

不同品种及大小规格桃果实营养品质及矿质元素差异分析

张雪^{1,2}, 陈蒙^{1,2}, 李勇^{1,2*}, 陈健², 宋立晓², 陈小龙², 余向阳^{1,2*}

(1. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110000) (2. 省部共建国家重点实验室培育基地-江苏省食品质量安全重点实验室, 江苏省农业科学院农产品质量安全与营养研究所, 江苏南京 210014)

摘要: 果实品种及大小规格是决定消费者接受度的重要因素, 但目前对于桃果实品种及大小规格与营养品质关系的研究很少。本研究以江苏省主产的 5 个品种桃果实为研究对象, 在同一果园中采集已成熟的果实, 比较不同品种及大小规格桃果实营养品质及矿质元素含量差异。结果显示, 紫金红可溶性固形物含量最高 (12.27%), 霞脆类黄酮含量最多 ($0.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 白凤维生素 C 含量最高 ($7.50 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), 金陵黄露总酸含量最多 ($496.97 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)。霞脆中 Fe、B、Zn 元素含量较高, 霞晖中 Mo 含量较高, 紫金红中 Ca、Mg 元素含量较高, 白凤中大部分矿质元素含量均较低。大部分品种的中、小果实维生素 C 及多数矿质元素含量比较高, 中果的可溶性糖含量比较高, 小果中类黄酮含量较高。综上所述, 不同品种桃果实营养物质有特征差异, 但大多数桃品种的中果和小果相比于大果, 营养物质及矿质元素更加丰富, 该研究结果为桃果实分等分级及质量评价等提供科学依据。

关键词: 桃果实; 果实大小; 营养品质; 矿质元素

文章编号: 1673-9078(2026)3-272-281

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.3.0025

Differences in the Nutritional Quality and Mineral Elements of Peach Fruits of Different Sizes

ZHANG Xue^{1,2}, CHEN Meng^{1,2}, LI Yong^{1,2*}, CHEN Jian², SONG Lixiao²,
CHEN Xiaolong², YU Xiangyang^{1,2*}

(1. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110000, China) (2. The Key Laboratory for Food Quality and Safety of Jiangsu Province, State Key Laboratory Breeding Base Jointly Built by Province and Ministry, Institute of Agricultural Product Quality, Safety and Nutrition, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Fruit varieties and sizes are significant factors that influence consumer acceptance; however, few research has been conducted on the relationship between the nutritional quality of peaches and their varieties and sizes. This study focused on five main peach varieties produced in Jiangsu Province, China. Mature peach fruits were collected from the same orchard for each variety, and their nutritional quality and mineral element content across various varieties and sizes then compared. Results indicated

引文格式:

张雪,陈蒙,李勇,等.不同品种及大小规格桃果实营养品质及矿质元素差异分析[J].现代食品科技,2026,42(3):272-281.

ZHANG Xue, CHEN Meng, LI Yong, et al. Differences in the nutritional quality and mineral elements of peach fruits of different sizes [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(3): 272-281.

收稿日期: 2025-01-07; 修回日期: 2025-04-24; 接受日期: 2025-04-30

基金项目: “国家桃产业技术体系岗位科学家任务”, 现代农业产业技术体系建设项目 (CARS-30-5-03)

作者简介: 张雪 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: 2941478500@qq.com

通讯作者: 李勇 (1987-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: liyong201508@jaas.ac.cn; 共同通讯作者: 余向阳 (1972-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品质量安全与营养, E-mail: yuxy@jaas.ac.cn

that Zijinhong had the highest soluble solid content (12.27%), Xiacui exhibited the highest flavonoid content ($0.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), Baifeng had the highest vitamin C content ($7.50 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), and Jinling Huanglu demonstrated the highest total acid content ($496.97 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$). Additionally, Xiacui had higher iron, boron, and zinc levels, Xiahui contained higher molybdenum levels, Zijinhong exhibited higher calcium and magnesium levels, and Baifeng generally had a low mineral content. For most of the varieties, medium- and small-sized fruits exhibited higher levels of vitamin C and most mineral elements, with medium-sized fruits demonstrating a higher soluble sugar content and small-sized fruits showing higher a flavonoid content. In summary, characteristic nutrient differences were observed among different varieties of peach fruits. In addition, compared to large-sized fruits, the medium- and small-sized fruits of most peach varieties had richer nutrient and mineral contents. The results of this study provide a scientific basis for the grading and quality evaluation of peach fruits.

Key words: peach fruit; fruit size; nutritional quality; mineral elements

随着我国社会经济的快速发展,果品营养安全日益受到人们的高度关注和重视。桃 (*Prunus persica* L.) 果实外观诱人、果肉香甜,不仅包括人类健康所必需的 7 种营养健康物质(水分、糖类、矿物质、膳食纤维、脂肪、蛋白质和维生素),还有酚类、萜类、黄酮类等各种对人体生命活动非常有益的生物活性成分^[1-4]。但桃果实品质易受遗传、生长环境、栽培品种和果园管理等多种因素影响^[5]。叶浩宇等^[6]比较了 6 个水蜜桃品种特征品质差异,发现白丽和圆梦更加甜美,新玉和白丽香味最浓郁。赵悦等^[7]测定了 65 份桃果实品质差异,发现扬州早甜桃、银河、紫金红 3 号和云南桃 19 号的可溶性固形物含量高。Xin 等^[8]研究发现,红肉桃比白肉桃积累了更多桃子香气成分,内酯和萜类等挥发物也在白肉桃和红肉桃中表现出不同的浓度。Li 等^[9]发现,硬溶质桃“霞晖 8 号”蛋白质表达水平相较于硬质桃“霞脆”更高,而霞脆桃中类黄酮生物合成相关蛋白的表达水平较高。

水果果实的外观品质直接关系到市场竞争力,其中果实大小是决定产量、质量和消费者接受度的一个主要因素^[10]。成熟水果采收过程中,会存在不同大小规格,现行 NY/T 1792-2009《桃等级规格》行业标准规定了桃果实的等级规格要求,依据果实重量分为小、中、大三个规格^[11]。但不同大小果实口感、质地、营养成分存在很大差异。贾惠娟等^[12]发现,日本冈山地区的白桃品种白凤、清水白桃、白丽的大果比中果酸甜度低、香气弱且肉质差。此外,Chen 等^[13]发现,相较于“沙糖橘”大中果,小果具有更长的货架期。但当前对于已成熟桃果实大小规格与其营养品质关系的研究相对较少,需要深入探究。

江苏是我国桃子主产区之一,拥有多个主栽品种,其中霞脆和霞晖分别是硬质桃和硬溶质桃,货架期长;紫金红是黄肉油桃,作为非酸性油桃品种,消费者接受度较高;金陵黄露是黄桃早熟品种,营养物质丰富;

