



冉露霞,朱博,王俊杰,等.百香果不同组织抗氧化活性及矿质元素差异分析[J].江西农业大学学报,2023,45(6):1385-1396.

RAN L X,ZHU B,WANG J J,et al.Analysis of antioxidant activity and mineral elements in different tissues of passion fruit[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2023,45(6):1385-1396.

百香果不同组织抗氧化活性 及矿质元素差异分析

冉露霞¹,朱 博^{1,2*},王俊杰¹,刘 鹏¹,杨建军³

(1.赣南师范大学 生命科学院,江西 赣州 341000;2.国家脐橙工程技术研究中心,江西 赣州 341000;3.江西博君生态农业开发有限公司,江西 抚州 344000)

摘要:【目的】百香果副产物低价值利用造成环境污染和资源浪费。研究旨在明确紫色(TN类)和黄色(QM类)百香果汁、果皮、果籽的营养物质积累情况,为百香果副产物资源绿色循环利用提供理论依据。【方法】通过测定百香果各组织对DPPH[•]、ABTS[•]的半抑制浓度,Fe³⁺还原能力、总酚、总黄酮及矿质元素含量,并对百香果不同的组织抗氧化能力、活性物质和矿质元素含量进行聚类分析和相关性分析。【结果】百香果不同组织中,果籽的DPPH[•]、ABTS[•]清除能力,Fe³⁺还原能力,总酚、总黄酮含量均大于果汁和果皮,其中TN类百香果果籽清除DPPH[•]的能力分别约是果汁、果皮的37.87倍、29.06倍。TN类百香果总酚、总黄酮含量比QM类高。矿质元素K、Ca、B、Mn、Fe在果皮中含量最高,果籽中含量最低,其中果皮中K元素含量是果籽的10.16倍;Mg、P、Zn、Cu在果籽中含量最高,其中Zn元素在果籽中的含量为49.06 mg/kg,是果汁和果皮中Zn元素含量的3.11倍、3.71倍,果籽的Cu元素是果汁和果皮的6.88倍、5.59倍。大量元素Mg与P、Ca,K与Ca呈极显著正相关,K与P呈极显著负相关($P<0.01$)。且微量元素B与Mn、Fe,Cu与Zn、Mo的吸收代谢相互促进。大量元素K、Ca主要促进B、Mn、Fe的吸收代谢,Mg、P主要促进Cu、Zn、Mo的吸收代谢。大量元素Mg、P与百香果总酚、总黄酮含量、Fe³⁺还原能力及DPPH[•]的清除率,微量元素Cu、Zn、Mo与百香果抗氧化能力均有显著协同作用,而K、B对百香果总酚、总黄酮的积累有一定拮抗作用。【结论】百香果果籽抗氧化能力最强,活性物质及微量元素含量最高,果皮中大量元素含量高。矿质元素Mg、P、Cu、Zn、Mn与活性物质、抗氧化能力相互协同。百香果果籽、果皮副产物可作为提取活性物质的重要原料。

关键词:百香果;副产物;抗氧化活性;总酚;总黄酮;矿质元素;相关性分析

中图分类号:S663.9 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2023)06-1385-12



Analysis of Antioxidant Activity and Mineral Elements in Different Tissues of Passion Fruit

RAN Luxia¹,ZHU Bo^{1,2*},WANG Junjie¹,LIU Peng¹,YANG Jianjun³

(1.College of Life Science,Gannan Normal University,Ganzhou,Jiangxi 341000,China;2.National Navel Orange Engineering Research Center,Ganzhou,Jiangxi 341004,China;3.Jiangxi Bojun Ecological Agriculture Development Co.,Ltd.Fuzhou,Jiangxi 344000,China)

收稿日期:2023-08-21 修回日期:2023-10-06

基金项目:江西省重点研发计划项目(20203BBFL63065)

Project supported by the Science and Technology Department of Jiangxi Province(20203BBFL63065)

作者简介:冉露霞,硕士生,orcid.org/0009-0005-2670-0093,2332963894@qq.com;*通信作者:朱博,教授,博士生导师,主要研究方向为园艺产品加工,orcid.org/0000-0001-8700-2348,nczb615@163.com。

Abstract: [Objective] The low-value utilization of passion fruit by-products causes environmental pollution and waste of resources. It is crucial to clarify the accumulation of nutrients in purple (TN type) and yellow (QM type) passion fruit juice, peel, and seed in order to achieve green recycling of passion fruit by-product resources. [Method] The semi-inhibitory concentration of DPPH $\cdot$ and ABTS $^{+\cdot}$, Fe $^{3+}$ reduction ability, total phenolics, total flavonoids and mineral element contents in different tissues of passion fruit were determined, and the antioxidant capacity, active substances and mineral element contents in different tissues of passion fruit were analyzed by cluster analysis and correlation analysis. [Result] It was found that in different tissues of passion fruit, the DPPH $\cdot$, ABTS $^{+\cdot}$ scavenging ability, Fe $^{3+}$ reducing ability, total phenolic and total flavonoid contents of fruit seeds were higher than those of juice and peel, the DPPH $\cdot$ scavenging ability of TN passion fruit seeds was about 37.87 times and 29.06 times of that in juice and peel, respectively. In general, the contents of total phenols and total flavonoids in TN passion fruit were higher than those in QM passion fruit. The contents of mineral elements K, Ca, B, Mn and Fe were the highest in fruit peel and the lowest in fruit seed. The content of K element in fruit peel was 10.16 times of that in fruit seed. The contents of Mg, P, Zn and Cu were the highest in fruit seeds, the content of Zn in fruit seeds was 49.06 mg/kg, which was 3.11 and 3.71 times of that in fruit juice and peel. The content of Cu in fruit seeds was 6.88 and 5.59 times of that in fruit juice and peel. Mg, P, Zn and Cu were the highest in fruit seeds. There was a significant positive correlation between Mg and P, Ca, K and Ca, and a significant negative correlation between K and P ($P < 0.01$). The absorption and metabolism of trace elements B and Mn, Fe, Cu and Zn, Mo were promoted by each other. Major elements K and Ca mainly promoted the absorption and metabolism of B, Mn and Fe, and Mg and P mainly promoted the absorption and metabolism of Cu, Zn and Mo. A large number of elements Mg, P and passion fruit total phenol, total flavonoids content, Fe $^{3+}$ reduction ability and DPPH $\cdot$ clearance rate, trace elements Cu, Zn, Mo and passion fruit antioxidant capacity have a significant synergistic effect, while K, B has a certain antagonistic effect on passion fruit total phenol, total flavonoids accumulation. [Conclusion] Passion fruit seed has the strongest antioxidant capacity, the highest content of active substances and trace elements, and the content of macroelements in peel is high. The mineral elements Mg, P, Cu, Zn and Mn are synergistic with active substances and antioxidant capacity. The by-products of passion fruit seed and peel can be used as important raw materials for extracting active substances.

Keywords: passion fruit; by-products; antioxidant activity; total phenol; total flavonoids; mineral elements; correlation analysis

【研究意义】百香果 (*Passiflora edulis* Sims) 是西番莲科西番莲属藤本植物, 主要有紫果和黄果两大类, ‘台农一号’百香果高产稳产、抗逆性强、品质优良, ‘钦蜜九号’百香果耐高温、高糖低酸, 适合鲜食, 因此‘台农一号’和‘钦蜜九号’是主栽的紫色和黄色品种百香果^[1-2]。百香果是一种典型的药食同源优质营养热带水果, 喜温暖湿润气候, 我国广西、福建、海南、广东等地是百香果的优势产区^[3]。百香果作为短、平、快增收产业, 在贵州、江西、云南等贫困地区的推广种植面积逐年增加, 对助推乡村振兴起着重要作用^[4-5]。百香果常用做鲜食或果茶加工的配料, 榨取果汁后产生大量果皮、果籽等副产物, 约占整个果实的60%~70%^[6-7], 这些副产物通常被丢弃或低价值利用。从整体增值角度来看, 百香果果皮、果籽是潜在生物活性化合物的重要来源。【前人研究进展】研究表明百香果果皮、果籽含有不饱和脂肪酸、生育酚、花青素、黄酮、生物碱、多糖等营养物质成分, 它们对生物体的多种生理生物学功能起调节作用, 并对高血压、肿瘤、糖尿病、高血脂等多种疾病有防治作用^[8-11]。何丹等^[12]对紫果百香果果皮花色苷进行鉴定及抗氧化活性分析, 共鉴定出12种花色苷且发现花色苷纯化样品抗氧化能力优于维生素C。陈雪梅等^[13]发现百香果果皮中果胶、花色苷和膳食纤维的得率高达12.45%、1.21%、55.56%。不同产区的同一品种百香果, 因光照、降水、温度、土壤条件不同, 其代谢产物种类和含量也有所差异, 景继月^[14]对福建、四川、广西3产地百香果果皮多酚物质进行提取和分析, 发现四川产地样品的多酚类

