

柘树果实主要性状指标比较分析

钱伟红¹,陈勇²,殷益明¹,姚冲³,徐珊珊^{4*}

1. 湖州市农业科学研究院,浙江 湖州 313000
2. 湖州柘树农业发展有限公司,浙江 湖州 313112
3. 湖州市中心医院,浙江 湖州 313000
4. 湖州市南浔区农业技术推广服务中心,浙江 湖州 313009

摘要: 旨在探究柘树果实主要性状指标特性,筛选出特殊用途的新品系。以5份柘树优系成熟果实为材料,测定了果实的44项主要性状指标,然后运用显著性、相关性、主成分和聚类等方法进行分析评价。结果表明,大多数指标在不同柘树优系果实间存在显著性差异。CZ1果大色艳,含糖量最高,质地最硬,但功能性成分含量较低;Zn、Cu和Se含量较高,Mn和Na等含量较低;满足高甜度、高硬度的需求,可作为鲜食与酿酒品种。CZ2果较小,种子最少,含糖量和硬度较低;花色苷含量较高,但游离氨基酸、N、P、K、S、B、Mo、Na、Fe等含量较低;满足种子少和高花色苷的需求,可作为鲜食品种。CZ3果中等,种子最多,SSC含量和Se含量最低,但功能性成分、Al、Fe、S等含量较高;满足高蛋白、总酚和黄酮的需求,可作为功能型开发品种。CZ4果大子多,中糖,游离氨基酸和花色苷含量最高,可溶性蛋白、总酚、N、K、P、S和Mn等含量较高;满足高总酚、游离氨基酸和花色苷的需求,可作为功能型开发品种。CZ5果中等,千粒质量、硬度、VC和花色苷最低,但Ca、B、Na和类胡萝卜素含量最高且可溶性果胶含量高;满足高类胡萝卜素和可溶性果胶的需求,可作为功能型开发品种。相关性分析表明指标间存在相关性,其中81对指标间呈显著相关($P < 0.05$),127对指标间呈极显著相关($P < 0.01$)。主成分分析共提取了7个主成分,累积方差贡献率高达93.320%。主成分评价结果显示CZ4、CZ3质量较好,而CZ5、CZ1和CZ2相对较差。聚类分析可以将5个柘果优系聚为3类,该结果基本与主成分分析结果一致。综上所述,5份柘果优系质量各有特色,果实间存在一定差异。基于本试验条件下,CZ4、CZ3综合质量较好,CZ5、CZ1和CZ2相对较差。其中CZ1可作为鲜食与酿酒用途品种,CZ2可作为鲜食品种,CZ3、CZ4和CZ5可作为功能型开发品种。从柘果中平均硒含量来看,柘果可以说是一种硒含量较高的水果。

关键词: 柘树; 柘果; 质量; 元素; 主成分

中图分类号: S567.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2026)02-0365-12

Comparative Analysis of Main Traits Indicators in *Cudrania tricuspidata* Fruits

QIAN Wei-hong¹, CHEN Yong², YIN Yi-ming¹, YAO Chong³, XU Shan-shan^{4*}

1. Huzhou Academy of Agricultural Sciences, Huzhou 313000, China

2. Huzhou Zheshu Agricultural Development Co., Ltd, Huzhou 313112, China

3. Huzhou Central Hospital, Huzhou 313000, China

4. Nanxun District Agricultural Technology Extension Service Center, Huzhou 313009, China

Abstract: This study aims to explore the characteristics of main trait indicators in *Cudrania tricuspidata* fruits and screen new lines for specific applications. We use mature fruits from five superior *Cudrania tricuspidata* lines as materials, measure 44 main fruits indicators, and then perform analysis and evaluation using significance tests, correlation analysis, principal component analysis (PCA) and cluster analysis. The results show that most indicators exhibit significant differences among the superior *Cudrania tricuspidata* lines. CZ1 has large and bright-colored fruits, the highest sugar content, and the firmest texture, but contains relatively low functional components. It shows high contents of Zn, Cu, and Se, and low contents of Mn and Na. It meets the requirements of high sweetness and firmness and can serve as a cultivar for fresh consumption and winemaking. CZ2 has small fruits, the fewest seeds, and low sugar content and firmness. It shows a high anthocyanin content, but low contents of free amino acids, N, P, K, S, B, Mo, Na, and Fe. It meets the requirements of few seeds and high anthocyanins and can serve as a fresh-eaten cultivar. CZ3 has medium-sized fruits, the most seeds, and the lowest SSC and Se contents, but high contents of functional components, Al, Fe, and S. It meets the requirements of high protein, total

收稿日期: 2025-09-24

修回日期: 2026-03-10

基金项目: 湖州市公益性应用研究项目(2023GZ50);浙江省软科学项目(2024C35128)

第1作者简介: 钱伟红(1978-),女,本科,农艺师,研究方向:农业栽培技术与推广。E-mail: 631788508@qq.com

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: tetemama2016@163.com

phenols, and flavonoids and can serve as a cultivar for functional product development. CZ4 has large fruits and many seeds, with a medium sugar content, and the highest contents of free amino acids and anthocyanins. It also shows high contents of soluble protein, total phenols, N, K, P, S, and Mn. It meets the requirements of high total phenols, free amino acids, and anthocyanins and can serve as a cultivar for functional product development. CZ5 has medium-sized fruit, with the lowest thousand-kernel weight, firmness, VC, and anthocyanin content, but the highest contents of Ca, B Na and carotenoids, as well as high contents of soluble pectin. It meets the requirements of high carotenoids and soluble pectin and can serve as a cultivar for functional product development. Correlation analysis shows that there are associations among the indicators, with 81 pairs showing significant correlations ($P < 0.05$) and 127 pairs highly significant ($P < 0.01$). PCA extracts seven principal components with a cumulative variance contribution rate of 93.320%. The principal component evaluation results show that CZ4 and CZ3 have good comprehensive quality, while CZ5, CZ1 and CZ2 are relatively poor. Cluster analysis divides the five superior *Cudrania tricuspidata* lines into three clusters aligning with PCA results. In summary, the five superior *Cudrania tricuspidata* lines each have distinctive fruit quality with certain differences among them. Under this study's conditions, CZ4 and CZ3 show better comprehensive quality, while CZ5, CZ1 and CZ2 are relatively poor. CZ1 can be used as a cultivar for fresh consumption and winemaking, CZ2 as a fresh-eating cultivar, and CZ3, CZ4 and CZ5 as cultivars for functional product development. According to the average selenium content, *Cudrania tricuspidata* fruit can be regarded as a fruit with high selenium content.