白凤是中熟水蜜桃品种,水分含量高,货架期短。本研究以上述五个品种桃果实为研究对象,采集各品种已成熟的桃果实,依据重量进行大、中、小分级,测定各组桃果实可溶性糖、维生素 C、氨基酸等营养品质指标以及常量、微量矿质元素含量,比较各类别桃果实营养品质及矿质元素含量差异,研究结果为进一步推动桃产业标准化,增强桃果实的品质和市场竞争力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

$100 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 矿质元素标准溶液 [包括钾 (K)、镁 (Mg)、钙 (Ca)、钠 (Na)、铝 (Al)、铁 (Fe) 硼 (B)、锌 (Zn)、铜 (Cu)、锰 (Mn)、钛 (Ti)、锶 (Sr)、钡 (Ba)、镓 (Ga)、钼 (Mo)], 国家标准物质研究中心; 有机酸 (苹果酸、酒石酸、琥珀酸、柠檬酸、奎宁酸)、维生素 C 标准品, 上海源叶生物科技有限公司; 硝酸 (HPLC 级), 国药集团化学试剂有限公司; 30% 过氧化氢 (优级纯), 国药集团化学试剂有限公司; 磷酸 (分析纯), 成都市科龙化工试剂厂; 甲醇、乙腈 (HPLC 级), 德国 Meker 公司; 甲酸 (HPLC 级), 美国 Fisher 公司。植物可溶性糖试剂盒 (A145-1-1)、植物类黄酮给试剂盒 (A142-1-1)、总氨基酸试剂盒 (A026-1-1) 均购于南京建成生物工程研究所。

PAL-1 数显手持糖度计, 日本 ATAGO 公司; PL3002 电子天平, 上海精密科学仪器有限公司; GY-4 果实硬度计, 山东恒美电子科技; Alpha-2LDPuls 冷冻干燥机, 北京博励仪器有限公司; EPOCH 12 酶标仪, 美国 BioTek 公司; Tiss-24 全自动样品快速研磨仪, 上海净信实业发展有限公司; ICP-MS 电感耦合等离子体质谱仪, 美国 PerkinElmer 公司; ICP-AES 电感耦合等离子体发射光谱仪, 德国耶拿分析仪器股份有限公司; DB-3A 电子恒温加热板, 常州金坛良友仪器有限公司。

1.2 样品采集及预处理

供试桃品种为江苏省农业科学院溧水基地栽培的“白凤”、“霞晖”、“霞脆”、“紫金红”和“金陵黄露”，树龄均为6年，通过修剪控制桃树旺长，未使用生长调节剂，树势中等。依照果实发育天数及果实外观变化判定果实成熟时间，各品种果实可采摘期为6~7月，具体样品信息见表1。从树冠中上部的外围区域随机采摘色泽均匀、已成熟、无机械损伤、无病虫害的桃果实。成熟果实采收后，放入带有冰袋的保温箱保存并于采摘当天带回实验室，运输过程中避光防震，以确保果实品质。测定桃果实重量，将同一品种的果实依据重量分成大、中、小三个规格（图1），分级标准参照NY/T1792-2009《桃等级规格》有所调整^[1]。每个规格各50颗桃果实，每组随机选取20个桃子用于测定硬度和可溶性固形物含量，其余30个桃子每6个果实混成一份样品，共5个平行。果实洗净后擦干水分，去除果皮，将可食用部分切碎混匀，迅速放入液氮速冻并研磨成粉末，密封好置于-80℃冰箱保存，待测定各品质指标（可溶性糖、类黄酮、总氨基酸、有机酸、维生素C及矿质元素）。

1.3 果重、硬度和可溶性固形物测定

单果质量采用电子天平（精度为0.01 g）测定；硬度（未去皮）用数显硬度计测定，探头直径8 mm，选择果实的中部位置，避开果梗和果蒂，将硬度计探头垂直压入果实表面进行测量；可溶性固形物含量采用手持糖度计进行测定，将果肉从中间横切，取汁液测定^[14]。

1.4 可溶性糖、类黄酮、总氨基酸测定

可溶性糖、类黄酮、总氨基酸分别采用蒽酮比色法、铝离子络合比色法、铜离子-氨基酸络合比色法测定，

相关试剂盒购于南京建成生物工程研究所。

1.5 有机酸及维生素C含量测定

采用高效液相色谱法（HPLC）^[15]，对桃果实中的有机酸含量和抗坏血酸（维生素C）总量进行测定。标准溶液的配制：分别称取0.4 g 奎宁酸、0.24 g 琥珀酸、0.44 g 柠檬酸、0.24 g 苹果酸、0.4 g 酒石酸和0.02 g 抗坏血酸（维生素C）置于10 mL容量瓶中并加入超纯水定容至刻度线，再配制成质量浓度梯度为0.47、0.94、1.88、3.75、7.5、15、30 mg·L⁻¹的混合标准溶液。称取2.0 g样品加入8 mL超纯水，研磨（1 000 r·min⁻¹）10 min后离心5 min（8 000 r·min⁻¹），取上清液1 mL加入9 mL超纯水并混匀，过0.45 μm的水系滤膜，供液相色谱分析。通过Waters高效液相色谱仪-PDA检测器和Agilent 5 μm粒径4.6×150 mm的ZORBAX SB-C18柱对桃果实中有机酸含量进行全波段检测。色谱条件：1%磷酸溶液-甲醇（97.5:2.5），等度洗脱，流量为0.5 mL·min⁻¹，柱温40℃，进样时间15 min。

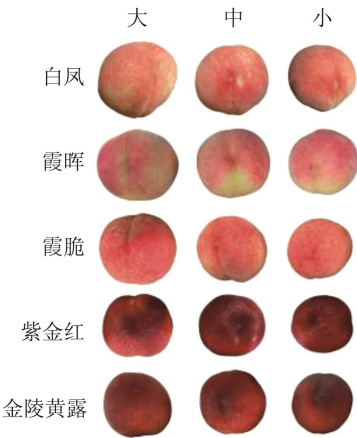


图1 不同品种及大小规格桃果实
Fig.1 Different varieties and sizes of peach fruits

表 1 桃果实样品信息

Table 1 Information of peach samples included in this study						
品种	果实类型	肉质	肉色	采收时间	果实发育时间/d	果实外观
白凤	毛桃	软溶质	白	7.8	120	黄白鲜红，圆润微凹，果顶圆顶中凹
金陵黄露	毛桃	硬溶质	黄	6.24	94	黄红相间，圆整对称，果顶圆平浅缝
霞脆	毛桃	不溶质	黄	7.2	102	果皮乳白，有玫瑰红条纹晕，圆整对称，果顶圆顶平滑
霞晖	毛桃	硬溶质	白	7.13	113	黄白着红，圆润饱满，果顶圆平浅凹
紫金红	油桃	硬溶质	白	6.11	81	黄底红覆，圆整对称，果顶圆平微凹