化合物如荭草素、牡荆素、芦丁含量及抗氧化活性均最高。Xie 等^[15]研究比较云南、广东、福建、广西等地百香果功能物质的含量,结果发现云南的酚类化合物含量最高,广西和广东的维 C、云南和广西的胡萝卜素含量均较高。【本研究切入点】尽管相关研究已对百香果果皮或果籽的多酚类、多糖类、黄酮类物质及抗氧化活性进行了报道,但目前的研究大多局限于对百香果单一品种或同一组织部位的总酚、总黄酮等物质进行提取和分析^[16-18],而对不同产区百香果各组织部位的抗氧化特异性及矿质元素含量缺乏深入对比分析。【拟解决的关键问题】试验通过对比 3 个自然地理分区的‘台农一号’和‘钦蜜九号’百香果果汁、果皮、果籽的 DPPH·、ABTS·清除能力,Fe³⁺还原能力,总酚、总黄酮及矿质元素含量等,明确百香果不同组织营养品质差异,为开展百香果营养功能研究提供基础,对百香果副产物资源绿色循环利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料采用西南(云南、贵州)、华南(广东、海南)、华东(江西、福建)3 个自然地理分区的紫色百香果台农一号(TN 类)和黄色百香果钦蜜九号(QM 类)2 个品种,产地条件及采收时间见表 1,百香果采摘后立即寄往实验室,于 10℃冰箱冷藏,收齐样品后再集中处理。

表 1 百香果采收信息
Tab.1 Information table of passion fruit harves

品种 Variety	产地 Habitat	采收时间 Harvest time	经纬度 Longitude & latitude	年降水量/mm Annual precipitation	年平均气温/℃ Annual average temperature	编号 Number
台农一号 Tainong No.1	江西省赣州市寻乌县幸福小镇	2022.10.15	(24.94°N, 115.64°E)	1 650	18.9	TN-1
	广西壮族自治区钦州市钦南区久隆镇	2022.10.13	(22.06°N, 108.74°E)	1 600	22.2	TN-2
	海南省三亚市吉阳区吉阳镇	2022.10.11	(18.29°N, 109.58°E)	1 263	25.4	TN-3
	贵州省黔西南自治州贞丰县鲁容乡	2022.10.13	(25.43°N, 105.80°E)	1 298	20.0	TN-4
	福建省龙岩市漳平市和平镇	2022.10.14	(25.34°N, 117.43°E)	1 544	20.6	TN-5
	云南省文山市马塘镇	2022.10.10	(23.51°N, 104.05°E)	850	18.5	TN-6
钦蜜九号 Qinmi No.9	江西省赣州市寻乌县幸福小镇	2022.10.15	(24.94°N, 115.64°E)	1 650	18.9	QM-1
	广西壮族自治区防城港市防城区华石镇	2022.10.13	(21.76°N, 108.25°E)	2 823	21.9	QM-2
	海南省琼中县红毛镇	2022.10.11	(19.04°N, 109.70°E)	2 444	22.5	QM-3
	贵州省凯里市榕江县寨蒿镇	2022.10.15	(26.19°N, 108.62°E)	1 240	16.0	QM-4
	福建省龙岩市漳平市拱桥镇	2022.10.14	(25.25°N, 117.33°E)	1 490	20.0	QM-5
	云南省昆明市官渡区金马镇	2022.10.11	(25.04°N, 102.75°E)	1 011	17.0	QM-6

1.2 材料处理

清洗百香果后,将果汁(pulp)、果皮(peel)、果籽(seed)3 个部位分离,果皮和果籽打碎,混匀,分装后贮存于-80℃冰箱,待测。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 抗氧化活性测定 DPPH·、ABTS·清除率及 Fe³⁺还原能力(FRAP)根据前人报道的方法进行^[19],并略作修改。

试样提取液制备:称取 1 g 冻存于-80℃的百香果不同组织鲜样于 50 mL 离心管中,加入体积分数 70% 乙醇溶液 10 mL,超声提取条件为:30℃、500 W、30 min,结束后 7 800 r/min,室温下离心 10 min,上清液即为试样提取液。将上述提取液用体积分数 70% 的乙醇稀释成不同浓度样液,用于测定 DPPH·、ABTS·的清除率。

DPPH·清除率测定:100 μL 样液加入 96 孔板中,再加入 100 μL 无水乙醇,记为 A₁,100 μL 无水乙醇加 100 μL DPPH 试剂记为 A₂,100 μL 样液加 100 μL DPPH 试剂记为 A₃,均匀混合 15 s,将平板置于黑暗环境中孵育 30 min,酶标仪测定 517 nm 处的 OD 值,以维生素 C 作为阳性对照。DPPH·的清除率计算公式如下:

$$\text{DPPH}\cdot\text{清除率} = \left[1 - \frac{A_3 - A_1}{A_2} \right] \times 100\% \quad (1)$$

ABTS⁺·清除率测定:各取0.2 mL ABTS储备液(7.4 mmol/L)+K₂S₂O₈储备液(2.6 mmol/L)置于试管中,混合均匀,置于室温黑暗环境12 h,使用时用无水乙醇稀释,使OD₇₃₄=0.7±0.02,得ABTS工作液。取50 μL上述不同浓度的样液于96孔板中,再加入100 μL ABTS工作液,混匀15 s,静置6 min,测得734 nm处的OD值,记为A;无水乙醇代替样液,测得734 nm的OD值,记为B。以维生素C作为阳性对照。ABTS⁺·清除率计算公式如下:

$$\text{ABTS}\cdot\text{清除率} = \frac{B - A}{B} \times 100\% \quad (2)$$

根据DPPH⁺·、ABTS⁺·清除率,用SPSS 25.0分析软件计算DPPH⁺·、ABTS⁺·的半抑制浓度(half maximum inhibitory concentration, IC₅₀)。

铁离子还原能力(FRAP)测定:将CH₃COONa溶液(300 mmol/L, pH3.6)、TPTZ(10 mmol/L)及FeCl₃溶液(20 mmol/L)按10:1:1混合均匀后得FRAP工作液,37℃水浴备用。取试样提取液50 μL加入96孔板中,再加入120 μL现配的FRAP工作液和80 μL的水,混合均匀,暗处静置反应15 min,在593 nm处测定OD值。以维生素C溶液作标准曲线,得拟合方程为:y=0.030 7x+0.117 7(R²=0.998 9)。将吸光值代入标准曲线得样品FRAP测定值。

1.3.2 总酚测定 试样提取液制备:称取1 g百香果不同组织鲜样,加入6 mL 70%(体积分数)的乙醇,涡旋混合1 min,在350 W,25℃条件下超声提取30 min,10 000 r离心5 min,取上清液待测。

采用Folin-Ciocalte法^[20]测定,取10 μL试样提取液于2 mL EP管中,加入690 μL去离子水稀释,再加入100 μL福林酚试剂,摇匀,静置6 min,再加入10.6%的Na₂CO₃溶液400 μL,摇匀,45℃水浴反应15 min后,取200 μL反应液于96孔板,酶标仪测定760 nm处各样液吸光值。以没食子酸标准品作标准曲线,得拟合方程为:y=0.005 5x+0.057 3(R²=0.998 4),从线性标准曲线获得没食子酸浓度表示总酚含量。

1.3.3 总黄酮测定 参照文献[21]的方法测定并略作修改,取1.3.2中的试样提取液100 μL于10 mL试管中,加入200 μL 5%的NaNO₂溶液,摇匀静置6 min,再加入200 μL 10%的Al(NO₃)₃溶液,摇匀静置6 min,最后加入400 μL浓度为1 mol/L的NaOH,加水定容至5 mL,摇匀静置15 min,取200 μL反应液在415 nm处测定吸光值,以芦丁标准品作标准曲线,得拟合方程为:y=0.041x+0.048 5(R²=0.996 2)。

1.3.4 矿质元素测定 将百香果果汁、果皮、果籽真空冷冻干燥至恒重,磨粉,称0.2 g样品粉末于石英坩埚中,电炉碳化至样品变为无烟灰白色粉末,500℃马弗炉中灰化5~6 h,待降至室温后,每个盛有样品的坩埚缓慢加入10 mL 5%的HNO₃溶液,静置硝化0.5 h,再将硝化后的样品滤入10 mL的离心管得到母液,母液稀释10倍用于微量元素测定,稀释100倍用于大量元素测定。用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 7900, USA)测定P、K、Ca、Mg、B、Mn、Fe、Cu、Zn、Mo元素的含量。

1.4 数据处理

每个指标进行3次平行测定,Excel 2019进行数据整理,采用SPSS 25.0新复极差法对数据进行差异显著性分析(P<0.05),Origin 2021进行热图绘制和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 百香果各组织抗氧化活性测定

百香果果汁、果皮、果籽乙醇提取物抗氧化活性结果见表2。两种百香果不同组织对DPPH⁺·的清除率由大到小依次为果籽、果皮和果汁,果籽和果皮对DPPH⁺·的清除能力为TN类高于QM类,TN类百香果果籽清除DPPH⁺·的能力分别约为果汁、果皮的37.87倍、29.06倍,QM类百香果果籽对DPPH⁺·的清除能力分别是果汁、果皮6.32倍、3.79倍。果皮、果籽清除DPPH⁺·最强的TN类百香果分别是TN-3、TN-1。

