Mo 的蔬菜品种, 由于其所含抗营养因子草酸的含量只有其他叶菜类蔬菜的 1/2, 矿质元素、蛋白质等营养素的生物利用率高, 被亚

洲蔬菜研究中心列为高营养蔬菜^[12], 适合生长发育期的儿童、青少年、老年人食用, 可以丰富食品种类, 还能补充多种重要的矿质营养元素。甘薯茎中也含有丰富的 Fe、Mn、Zn、Se、Cr 等, 有利于人体或动物体各种微量元素的补充, 起到调节机体生理代谢, 增强免疫力的作用。

2.4 功能成分分析

甘薯茎叶或甘薯茎尖含有丰富的多酚类化合物和黄酮类化合物, 因此具有很强的清除体内自由基、抗炎、抗肿瘤以及降血糖等功效^[16]。甘薯地上部不同部位的多酚、黄酮类化合物以及叶绿素、类胡萝卜素含量如图 1 所示。

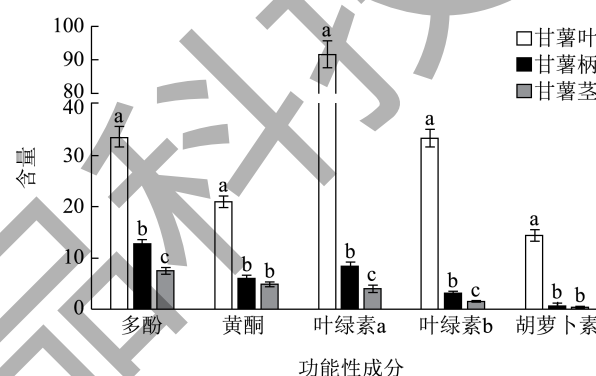


图 1 甘薯地上部不同部位功能性成分含量

Fig.1 Content of functional components in different parts of sweet potato

甘薯叶多酚、黄酮、叶绿素 a、叶绿素 b 以及 β -胡萝卜素含量均显著高于柄和茎部, 其次是柄部。甘薯叶多酚含量为 33.6 mg GAE/g, 分别是柄的 2.7 倍和茎的 4.3 倍。叶黄酮含量为 20.9 mg CE/g, 是柄的 3.4 倍和茎的 4.3 倍。甘薯叶中叶绿素 a 和叶绿素 b 含量分别为 91.8 mg/100 g 和 33.14 mg/100 g, 其总叶绿素含量是柄的 10.7 倍和茎的 22.3 倍。甘薯地上部的类胡萝卜素主要分布在甘薯叶中, 其含量为 14.5 mg/100 g, 柄和茎部含量极少。世界各地 1 389 种基因型甘薯茎叶粉的总多酚含量研究结果, 其范围为 14.2~171.0 mg/g^[17], 国内 32 个基因型的新鲜甘薯叶总黄酮、总多酚含量分析结果, 其范围分别为 3.0~12.7 mg RE/g、2.2~28.9 mg GAE/g, 变异系数达 40% 以上^[10], 但也有人分析国内 40 个品种的甘薯茎叶多酚含量, 其范围为 27.3~124.6 mg/g^[18], 本实验结果, 甘薯叶、柄、茎中的总多酚和总黄酮含量符合前人的研究结果范围之内。大量的研究证明甘薯叶含有以咖啡酰奎尼酸衍生物为主的 20 多种酚酸类, 黄芪素、槲皮素、异槲皮苷以及花色苷

等 10 多种类黄酮^[19,20]，且甘薯茎叶总多酚含量显著高于甘薯块根^[21]。甘薯茎叶酚酸、黄酮类等物质具有良好的抗氧化、抗衰老、抗炎、抗肿瘤、降血糖、保护肝脏和免疫调节等作用，研究表明甘薯叶和茎的抗氧化活性高于茎尖、柄^[22]。本研究结果，甘薯叶中的总多酚、总黄酮含量显著高于甘薯柄和茎，甘薯柄中的总多酚含量也显著高于甘薯茎，而在黄酮含量上没有呈现显著性差异 ($P < 0.01$)。