1.6 矿质元素含量测定

标准参照 GB5009.268-2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》略有修改。称取 1.0 g (精准至 0.01 g) 于微波消解管中, 加入 5 mL HNO_3 (高纯级), 置于预热消解仪中, 100 °C 消解至肉眼看不到桃纤维为止; 冷却至常温后, 加入 3 mL 30% H_2O_2 , 设定微波消解仪程序为升温时间 25 min, 恒温时间 30 min, 温度 200 °C, 温度保护 230 °C 进行消解; 消解完成后于 150 °C 消解仪中赶酸 2 h, 最后用去离子水定容至 25 mL, 待上机测定。采用 ICP-AES 测定样品中常量元素钾、镁、钙、钠, ICP-MS 测定样品中微量元素铝、铁、硼、锌、铜、锰、钛、锶、钡、镓、钼。

1.7 固酸比、糖酸比

可溶性固形物与总酸含量比为固酸比, 可溶性总糖与总酸含量比为糖酸比。

1.8 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2021、IBM SPSS 26.0 软件进行统计分析数据及绘图。

2 结果与讨论

2.1 质量、硬度、可溶性固形物、可溶性糖差异分析

依据质量对成熟的各品种桃果实进行分级, 并测定果实硬度、可溶性固形物和可溶性糖含量。结果显示, 白凤的平均质量最高 (258.98 g), 其次为霞晖 (233.41 g)、霞脆 (214.97 g)、金陵黄露 (210.01 g)、紫金红 (172.61 g)。不同品种的大果质量是中果的 1.28~1.44 倍, 是小果的 1.52~2.69 倍 (图 2a)。各品种硬度由高到低排序依次为霞脆 ($12.04 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)、金陵黄露 ($9.77 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)、霞晖 ($7.72 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)、紫金红 ($7.45 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)、白凤 ($6.38 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$) (图 2b), 其中白凤为软溶质桃, 硬度最低。霞脆为不溶质桃, 硬度最高。而金陵黄露、霞晖、紫金红虽同为硬溶质桃, 但它们在硬度上存在差异主要是由各品种自身特性所导致的。同一品种大、中、小规格果实硬度均无显著差异 ($P>0.05$), 已报道果实硬度可以表征果实成熟度^[16], 这表明采集的桃果实样品均已成熟。

可溶性固形物含量范围在 6.40%~15.40% 之间 (图 2c), 其中紫金红可溶性固形物含量最高 (12.27%)。此前研究发现, 可溶性固形物含量越高的油桃品种消费者接受度也越高^[17]。除金陵黄露外, 其他品种大果与中果的可溶性固形物含量显著高于小果

($P<0.05$)。此外, 紫金红与金陵黄露中的可溶性固形物含量随着果实质量的增加而增加。尹钰今^[18]在苹果中的研究也发现, 果实越大可溶性固形物积累越多。

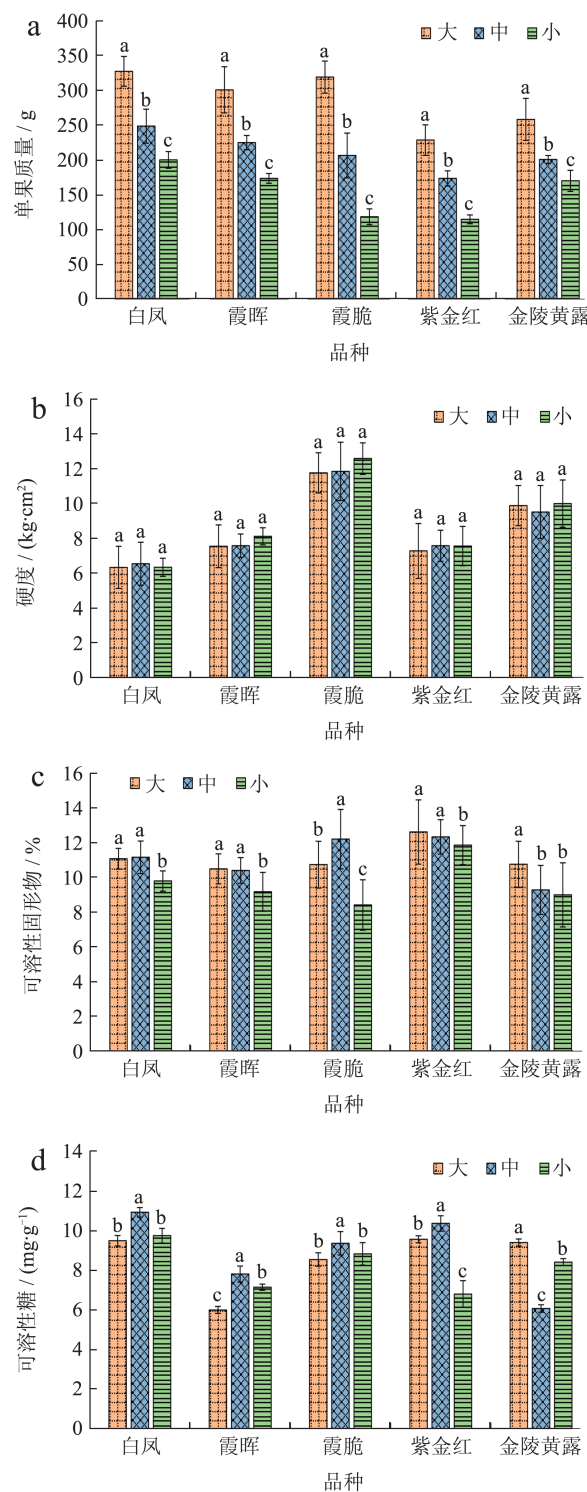


图 2 不同品种及大小规格桃果实质量、硬度、可溶性固形物、可溶性糖含量

Fig.2 Weight, firmness, soluble solid content, and soluble sugar content of peach fruits with various varieties and sizes

注: 图中不同字母表示存具有显著差异 ($P<0.05$)。下图同。

可溶性糖整体含量范围在 5.73~11.06 mg·g⁻¹ 之间 (图 2d), 各品种可溶性糖平均含量由高到低依次是白凤、霞脆、紫金红、金陵黄露、霞晖, 分别为 10.06、8.92、8.91、7.99、6.99 mg·g⁻¹。除金陵黄露外, 白凤、霞脆、紫金红和霞晖中果的可溶性糖含量高于大果和小果, 分别为大果和小果的 1.08~1.30 倍和 1.06~1.52 倍。这可能由于桃果实糖含量积累会受到发育阶段碳水化合物供应、代谢转化以及果实体积变化的调控^[19]。大果膨大速度过快可能导致糖分转化和储存滞后而稀释甜度, 小果糖类物质传输较慢, 而中果膨大期持续时间长且速度适中, 糖分积累与细胞膨大同步进行, 进而果实可溶性固形物含量更高。