TN类百香果果皮和果籽清除ABTS⁺·的能力差距不大但均比果汁强;QM类百香果清除ABTS⁺·的能力由大到小依次为果皮、果籽和果汁。其中清除ABTS⁺·能力最强的TN类和QM类百香果果皮分别是TN-5、QM-2。

两种百香果 Fe³⁺还原能力由大到小依次为果籽、果皮、果汁,这与百香果各组织对 DPPH•的清除能力有相同结果,说明百香果不同组织中,果籽的抗氧化能力最强,其次是果皮。不同产地样品中,Fe³⁺还原能力最强的TN类和QM类百香果果籽分别是TN-3、QM-6。

表 2 百香果果汁、果皮、果籽抗氧化活性差异
Tab.2 Differences in antioxidant activity of passion fruit juice, peel and seed

样品 Specimen	DPPH•半抑制浓度/(mg·mL ⁻¹) DPPH• Semi-inhibitory concentration			ABTS ⁺ •半抑制浓度/(mg·mL ⁻¹) ABTS ⁺ •Semi-inhibitory concentration			Fe ³⁺ 还原能力/(μmol·L ⁻¹) Fe ³⁺ reduction ability		
	果汁 Pulp	果皮 Peel	果籽 Seed	果汁 Pulp	果皮 Peel	果籽 Seed	果汁 Pulp	果皮 Peel	果籽 Seed
TN-1	48.80±1.14 ^d	7.60±0.30 ^h	1.01±0.03 ⁱ	0.75±0.12 ^d	0.26±0.02 ^b	0.26±0.03 ^{cd}	3.17±0.08 ⁱ	39.36±0.36 ^b	44.60±0.42 ^{ab}
TN-2	76.63±3.12 ^a	15.73±0.45 ^f	1.95±0.12 ^g	1.73±0.12 ^{ab}	0.20±0.01 ^c	0.33±0.02 ^a	4.61±0.12 ^{hi}	35.59±0.67 ^c	45.26±0.67 ^a
TN-3	73.67±2.83 ^a	4.46±0.23 ^j	1.98±0.09 ^g	1.65±0.09 ^b	0.21±0.02 ^c	0.27±0.01 ^{bc}	10.81±0.13 ^c	42.04±1.32 ^a	45.87±0.78 ^a
TN-4	65.67±2.30 ^b	9.14±0.32 ^g	1.58±0.07 ^h	1.58±0.19 ^{bc}	0.37±0.03 ^a	0.31±0.02 ^{ab}	5.14±0.12 ^h	36.87±1.27 ^c	45.25±1.21 ^{bc}
TN-5	52.23±2.32 ^c	5.96±0.22 ⁱ	1.98±0.09 ^g	1.88±0.11 ^a	0.13±0.01 ^d	0.25±0.02 ^{cde}	7.59±0.14 ^g	31.95±1.73 ^d	40.88±1.23 ^c
TN-6	53.40±2.81 ^c	4.47±0.21 ^j	1.26±0.05 ⁱ	1.43±0.14 ^c	0.26±0.02 ^b	0.21±0.01 ^{ef}	11.44±0.23 ^d	40.13±0.96 ^b	43.14±1.43 ^{abc}
QM-1	45.10±1.70 ^e	16.03±0.81 ^f	7.30±0.26 ^b	0.34±0.16 ^c	0.13±0.03 ^d	0.17±0.02 ^{fg}	4.22±0.16 ^j	15.52±0.76 ^g	41.63±0.78 ^c
QM-2	24.80±0.46 ^g	20.73±1.21 ^e	8.34±0.29 ^a	0.37±0.03 ^c	0.05±0.00 ^f	0.15±0.01 ^{gh}	14.88±0.26 ^a	19.91±0.78 ^f	41.21±0.67 ^c
QM-3	41.70±0.40 ^{ef}	22.47±0.76 ^e	3.49±0.31 ^f	0.28±0.02 ^e	0.07±0.00 ^{ef}	0.12±0.01 ^h	12.32±0.28 ^c	15.63±0.92 ^g	43.13±0.45 ^{abc}
QM-4	43.23±0.47 ^{ef}	21.87±0.42 ^{ab}	4.80±0.21 ^d	0.22±0.01 ^e	0.06±0.00 ^{ef}	0.23±0.02 ^{de}	9.86±0.16 ^f	25.63±0.37 ^e	41.37±0.56 ^c
QM-5	40.90±0.87 ^f	23.40±0.53 ^b	4.10±0.17 ^e	0.18±0.03 ^e	0.06±0.00 ^{ef}	0.16±0.02 ^{gh}	9.71±0.27 ^f	16.80±0.67 ^g	40.89±0.67 ^c
QM-6	24.03±1.00 ^g	30.37±0.15 ^a	6.73±0.31 ^c	0.26±0.02 ^e	0.08±0.01 ^e	0.17 ^f ±0.01 ^g	14.24±0.31 ^b	24.87±0.87 ^e	43.68±0.78 ^{abc}

同列字母相同表示差异不显著($P>0.05$),不同表示差异显著($P<0.05$)。
The same lowercase letter in the same column indicated no significant difference ($P>0.05$), different lowercase indicated no significant difference($P>0.05$).

2.2 百香果各组织活性物质测定

百香果不同组织活性物质含量见表3。百香果各组织总酚含量由大到小依次为果籽、果皮和果汁,这与百香果各组织对 DPPH•的清除能力、Fe³⁺还原能力有相同的结果,果籽总酚含量最高的TN类和QM类百香果分别是TN-3、TN-6、QM-4。不同的百香果同一组织总酚含量也有所差异,TN类百香果果籽、果皮总酚含量比QM类分别高4.32倍、1.64倍,而QM类百香果果汁总酚含量比TN类高1.36倍。

表 3 百香果果汁、果皮、果籽活性物质含量差异
Tab.3 Difference of active substance content in passion fruit juice, peel and seed

样品 Specimen	总酚/(mg·g ⁻¹) Total phenols			总黄酮/(mg·g ⁻¹) Total flavonoids		
	果汁 Pulp	果皮 Peel	果籽 Seed	果汁 Pulp	果皮 Peel	果籽 Seed
TN-1	0.23±0.02 ^d	1.54±0.07 ^a	12.01±0.13 ^b	0.56±0.03 ^{bcd}	0.72±0.02 ^c	5.00±0.52 ^{bc}
TN-2	0.07±0.00 ^e	1.08±0.02 ^{cd}	3.61±0.28 ^d	0.60±0.03 ^{bcd}	0.74±0.01 ^c	4.85±0.37 ^c
TN-3	0.31±0.02 ^{bcd}	1.66±0.12 ^a	5.78±0.25 ^c	0.53±0.07 ^{bcd}	1.18±0.01 ^a	6.12±0.32 ^{abc}
TN-4	0.37±0.03 ^{abc}	1.20±0.13 ^{bc}	5.00±0.26 ^c	0.58±0.06 ^{bcd}	0.87±0.02 ^b	6.26±0.27 ^{ab}
TN-5	0.28±0.02 ^{cd}	1.21±0.21 ^{bc}	5.01±0.17 ^c	0.61±0.03 ^{bc}	0.60±0.03 ^c	5.05±0.37 ^{bc}
TN-6	0.42±0.04 ^{ab}	1.66±0.12 ^a	14.41±0.98 ^a	0.50±0.03 ^{cd}	0.97±0.04 ^b	6.14±0.28 ^{abc}
QM-1	0.38±0.03 ^{abc}	0.75±0.23 ^e	1.12±0.09 ^f	0.56±0.02 ^{bcd}	0.27±0.02 ^e	6.56±0.26 ^a
QM-2	0.28±0.02 ^{cd}	0.71±0.14 ^e	1.53±0.12 ^{ef}	0.35±0.03 ^d	0.30±0.01 ^e	7.26±0.76 ^a
QM-3	0.43±0.03 ^{ab}	0.57±0.23 ^e	2.29±0.15 ^e	0.67±0.06 ^{abc}	0.25±0.02 ^e	6.48±0.76 ^a
QM-4	0.31±0.03 ^{bcd}	1.45±0.27 ^{ab}	2.33±0.15 ^e	0.54±0.05 ^{bcd}	0.44±0.02 ^d	6.55±0.35 ^a
QM-5	0.44±0.02 ^a	0.83±0.17 ^{de}	1.71±0.16 ^{ef}	0.86±0.06 ^a	0.27±0.02 ^e	6.20±0.76 ^{abc}
QM-6	0.44±0.04 ^a	0.79±0.16 ^e	1.62±0.17 ^{ef}	0.77±0.04 ^{ab}	0.36±0.03 ^{de}	6.59±0.76 ^a

同列字母相同表示差异不显著($P>0.05$),不同表示差异显著($P<0.05$)。
The same lowercase letter in the same column indicated no significant difference ($P>0.05$), different lowercase indicated no significant difference($P>0.05$).