Keywords: *Cudrania tricuspidata*; *Cudrania tricuspidata* fruits; quality; element; PCA

柘 (*Cudrania tricuspidata* 或 *Maclura tricuspidata*), 又名柘树、黄桑或灰桑等, 隶属于桑科 (Moraceae) 柘属 (*Maclura*) 的一种落叶灌木或者小乔木, 主要分布在中国、韩国、朝鲜和日本等国家^[1,2]。柘树除了能食用、养蚕与作木材、染料等外^[3,4], 也是一种传统中药材, 其根、果、叶等均可入药^[5-8]。现代药理研究表明, 它对治疗炎症、肿瘤和肝病等多种疾病均有一定作用^[9-11]。所以, 柘树是一种集食用、经济、园林、生态和药用等价值于一身的优良树种。

柘果为柘树的果实, 又为山荔枝、水荔枝或佳子等名称, 在民间可以直接鲜食, 亦可用来浸酒、酿酒或加工成其它产品, 被誉为“长寿果”^[4], 尤其是在韩国加工应用广泛^[12]。果实中含有多糖、氨基酸、黄酮、酚酸、维生素和矿物质等生物活性物质^[13-15]。《浙江民间常用草药》中柘树干燥果实具有“跌打损伤”等功效^[8]。前人研究表明, 柘果具有抗癌^[16,17]、抗炎^[18]、抗肥胖^[19]、保护神经^[20]、抗氧化^[21]和治疗糖尿病^[22]等作用, 有很高的药用价值, 具有广阔的开发潜力和应用前景。目前, 有关柘果的研究主要集中在化学成分^[13-15]、产品开发^[23,24]和药理作用^[16-22]等方面, 且主要的一些研究成果来自于韩国, 而我国对于柘果研究处在起步阶段, 尤其缺乏对其不同种质资源果实品质性状的系统评价与比较分析。品种 (种质资源) 间的性状差异、关键品质指标间的相互关系及其形成机制尚不明确, 这严重制约了柘果资源的科学评价、品种选育与高值化综合利

用。为此, 本研究以 5 份柘树优系成熟果实为材料, 测定了果实主要物理性状 (单果质量、纵横径、颜色参数、种子数等 10 项)、内在品质 (可溶性固形物、硬度、维生素 C、类胡萝卜素等 13 项) 和元素 (N、P、K、S、Ca、Mg、Fe、Cu 等 21 项) 44 项指标, 运用显著性、相关性、主成分和聚类等方法进行综合分析, 以期了解柘树果实主要性状指标特点和产品开发应用等方面提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为湖州柘树农业发展有限公司初步选育出的 5 份柘树优系果实, 分别命名为 CZ1、CZ2、CZ3、CZ4 和 CZ5, 于 2024 年 8 月~11 月采自湖州柘树农业发展有限公司柘树种植基地, 位于浙江省湖州市长兴县桥南村精品水果园内 (119.82°N, 30.91°E)。在果实成熟期每个优系分别选取 10 棵树, 以果实达到完熟状态为采样标准, 于每棵树东西南北四个方向分别摘取 5 颗果实, 确保果实成熟度一致、大小均匀且无病虫害和机械损伤, 每次均由同一技术人员全程取样, 摘取后立即放进冰盒内带回湖州市农业科学院湖州市农业种质资源创新与应用重点实验室进行相关性状指标测定与处理。

1.2 试验方法

每个品种从所采果实中随机选取 45 粒果

实,再随机分为9组,每组5粒果实,首先,用于单果质量、纵横径、颜色参数和硬度指标测定;接着将每组果实压碎取汁后,立即进行可溶性固形物、可滴定酸含量的测定;然后再数种子数和测定种子鲜质量。最后,随机选取25粒果实用液氮速冻后,立即置于有干冰的样品箱中邮寄到检测公司,用于可溶性蛋白、可溶性糖、总酚、黄酮、花色苷、维生素C、类胡萝卜素和游离氨基酸及元素含量等指标测定。

1.2.1 主要物理性状测定 单果质量(g)和种子鲜质量(g)均采用1/100天平测定,千粒质量(g)按照种子平均鲜质量乘以1000计算,果实纵横径(mm)采用游标卡尺测定,种子数(粒)采用直接计数法测定,果实色泽参数 L^* 、 a^* 、 b^* 、 C 和 $h^*(^\circ)$ 采用NR10QC色差计测定。以上指标均在实验室自行测定。

1.2.2 内在品质测定 可溶性固形物含量(Soluble solid content, SSC, %)、可滴定酸含量(Titratable acidity, TA, %)分别采用数显糖度计和酸度计直接测定,硬度(kg/cm²)采用GY-4型数显硬度计测定,可溶性蛋白含量(mg/g)采用考马斯亮蓝比色法测定,可溶性糖(mg/g)采用蒽酮硫酸法测定,总酚含量(mg/g)采用福林酚比色法测定,黄酮含量(mg/g)采用硝酸铝盐比色法测定,花色苷含量(mg/kg)采用pH示差法测定,维生素C(Vitamin C, VC, mg/kg)含量采用2,6-二氯靛酚滴定法测定,类胡萝卜素含量($\mu\text{g/g}$)采用浸提比色法测定,可溶性果胶含量(mg/g)采用咔唑比色法测定,游离氨基酸含量(mg/g)采用茚三酮比色法测定。其中SSC、TA和硬度3个指标在实验室自行测定,其余指标均委托南京瑞源生物技术有限公司依据以上对应测定方法进行测定。

1.2.3 元素测定 N含量根据NY/T 2017-2011中方法测定^[25],单位g/kg;P、K等元素含量根据GB 5009.268-2016食品安全国家标准食品中多元素的测定中电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)方法测定^[26],单位为g/kg或mg/kg,样品前处理采用压力罐消解法,具体如下:称取2g左右柘果鲜样(精确至0.0001g)于聚四氟乙烯消解内罐,加硝酸5.0 mL浸泡过夜。盖好内盖,旋紧不锈钢外套,放入恒温干燥箱,80℃保持2h,120℃保持2h,再升至160℃保持4h,在箱内自然冷却至室温,打开后加热赶酸至近干,将消化液洗入

25 mL容量瓶中,用少量1.0%硝酸溶液洗涤内罐和内盖3次,洗液合并至容量瓶中并用1.0%硝酸定容至刻度,混匀备用。均委托南京瑞源生物技术有限公司依据以上对应测定方法进行测定。

1.2.4 主要仪器与设备 手持数显糖/酸度计,型号分别为PAL-1、PAL-EAZY ACID5,均为日本爱拓公司生产;水果数显硬度计,型号GY-4,浙江托普云农科技股份有限公司生产;万分之一天平,型号LE204E,梅特勒托利多科技有限公司生产;ICP-MS,型号NexION®1000,珀金埃尔默公司生产;美国MD全波长酶标仪,型号SpectraMax190,美国Molecular Devices公司生产等。

1.2.5 数据分析 所有数据均用SPSS 19.0软件进行显著性(Duncan's新复极差法, $P < 0.05$)、相关性(皮尔逊双尾检验)、主成分(步骤主要包括数据标准化、主成分提取等)和聚类(欧氏距离和组间平均联结法)分析等。

2 结果分析

2.1 主要物理性状分析

由表1可知,除横径、 L^* 、 b^* 和 h^* 指标外,5个柘树优系果实在单果质量等6个指标上存在显著性差异。CZ4与CZ1单果质量较重且无显著性差异,CZ3和CZ5中等,CZ2最轻。纵径以CZ1、CZ4和CZ3较大,且三者间无显著差异,而CZ2和CZ5较小。CZ3种子数最多,CZ4、CZ5和CZ1次之,CZ2最少。千粒质量CZ1最高,CZ3、CZ4和CZ2居中,CZ5最低。对于 a^* 值,CZ1、CZ4和CZ3无显著差异且较高,CZ5中等,CZ2最小。CZ1和CZ4的 C 显著高于CZ2,但与CZ3和CZ5无显著差异。综上所述,CZ1在单果质量、纵径、 a^* 和 C 上表现优异,CZ4的单果质量和纵径与CZ1相当,但种子数显著高于CZ1和CZ2;CZ3种子数最多,但千粒质量较低;CZ2和CZ5种子数少,千粒质量较低。