2.2 维生素C、氨基酸和类黄酮含量差异分析

维生素 C、氨基酸和类黄酮整体含量范围分别是 1.38~9.67 μg·g⁻¹、0.78~1.97 μmol·mg⁻¹ 和 0.05~0.31 mg·g⁻¹ (图 3)。维生素 C 是维持人体健康和预防多种疾病的重要营养素^[20], 由于人体不能自行合成维生素 C, 所以维生素 C 含量高的水果更受消费者喜爱。白凤中维生素 C 含量最高, 是其它品种 2.72~3.43 倍。氨基酸是蛋白质合成、代谢和免疫反应中的关键化合物, 也是关键的风味活性物质^[21]。类黄酮因其丰富的生物活性对健康有诸多益处^[22]。霞脆中的氨基酸和类黄酮含量最高, 是其它品种的 1.12~1.28 倍和 1.75~3.28 倍。

对同一品种不同大小果实进行比较发现, 白凤的维生素 C 含量随果实质量增加显著减少 ($P<0.05$), 其小果中的维生素 C 含量是大果的 1.8 倍。霞晖、霞脆小果中的氨基酸含量显著高于其大果 ($P<0.05$), 为 1.29、1.69 μmol·mg⁻¹, 分别是其大果中的 1.38 倍、1.47 倍。同一品种中, 小果的类黄酮含量均比较高, 其中白凤的类黄酮含量随着果实增大显著减少 ($P<0.05$)。以上结果表明, 大果中的营养物质含量并非是最多的, 且并不是所有品种的营养指标都会随果实重量有规律地变化, 在库尔勒香梨的研究中也有相似结果^[23]。

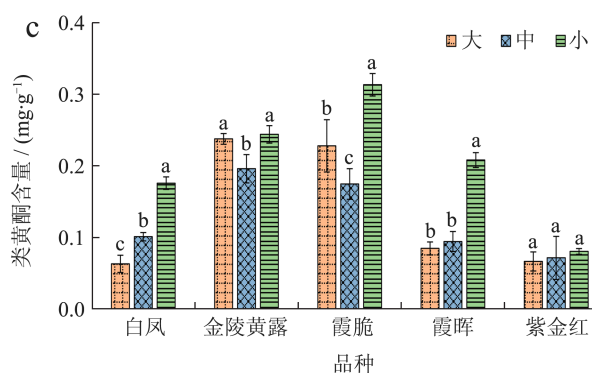
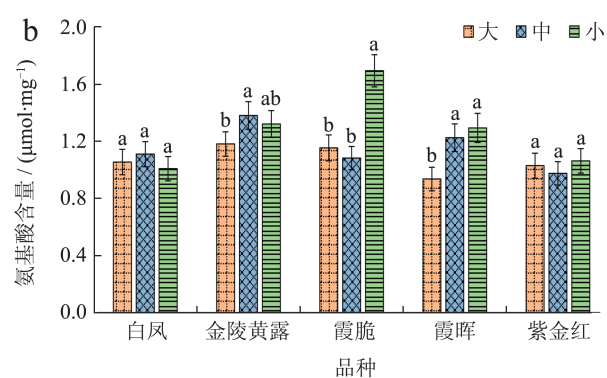
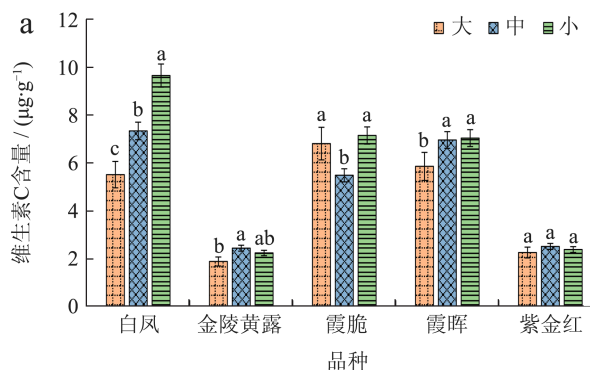


图 3 不同品种及大小规格桃果实维生素 C、氨基酸、类黄酮含量

Fig.3 The contents of Vc, amino acids and flavonoids of peach fruits with various varieties and sizes

2.3 有机酸含量差异分析

水果酸度主要由有机酸的积累决定^[24], 了解不同品种及大小规格桃果实中的有机酸含量特点, 有助于推测它们在风味和口感上的差异。测定的有机酸包括琥珀酸、酒石酸、奎宁酸、柠檬酸和苹果酸, 这些有机酸含量范围依次是 18.16~76.65、2.82~26.13、20.39~124.74、11.44~60.94、10.97~330.31 μg·g⁻¹ (图 4a~e), 总酸含量范围在 67.05~551.58 μg·g⁻¹ 之间 (图 4f)。苹果酸在所有品种中含量较高, 平均值为 158.87 μg·g⁻¹, 酒石酸在测定的所有品种中的含量最低, 平均值为 12.72 μg·g⁻¹。白凤中的总酸含量最低为 171.83 μg·g⁻¹, 且其中果的各有机酸含量均最少, 这也预示着白凤中果的酸度更低。金陵黄露的总酸含量最高为 496.97 μg·g⁻¹, 奎宁酸含量是其他品种的 2 倍以上, 而奎宁酸形成绿原酸后会果实涩味有一定影响, 这说明金陵黄露的滋味最丰富, 同时奎宁酸对金陵黄露的酸味特性有显著贡献。霞晖中的总酸含量随果重增加而显著减少 ($P<0.05$), 黄雪燕等^[25]曾在温岭高橙中发现这一变化规律。此外, 紫金红不同规格果实中有机酸差异不大。