不同组织中,两种百香果果籽总黄酮含量均最高,果籽总黄酮含量分别为果汁和果皮的10.31倍、10.48倍,果籽总酚含量是果汁和果皮的14.24倍、4.20倍。果籽总黄酮含量最高的TN类和QM类百香果分别是TN-6和QM-2。

2.3 百香果各组织矿质元素的测定

TN类和QM类百香果果汁、果皮、果籽中矿质元素含量如表4~表6所示。果汁、果皮、果籽中矿质元素含量分别为0.08~143.03,0.09~455.35,0.16~74.19 mg/kg。4种大量元素在百香果不同组织中含量有较大差异,K、Ca元素在果皮中含量最高,Mg、P元素在果籽中含量最高。其中果皮中K元素的含量分别是果汁、果籽中K元素含量的3.24倍、10.16倍。

表4 百香果果汁矿质元素差异分析

Tab.4 Difference analysis of mineral elements in passion fruit juice

样品	矿质元素含量/(mg·kg ⁻¹) Mineral element content									
Specimen	Mg	P	K	Ca	B	Mn	Fe	Cu	Zn	Mo
TN-1	9.52±0.06 ^b	9.60±0.76 ^c	143.03±1.76 ^a	15.65±0.23 ^{bed}	11.10±0.79 ^a	5.03±0.78 ^{abc}	46.50±0.32 ^a	6.19±0.39 ^{ab}	15.18±0.08 ^{cd}	0.15±0.03 ^{ab}
TN-2	8.88±0.76 ^b	14.50±0.95 ^a	102.07±2.75 ^{bc}	15.58±0.53 ^{bed}	9.01±0.37 ^b	5.46±0.79 ^{abc}	36.81±0.79 ^a	8.32±0.17 ^a	31.54±0.07 ^a	0.21±0.01 ^a
TN-3	8.16±0.32 ^b	8.53±0.79 ^{bc}	96.75±0.96 ^{bc}	16.09±0.38 ^{bc}	7.04±0.27 ^{cde}	4.34±0.34 ^{bc}	33.50±1.21 ^a	4.34±0.23 ^{bc}	11.64±0.09 ^{de}	0.21±0.00 ^a
TN-4	8.00±0.46 ^b	10.78±0.94 ^c	86.90±1.76 ^{bed}	14.90±0.32 ^{bed}	7.67±0.19 ^{bed}	3.80±0.27 ^c	41.42±1.32 ^a	6.25±0.31 ^{ab}	19.80±0.06 ^b	0.14±0.00 ^{ab}
TN-5	6.49±0.73 ^b	9.44±0.78 ^c	84.60±1.73 ^{bed}	9.87±0.12 ^{cd}	3.23±0.08 ^f	5.79±0.93 ^{ab}	32.76±1.67 ^a	2.58±0.21 ^c	15.82±0.04 ^{bed}	0.09±0.00 ^b
TN-6	8.36±0.51 ^b	10.60±0.93 ^c	106.63±2.01 ^{bed}	16.19±0.76 ^{bc}	8.64±0.74 ^{bc}	4.80±0.36 ^{abc}	30.94±0.97 ^a	4.46±0.27 ^{bc}	12.43±0.09 ^{de}	0.14±0.01 ^{ab}
QM-1	7.18±0.32 ^b	11.07±0.57 ^c	110.56±2.03 ^b	10.23±0.76 ^{cd}	6.05±0.94 ^{de}	6.41±0.29 ^a	33.76±1.89 ^a	3.77±0.15 ^{bc}	17.53±0.76 ^{bc}	0.18±0.01 ^{ab}
QM-2	8.26±0.28 ^b	10.04±0.98 ^c	91.41±0.79 ^{bed}	17.46±0.36 ^b	2.58±0.32 ^f	3.87±0.38 ^{bc}	33.29±0.96 ^a	4.10±0.28 ^{bc}	13.69±0.74 ^{cde}	0.08±0.00 ^b
QM-3	8.27±0.79 ^b	10.09±0.27 ^c	82.13±1.87 ^{bed}	8.77±0.55 ^d	5.45±0.32 ^e	4.53±0.71 ^{abc}	27.48±0.37 ^a	2.01±0.06 ^c	9.79±0.37 ^e	0.08±0.00 ^b
QM-4	6.59±0.73 ^b	7.73±0.73 ^c	61.45±0.97 ^d	8.70±0.37 ^d	2.55±0.19 ^f	4.62±0.28 ^{abc}	31.66±0.79 ^a	1.89±0.12 ^c	10.20±0.37 ^e	0.10±0.00 ^{ab}
QM-5	8.99±0.93 ^b	12.33±0.32 ^c	71.03±0.99 ^{cd}	15.01±0.73 ^{bed}	2.25±0.36 ^f	5.18±0.73 ^{abc}	48.56±0.87 ^a	4.72±0.09 ^{bc}	19.89±0.39 ^b	0.18±0.01 ^{ab}
QM-6	12.61±0.98 ^a	13.30±0.73 ^{ab}	140.88±2.37 ^a	24.99±0.14 ^a	5.54±0.38 ^e	4.22±0.23 ^{bc}	41.81±0.39 ^a	4.51±0.03 ^{bc}	11.60±0.28 ^{de}	0.11±0.00 ^{ab}

同列字母相同表示差异不显著($P>0.05$),不同表示差异显著($P<0.05$)。

The same lowercase letter in the same column indicated no significant difference ($P>0.05$), different lowercase indicated no significant difference ($P>0.05$).

表5 百香果果皮矿质元素差异分析

Tab.5 Difference analysis of mineral elements in passion fruit peel

样品	矿质元素含量/(mg·kg ⁻¹) Mineral element content									
Specimen	Mg	P	K	Ca	B	Mn	Fe	Cu	Zn	Mo
TN-1	12.75±0.87 ^{ab}	9.27±0.27 ^c	321.82±2.89 ^{bc}	53.10±2.16 ^{bed}	15.61±0.75 ^{abc}	33.31±0.38 ^{de}	76.63±0.56 ^b	7.25±0.26 ^a	13.09±0.17 ^{bede}	0.09±0.00 ^b
TN-2	11.12±0.76 ^b	17.12±0.75 ^a	313.52±2.92 ^{bc}	43.61±2.17 ^d	15.71±0.53 ^{abc}	41.37±0.96 ^{bed}	54.45±0.37 ^{cd}	6.35±0.24 ^{ab}	16.57±0.75 ^{abc}	0.16±0.01 ^b
TN-3	14.92±0.97 ^{ab}	6.98±0.37 ^{cd}	260.8±3.02 ^{cd}	73.43±2.57 ^{ab}	15.29±0.32 ^{abc}	22.81±0.76 ^f	60.45±0.21 ^c	5.77±0.17 ^{ab}	9.46±0.34 ^{de}	0.16±0.02 ^b
TN-4	18.53±0.32 ^a	14.04±0.67 ^b	256.56±3.13 ^{cd}	66.28±2.16 ^{bc}	19.26±0.76 ^a	12.81±0.56 ^e	99.95±0.31 ^a	4.40±0.17 ^{ab}	15.10±0.56 ^{abcd}	0.36±0.03 ^a
TN-5	8.71±0.75 ^{ab}	14.13±0.32 ^b	371.03±2.76 ^b	36.53±2.17 ^d	12.99±0.73 ^c	42.38±0.37 ^{bc}	93.21±0.52 ^{ab}	8.41±0.28 ^a	20.56±0.37 ^a	0.24±0.02 ^{ab}
TN-6	10.76±0.31 ^b	15.04±0.94 ^{ab}	255.99±2.67 ^{cd}	44.71±2.53 ^{cd}	15.27±0.34 ^{abc}	31.39±0.67 ^{ef}	85.54±0.47 ^{ab}	3.86±0.25 ^{ab}	10.46±0.67 ^{de}	0.13±0.01 ^b
QM-1	18.99±0.79 ^a	15.45±0.38 ^{ab}	455.35±3.41 ^a	83.41±2.17 ^a	18.09±0.79 ^{ab}	49.44±0.78 ^b	45.35±0.12 ^{cd}	4.47±0.26 ^{ab}	18.04±0.32 ^{ab}	0.26±0.02 ^{ab}
QM-2	14.15±0.28 ^{ab}	6.58±0.93 ^{cd}	313.52±4.12 ^{bc}	56.09±2.18 ^{bed}	18.21±0.98 ^{ab}	34.28±0.89 ^{cde}	42.87±0.26 ^{cd}	4.50±0.14 ^{ab}	10.61±0.31 ^{de}	0.11±0.01 ^b
QM-3	13.99±0.37 ^{ab}	9.16±0.38 ^c	310.65±3.16 ^{bc}	72.93±3.61 ^{ab}	14.18±0.43 ^{bc}	28.79±0.37 ^{ef}	45.54±0.35 ^{cd}	2.18±0.26 ^b	7.21±0.72 ^e	0.11±0.01 ^b
QM-4	12.26±0.28 ^{ab}	4.94±0.23 ^d	181.59±2.76 ^d	51.95±1.23 ^{bed}	8.43±0.32 ^d	25.82±0.89 ^{ef}	38.84±0.27 ^d	6.44±0.27 ^{ab}	9.09±0.17 ^{de}	0.14±0.01 ^b
QM-5	13.58±0.27 ^{ab}	8.58±0.23 ^c	394.50±2.45 ^{ab}	53.64±1.63 ^{bed}	17.04±0.78 ^{abc}	67.32±0.73 ^a	38.05±0.13 ^d	4.29±0.27 ^{ab}	16.95±0.92 ^{abc}	0.18±0.02 ^b
QM-6	14.95±0.72 ^{ab}	12.69±0.38 ^b	309.09±2.71 ^{bc}	82.08±1.76 ^a	15.08±0.75 ^{abc}	13.95±0.92 ^e	58.88±0.27 ^c	7.52±0.18 ^a	11.70±0.32 ^{cde}	0.16±0.02 ^b

同列字母相同表示差异不显著($P>0.05$),不同表示差异显著($P<0.05$)。

The same lowercase letter in the same column indicated no significant difference ($P>0.05$), different lowercase indicated no significant difference ($P>0.05$).