2.2 内在品质测定

由表2可知,五个柘树优系果实的多项内在品质指标存在显著差异。SSC和可溶性糖含量均以CZ1最高,CZ3最低。TA由大到小依次为CZ4、CZ1、CZ3、CZ5和CZ2。CZ1硬度最大,CZ5最软。含水量CZ2和CZ5较高,显著高于

表 1 果实主要物理性状分析
Table 1 Analysis of main physical traits of fruits

项目 Item	CZ1	CZ2	CZ3	CZ4	CZ5
单果质量/g	26.52±3.36 a	20.92±3.72 b	21.97±3.46 ab	26.79±5.35 a	22.29±4.88 ab
横径/mm	39.31±3.15 a	38.61±2.41 a	37.25±5.12 a	40.72±3.22 a	39.58±1.82 a
纵径/mm	36.13±1.79 a	30.12±2.25 b	33.73±1.75 a	34.90±2.5 a	30.80±2.46 b
种子数/粒	24.67±3.44 c	9.67±2.88 d	39.17±3.49 a	33.33±10.37 ab	27.50±7.42 bc
千粒质量/g	76.20±6.03 a	47.42±3.82 b	50.52±6.89 b	50.33±3.26 b	39.82±3.09 c
L^*	31.49±1.23 a	31.79±1.51 a	33.01±1.45 a	32.2±2.38 a	31.17±0.81 a
a^*	30.00±2.48 a	25.63±2.51 b	29.08±3.93 a	29.42±1.94 a	27.95±0.88ab
b^*	17.5±1.69 a	15.36±1.91 a	15.96±2.12 a	17.57±2.03 a	16.49±0.63 a
C	34.33±2.91 a	29.87±2.76 b	33.16±4.59 ab	34.27±2.67 a	32.46±0.88ab
h°	30.18±1.02 a	30.97±2.87 a	28.91±1.66 a	30.77±1.46 a	30.55±1.13 a

注:同一行内数据后不同英语小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Note: Lowercase letters behind data in a row indicate significance of differences at =0.05 level.

表 2 果实内在品质分析
Table 2 Analysis of intrinsic quality of fruits

项目 Item	CZ1	CZ2	CZ3	CZ4	CZ5
SSC/%	20.48±1.04 a	15.20±1.85 b	12.80±1.09 c	15.12±0.86 b	14.80±0.67 b
TA/%	0.84±0.20 ab	0.49±0.08 c	0.72±0.24 bc	1.02±0.13 a	0.60±0.25 c
硬度/(kg/cm ²)	4.00±0.76 a	1.73±0.21 b	1.38±0.67 bc	1.33±0.48 bc	0.94±0.24 c
含水量/%	81.29±0.55 ab	82.10±1.13 a	81.11±1.15 ab	80.15±1.20 b	81.91±0.71 a
可溶性蛋白/(mg/g)	7.21±0.21 b	6.79±0.33 b	7.96±0.30 a	8.22±0.33 a	5.97±0.27 c
可溶性糖/(mg/g)	135.82±1.10 a	97.53±1.77 b	72.37±3.08 d	88.52±2.70 c	89.52±1.21 c
可溶性果胶/(mg/g)	2.45±0.07 c	4.08±0.22 a	3.18±0.17 b	4.19±0.05 a	4.05±0.21 a
总酚/(mg/g)	1.16±0.02 b	0.98±0.04 c	1.61±0.19 a	1.46±0.02 a	1.45±0.03 a
游离氨基酸/(mg/g)	3.59±0.07 d	3.24±0.05 e	4.51±0.09 c	8.04±0.08 a	6.98±0.12 b
黄酮/(mg/g)	2.37±0.03 d	2.57±0.09 c	3.86±0.08 a	3.38±0.02 b	3.32±0.02 b
花色苷/(mg/kg)	124.17±13.59 b	156.80±1.175 a	104.60±11.17 bc	170.80±12.93 a	85.71±11.96 c
VC/(mg/kg)	793.40±8.12 a	738.23±9.28 b	802.87±29.75 a	708.47±2.72 bc	678.57±2.33 c
类胡萝卜素/(μg/g)	178.38±3.13 b	181.81±1.28 b	179.27±5.46 b	164.77±4.12 c	203.18±4.57 a

注:同一行内数据后不同英语小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Note: Lowercase letters behind data in a row indicate significance of differences at =0.05 level.

CZ4。可溶性蛋白含量依次为 CZ4>CZ3>CZ1>CZ2>CZ5。可溶性果胶含量 CZ2、CZ4、CZ5 较高,且显著高于 CZ1 和 CZ3。总酚、游离氨基酸和黄酮含量均以 CZ3、CZ4、CZ5 较高,CZ1、CZ2 较低。花色苷含量 CZ4 和 CZ2 较高,显著高于其他优系。VC 含量 CZ1 和 CZ3 显著高于其他 3 个优系。类胡萝卜素含量 CZ4 显著低于其他 4 个优系,CZ5 最高。综上分析,CZ1 在硬度、可溶性糖和 VC 含量上表现最优,但可溶性果胶、总黄酮、总花色苷较低;CZ4 在总酚、游离氨基酸、总花色苷上表现突出,但硬度和类胡萝卜素较低;CZ5 类胡萝卜素含量最高,但 TA、VC 含量最低;CZ2 和 CZ3 表现中等。各优系内在品质呈现互

补性差异,为其差异化利用提供了依据。

2.3 元素分析

由表 3 看出,除 As 和 Cd 外其他指标在 5 个优系间均存在显著性差异。大量元素中,N、P、K、S 和 Mg 含量均是 CZ4、CZ5 和 CZ3 较高,CZ1 和 CZ2 较低;CZ5 的 Ca 含量显著高于其他 4 个优系,且 4 者之间无显著性差异。微量元素中,Na 含量 CZ5 显著高于其他优系,CZ2 和 CZ3 较低;Fe 和 Zn 含量 CZ1 和 CZ3 较高,高于其他 3 个优系;CZ4 和 CZ1 的 Cu 含量显著高于其余 3 个优系,且这 3 者间差异不显著;B 和 Mo 含量 CZ5、CZ1 较高,CZ3、CZ4、CZ2 较低。对照 GB 2762-2022 食品安全国家标准 食品中污染物限量中发

现,其Cr、As、Pb、Cd和Hg含量均远低于国家安全标准限量,说明可安全食用与加工。由以上可知,CZ4果实中N、K、P、S等元素含量较高,但需注意其Pb、Hg含量;CZ5果实中Ca、B和Na含量

最高;CZ3果实中Al、Fe、S含量较高,但Se含量最低;CZ1果实中Zn、Cu和Se含量较高,但Mn和Na含量较低;CZ2果实中N、P、K、S、B、Mo、Na、Fe等元素含量较低。