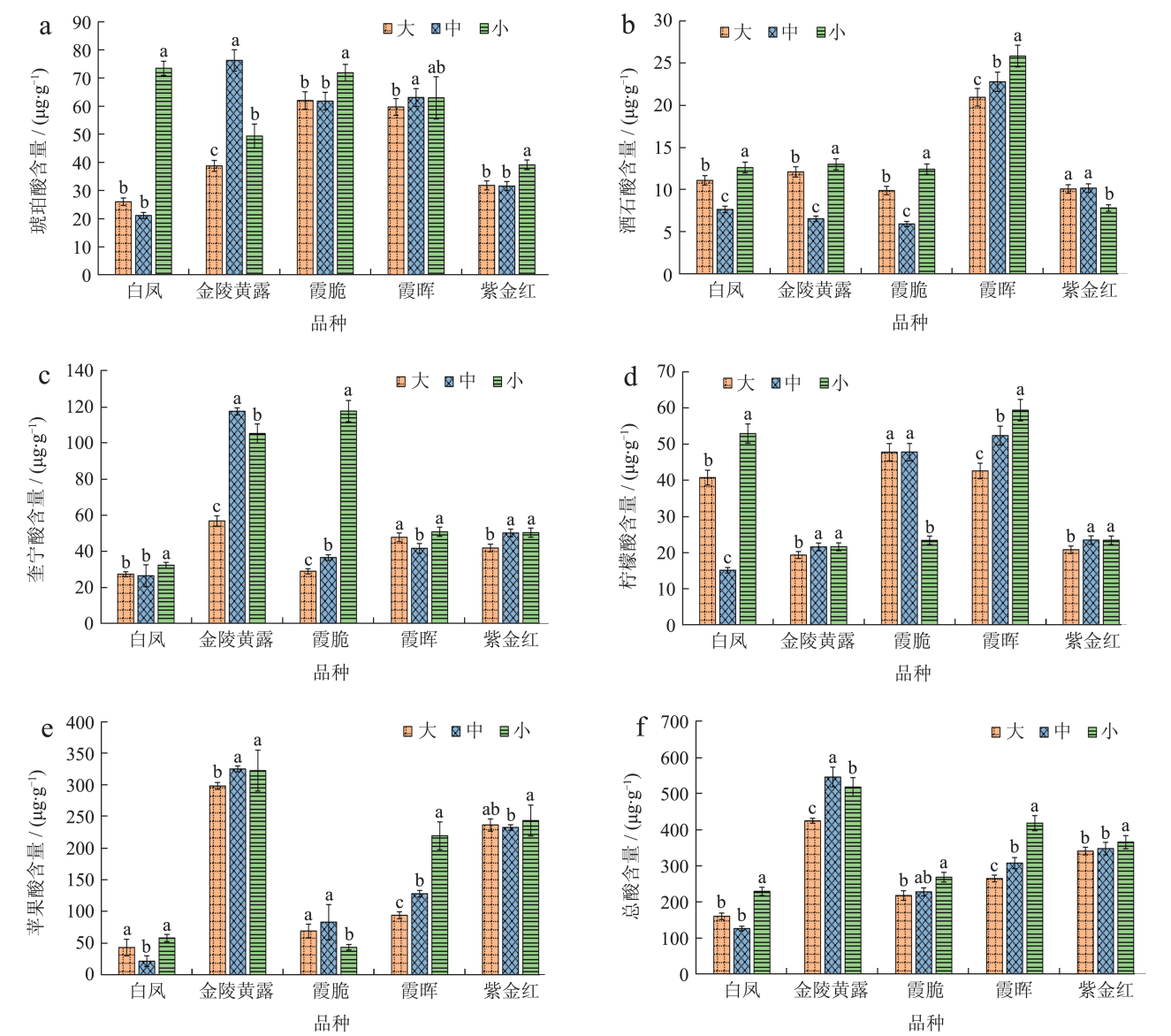


图 4 不同品种及大小规格桃果实有机酸含量

Fig.4 Organic acids content of peach fruits with various varieties and sizes

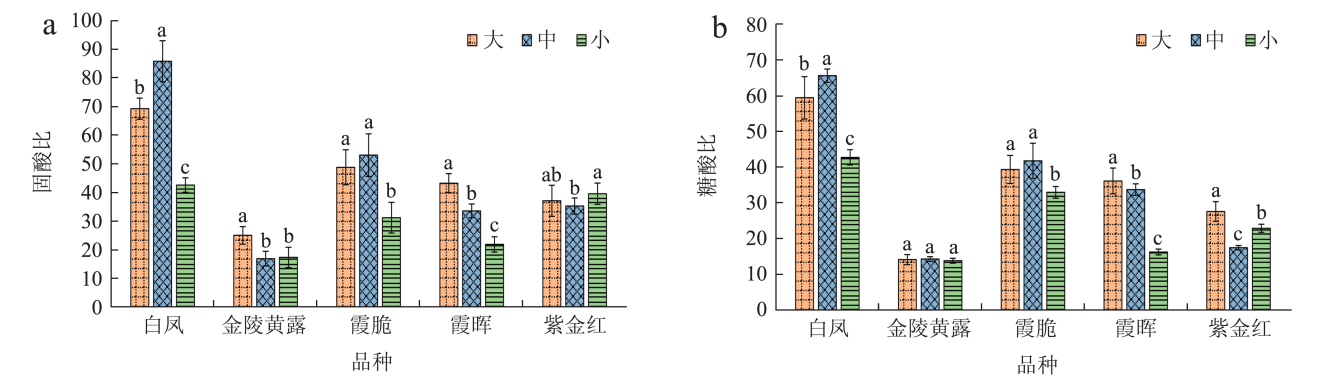


图 5 不同品种及大小规格桃果实固酸比、糖酸比

Fig.5 Sugar-acid ratio and solid-acid ratio of peach fruits with various varieties and sizes

2.4 固酸比、糖酸比差异分析

固酸比和糖酸比是衡量水果品质和风味特性的重要指标，固酸比适当的果实具有更好的适口性，糖酸比越高的果实甜度相对更加明显^[26,27]。各品种及规格桃子的固酸比在 12.31~99.23 之间（图 5a），糖酸比范围在 12.80~67.43 之间（图 5b）。白凤中的固酸比最高（65.92），金陵黄露中的固酸比最少（19.74）。在所测定的 5 个品种中，除紫金红外，其余品种均是小果中的固酸比较低。霞晖中的固酸比随果实重量增大而增多。丁志祥等^[28]观察到，锦橙单果重越大，固酸比也越高。各品种糖酸比表现为白凤>霞脆>紫金红>霞晖>金陵黄露，分别为 55.94、38.03、28.71、22.65、14.07。霞脆、霞晖、白凤小果糖酸比分别为 32.94、16.25、42.74，显著低于其大果和中果（ $P<0.05$ ）。而金陵黄露不同大小规格之间桃果实糖酸比差异不大。以上结果表明，大部分品种桃果实大中果的糖酸比、固酸比高于小果，尽管小果中营养物质含量比较高，但小果可能口感欠佳。

2.5 不同品种规格桃果实矿质元素分析

矿质元素对于维持人体正常的生理功能、促进健康和预防疾病至关重要，桃果实中矿质元素含量已成为果实评价的重要指标。通过 ICP-AES 和 ICP-MS 测定了桃果实中的矿质元素，发现各品种桃果实的常量元素 K 含量最高，平均含量为 2.11 g·kg⁻¹，其次为 Ca（83.91 mg·kg⁻¹）、Mg（79.86 mg·kg⁻¹）、Na（8.11 mg·kg⁻¹），