国内 32 个基因型的新鲜甘薯叶总叶绿素、类胡萝卜素含量分析结果指出，叶绿素 a 的含量范围在 49.8~107.8 mg/100 g，变异系数为 21.1%，叶绿素 b 的含量范围在 18.3~43.4 mg/100 g，变异系数为 23.4%，而类胡萝卜素含量变幅为 7.1~17.4 mg/100 g，变异系数为 29.7%^[13]。本实验结果，甘薯叶叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均与前人的研究结果相符合，其功能性成分在甘薯地上部中主要集中在甘薯叶中。

上述实验结果可知，甘薯地上部中多酚、黄酮、叶绿素以及类胡萝卜素等具有药理作用的功能性成分主要分布在甘薯叶中，甘薯柄和茎中含量极少，这为甘薯叶的功能性食品开发提供了重要的理论依据。

2.5 甘薯地上部各营养指标的主成分分析

对 26 个营养指标进行了主成分分析，其结果如表 5 所示。

表 5 主成分提取

Table 5 Principal component extraction and analysis

成分	载荷平方和		
	总计	方差百分/%	累计贡献率/%
1	17.91	68.883	68.883 0
2	8.09	31.117	100

由表 5 可知，主成分 1 (PC1) 的贡献率为 68.883%，特征值为 17.910，主成分 2 (PC2) 的贡献率为 31.117%，特征值为 8.090，2 个主成分的累计贡献率达到了 100%，因此，本研究共提取了 2 个主成分 Y1、Y2，包含了所测营养品质指标的全部信息。

由表 6 可知，主成分 1 主要包括蛋白质 (x_1)、灰分 (x_4)、7 种必需氨基酸 ($x_5 \sim x_{11}$)、Mn (x_{17})、Mo (x_{20})、和 TPC (x_{22})、TFC (x_{23})、Chl a (x_{24})、Chl b (x_{25})、类胡萝卜素 (x_{26}) 等主要作用因子，主成分 2 主要包括纤维素 (x_3)、Zn (x_{18})、Se (x_{19})、Na (x_{15}) 等主要作用因子。综合 2 个主成分所携带的信息，可用粗蛋白、7 种必需氨基酸、灰分、Mo、Mn、纤维素、Zn、Se、Na 等营养指标来概括

甘薯地上部营养、功能相关性状的所有信息。

表 6 各因子的载荷矩阵

Table 6 Loading matrix of each component

项目	主成分	
	PC1	PC2
x_1 粗蛋白质/Protein	0.934	0.357
x_2 粗脂肪/Fat	-0.115	-0.993
x_3 纤维素/Fiber	-0.320	0.947
x_4 灰分/Ash	1.000	-0.026
x_5 苏氨酸/Thr	0.944	0.330
x_6 缬氨酸/Val	0.932	0.362
x_7 蛋氨酸/Met	0.956	0.295
x_8 异亮氨酸/Ile	0.951	0.310
x_9 亮氨酸/Leu	0.950	0.311
x_{10} 苯丙氨酸/Phe	0.959	0.285
x_{11} 赖氨酸/Lys	0.981	0.194
x_{12} Ca	-0.143	-0.990
x_{13} Mg	0.795	-0.607
x_{14} K	0.703	-0.712
x_{15} Na	-0.525	0.851
x_{16} Fe	-0.728	0.685
x_{17} Mn	0.897	0.442
x_{18} Zn	-0.483	0.875
x_{19} Se	-0.522	0.853
x_{20} Mo	0.944	-0.331
x_{21} Cr	-0.784	0.621
x_{22} 多酚/TFC	0.996	0.087
x_{23} 类黄酮/TFC	0.980	0.200
x_{24} 叶绿素 a/Chl a	0.975	0.221
x_{25} 叶绿素 b/Chl b	0.975	0.224
x_{26} 类胡萝卜素/carotenoid	0.969	0.246