表3 果实元素含量分析
Table 3 Analysis of fruit elements contents

项目 Item	CZ1	CZ2	CZ3	CZ4	CZ5
N/(g/kg)	2.76±0.08 c	2.22±0.10 d	3.49±0.14 ab	3.57±0.18 a	3.24±0.19 b
P/(g/kg)	0.64±0.02 b	0.49±0.01 c	0.74±0.04 a	0.72±0.01 a	0.69±0.03 a
K/(g/kg)	3.80±0.22 c	3.32±0.03 d	4.26±0.07 b	4.55±0.13 a	4.38±0.16 ab
S/(g/kg)	0.16±0 c	0.13±0 d	0.21±0.01 a	0.18±0.01 b	0.17±0.01 bc
Ca/(g/kg)	0.10±0.01 b	0.11±0.01 b	0.10±0b	0.11±0.01 b	0.13±0.01 a
Mg/(g/kg)	0.19±0.01 c	0.19±0.01 c	0.27±0.01 a	0.25±0.01 a	0.22±0.01 b
Na/(g/kg)	0.037 0±0.005 b	0.022 3±0.002 1 c	0.024 3±0.002 9 c	0.042 0±0.002 7 b	0.049 0±0.003 a
Fe/(mg/kg)	4.293 7±0.600 5 a	3.163±0.170 3 b	4.082 3±0.111 6 a	3.379 7±0.177 5 b	3.017±0.134 6 b
Cu/(mg/kg)	1.207 0±0.070 1 a	0.895 0±0.021 7 b	0.998 7±0.037 2 b	1.309 7±0.208 a	0.930 3±0.061 2 b
Zn/(mg/kg)	3.108 3±0.081 1 a	1.817 0±0.121 5 bc	2.009 3±0.131 9 b	1.561 7±0.131 6 d	1.696 0±0.181 1 cd
B/(mg/kg)	3.052 0±0.215 5 b	2.283 0±0.018 d	2.763 0±0.027 2 bc	2.680 7±0.238 5 c	4.223 7±0.208 1 a
Mn/(mg/kg)	1.959 3±0.121 2 d	2.321 3±0.067 4 c	2.995 0±0.035 0 b	4.382 3±0.129 0 a	4.348 0±0.215 3 a
Al/(mg/kg)	1.300 0±0.088 8 b	1.184 0±0.148 1 b	2.877 0±0.190 8 a	1.374 0±0.109 0 b	1.291 0±0.081 7 b
Mo/(mg/kg)	0.034 7±0.002 5 a	0.015 7±0.002 5 c	0.013 7±0.000 6 c	0.027 3±0.001 5 b	0.036 0±0.003 6 a
Se/(mg/kg)	0.017 0±0.002 6 a	0.012 7±0.002 1 b	0.008 7±0.002 1 c	0.009 7±0.001 5 bc	0.012 0±0.001 7 bc
Ni/(mg/kg)	0.192 7±0.014 5 b	0.189 3±0.013 6 b	0.267 3±0.008 5 a	0.248 7±0.026 7 a	0.131 7±0.002 5 c
Cr/(mg/kg)	0.021 7±0.003 5 a	0.025 3±0.003 5 a	0.016 0±0.003 5 b	0.009 3±0.001 5 c	0.011 7±0.002 5 bc
As/(mg/kg)	0.005 7±0.002 1 a	0.005 7±0.001 5 a	0.006 7±0.002 1 a	0.005 0±0.002 6 a	0.006 7±0.001 5 a
Pb/(mg/kg)	0.011 3±0.001 5 ab	0.008 3±0.001 5 b	0.013 7±0.002 5 a	0.014 7±0.002 9 a	0.012 7±0.002 1 a
Cd/(mg/kg)	0.001 3±0.000 6 a	0.001 0±0 a	0.001 3±0.000 6 a	0.001 3±0.000 6 a	0.001 7±0.000 6 a
Hg/(mg/kg)	0.001 3±0.000 6 e	0.006 0±0 b	0.005 0±0 c	0.008 3±0.000 6 a	0.002 0±0 d

注:同一行内数据后不同英语小写字母表示在0.05水平上差异显著。

Note: Lowercase letters behind data in a row indicate significance of differences at =0.05 level.

2.4 指标间相关性分析

由图1可以看出,44个指标间呈正相关或者负相关,其中81对指标间呈显著相关($P<0.05$),127对指标间呈极显著相关($P<0.01$),颜色越深其相关性越强。SSC与千粒鲜质量、可溶性糖、Zn和Se,硬度与千粒鲜质量、可溶性糖和Zn,种子数与总酚、P和S,千粒鲜质量与可溶性糖、Fe和Zn, a^* 与C, b^* 与C,可溶性蛋白与Ni,可溶性糖与Zn和Se,总酚与游离氨基酸、N、P、K、S和Mg,游离氨基酸与K和Mn,黄酮与N、S和Mg,Vc与Fe,N与P、K、S、Mg和Pb,P和K、S和Mg,K与S、Mg、Mn和Pb,S与Mg和Al,Na与B和Mo,呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数在0.75以上;硬度与可溶性果胶和Mn,千粒鲜质量与可溶性果胶,含水量与N, a^* 与 b^* ,可溶性蛋白与类

胡萝卜素,可溶性糖与黄酮,可溶性果胶与Vc、Fe和Zn,游离氨基酸与Cr,黄酮与Se,类胡萝卜素与Ni,N与Cr,P和Cr,K与Cr,Mg与Se,呈极显著负相关($P<0.01$),相关系数均在-0.75以下;这说明柘果指标间有较强的相关性。

2.5 主成分分析

主成分分析结果如表4所示,共选取了特征值>1的7个主成分,其值分别为12.995、9.375、7.169、4.357、3.802、2.085和1.277,对应方差贡献率分别为29.534%、21.308%、16.293%、9.902%、8.641%、4.740%和2.903%;累计方差贡献率93.320%。