然而在霞脆桃果实中 Ca 和 Mg 含量趋势相反（表 2）。桃果实的微量元素中，B 元素（2.80 mg·kg⁻¹）含量最高、其次是 Fe 元素（2.06 mg·kg⁻¹）、Al 元素（0.80 mg·kg⁻¹）、Zn 元素（0.69 mg·kg⁻¹）、Cu 元素（0.61 mg·kg⁻¹）、Mn 元素（0.61 mg·kg⁻¹）（表 3）。不同品种桃果实比较中，霞脆中 Fe、B、Zn 元素含量分别是其他品种的 1.80~2.25 倍、1.13~1.23 倍、1.16~1.83 倍，其中 Fe 元素的含量是其他品种含量的近 2 倍。Fe 元素参与了人体多个生理过程，包括氧气的运输、能量代谢、免疫功能以及大脑的健康发育，缺铁会导致贫血、疲劳和免疫力下降等问题^[29]。霞晖中 Mo 含量较高，是其他品种 1.17~1.74 倍，紫金红中 Ca、Mg 元素含量较高，是其他品种 1.11~2.01 倍、1.16~1.34 倍。白凤中大部分矿质元素含量均较低。同一品种、不同大小规格桃果实比较发现，白凤中果 Cu、Sr、Zn 元素含量高于其大果和小果，金陵黄露中果 Mo、Fe 元素含量较高，霞晖中果 Ba、Ca 元素含高，霞脆的小果 Mg、Sr 元素含量明显高于大果，紫金红小果中 Ba、Mg、Mo 元素含量高于其大中果。不同大小的果实其矿质元素的分布和浓度有所不同^[30]，但大部分品种桃果实中的矿质元素含量均在中小果中的含量较高。果实大小与桃果实膨大期的生长有关，桃果实生育期存在两个快速膨大期，膨大速度和持续时间共同决定了最终的果实大小^[31]。相比于中小果，大果在膨大期时细胞体积扩张速率快，进而导致矿质元素含量被稀释。

表 2 不同品种及大小规格桃果实常量元素含量

Table 2 Constant elements content of peach fruits with various varieties and sizes					
品种	规格	K/(g·kg ⁻¹)	Ca/(mg·kg ⁻¹)	Mg/(mg·kg ⁻¹)	Na/(mg·kg ⁻¹)
白凤	大	2.23 ± 0.02 ^a	54.37 ± 4.57 ^a	66.81 ± 1.31 ^b	4.50 ± 0.74 ^a
	中	2.23 ± 0.10 ^{ab}	59.02 ± 8.88 ^a	73.28 ± 3.12 ^a	6.25 ± 1.59 ^a
	小	2.16 ± 0.05 ^b	52.19 ± 3.82 ^a	69.05 ± 4.20 ^{ab}	5.74 ± 1.45 ^a
金陵黄露	大	1.93 ± 0.08 ^a	47.4 ± 10.79 ^b	80.96 ± 6.67 ^a	9.41 ± 1.01 ^a
	中	2.04 ± 0.06 ^a	88.64 ± 17.93 ^a	65.01 ± 7.21 ^b	9.20 ± 0.73 ^a
	小	1.99 ± 0.07 ^a	97.93 ± 17.66 ^a	77.02 ± 6.51 ^{ab}	8.97 ± 0.81 ^a
霞脆	大	2.04 ± 0.12 ^a	75.83 ± 9.54 ^a	66.16 ± 4.1 ^b	9.49 ± 0.53 ^a
	中	2.15 ± 0.12 ^a	83.10 ± 5.68 ^a	89.11 ± 5.83 ^a	8.50 ± 0.53 ^b
	小	2.06 ± 0.11 ^a	72.26 ± 8.35 ^a	89.85 ± 3.46 ^a	8.17 ± 0.64 ^b
霞晖	大	2.11 ± 0.06 ^a	77.14 ± 11.75 ^c	75.52 ± 6.81 ^a	8.52 ± 0.80 ^a
	中	2.16 ± 0.04 ^a	117.76 ± 5.38 ^a	81.51 ± 7.66 ^a	9.47 ± 0.34 ^a
	小	2.16 ± 0.06 ^a	99.74 ± 3.57 ^b	79.87 ± 5.30 ^a	8.95 ± 1.03 ^a
紫金红	大	2.05 ± 0.12 ^a	110.17 ± 11.42 ^{ab}	87.96 ± 4.00 ^b	8.20 ± 0.44 ^a
	中	2.05 ± 0.08 ^a	124.57 ± 12.07 ^a	90.68 ± 12.01 ^{ab}	8.30 ± 0.59 ^a
	小	2.22 ± 0.13 ^a	98.47 ± 4.93 ^b	105.16 ± 8.60 ^a	7.94 ± 0.63 ^a

注：同一品种不同规格大小果实之间比较，不同小写字母表示具有显著性差异（ $P<0.05$ ）。

表 3 不同品种及大小规格桃果实微量元素含量
Table 3 Trace elements content of peach fruits with various varieties and sizes