6种微量矿质元素在各组织中的含量也有所差异,Zn、Cu、Mo元素在果籽中含量最高,其中Zn元素在果籽中的含量为49.06 mg/kg,是果汁和果皮Zn元素含量的3.11倍、3.71倍,果籽的Cu元素是果汁和果

皮的6.88倍、5.59倍。B、Mn、Fe在果皮中的含量最高,其中果皮的B元素含量约是果汁和果籽的2.60倍、4.58倍,果皮的Mn元素含量约是果汁和果籽的6.95倍、2.66倍。

矿质元素在不同产区百香果中的含量也有所差异。如K、Ca、Mg元素在QM-1百香果果皮中含量最高,B、Fe元素在TN-4果皮中含量最高,TN-5果籽的Cu、Zn元素含量最高。

表 6 百香果果籽矿质元素差异分析
Tab.6 Difference analysis of mineral elements in passion fruit seed

样品	矿质元素含量/(mg·kg ⁻¹) Mineral element content										
Specimen	Mg	P	K	Ca	B	Mn	Fe	Cu	Zn	Mo	
TN-1	16.00±0.32 ^a	32.61±0.78 ^a	30.06±0.17 ^{abc}	18.39±0.79 ^a	2.21±0.72 ^a	13.37±0.21 ^{bcd}	35.64±0.32 ^a	7.12±0.21 ^e	39.30±0.32 ^{de}	0.28±0.02 ^c	
TN-2	15.62±0.31 ^a	27.85±0.92 ^a	26.30±0.79 ^{bc}	24.36±0.32 ^a	3.52±0.23 ^a	15.07±0.72 ^{ab}	42.52±0.71 ^a	30.56±0.41 ^{cd}	74.19±0.38 ^a	0.34±0.01 ^{bc}	
TN-3	13.95±0.28 ^a	26.99±0.79 ^a	24.74±0.12 ^{bc}	25.10±0.71 ^a	2.39±0.76 ^a	12.16±0.33 ^{cde}	33.31±0.72 ^a	25.37±0.28 ^{cd}	36.95±0.27 ^e	0.39±0.02 ^{abc}	
TN-4	16.05±0.17 ^a	29.24±0.47 ^a	33.60±0.26 ^{abc}	25.74±0.27 ^a	3.32±0.21 ^a	12.31±0.20 ^{cde}	43.92±0.81 ^a	28.44±0.21 ^{cd}	52.47±0.37 ^{bc}	0.51±0.03 ^{ab}	
TN-5	14.78±0.68 ^a	26.93±0.78 ^a	22.99±0.27 ^c	21.37±0.18 ^a	2.93±0.73 ^a	15.78±0.20 ^a	43.63±0.21 ^a	20.82±0.31 ^d	52.62±0.27 ^{bc}	0.40±0.02 ^{abc}	
TN-6	15.67±0.79 ^a	30.46±0.39 ^a	25.93±0.36 ^{bc}	22.59±0.53 ^a	1.87±0.73 ^a	14.58±0.31 ^{ab}	41.08±0.41 ^a	26.52±0.93 ^{cd}	40.91±0.14 ^{cde}	0.18±0.02 ^c	
QM-1	14.82±0.28 ^a	26.94±0.28 ^a	29.65±0.26 ^{abc}	22.13±0.27 ^a	4.41±0.26 ^a	11.53±0.83 ^{de}	41.60±0.18 ^a	25.02±0.32 ^{cd}	52.61±0.18 ^{bc}	0.58±0.05 ^a	
QM-2	15.74±0.28 ^a	27.77±0.39 ^a	32.78±0.26 ^{abc}	22.85±0.37 ^a	3.46±0.23 ^a	10.39±0.32 ^e	34.88±0.19 ^a	30.25±0.38 ^{cd}	46.53±0.23 ^{bcd}	0.16±0.01 ^c	
QM-3	16.11±0.38 ^a	29.56±0.71 ^a	31.73±0.37 ^{abc}	19.80±0.52 ^a	6.69±0.18 ^a	10.37±0.12 ^e	40.21±0.13 ^a	23.24±0.27 ^d	41.94±0.19 ^{cde}	0.24±0.02 ^c	
QM-4	18.53±0.79 ^a	31.87±0.37 ^a	36.96±0.26 ^{ab}	27.87±0.33 ^a	2.75±0.19 ^a	10.67±0.29 ^e	35.34±0.17 ^a	47.44±0.17 ^b	44.68±0.21 ^{bcd}	0.24±0.02 ^c	
QM-5	17.90±0.27 ^a	28.92±0.29 ^a	40.87±0.36 ^a	24.69±0.42 ^a	3.21±0.21 ^a	14.19±0.17 ^{abc}	46.31±0.15 ^a	39.51±0.26 ^{bc}	55.62±0.41 ^b	0.29±0.04 ^{bc}	
QM-6	16.68±0.36 ^a	28.78±0.18 ^a	32.76 ^a ±0.13 ^{bc}	22.59±0.57 ^a	3.63±0.21 ^a	11.61±0.72 ^{de}	40.45±0.26 ^a	61.62±0.27 ^a	50.93±0.24 ^{bcd}	0.36±0.03 ^{abc}	

同列字母相同表示差异不显著($P>0.05$),不同表示差异显著($P<0.05$)。
The same lowercase letter in the same column indicated no significant difference ($P>0.05$), different lowercase indicated no significant difference($P>0.05$).

2.3.1 百香果不同组织矿质元素聚类分析 基于必须矿质元素组成,依据欧式距离和离差平方和法对百香果不同组织进行层级聚类,聚类结果显示百香果不同组织被明显分为两个大类,百香果果籽聚为一个 大类,Fe、Zn、K元素含量较高,B和Mo元素含量均较低;百香果果汁和果皮聚为一个 大类,K元素含量最高,Mo、Cu元素含量较低。每个大类分为若干个亚类,被明显分为4组,QM-6seed和QM-4seed聚为组1,Cu、Zn元素含量高,百香果果籽其余10个样品聚为组2,Fe、Zn含量较高。QM-5pulp单独聚为组3,Fe、Zn含量均较高,P、K含量次之;除QM-5pulp外,百香果果皮、果汁其余23个样品聚为组4,K元素含量均较高,Mo元素含量均较低(图1)。聚类分析结果与对表4~表6的分析结果相近。

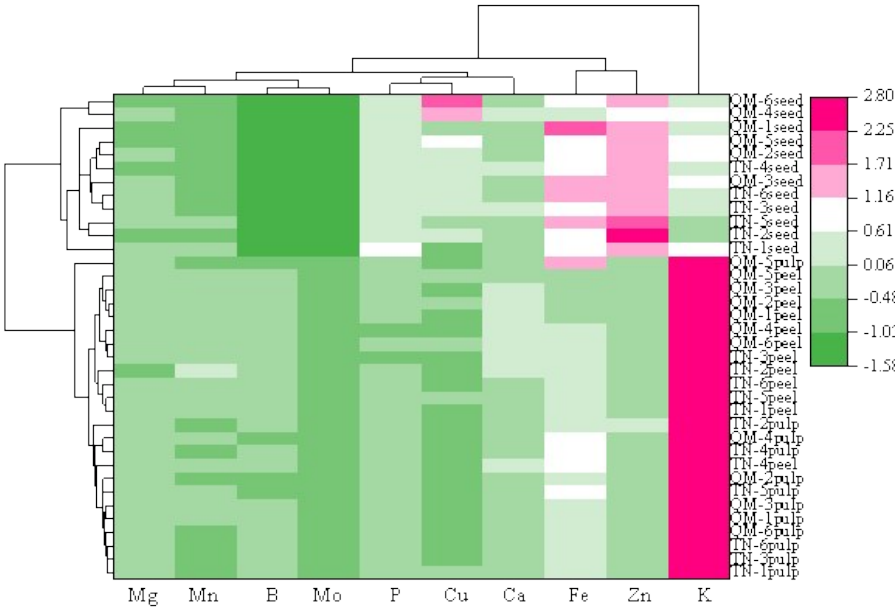


图 1 百香果不同组织矿质元素聚类分析

Fig.1 Cluster heat map analysis of mineral elements in different tissues of passion fruit