由表5可知,第1主成分中主要包含N、黄酮、Mg、总酚、K和P等指标,其中N的载荷值最大,为0.924;第2主成分中包含Fe、千粒质量、可

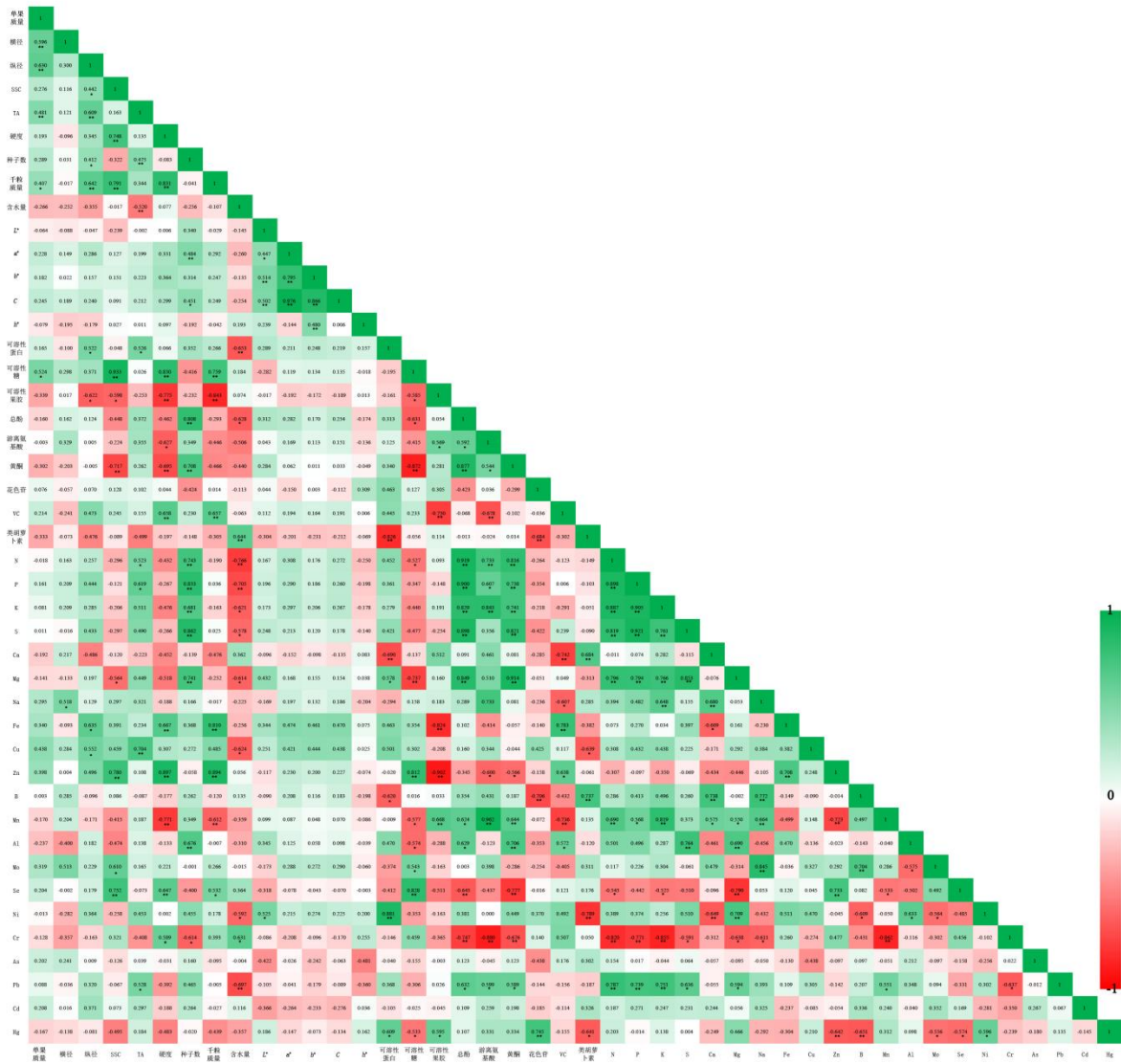


图 1 指标间相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis among indicators

注:**与*分别表示在0.01水平极显著相关和0.05水平显著相关。

Note: ** and * indicate statistically significant correlation and significant correlation at the 0.01 level and 0.05 level, respectively.

溶性果胶、纵径、VC 和 Ca 等指标,其中 Fe 的载荷值最大,为 0.901;第 3 主成分中包含 Mo、Na 和 B 等指标,其中 Mo 的载荷值最大,为 0.940;第 4 主成分中包含花色苷和 Al 等指标,其载荷值分别为 0.840 和 -0.626;第 5 主成分中主要包含 L*、a*、b* 和 C 等指标,它们载荷值均在 0.68 以上;第 6 主成分中主要包含 As 和 h* 等指标,其载荷值分别为 -0.633、0.620;第 7 主成分中主要包含 Cd 等指标,其载荷值为 0.694。

以 7 个主成分相对方差贡献率为权重,构建柘果质量评价函数 $F=0.317F_1+0.228F_2+$

$0.175F_3+0.106F_4+0.093F_5+0.051F_6+0.031F_7$, F 值越大说明其质量越好。由表 6 可知,5 个柘果优系果实质量综合得分从高到低依次为 CZ4、CZ3、CZ5、CZ1 和 CZ2,其中仅有 CZ2 得分小于零。综上可知,主成分分析结果可将不同柘树优系果实间差异区分开。

2.6 聚类分析

以柘果 44 项指标为基础值,对 5 个柘树优系进行聚类分析(图 2)。当距离选定 10 时,可聚为 3 类。第 1 类有 CZ3 和 CZ4,主成分中综合得分排第 1、2,综合质量表现好;第 2 类只有 CZ5,主

表4 主成分分析结果
Table 4 Principal component analysis results

成分 Component	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution rate	累积方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate
1	12.995	29.534	29.534
2	9.375	21.308	50.841
3	7.169	16.293	67.134
4	4.357	9.902	77.037
5	3.802	8.641	85.677
6	2.085	4.740	90.417
7	1.277	2.903	93.320

成分中综合得分排第3,综合质量表现中等;第3类有CZ1和CZ2,主成分中综合得分排第4、5,综合质量表现差。以上结果也能反映出5个柘树优系间的果实质量差异性,且与主成分分析结果一致。

3 讨论

果实性状指标包含众多指标,不仅是影响果实商品性和经济价值的重要因子,也是评价和筛选良种的关键参考因子^[27]。本研究测定了5个柘果优系的44项指标,研究发现大多数指标在5个柘果优系之间存在显著性差异。试验材料均来自于同一种植基地,基地内气候因素、栽培管理条件及土壤性质等因子基本一致,所以差异主要由其自身遗传特性造成的。已有研究表明,果实性状指标除受基因影响外,也受地理环境、土壤和气象等因素影响^[28,29]。果实颜色主要受叶绿素、类胡萝卜素、花青苷等影响^[30],研究发现,柘果色泽参数 L^* 、 b^* 、 h^* 表现稳定,但 a^* 和 C 有一定程度差异,同时不同柘果中花色苷和类胡萝卜素也存在差异,这主要是调控这些色素合成的关键酶基因在不同优系中表达程度存在差异,在今后的育种工作中,可以朝这方面努力而选育出多彩的柘果新品种。

对比同科桑属桑果可以发现,其果实含水量、可溶性糖、总酚、花色苷等含量均低于粤椹大10,SSC、TA、VC和黄酮等含量高于粤椹大10^[31];但张芳^[32]等人研究结果中15份野生桑果的总酚和黄酮及大多样品的SSC、VC花色苷和可溶性糖均低于柘果;K、Na、Mn、Ni、Cu、Zn等均高于桑果,Mg、Ca、Fe、Se、Mo等均低于桑果^[33]。对比同科构属构树果实可以发现,可溶性

糖、可溶性蛋白、酚类和黄酮均高于构树果实^[34]。综上可知,柘树果实富含总酚、黄酮和VC以及某些矿物质等成分。植物中主要次生代谢物包括酚类、萜类和含氮有机物等化合物,不仅对维持自身生长发育和适应环境极其重要,而且对人们获取健康饮食、药物开发提取也具有重要作用^[35,36]。本试验研究表明,柘果中总酚含量1.33 mg/g、黄酮含量3.10 mg/g和花色苷含量128.41 mg/kg,推测这些次生代谢物与柘果能作为中药材发挥治疗作用有一定关系。前人研究表明,柘果中主要含有黄酮类和氧杂蒽酮类等生物活性物质^[37],具有抗氧化、抗肿瘤等作用^[16,38,39]。所以,柘果可以说是一种具有广阔利用前景和开发价值的野生水果资源或者中药材资源。但针对柘树不同组织化学成分的分离、鉴定主要集中在根、茎等部位^[40],下一步,有必要摸清酚类组分以及生物碱、苯丙素等物质含量与生物活性等,进一步探明柘果的药理作用与应用前景。