品种	规格	B(mg·kg ⁻¹)	Zn(mg·kg ⁻¹)	Cu/(mg·kg ⁻¹)	Mn/(mg·kg ⁻¹)	Ti/(mg·kg ⁻¹)	Fe/(μg·kg ⁻¹)	Al/(μg·kg ⁻¹)	Ba/(μg·kg ⁻¹)	Ga/(μg·kg ⁻¹)	Mo/(μg·kg ⁻¹)	Sr/(μg·kg ⁻¹)
白凤	大	2.75±0.22 ^a	0.46±0.08 ^c	0.59±0.01 ^c	0.45±0.02 ^a	0.11±0.02 ^a	1.62±0.15 ^a	0.52±0.04 ^a	67.81±6.90 ^e	19.08±9.72 ^{ab}	7.68±3.21 ^a	12.49±11.94 ^b
	中	2.83±0.17 ^a	0.85±0.03 ^a	0.69±0.02 ^a	0.44±0.02 ^a	0.12±0.01 ^a	1.45±0.03 ^a	0.49±0.01 ^a	51.05±4.42 ^b	25.32±2.92 ^a	6.08±1.47 ^a	28.75±4.69 ^a
	小	2.82±0.06 ^a	0.66±0.02 ^b	0.61±0.01 ^b	0.41±0.01 ^b	0.11±0.01 ^a	1.46±0.09 ^a	0.50±0.03 ^a	83.86±9.56 ^a	11.10±0.42 ^b	7.20±1.51 ^a	25.59±4.92 ^{ab}
金陵黄露	大	2.83±0.21 ^a	0.80±0.05 ^a	0.68±0.03 ^a	0.61±0.05 ^{ab}	0.14±0.02 ^a	1.49±0.06 ^b	1.03±0.12 ^a	105.95±16.14 ^a	16.58±2.87 ^b	6.46±1.74 ^{ab}	135.86±42.28 ^a
	中	2.61±0.09 ^a	0.77±0.06 ^a	0.65±0.04 ^a	0.56±0.04 ^b	0.14±0.01 ^a	1.87±0.10 ^a	0.92±0.04 ^a	95.58±13.74 ^a	18.31±1.83 ^b	7.65±1.59 ^a	117.52±28.46 ^a
	小	2.71±0.11 ^a	0.78±0.08 ^a	0.66±0.04 ^a	0.63±0.03 ^a	0.14±0.01 ^a	1.83±0.10 ^a	0.85±0.05 ^a	110.33±27.26 ^a	22.53±1.38 ^a	4.89±0.70 ^b	120.64±36.99 ^a
霞脆	大	3.28±0.12 ^a	0.89±0.03 ^a	0.50±0.02 ^a	0.68±0.04 ^a	0.18±0.03 ^a	3.10±0.68 ^a	0.87±0.09 ^a	58.36±10.18 ^a	25.13±12.79 ^a	9.99±0.66 ^a	40.46±6.13 ^b
	中	3.19±0.16 ^a	0.93±0.01 ^a	0.51±0.03 ^a	0.68±0.03 ^a	0.15±0.03 ^a	3.45±0.47 ^a	1.10±0.08 ^a	55.19±6.11 ^a	40.22±13.72 ^a	9.30±1.48 ^a	77.12±20.17 ^a
	小	3.05±0.21 ^a	0.91±0.03 ^a	0.49±0.02 ^a	0.70±0.02 ^a	0.15±0.02 ^a	3.59±0.46 ^a	0.84±0.02 ^b	62.73±20.38 ^a	24.12±8.54 ^a	9.07±1.79 ^a	89.02±6.36 ^a
霞晖	大	2.76±0.10 ^a	0.64±0.07 ^a	0.54±0.04 ^b	0.76±0.06 ^a	0.10±0.01 ^a	1.48±0.36 ^a	1.02±0.08 ^a	61.00±15.51 ^a	27.20±3.80 ^a	14.18±1.63 ^a	66.11±8.72 ^a
	中	2.85±0.18 ^a	0.65±0.07 ^a	0.57±0.04 ^{ab}	0.71±0.08 ^a	0.11±0.02 ^a	1.85±0.07 ^a	1.13±0.08 ^a	96.1±39.88 ^a	22.17±4.56 ^a	9.69±2.21 ^b	60.29±10.71 ^a
	小	2.61±0.08 ^a	0.45±0.07 ^b	0.60±0.03 ^a	0.66±0.03 ^a	0.09±0.01 ^a	2.02±0.25 ^a	0.88±0.05 ^b	65.35±22.26 ^a	23.99±7.06 ^a	8.42±0.80 ^b	62.55±10.96 ^a
紫金红	大	2.91±0.20 ^a	0.50±0.03 ^a	0.71±0.08 ^a	0.58±0.05 ^a	0.16±0.01 ^a	1.82±0.09 ^b	0.72±0.04 ^a	51.24±7.17 ^b	15.51±3.73 ^a	7.76±1.74 ^b	182.60±29.62 ^a
	中	2.45±0.24 ^a	0.49±0.02 ^a	0.74±0.08 ^a	0.61±0.07 ^a	0.19±0.03 ^a	1.95±0.06 ^a	0.60±0.01 ^b	102.18±22.29 ^a	19.80±2.81 ^a	7.30±2.13 ^b	196.22±28.25 ^a
	小	2.28±0.15 ^a	0.51±0.03 ^a	0.65±0.11 ^a	0.61±0.04 ^a	0.17±0.02 ^a	1.87±0.12 ^{ab}	0.60±0.05 ^b	135.75±21.48 ^a	19.08±2.59 ^a	12.88±0.59 ^a	171.84±15.72 ^a

注：同一品种不同规格大小果实之间比较，不同小写字母表示具有显著性差异（*P*<0.05）。

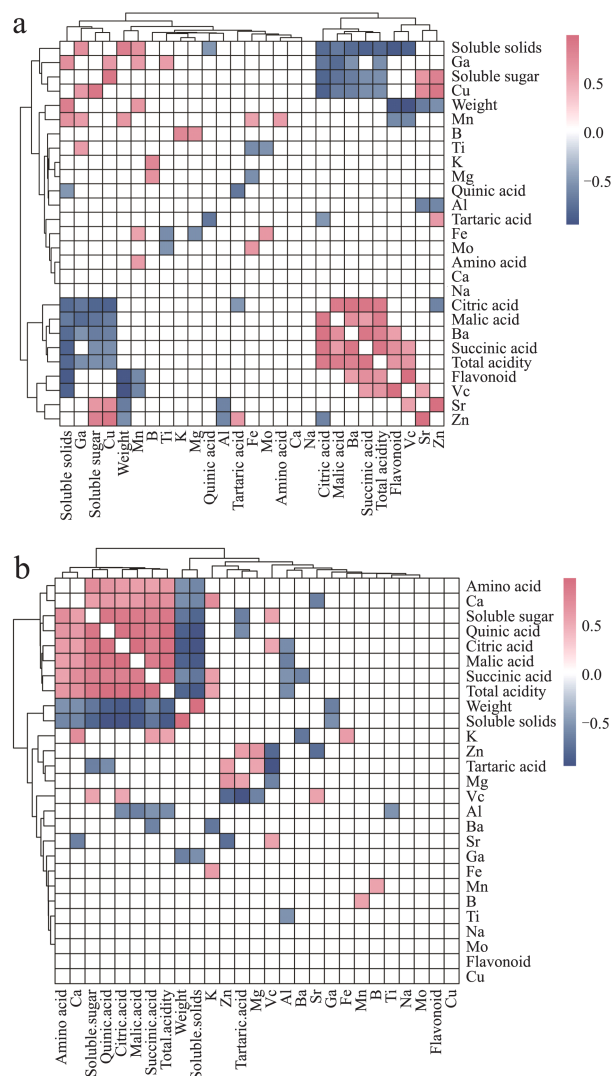


图6 不同规格桃果实表型、品质指标与矿质元素含量相关性分析
Fig.6 Correlation analysis of phenotype indexes, quality indexes and mineral element content of peach fruits with different sizes

注: a 为白凤, b 为金陵黄露。

2.6 相关性分析

同一品种不同大小桃果实各指标之间相关性存在一定差异。以白凤为例,对不同规格果实各指标进行相关性分析(图6),发现果实质量与类黄酮、Vc、Sr、Zn呈显著负相关($P<0.05$)。可溶性糖与Zn、Sr和Cu之间呈显著正相关,表明这些元素对糖累积存在关联。可溶性固形物和可溶性糖均与柠檬酸、苹果酸、琥珀酸、总酸呈显著负相关($P<0.05$),这与成熟期桃果实糖和酸之间的平衡关系有关。氨基酸与Mn之间呈显著正相关($P<0.05$),这预示这Mn可能会与氨基酸的合成调控有关。Vc与Sr、类黄酮、总酸、琥珀酸呈显著正相关($P<0.05$)。此外,琥珀酸、柠檬酸、苹果酸、总酸之间呈显著正相关($P<0.05$)。K、Mg与B之间呈显著正相关,Al和Zn之间呈显著负

相关($P<0.05$)。金陵黄露中不同规格果实各指标相关性分析结果如图6b所示,质量与可溶性固形物呈显著正相关,但与可溶性固形物、氨基酸、总酸、奎宁酸、柠檬酸、苹果酸、Ca呈显著负相关($P<0.05$)。Vc与Mg、Zn以及酒石酸呈显著负相关,但与柠檬酸、可溶性糖显著正相关($P<0.05$)。