2.3.2 百香果不同组织矿质元素相关性分析 百香果果汁中矿质元素相关性如图2a所示,果汁中大量元素间的相关系数变幅为0.34~0.87,其中K和Ca、Mg间存在显著正相关($P<0.05$),Ca与Mg呈极显著正相关($P<0.01$);微量元素间的相关系数变幅为-0.45~0.78,Cu与B、Mo存在显著正相关($P<0.05$),Cu与Zn存在极显著正相关($P<0.01$)。说明果汁的大量元素Ca与Mg、微量元素Cu与Zn之间的吸收代谢具有很强的协同作用。果汁中,只有Mn与Mg、Ca间呈现负相关。

百香果果皮中矿质元素相关性如图2b所示。可以发现果皮中大量元素Ca、Mg呈极显著正相关($P<0.01$),这与果汁中Mg与Ca的吸收代谢有相似结果,微量元素Zn和Mn间呈显著正相关($P<0.05$)。Mg与B呈显著正相关($P<0.05$)。

百香果果籽中矿质元素相关性如图2c所示。大量元素Mg和K呈极显著正相关($P<0.01$),Mg与P、Ca呈显著正相关($P<0.05$),微量元素Mo和Fe具有显著正相关($P<0.05$),大量元素Ca和微量元素Cu呈极显著正相关($P<0.01$),大量元素P与微量元素B、Mn、Fe、Zn、Mo、Cu间均呈现负相关,说明果籽中P元素对上述6种微量元素的积累有一定的拮抗作用,而Mg和K,Ca和Cu的吸收代谢相互促进。

综上所述,可以发现大量元素Mg与Ca在果汁和果皮中的吸收代谢相互协同,Mg与K在果籽中的吸收代谢相互协同。6种微量元素在不同组织的吸收代谢也不同,果汁中Cu与B、Zn,果皮中Mn与Zn,果籽中Mo与Fe相互协同。

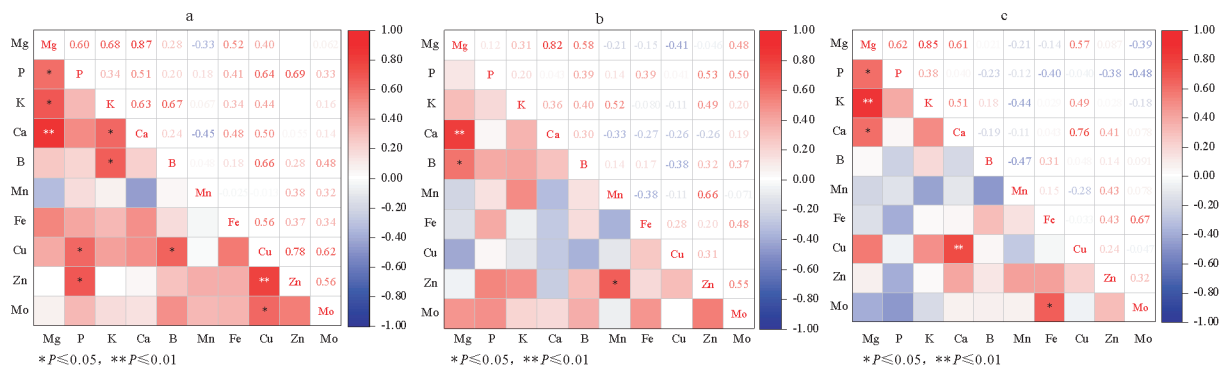


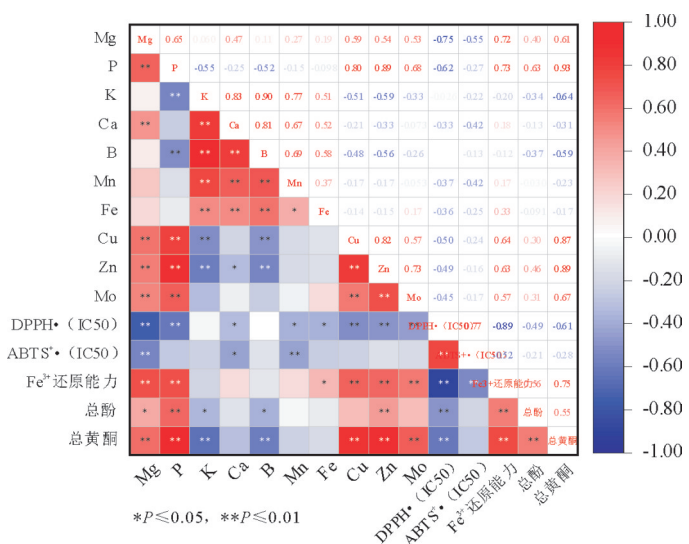
图2 百香果矿质元素相关性分析

Fig.2 Correlation analysis of mineral elements in different tissues of passion fruit

2.4 百香果矿质元素与理化指标相关性分析

由图3可知,百香果4种大量元素中,Mg与P、Ca呈极显著正相关,K与Ca呈极显著正相关,K与P呈极显著负相关($P<0.01$);微量元素中,B、Mn、Fe 3种元素间呈显著正相关($P<0.05$),Cu、Zn、Mo 3种元素间呈极显著正相关($P<0.01$),说明它们两两元素间存在较强的协同作用。B与Cu、Zn呈极显著负相关($P<0.01$),说明B会抑制Cu、Zn的吸收代谢。大量元素与微量元素中,Mg、P与Cu、Zn、Mo,K、Ca与B、Mn、Fe均呈极显著正相关($P<0.01$),说明Mg、P主要促进Cu、Zn、Mo的吸收代谢,K、Ca主要与B、Mn、Fe的吸收代谢。K、B均与Cu、Zn间呈极显著负相关($P<0.01$)。

理化指标中, Fe^{3+} 还原能力、总酚、总黄酮间均呈极显著正相关($P<0.01$),而 Fe^{3+} 还



原能力与DPPH $\cdot$ 、ABTS $^{+}$ 的IC₅₀均呈现极显著负相关,DPPH $\cdot$ 的IC₅₀与总酚、总黄酮也呈现极显著负相关($P<0.01$),说明总酚、总黄酮的积累对百香果Fe³⁺还原能力,DPPH $\cdot$ 的清除率有较强的协同作用。

矿质元素与各理化指标间也存在一定相关性。大量元素Mg、P与总酚、总黄酮、Fe³⁺还原能力均呈显著正相关($P<0.05$),与DPPH $\cdot$ 的IC₅₀呈极显著负相关($P<0.01$),说明Mg、P能促进百香果活性物质总酚、总黄酮的积累且对清除DPPH $\cdot$ 有一定协同作用。微量元素Cu、Zn、Mo与Fe³⁺还原能力、总黄酮存在极显著正相关,与DPPH $\cdot$ 的IC₅₀存在极显著负相关($P<0.01$),说明Cu、Zn、Mo对百香果抗氧化能力有显著协同作用。K、B均与总酚、总黄酮间存在显著负相关($P<0.05$),说明K、B对百香果总酚、总黄酮活性物质的积累有一定拮抗作用。

3 讨 论

3.1 百香果不同组织抗氧化能力和活性物质含量评价

清除自由基的能力可以反应物质的抗氧化活性,常用DPPH $\cdot$ 、ABTS $^{+}$ 清除率、Fe³⁺还原能力衡量物质的抗氧化能力^[22-23]。此外活性物质如维生素C、黄酮类、酚类物质的含量也与抗氧化活性密切相关^[24]。

百香果不同的组织部位,抗氧化能力和活性物质含量不同。本试验结果中,百香果不同组织DPPH $\cdot$ 清除能力、Fe³⁺还原能力由大到小均为果籽、果皮、果汁,其中TN类百香果果籽清除DPPH $\cdot$ 的能力分别约为果汁、果皮的37.87倍、29.06倍,QM类百香果果籽对DPPH $\cdot$ 的清除能力分别是果汁、果皮的6.32倍、3.79倍,这可能是由于果籽中总酚、总黄酮含量较高。Santos等^[25]研究发现,百香果果籽中含有大量生育酚、类黄酮、抗坏血酸等生物活性成分,抗氧化能力也较强,与本研究结果相似,说明生物活性物质积累与抗氧化能力具有一定相关性。Septembre等^[26]发现百香果果汁中总黄酮含量为0.70 mg/g,与笔者的测定结果差异不大。Silva等^[27]测定发现黄色百香果果肉的总酚、总黄酮含量高于果皮,REIS等^[28]研究比较百香果果汁、果皮、果籽清除DPPH $\cdot$ 、ABTS $^{+}$ 的能力,发现果汁清除DPPH $\cdot$ 、ABTS $^{+}$ 的能力最强,这与本研究结果有差异,可能是因为百香果品种和生长环境不同,导致代谢物质积累也不一样。