矿质元素在果树生长发育、新陈代谢、品质形成和产量提高等方面发挥着不可或缺的作用^[41,42],也是组成人体中某些蛋白和激素等活性成分的必需物质,对维持人体正常生命活动具有举足轻重的作用^[43,44]。本研究发现,柘果中K含量最高,其低于枣^[45],但高于山楂^[46]、沙棘^[47]和梨^[48]等,它与Na比值为116.33,是典型的高钾低钠水果,研究表明,高钾低钠饮食或者食品有利于降低患高血压和心血管疾病等疾病的风险^[49-51]。硒是人体生长发育必需的元素之一,合理硒的摄入具有抗氧化、预防心力衰竭和降低患癌风险等作用^[52-54],但缺乏或过多摄入对人体健康会有不利影响,《中国居民膳食营养素参考摄入量》中建议每天成年人硒摄入量60~400 μg ^[55]。本

表 5 载荷矩阵
Table 5 Loading matrix

指标 Index	成分 1 Component 1	成分 2 Component 2	成分 3 Component 3	成分 4 Component 4	成分 5 Component 5	成分 6 Component 6	成分 7 Component 7
单果质量	-0.091	0.510	0.441	0.238	-0.335	-0.325	0.243
横径	0.094	0.072	0.577	0.296	-0.009	-0.573	0.075
纵径	0.128	0.769	0.250	0.061	-0.403	0.109	0.256
SSC	-0.538	0.486	0.554	0.218	-0.115	0.171	-0.071
TA	0.452	0.514	0.203	0.249	-0.468	0.109	0.092
硬度	-0.644	0.699	0.186	-0.044	0.158	-0.080	0.019
种子数	0.741	0.411	0.112	-0.343	0.064	-0.047	0.197
千粒质量	-0.398	0.833	0.254	-0.036	-0.091	0.152	-0.022
含水量	-0.678	-0.504	-0.056	-0.291	0.201	0.237	0.222
L^*	0.289	0.270	-0.304	0.031	0.785	0.151	0.052
a^*	0.210	0.494	0.255	0.039	0.681	-0.365	0.048
b^*	0.126	0.460	0.138	0.133	0.822	-0.082	0.166
C	0.181	0.492	0.233	0.070	0.727	-0.321	0.072
h^*	-0.145	-0.016	-0.313	0.143	0.499	0.622	0.340
可溶性蛋白	0.413	0.634	-0.465	0.290	-0.140	0.000	0.121
可溶性糖	-0.730	0.412	0.487	0.203	-0.050	0.050	-0.061
可溶性果胶	0.323	-0.777	-0.183	0.425	0.097	-0.168	0.041
总酚	0.915	0.100	0.083	-0.281	0.075	-0.032	-0.082
游离氨基酸	0.772	-0.271	0.376	0.394	0.020	0.021	0.011
黄酮	0.917	-0.097	-0.210	-0.296	-0.005	0.084	0.054
花色苷	-0.159	0.090	-0.427	0.840	-0.094	0.107	0.092
VC	-0.243	0.756	-0.341	-0.407	-0.088	-0.063	0.107
类胡萝卜素	-0.166	-0.622	0.419	-0.600	0.108	0.089	0.034
N	0.924	0.172	0.163	-0.075	-0.062	-0.043	-0.079
P	0.851	0.322	0.314	-0.167	-0.072	0.133	-0.037
K	0.902	0.078	0.354	0.051	0.017	0.125	-0.043
S	0.799	0.361	0.041	-0.411	-0.084	0.152	0.000
Ca	0.126	-0.715	0.517	0.022	0.218	0.177	0.043
Mg	0.916	0.182	-0.274	-0.070	0.028	0.139	0.025
Na	0.341	-0.166	0.869	0.246	0.034	0.102	-0.043
Fe	-0.065	0.901	-0.035	-0.275	0.154	0.088	-0.103
Cu	0.257	0.626	0.247	0.592	0.060	0.168	-0.073
Zn	-0.562	0.690	0.297	-0.235	-0.040	0.118	-0.154
B	0.236	-0.302	0.804	-0.354	0.223	0.102	-0.055
Mn	0.794	-0.443	0.286	0.247	0.091	0.061	-0.004
Al	0.500	0.352	-0.472	-0.626	-0.017	0.008	-0.021
Mo	-0.055	0.017	0.940	0.169	0.136	0.153	0.039
Se	-0.749	0.171	0.418	0.009	-0.098	0.226	-0.044
Ni	0.451	0.604	-0.623	0.149	0.027	0.101	-0.027
Cr	-0.856	0.119	-0.352	-0.171	0.052	0.032	-0.060
As	0.040	-0.105	0.091	-0.435	-0.345	-0.633	0.308
Pb	0.702	0.158	0.171	0.011	-0.376	0.161	-0.429
Cd	0.157	-0.134	0.379	-0.164	-0.402	0.310	0.694
Hg	0.393	-0.104	-0.655	0.602	-0.116	-0.063	0.123

表6 综合得分结果
Table 6 Comprehensive score results

项目 Item	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F
CZ1	-1.633	6.647	4.360	-0.006	0.899	1.472	1.552	1.9678
CZ2	-2.115	0.310	-0.673	1.126	0.834	0.557	1.757	-0.4364
CZ3	5.259	4.420	-0.408	-2.496	0.641	0.648	1.653	2.4811
CZ4	5.924	3.612	2.103	3.476	0.764	1.018	2.219	3.6271
CZ5	3.602	-1.213	5.316	-0.951	1.751	1.414	1.426	1.9684

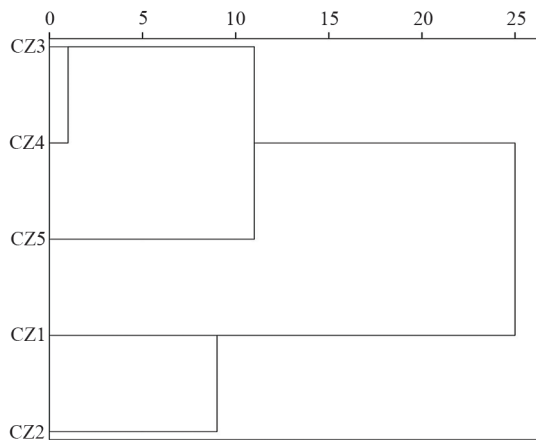


图2 不同柘果优系聚类树状图

Fig. 2 Dendrogram of different superior *Cudrania tricuspidata* lines

研究表明,5个柘果优系中硒含量在8.6~17.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 之间,除CZ3和CZ4之外,其含量均在10.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 以上,尤其是CZ1含量高达17.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$,参照重庆市地方标准《富硒农产品》(DB50/T705-2016)中对富硒水果的标准,CZ1、CZ2和CZ5三个优系可以达到富硒的水平;从5个柘果优系平均硒含量来看,其高于枣、葡萄、桃、猕猴桃、梨和苹果等生活中常见水果硒含量^[56],所以柘果是一种硒含量较高的水果。