3 结论与展望

本研究比较了江苏地区不同品种及大小桃果实营养品质与矿质元素差异。明确了不同品种桃果实营养品质及矿质元素特征,依据成分特征可赋予不同桃果实“标签”。同一品种的不同大小果实中,中小果的营养物质及矿质元素含量相对更为丰富,并非果实越大,营养成分含量越高。试验结果为桃果实营养品质评价及分等分级提供重要的理论基础。此外,本研究基于有机酸、氨基酸、类黄酮总量以及表型指标和部分矿质元素含量对桃果实进行分析,但桃果实中还富含N、P等大量矿质元素以及各类其他小分子营养成分,未来将更全面地对桃果实中的矿质元素进行分析,并且通过代谢组学方法,通量测定不同种类及规格桃果实小分子营养成分差异,完善桃果实品质评价理论。

参考文献

- [1] 阚娟,林仙佩,万冰,等.不同溶质型桃果实成熟过程中酚类代谢与抗氧化能力的研究[J].现代食品科技,2017,33(6):74-79.
- [2] CLAUDIA S, ANTONELLA C, SUSANNE N, et al. Post-harvest UV-B irradiation induces changes of phenol contents and corresponding biosynthetic gene expression in peaches and nectarines [J]. Food Chemistry, 2014, 163: 51-60.
- [3] 黄丽萍,张倩茹,尹蓉,等.不同品种桃果实糖、酸、Vc含量分析[J].农学报,2017,7(10):51-55.
- [4] MATEJA C, ROBERT V, FRANCI S, et al. Evaluation of peach and nectarine fruit quality and correlations between sensory and chemical attributes [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85(15): 2611-2616.
- [5] ANTHONY B M, MINAS I S. Redefining the impact of preharvest factors on peach fruit quality development and metabolism: A review [J]. Scientia Horticulturae, 2022, 297:110919.
- [6] 叶浩宇,张志祥,朱恩泽,等.不同水蜜桃品种特征特性识别及品质测定[J].浙江农业科学,2024,65(11):2623-2627.
- [7] 赵悦,陈蒙,张雪,等.不同品种桃果实总酚、可溶性固形物及矿质元素含量差异[J].江苏农业科学,2024,52(17):176-184.
- [8] XIN R, LIU X H, WEI C Y, et al. E-Nose and GC-MS reveal a difference in the volatile profiles of white- and red-fleshed peach fruit [J]. Sensors, 2018, 18(3): 765-765.
- [9] LI J, LI F, ZHANG F, et al. Peach fruit ripening: Proteomic comparative analyses of two cultivars with different flesh texture phenotypes at two ripening stages [J]. Scientia Horticulturae, 2020, 260: 108610.

- [10] PU X, TIAN J, LI J, et al. Genome-wide identification and expression analysis of the *fw2.2-like* Gene family in pear [J]. Horticulturae, 2023, 9(4): 429.
- [11] 中华人民共和国农业部种植业管理司.NY/T1792-2009桃等级规格[S].北京:中华人民共和国农业部,2009.
- [12] 贾惠娟,水口京子,冈本五郎.果实大小对白肉桃果实品质的影响[J].果树学报,2003,6:439-444.
- [13] CHEN K, CAO J P, SUN J, et al. Comparison of physiochemical characteristics of *Citrus reticulata* cv. Shatangju fruit with different fruit sizes after storage [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 31: 100774.
- [14] 韩飞,陈美艳,李昆同,等.不同产地‘金圆’猕猴桃低温贮藏下的生理指标及贮藏性变化[J].植物科学学报,2018,36(3):381-392.
- [15] 王塔娜.近红外光谱在桃果实精准采摘中的应用研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2023.
- [16] LIN J H, HU Q, XIA J M, et al. Non-destructive fruit firmness evaluation using a soft gripper and vision-based tactile sensing [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108256.
- [17] WANG Y, HAO Y J, ZHOU D D, et al. Differences in commercial quality and carotenoids profile of yellow- and white-fleshed nectarine fruit during low temperature storage and the regulation of carotenoids by sugar [J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 197: 112206.
- [18] 尹铎令.三个品种苹果果实大小与品质的关系研究[D].泰安:山东农业大学,2023.
- [19] ELSA D, YVES G, VALENTINA B, et al. Profiling sugar metabolism during fruit development in a peach progeny with different fructose-to-glucose ratios [J]. BMC Plant Biology, 2014, 14(1): 336.
- [20] CALDER C P, KREIDER B R, MCKAY L D. Enhanced vitamin c delivery: a systematic literature review assessing the efficacy and safety of alternative supplement forms in healthy adults [J]. Nutrients, 2025, 17(2): 279.
- [21] WANG M, GUO J, LIN H, et al. UHPLC-QQQ-MS/MS method for the simultaneous quantification of 18 amino acids in various meats [J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11: 1467149.
- [22] ZHANG C, ZHAI Y, HAN T, et al. Analysis of the flavonoidome reveals the different health-promoting flavonoid characteristics in fruit [J]. Antioxidants, 2023, 12(9): 1665.
- [23] 俞安炜,阿不都苏甫尔·吾甫尔江,温玥,等.不同大小库尔勒香梨果实品质综合评价[J].北方园艺,2024,20:16-22.
- [24] MIAO S, WEI X, ZHU L, et al. The art of tartness: the genetics of organic acid content in fresh fruits [J]. Horticulture Research, 2024, 11(10): 225.
- [25] 黄雪燕,陈丹霞,王燕斌,等.温岭高橙果实大小与品质的相关性研究[J].浙江柑桔,2008,25(4):7-9.
- [26] GASIC K, ABDELGHAFAR A, REIGHARD G, et al. Fruit maturity affects fruit quality and bioactive compound accumulation in peach [J]. Acta Horticulturae, 2016, (1119): 197-201.
- [27] PAN T F, MOAAZ M A, GONG J M, et al. Fruit physiology and sugar-acid profile of 24 pomelo (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) cultivars grown in subtropical region of China [J]. Agronomy, 2021, 11(12): 2393.
- [28] 丁志祥,唐尧春,吴正琴,等.锦橙果实大小与品质关系的观察研究[J].河北农业大学学报,1993,35(4):6-8.
- [29] NAZANIN A, RICHARD H, ROYA K. Review on iron and its importance for human health [J]. Journal of Research in Medical Sciences, 2014, 19(2): 164-174.
- [30] YUAN C, XU K, WANG Y, et al. Effects of preharvest bagging on soft nose disorder in mango (*Mangifera indica* L.cv.‘Keitt’) during postharvest [J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2023, 98(6): 799-806.
- [31] VEERAPPAN K, NATARAJAN S, CHUNG H, et al. Molecular insights of fruit quality traits in peaches, *Prunus persica* [J]. Plants, 2021, 10(10): 2191.