2.6 不同部位的营养综合评价

采用模糊数学的隶属函数法对甘薯叶、柄、茎的营养品质进行分析评价以每个主成分所对应的综合指标值，通过得到隶属函数值，根据其权重求得综合评价值。通过表 5 得出主成分 1 (Y1) 和主成分 2 (Y2) 的综合指标值表达式分别为：

$$Y1 = 0.221x_1 - 0.022x_2 - 0.076x_3 + 0.236x_4 + \dots + 0.230x_{25} + 0.229x_{26}$$

$$Y2 = 0.126x_1 - 0.349x_2 + 0.333x_3 - 0.009x_4 + \dots + 0.079x_{25} + 0.086x_{26}$$

得出的各部位综合指标值通过隶属函数法对甘

薯地上部指标的最小值和最大值计算出对应的隶属值, 确定权重, 计算出甘薯叶、柄、茎各部位的营养综合评价值, 并按大小进行排序, 获得甘薯叶、柄、茎的综合营养品质顺序, 其结果如表 7 所示。

表 7 不同部位间营养综合评价值
Table 7 Comprehensive evaluation values of nutrition between different parts

部位	综合指标值		隶属函数值		综合评价值	排序
	PC1	PC2	$\mu(x1)$	$\mu(x2)$		
叶	4.71	0.87	1.00	0.74	0.92	1
柄	-1.23	-3.18	0.27	0.00	0.19	3
茎	-3.48	2.31	0.00	1.00	0.31	2
指标权重			0.69	0.31		

由表中可知, 主成分 1 和主成分 2 的最大综合指标值分别为 4.71 和 2.31, 最小值分别为 -3.48 和 -3.18。对于主成分 1 的综合指标而言, 甘薯叶的隶属函数值最大, 为 1.00, 而甘薯茎的隶属函数值则最小, 为 0.00。这说明甘薯叶中粗蛋白质、必需氨基酸、灰分、生理活性成分和 Mo、Mn 等含量最高, 综合指标表现最好, 茎部的营养指标表现最差。对 PC2 综合指标而言, 甘薯茎的隶属函数值最大, 为 1.00, 其次是甘薯叶, 其隶属函数值为 0.74, 甘薯柄的隶属函数值则最小, 为 0.00。这说明甘薯茎部的纤维素、Zn、Se 含量最高, 综合指标的表现最好, 甘薯叶的综合指标的表现良好, 柄的表现差。利用由表 5 计算获得的主成分 1 和主成分 2 的权重 (分别为 0.69 和 0.31), 得出营养综合评价值, 按其大小顺序排序, 甘薯叶 (0.92) > 甘薯茎 (0.31) > 甘薯柄 (0.19)。

本研究结果得出, 甘薯叶中的营养、功能组分种类多, 其含量丰富, 而甘薯茎和甘薯柄可以根据特定营养成分进行功能性食品开发, 或开发特种功能动物饲料, 可大大提高甘薯附加值, 提高农民收入。

3 结论

通过本研究发现, 甘薯地上部富含多种营养成分, 包括矿物质、蛋白质、膳食纤维、多酚、黄酮、叶绿素和类胡萝卜素。不同部位的甘薯地上部营养品质有所差异。甘薯叶富含蛋白质、Mo、Mn 等矿物质和多种生理活性成分, 甘薯柄富含 Ca、Mg、K、Fe 等矿物质和粗脂肪, 甘薯茎富含纤维素和 Zn、Se 等矿物质。综合评价结果显示, 甘薯地上部的营养价值综合评价值高低顺序为甘薯叶 > 甘薯茎 > 甘