相关性分析表明,大量元素N、P、K、S和Mg元素间成极显著正相关($P<0.01$),且它们均与果实中总酚、黄酮和种子数也呈极显著正相关($P<0.01$),与含水量呈显著($P<0.05$)或极显著负相关($P<0.01$)。这说明柘果中N、P、K、S和Mg大量元素间存在协同吸收,共同参与果实品质形成,且与酚类、黄酮等活性成分积累关系密切。所以在柘果施肥管理过程中,建议注意氮磷钾等元素间的平衡,避免单一元素过量导致拮抗。可溶性糖与黄酮呈极显著负相关($P<0.01$),其相关系数为-0.872,这可能反映了碳源在初生代谢(糖类积累)和次生代谢(黄酮合成)之间的分配

竞争。丙二酸单酰辅酶A和4-香豆酰辅酶A是黄酮类化合物生物合成起始前体,而糖不仅为其代谢活动提供能量,也是这两个前体物质合成的基础^[57],且植物中黄酮大多与糖结合成黄酮苷存在,也会消耗糖^[58]。所以,可以猜测果实中有糖分过多积累时,就可能流向或激活黄酮合成途径,提高黄酮的合成量,进而降低糖含量。已有研究表明,糖可以诱导多种植物花青素的合成^[59,60]。同时,在今后的柘果育种中,不能同时追求高糖和高黄酮的选育策略。Zn在植物体内参与光合作用、细胞分裂、细胞膜稳定和生长素合成等生命过程,也是碳酸酐酶等多种酶的组成成分或辅助因子^[61]。Zn与硬度、可溶性糖、种子千粒重等指标呈极显著正相关($P<0.01$),研究表明,碳酸酐酶依赖锌离子催化 CO_2 与水的可逆反应,直接促进光合碳同化效率^[62];适宜锌肥通过提高植物叶片中叶绿素含量和叶片净光合效率增强植物光合效率^[63]。可以推断柘树内Zn通过激活某些酶等活性,提升光合效率,进而调控果实中糖分积累。在实际生产中,建议通过增施锌肥调控果实质地和糖分积累,进而提升果实商品性。

4 结论

综上所述,在本试验条件下,5个柘果优系间存在差异,各有特色,可满足不同利用目标。优系CZ4、CZ3综合质量较好,CZ5、CZ1和CZ2相对较差;其中CZ1可以作为鲜食、酿酒等多用途品种,CZ2可以作为鲜食品种,CZ3、CZ4和CZ5可以作为功能型开发品种。同时,柘果中硒含量较高。

参考文献

- [1] 中国科学院《中国植物志》编辑委员会. 中国植物志(第23卷)[M]. 北京:科学出版社, 1998.
- [2] Song S H, Ki S H, Park D H, et al. Quantitative

- analysis, extraction optimization, and biological evaluation of *Cudrania tricuspidata* leaf and fruit extracts[J]. *Molecules*,2017,22(9):1489.
- [3] 赵家春,桑继法,刘文敏,等. 柘叶全龄饲蚕试验及其蚕丝特征研究[J]. *广东蚕业*,2021,55(08):4-6+13.
- [4] 龙滕周. 国内柘树种质资源及其开发利用研究进展[J]. *林业科技通讯*,2018(09):34-38.
- [5] 葛洪. 肘后备急方[M]. 北京:北京科学技术出版社,2016.
- [6] 孙思邈. 千金翼方[M]. 上海:第二军医大学出版社,2011.
- [7] 陈藏器. 本草拾遗[M]. 尚志钧,辑释. 合肥:安徽科学技术出版社,2003.
- [8] 浙江省卫生局. 浙江民间常用草药(第三集)[M]. 杭州:浙江人民出版社,1972.
- [9] Li X S, Yao Z L, Jiang X W, et al. Bioactive compounds from *Cudrania tricuspidata*: a natural anticancer source[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*,2020,60(3):494-514.
- [10] Ko W, Kim N, Lee H, et al. Anti-inflammatory effects of compounds from *Cudrania tricuspidata* in haca human keratinocytes[J]. *International Journal of Molecular Sciences*,2021,22(14):7472.
- [11] Shrestha J, Baek D J, Oh Y S, et al. Protective effect of *Cudrania tricuspidata* extract against high-fat diet induced nonalcoholic fatty liver disease through Nrf-2/HO-1 pathway[J]. *Molecules*,2021,26(9):2434.
- [12] Yong G R, Gebru Ya, Kim D W, et al. Chemical composition and antioxidant activity of steam-distilled essential oil and glycosidically bound volatiles from *Maclura tricuspidata* fruit[J]. *Foods*,2019,8(12):659.
- [13] 丁子康,李新月,赵猛,等. 低分子量柘果多糖的制备及其抗氧化活性研究[J]. *食品工业科技*,2023,44(19):39-46.
- [14] Kim D W, Lee W J, Gebru A Y, et al. Comparison of bioactive compounds and antioxidant activities of *Maclura tricuspidata* fruit extracts at different maturity stages[J]. *Molecules*,2019,24(3):567.
- [15] 程勇杰,陈小伟,蒋立新,等. 柘果酵素发酵过程氨基酸的变化规律研究[J]. *天然产物研究与开发*,2018,30(08):1402-1409.
- [16] Jiang X W, Cao C T, Sun W W, et al. Scandolone from *Cudrania tricuspidata* fruit extract suppresses the viability of breast cancer cells (MCF-7) in vitro and in vivo[J]. *Food and Chemical Toxicology*,2019(126):56-66.
- [17] Cho M A, Song K J, Lee J, et al. Physicochemical properties and anti-proliferative activity against human lung cancer cells of kombucha using sugar extracts of *Cudrania tricuspidata* fruits[J]. *Food Science and Preservation*,2024,31(4):673-681.
- [18] Lee J Y, Son H G, Koo Y, et al. Protective effects of *Cudrania tricuspidata* against *Helicobacter pylori*-induced inflammation in C57BL/6 mice[J]. *Journal of Medicinal Food*,2023,26(4):224-231.
- [19] Jo Y H, Choi K M, Liu Q, et al. Anti-obesity effect of 6, 8-diprenylgenistein, an isoflavonoid of *Cudrania tricuspidata* fruits in high-fat diet-induced obese mice[J]. *Nutrients*,2015,7(12):10480-10490.
- [20] Jee S C, Lee K M, Kim M, et al. Neuroprotective effect of *Cudrania tricuspidata* fruit extracts on scopolamine-induced learning and memory impairment[J]. *International Journal of Molecular Sciences*,2020,21(23):9202.
- [21] Cho S S, Yang J H, Seo K H, et al. *Cudrania tricuspidata* extract and its major constituents inhibit oxidative stress-induced liver injury[J]. *Journal of Medicinal Food*,2019,22(6):602-613.
- [22] Zhang X M, Hao X Y, Chen X Q, et al. The beneficial effects of the active components from *Maclura tricuspidata* fruits in the treatment of diabetes mellitus[J]. *Natural Product Research*,2024,38(21):3831-3835.
- [23] Jang K T, Ryu S I, Oh H S, et al. Quality characteristics and antioxidant of the fruit jelly according to different addition ratios of Kkujibong (*Cudrania tricuspidata*) fruit juice[J]. *Culinary Science & Hospitality Research*,2022,28(2):81-89.
- [24] 吴隽松,滕飞翔,杨留才. 响应面法优化柘果白兰地原酒发酵条件[J]. *中国酿造*,2024,43(02):216-220.
- [25] 中华人民共和国农业部. NY/T 2017-2011 植物中氮、磷、钾的测定[S]. 北京:中国农业出版社,2011.
- [26] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. GB5009.268—2016 食品安全国家标准食品中多元素的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [27] 盛玮,刘巧玲,刘丽燕. 基于因子分析的6个大果沙枣新品种果实性状综合评价[J]. *果树学报*,2024,41(09):1800-1810.
- [28] 张琪静. 甜樱桃果实品质研究进展[J]. *果树学报*,2025,42(10):2430-2439.
- [29] Lee D H, Son Y H, Jang J H, et al. The growth