水果产地和品种不同,抗氧化能力、活性物质含量也有差异。田亮等^[29]比较不同品种诺丽果酵素的抗氧化活性,发现西沙诺丽抗氧I号果酵素的ABTS、DPPH自由基清除率最高。本试验中TN类百香果总酚、总黄酮含量比QM类高,这可能是由于TN类百香果果皮花青素、果籽酚类物质含量较高^[30]。Reis等^[28]研究比较紫色、黄色、橙色百香果清除DPPH $\cdot$ 、ABTS $^{+}$ 的能力,发现自由基清除能力由大到小依次为黄色百香果、橙色、紫色。Contreras等^[20]发现两种香蕉百香果果皮中的总酚含量分别为2.46, 2.88 mg/g,比本试验中百香果果皮总酚含量高。相关研究表明,植物中黄酮的积累受产地环境条件影响较大,徐青等^[31]发现黄色百香果中黄酮的积累与温度、降水量呈负相关,与日照时数呈正相关,而本研究中,QM-2产地降水量最多,黄酮含量最高,可能是由于所选百香果品种不一样,黄酮的积累受产地降水量的影响也不同。

3.2 百香果不同组织矿质元素含量探究

矿质元素参与协助人体各种生理功能,如缺K会导致身体酸软乏力、呼吸麻痹、心率失常等^[32],缺Fe会导致贫血、身体发育不良等症状^[33],Cu也是重要的生命元素,缺Cu会导致酪氨酸活性下降,黑色素合成受阻^[34]。

前人研究^[35]表明,植物不同组织部位对同一种矿质元素的富集能力不同,如白屈菜地上部对矿质元素的富集能力强于地下部。本试验中,大量元素K、Ca,微量元素B、Mn、Fe在果皮中含量最高,大量元素Mg、P,微量元素Zn、Cu在在果籽中含量最高,其中果皮中K元素含量为181.59~455.35 mg/kg,是果籽中K元素含量的10.16倍,果籽Cu元素含量为7.12~61.62 mg/kg,是果汁和果皮的6.88倍、5.59倍,这可能是由于百香果不同组织对各种矿质元素的富集能力不同。Zn和Cu对植物体新陈代谢起关键作用^[36],百香果果籽中Zn、Cu元素含量高可能是因为果籽中新陈代谢较旺盛。Rúbia等^[37]研究发现百香果新鲜果皮中K含量丰富,果籽中K、Ca、P含量也较高,与本研究有相近的结果,有研究还发现果籽中含有大量Mg元素,但本研究百香果果籽的Mg含量较低。Reis等^[28]发现紫色和黄色百香果果汁中均有较高含量的Ca、K,与本研究结果相似。各元素在两种百香果果汁中的含量均低于果皮和果籽,说明果汁对各元素的富集能

力较弱。10种矿质元素在两种百香果的同一组织中含量差别不大,表明TN类和QM类百香果对这10种矿质元素的吸收转运基本一致。

另外,可以发现大量元素Mg与Ca在果汁和果皮中的吸收代谢相互协同,Mg与K在果籽中的吸收代谢相互协同。6种微量元素在不同组织的吸收代谢也不同,果汁中Cu与B、Zn,果皮中Mn与Zn,果籽中Mo与Fe相互协同。

3.3 百香果活性物质与矿质元素相关性研究

百香果10种矿质元素相关性分析表明,百香果Mg与P、Ca呈极显著正相关,K与Ca呈极显著正相关,与P呈极显著负相关($P<0.01$),这与大白菜叶球中Ca和Mg,K和Ca、P含量的相关性一致^[38]。微量元素B与Mn、Fe,Cu与Zn、Mo间具有较强的协同作用,崔世展等^[39]对两种茶果10种矿质元素含量进行分析,发现茶果中B和Mn呈现极显著正相关($P<0.01$),与百香果中B、Mn的积累有相似结果,说明B、Mn间具有明显的协同作用。大量元素K、Ca主要促进B、Mn、Fe的吸收代谢,Mg、P主要促进Cu、Zn、Mo的吸收代谢,这表明百香果中矿质元素富集关系复杂。

百香果总酚、总黄酮的积累对 Fe^{3+} 还原能力,DPPH·的清除率有较强的协同作用。百香果矿质元素与活性物质相关性分析表明,Mg、P能促进百香果活性物质总酚、总黄酮的积累且对抗氧化能力有一定协同作用,微量元素Cu、Zn、Mo对百香果抗氧化能力有显著协同作用,而K、B对百香果总酚、总黄酮等活性物质的积累有一定拮抗作用。刘思恬等^[40]研究3种番茄的营养品质差异,发现Mg、P、Zn等矿质元素高的口感番茄,其维生素C、槲皮素、酚类化合物含量也较高。综合本研究结果,进一步说明矿质元素与活性物质积累有一定相关性,但其中的机理还有待进一步研究。

4 结 论

百香果不同组织DPPH·清除能力、 Fe^{3+} 还原能力均为果籽>果皮>果汁,且果籽中总酚、总黄酮含量远远大于果汁和果皮。相关性分析表明,总酚、总黄酮的积累对百香果 Fe^{3+} 还原能力,DPPH·、ABTS·清除率有较强的协同作用。

百香果不同组织中各元素含量差异明显。元素K、Ca、B、Mn、Fe在果皮中含量最高,Mg、P、Zn、Cu在在果籽中含量最高。百香果果汁中10种矿质元素含量均低于果皮和果籽,说明果汁对各元素的富集能力较弱。10种矿质元素在两种百香果的同一组织中含量差别不大,表明TN类和QM类百香果对这10种矿质元素的吸收转运基本一致。

百香果中矿质元素富集关系复杂。大量元素K、Ca主要与B、Mn、Fe相互协同,Mg、P主要与Cu、Zn、Mo相互协同,且微量元素B与Mn、Fe,Cu与Zn、Mo的吸收代谢相互促进。

百香果矿质元素与活性物质积累也有一定相关性。Mg、P促进百香果总酚、总黄酮的积累,且Mg、P、Cu、Zn、Mo均对百香果抗氧化能力有协同作用。K、B对百香果总酚、总黄酮的积累有一定拮抗作用。

致谢:抚州市重点研发计划(202101022861、202205127357)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 唐语琪,杨其军,洗淑颜,等.百香果产业支撑乡村振兴的现状与对策建议[J].中国农业文摘-农业工程,2021,33(3):31-32.
TANG Y Q, YANG Q J, XIAN S Y, et al. The current situation and countermeasures of passion fruit industry supporting rural revitalization[J]. Agricultural science and engineering in China, 2021, 33(3): 31-32.
- [2] 李新雄,卢东方,龙凤瑶.百香果家族再添丁“钦蜜9号”成新宠[J].农家之友,2021,33(8):18-19.
LI X X, LU D F, LONG F Y. The hundred fragrant fruit family becomes a new favorite with the addition of "Qinmi 9"[J]. Friends of the farmhouse, 2021, 33(8): 18-19.
- [3] 王银.百香果种植气候条件与管理措施分析[J].河南农业,2019,30(5):22-23.
WANG Y. Analysis of climatic conditions and management measures for passion fruit planting[J]. Agriculture of Henan, 2019, 30(5): 22-23.
- [4] 杜虹,吴胜芳,黄凤,等.加快百香果国家融合产业发展示范园创建,助力乡村振兴[J].福建热作科技,2023,48(3):56-58.
DU H, WU S F, HUANG F, et al. Accelerate the establishment of a national integrated industrial development demonstration park for passion fruit, and assist in rural revitalization[J]. Fujian science & technology of tropical crops, 2023, 48(3): 56-58.