薯柄。甘薯地上部的开发和综合利用有望提高甘薯的附加值, 并推动甘薯产业的发展。特别是甘薯叶和茎具有丰富的蛋白质和矿物质, 值得进一步研究和开发利用。

参考文献

- [1] ALI M M. 15. food and agriculture organization of the united nations (FAO) [J]. Yearbook of International Environmental Law, 2016, 1: 1.
- [2] SUAREZS, MU T H, SUN H N, et al. Antioxidant activity, nutritional, and phenolic composition of sweet potato leaves as affected by harvesting period [J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 178-188.
- [3] JANGY B, KOH E M. Antioxidant content and activity in leaves and petioles of six sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) and antioxidant properties of blanched leaves [J]. Food Science and Biotechnology, 2019, 28: 337-345.
- [4] TANG CC, AMEEN A, FANG BP, et al. Nutritional composition and health benefits of leaf-vegetable sweet potato in South China [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 96: 103714.
- [5] LUO D, MU T H, SUN H N, et al. Optimization of the formula and processing of a sweet potato leaf powder-based beverage [J]. Food Science and Nutrition, 2020, 8(6): 2680-2691.
- [6] SUN Z L, WANG M, HAN S W, et al. Production of hypoallergenic milk from DNA-free beta-lactoglobulin (BLG) gene knockout cow using zinc-finger nucleases mRNA [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-11.
- [7] FRONDA D, IUHAS C I, STIRBU I, et al. Phytochemical characterization of five edible purple-reddish vegetables: Anthocyanins, flavonoids, and phenolic acid derivatives [J]. Molecules, 2019, 24(8): 15-36.
- [8] ALAM MK. A comprehensive review of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam): Revisiting the associated health benefits [J]. Trends in Food Science and Technology, 2021, 115: 512-529.
- [9] KURATA R, SUN HN, OKI T, et al. Sweet potato polyphenols [B]. Sweet Potato, 2019: 177-222.
- [10] 李春英, 孙义豪, 范会平, 等. 甘薯蔓的营养评价及开发利用进展 [J]. 食品工业, 2021, 42(6): 390-393.
- [11] 冉海榕. 叶片富含多酚的甘薯种质资源筛选及转录组测序分析 [D]. 重庆: 西南大学, 2022.
- [12] ESAN Y O, OMOBA O S, ENUJIUGHA V N. Biochemical and nutritional compositions of two accessions of *Amaranthus cruentus* seed flour [J]. American Journal of Food Science and Technology, 2018, 6(4): 145-150.
- [13] 欧行奇, 李新华, 朱彬. 甘薯茎尖与常见叶菜类蔬菜氨基酸含量及组成的比较分析 [J]. 氨基酸和生物资源, 2007,

- 29(3):70-74.
- [14] 范文秀,欧行奇.叶菜型甘薯茎尖中微量元素和氨基酸的含量分析[J].广东微量元素科学,2007,14(9):60-63.
- [15] MUTIAH R, FITRIANINGSIH A A, INDRAWIJAYA Y, et al. The activity of purple sweet potato leaves (*Ipomea batatas* Ver.) extract to calcium oxalate concentration of male rat (*Rattus novergicus*) [J]. *Majalah Obat Tradisional*, 2020, 25(1): 49.
- [16] 罗丹.西蒙1号甘薯茎叶多酚降血糖作用及机制的研究[D].北京:中国农业科学院,2020.
- [17] 王永徐.甘薯茎叶主要抗氧化功能成分的提取及其品种间差异研究[D].杭州:浙江农林大学,2019.
- [18] SUN H N, MU B N, SONG Z, et al. The *in vitro* antioxidant activity and inhibition of intracellular reactive oxygen species of sweet potato leaf polyphenols [J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2018, 15(4): 9017828.
- [19] LIU J, MU T H, SUN H N, et al. Optimization of ultrasonic-microwave synergistic extraction of flavonoids from sweet potato leaves by response surface methodology [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(5): e13928.
- [20] LUO D, MU T H, SUN H N. Profiling of phenolic acids and flavonoids in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves and evaluation of their anti-oxidant and hypoglycemic activities [J]. *Food Bioscience*, 2021, 39(1): 100801.
- [21] LI M S, JANG GY, LEE SH, et al. Comparison of functional components in various sweet potato leaves and stalks [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2017, 26(1): 97-103.
- [22] SAMSONOWICZ M, REGULSKA E, KARPOWICZ D, et al. Antioxidant properties of coffee substitutes rich in polyphenols and minerals [J]. *Food Chemistry*, 2019, 278: 101-109.

现代食品科技