- characteristics and the active compounds of *Cudrania tricuspidata* fruits in different cultivation environments in South Korea[J]. *Plants*, 2023(12): 2107.
- [30] 王雪婷,许学文,陈学好.园艺作物果肉颜色研究进展[J]. *分子植物育种*,2022,20(03):1014-1025.
- [31] 史星雲,徐珊珊,柳丽萍,等.基于主成分分析果桑品质评价模型的建立[J]. *中国果树*,2024(03):54-59.
- [32] 张芳,王晓红,罗泽虎,等.贵州省野生桑果实品质指标的主成分和聚类分析[J]. *果树学报*,2022,39(04):593-601.
- [33] 林建华,陈秋生,张强,等.桑葚中矿质元素的质谱分析方法的建立[J]. *天津农业科学*,2020,26(11): 19-22.
- [34] Xu Z G, Tang Y W, Wu J Y, et al. *Broussonetia papyrifera* fruits as a potential source of functional materials to develop the phytoremediation strategy [J]. *Environmental Challenges*,2022(7):100478.
- [35] 纪宏超,李正艳.基于质谱的未知次生代谢物结构解析研究进展与展望[J]. *生物技术通报*,2024,40(10):76-85.
- [36] Hilal B, Khan M M, Fariduddin Q. Recent advancements in deciphering the therapeutic properties of plant secondary metabolites: phenolics, terpenes, and alkaloids[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*,2024(211):108674.
- [37] Xin L T, Yue S J, Fan Y C, et al. *Cudrania tricuspidata*: an updated review on ethnomedicine, phytochemistry and pharmacology[J]. *RSC Advances*,2017,7(51):31807-31832.
- [38] 曹春廷.柘树果实抗氧化成分分析及其异黄酮 Scandelenone 诱导乳腺癌细胞凋亡通路研究[D].雅安:四川农业大学,2015.
- [39] 王丽芳.柘树果实活性成分 Warangalone 诱导宫颈癌细胞凋亡的分子机制研究[D].广州:暨南大学, 2017.
- [40] 张欣芮,李娜,卜桐,等.柘树不同药用部位本草考证、化学成分及药理作用研究进展[J]. *中成药*, 2023,45(03):865-874.
- [41] Trapp T, Bueno M M J, Siqueira D N G, et al. Nutrients' critical level propositions and sufficiency ranges aimed at high apple yield under subtropical climate[J]. *European Journal of Agronomy*,2025,164: 127523.
- [42] Wan R, Shi Z G, Li Y K, et al. Effect of potassium on the agronomic traits and fruit quality of Goji (*Lycium barbarum* L.)[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1):21477.
- [43] Bai S, Zhang M H, Tang S Y, et al. Effects and impact of selenium on human health, a review[J]. *Molecules*,2024,30(1):50.
- [44] Notova S V, Kazakova T V, Marshinskaya O V, et al. Metal-ligand forms of iron and zinc in the human body[J]. *Kazan Medical Journal*,2022,103(2):259-268.
- [45] 郭雪飞,周晓凤,冯一峰,等.不同枣品种果实矿质元素含量分析及综合评价[J]. *食品工业科技*,2018,39(22):262-269.
- [46] 齐秀娟,徐善坤,李作轩,等.山楂果实发育期矿质元素和色素含量的动态变化及相关关系[J]. *果树学报*,2006(02):214-217.
- [47] Sabir S M, Maqsood H, Hayat I, et al. Elemental and nutritional analysis of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* ssp. *turkestanica*) berries of Pakistani origin[J]. *Journal of Medicinal Food*, 2005, 8(4): 518-522.
- [48] Liu C G, Li H L, Ren A H, et al. A comparison of the mineral element content of 70 different varieties of pear fruit (*Pyrus ussuriensis*) in China[J]. *PeerJ*, 2023(11):e15328.
- [49] Farapti F, Buanasita A, Atmaka D R, et al. Potassium intake is associated with nutritional quality and actual diet cost: a study at formulating a low sodium high potassium (LSHP) healthy diet[J]. *Journal of Nutritional Science*,2022(11):e11.
- [50] Muiesan M L, Buso G, Agabiti Rosei C. Less sodium and more potassium to reduce cardiovascular risk[J]. *European Heart Journal Supplements*,2023, 25(B):108-110.
- [51] Kim B S, Yu M Y, Shin J. Effect of low sodium and high potassium diet on lowering blood pressure and cardiovascular events[J]. *Clinical Hypertension*, 2024,30(1):2.
- [52] Zhang Z L, Chang C, Zhang Y X, et al. The association between serum selenium concentration and prognosis in patients with heart failure in a Chinese population[J]. *Scientific Reports*,2021,11(1): 14533.
- [53] He L W, Zhang L, Peng Y L, et al. Selenium in cancer management: exploring the therapeutic potential [J]. *Frontiers in Oncology*,2025(14):1490740.
- [54] Hasani M, Agh F, Irandoost P, et al. Antioxidant effects of selenium in adult critically ill patients: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Topics in Clinical Nutrition*,2023,

- 38(3):224-238.
- [55] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量[M]. 北京:人民教育出版社,2023.
- [56] 聂继云,匡立学,李志霞,等. 中国主要落叶果树果实硒含量及其膳食暴露评估[J]. 中国农业科学,2015,48(15):3015-3026.
- [57] 林春草,陈大伟,戴均贵. 黄酮类化合物合成生物学研究进展[J]. 药学学报,2022,57(05):1322-1335.
- [58] 邹丽秋,王彩霞,匡雪君,等. 黄酮类化合物合成途径及合成生物学研究进展[J]. 中国中药杂志,2016,41(22):4124-4128.
- [59] Dai Z W, Meddar M, Renaud C, et al. Long-term in vitro culture of grape berries and its application to assess the effects of sugar supply on anthocyanin accumulation[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014(65):4665-77.
- [60] Liu X J, An X H, Liu X, et al. MdSnRK1.1 interacts with MdJAZ18 to regulate sucrose-induced anthocyanin and proanthocyanidin accumulation in apple[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2017(68):2977-90.
- [61] 张俊伶. 植物营养学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2021.
- [62] Rudenko N N, Borisova-Mubarakshina M M. Role of plant carbonic anhydrases[J]. *Plant Stress Physiology*, 2021:301.
- [63] 朱雪丰,黄玉兰,高玉刚. 叶面施用锌肥对桔梗生长的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2024,45(06):129-137.