- [5] 杨武学.农业产业化进程中的地方政府行为研究[D].贵阳:贵州财经大学,2022.
YANG W X. Research on local government behavior in the process of agricultural industrialization [D]. Guiyang: Guizhou university of finance and economics, 2022.
- [6] 杨锋,黄永春,何仁,等.酶处理对降低百香果鲜榨汁中不溶性固形物含量的影响[J].食品科技,2008,33(4):42-45.
YANG F, HUANG Y C, HE R, et al. The influence of enzyme treatment on lowering the content of insoluble solid in fresh passion fruit juice [J]. Food science and technology, 2008, 33(4): 42-45.
- [7] ANTONIASSI R, WILHELM A E, REIS S L R, et al. Expeller pressing of passion fruit seed oil: pressing efficiency and quality of oil [J]. Brazilian journal of food technology, 2022, 25: e2021168.
- [8] PEREIRA M G, MaACIEL G M, HAMINIUK C W I, et al. Effect of extraction process on composition, antioxidant and antibacterial activity of oil from yellow passion fruit (*Passiflora edulis* var. *Flavicarpa*) seeds [J]. Waste and biomass valorization, 2019, 10(9): 2611-2625.
- [9] SANTOS O V, VIEIRA E L S, SOARES S D, et al. Utilization of agroindustrial residue from passion fruit (*Passiflora edulis*) seeds as a source of fatty acids and bioactive substances [J]. Food science and technology, 2020, 41(S1): 218-225.
- [10] CAO Q, TENG J, WEI B, et al. Phenolic compounds, bioactivity, and bioaccessibility of ethanol extracts from passion fruit peel based on simulated gastrointestinal digestion [J]. Food chemistry, 2021, 356: 129682.
- [11] 胡敏.紫果百香果外果皮花青素分离纯化及抗疲劳研究[D].南昌:江西农业大学,2020.
HU M. Study on separation and purification of anthocyanin from purple passion fruit (*P. edulis* Sims) epicarp and its anti-fatigue activity [D]. Nanchang: Jiangxi agricultural university, 2020.
- [12] 何丹,孔钰婷,宋洪波,等.紫果西番莲果皮花色苷鉴定及其生物活性[J].食品科学,2020,41(11):57-63.
HE D, KONG Y T, SONG H B, et al. Identification and bioactivity evaluation of anthocyanins from *Passiflora edulis* Sims peel [J]. Food science, 2020, 41(11): 57-63.
- [13] 陈雪梅,刘夏蕾,林标声,等.百香果果皮主要有效成分连续提取工艺[J].热带作物学报,2023,44(2):405-418.
CHEN X M, LIU X L, LIN B S, et al. Continuous extraction technology of main active components of passion fruit peel [J]. Chinese journal of tropical crops, 2023, 44(2): 405-418.
- [14] 景继月.三产地百香果果皮中活性多酚研究[D].北京:中央民族大学,2022.
JING J Y. Study on active polyphenols in passion fruit peel from three producing areas [D]. Beijing: Minzu University of China, 2022.
- [15] XIE X, CHEN C, FU X. Study on the bioaccessibility of phenolic compounds and bioactivities of passion fruit juices from different regions in vitro digestion [J]. Journal of food processing and preservation, 2021, 45(1): 13.
- [16] 张欣莉,李思仪,孙嘉吁,等.响应面优化百香果果皮总黄酮提取工艺及其抗氧化性[J].饲料研究,2022,45(16):83-88.
ZHANG X L, LI S Y, SUN J N, et al. Optimization of extraction process and antioxidant activity of total flavonoids from passion fruit peel by response surface methodology [J]. Feed research, 2022, 45(16): 83-88.
- [17] SANTANA F C, OLIVEIRA T L R, SHINAGAWA F B, et al. Optimization of the antioxidant polyphenolic compounds extraction of yellow passion fruit seeds (*Passiflora edulis* Sims) by response surface methodology [J]. Journal of food science and technology, 2017, 54(11): 3552-3561.
- [18] PUROHIT S, BARIK C R, KALITA D, et al. Exploration of nutritional, antioxidant and antibacterial properties of unutilized rind and seed of passion fruit from Northeast India [J]. Journal of food measurement and characterization, 2021, 15(4): 3153-3167.
- [19] GUO C, SHAN Y, YANG Z, et al. Chemical composition, antioxidant, antibacterial, and tyrosinase inhibition activity of extracts from Newhall navel orange (*Citrus sinensis* Osbeck cv. Newhall) peel [J]. Journal of the science of food and agriculture. 2020, 100(6), 2664-2674.
- [20] CONTRERAS C J, CALDERÓN J L, GUERRA H E, et al. Antioxidant capacity, phenolic content and vitamin C in pulp, peel and seed from 24 exotic fruits from Colombia [J]. Food research international, 2011, 44(7): 2047-2053.
- [21] LAI C, LIANG Y, ZHANG L, et al. Variations of bioactive phytochemicals and antioxidant capacity of navel orange peel in response to different drying methods [J]. Antioxidants, 2022, 11(8): 1543.
- [22] 郭长江,杨继军,李云峰,等. FRAP 法测定水果不同部分抗氧化活性[J].中国公共卫生,2003,19(7):841-843.
GUO C J, YANG J J, LI Y F, et al. Antioxidant capacity of different parts of fruits determined by FRAP assay [J]. Chinese journal of public health. 2003, 19(7): 841-843.

- [23] DOU D, LENG P, Li Y, et al. Comparative study of antioxidant compounds and antiradical properties of the fruit extracts from three varieties of *Crataegus pinnatifida* [J]. Journal of food science and technology, 2015, 52(1): 430-436.
- [24] KIM I S, YANG M, LEE O H, et al. The antioxidant activity and the bioactive compound content of *Stevia rebaudiana* water extracts [J]. LWT - food science and technology, 2011, 44(5): 1328-1332.
- [25] SANTOS D, ORQUIDEA V, EVELYN L S S, et al. Utilization of agroindustrial residue from passion fruit (*Passiflora edulis*) seeds as a source of fatty acids and bioactive substances [J]. Food science and technology, 2021, 41: 218-225.
- [26] SEPTEMBRE M A, STANISLAS G, DOURAGUIA E, et al. Evaluation of nutritional and antioxidant properties of the tropical fruits banana, litchi, mango, papaya, passion fruit and pineapple cultivated in re'union french island [J]. Food chemistry, 2016, 212(dec.1): 225-233.
- [27] SILVA L M R, FIGUEIREDO E A T, RICARDO N M P S, et al. Quantification of bioactive compounds in pulps and by-products of tropical fruits from Brazil [J]. Food chemistry, 2014, 143(1): 398-404.
- [28] REIS L C R D, FACCOE M P, SALVADOR M, et al. Antioxidant potential and physicochemical characterization of yellow, purple and orange passion fruit [J]. Journal of food science and technology, 2018, 55(7): 2679-2691.
- [29] 田亮, 孙碧琪, 毛祥飞, 等. 不同品种诺丽果发酵前后品质、挥发性风味成分和抗氧化活性比较 [J]. 中国酿造, 2023, 42(9): 138-143.
- TIAN L, SUN B Q, MAO X F, et al. Comparison of quality, volatile flavor components and antioxidant activity of different varieties of Noni fruit before and after fermentation [J]. China brewing, 2023, 42(9): 138-143.
- [30] LIU M, SU Y J, LIN Y L, et al. Optimizing the extraction of anthocyanins from purple passion fruit peel using response surface methodology [J]. Journal of food processing and preservation, 2018, 42(10): 185-193.
- [31] 徐青, 杨江, 李安定. 不同产地百香果黄果主要功能成分含量及抗氧化活性比较 [J]. 现代食品科技, 2023, 39(8): 1-9.
- XU Q, YANG J, LI A D. Contents of main functional components and antioxidant activity of yellow (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*) passion fruit from different habitats [J]. Modern food science and technology, 2023, 39(8): 1-9.
- [32] 桑宝华. 钾元素生理药理作用探讨及其临床药物运用 [J]. 中国民族民间医药, 2011, 20(8): 22-23.
- SANG B H. Discussion on the physiological and pharmacological effects of potassium and its clinical drug use [J]. Chinese national folk medicine, 2011, 20(8): 22-23.
- [33] FRAGA C G. Relevance, essentiality and toxicity of trace elements in human health [J]. Molecular aspects of medicine, 2005, 26(4-5): 235-244.
- [34] World Health Organization. trace elements in human nutrition and health [M]. Geneva: WHO, 1996.
- [35] 赵露, 苑雪琪, 刘晨阳, 等. 白屈菜对根际土壤矿质元素吸收规律的研究 [J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 49-53.
- ZHAO L, YUAN X Q, LIU C Y, et al. Study on the absorption of mineral elements in *Chelidonium majus* rhizosphere soil [J]. Journal of inner mongolia agricultural university (natural science edition), 2020, 41(5): 49-53.
- [36] 韩文炎, 许允文, 伍炳华. 铜与锌对茶树生育特性及生理代谢的影响 II: 锌对茶树的生长和生理效应 [J]. 茶叶科学, 1994, 14(1): 23-29.
- HAN W Y, XU Y W, WU B H. Physiological effects of Cu and Zn on the development and the physiological metabolism of tea plants II: effects of Zn on the growth of tea plants [J]. Journal of tea science, 1994, 14(1): 23-29.
- [37] RÚBIA C G, CORRÊA R M, PERALTA C W I, et al. The past decade findings related with nutritional composition, bioactive molecules and biotechnological applications of *Passiflora* spp. (Passion Fruit) [J]. Trends in food science & technology, 2016, 58: 79-95.
- [38] 汪洁, 李兆壮, 金宁, 等. 不同大白菜品种矿质元素含量评价 [J]. 中国瓜菜, 2022, 35(12): 47-52.
- WANG J, LI Z Z, JIN N, et al. Evaluation of mineral element content in different varieties of Chinese cabbage [J]. China cucurbits and vegetables, 2022, 35(12): 47-52.
- [39] 崔世展, 陶亚飞, 缪德仁. 2种茶果不同组织中矿质元素含量的分布特征 [J]. 昆明学院学报, 2022, 44(6): 31-36.
- CUI S Z, TAO Y F, LIAO D R. Content distribution characteristics of mineral elements in different tissues of two tea fruits [J]. Journal of Kunming university, 2022, 44(6): 31-36.
- [40] 刘思恬, 祝秀梅, 张婧, 等. 不同类型番茄果实营养品质分析与综合评价 [J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(3): 564-574.
- LIU S T, ZHU X M, ZHANG J, et al. Nutritional quality analysis and comprehensive evaluation of different types of tomato fruits [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(3): 564-574.