

刘毓超,王辉,贾一鸣,等.中国红富士苹果糖、酸、多酚分析及产区溯源模型构建[J].食品工业科技,2023,44(22):285-293. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030245

LIU Yuchao, WANG Hui, JIA Yiming, et al. Assay on Sugars, Acid and Polyphenols of Red Fuji Apple in Chinese Main Production Area and Models of Reginal Authenticate[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(22): 285-293. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030245

· 分析检测 ·

中国红富士苹果糖、酸、多酚分析及 产区溯源模型构建

刘毓超¹,王 辉¹,贾一鸣¹,张 晓²,朱丽霞^{1,3,*}

(1.塔里木大学食品科学与工程学院,新疆阿拉尔 843300;

2.塔里木大学信息工程学院,新疆阿拉尔 843300;

3.南疆特色农产品深加工兵团重点实验室,新疆阿拉尔 843300)

摘 要:中国各产区红富士苹果糖、酸、多酚等营养品质存在差异,构建其产地溯源技术有利于实施产区保护、特色产品保真及产业可持续发展。本文对新疆阿克苏、甘肃静宁、陕西洛川、河南灵宝、山东烟台和云南昭通 6 大产区红富士苹果的糖类、总酸及多酚类等 18 个营养品质指标进行检测分析,基于多元统计分析筛选有效产地溯源营养品质指标,构建红富士苹果不同产地鉴别的判别模型。结果表明,相对于其他产区,阿克苏红富士苹果总糖和山梨醇等含量偏高;静宁红富士苹果总酚和绿原酸等含量偏高;灵宝红富士苹果儿茶素和根皮素等含量偏高;洛川红富士苹果果糖和根皮苷等含量偏高;烟台红富士苹果糖酸比和芦丁等含量偏高;昭通红富士苹果槲皮苷和表儿茶素等含量偏高。所测果实指标做正交偏最小二乘判别分析, Q^2 值 0.794,矩阵 R^2X 值 0.885,区分参数 R^2Y 值 0.874,并建立了正确判别率为 93.33% 有效 OPLS-DA 产区识别模型。利用线性判别,筛选得到 V_C 、山梨醇、儿茶素、槲皮素糖苷类、槲皮素鼠李糖苷、槲皮苷、芦丁和槲皮素这 8 个有效指标,能 100% 区分各个产区红富士。各产区果实糖积累与产区环境密切相关,总糖和总酸含量与降雨量显著负相关,蔗糖含量与温差呈显著正相关。本研究有望为中国红富士苹果产业发展与地理标志产品保护提供技术支撑。

关键词:红富士苹果,糖,多酚,产区,溯源

中图分类号:TS255.7

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2023)22-0285-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030245



本文网刊:

Assay on Sugars, Acid and Polyphenols of Red Fuji Apple in Chinese Main Production Area and Models of Reginal Authenticate

LIU Yuchao¹, WANG Hui¹, JIA Yiming¹, ZHANG Xiao², ZHU Lixia^{1,3,*}

(1.College of Food Science and Engineering, Tarim University, Aral 843300, China;

2.College of Information Engineering, Tarim University, Aral 843300, China;

3.South Xinjiang Special Agricultural Products Deep Processing Corps Key Laboratory, Aral 843300, China)

Abstract: The nutritional quality of Fuji apple candy, acid, and polyphenols varies among production areas in China, so the construction of its origin traceability technology is beneficial to the implementation of production area protection, characteristic product fidelity and sustainable industrial development. Therefore, 18 nutritional quality indexes such as total carbohydrate, acid and polyphenols of Fuji apple from six production areas, namely, Aksu in Xinjiang, Jingning in Gansu, Luochuan in Shaanxi, Lingbao in Henan, Yantai in Shandong and Zhaotong in Yunnan were tested and analyzed in this paper. And effective origin traceability nutritional quality indicators were screened based on multivariate statistical analysis to construct a method for the identification of different origins of Fuji apple. The discriminative model for the identification

收稿日期: 2023-03-24

基金项目: 新疆兵团科技攻关项目(2018AB042);国家自然科学基金项目(31960503);校长基金(TDZKBS202305)。

作者简介: 刘毓超(1991-),男,硕士研究生,研究方向:食品生物技术,E-mail: fovervv@163.com。

* 通信作者: 朱丽霞(1975-),女,博士,教授,研究方向:食品加工及贮藏技术,E-mail: 120050068@taru.edu.cn。

of different production areas of Fuji apple was constructed. The results showed that compared with other production areas, the contents of Aksu Fuji apple total carbohydrate and sorbitol were high, the contents of Jingning Fuji apple total phenols and chlorogenic acid were high and the contents of Lingbao Fuji apple catechin and phloretin were high. The contents of Luochuan Fuji apple fructose and phlorizin were high, the contents of Yantai Fuji apple sugar-acid ratio and rutin were high, the contents of Zhaotong Fuji apple quercitrin and epicatechin were high. The fruit indicators measured were subjected to orthogonal partial least squares discriminant analysis with a Q^2 value of 0.794, a matrix R^2X value of 0.885 and a differentiation parameter R^2Y value of 0.874, and a valid OPLS-DA appellation identification model with a correct discrimination rate of 93.33% was established. The linear discriminant was used and eight valid indicators including V_C , sorbitol, catechin, quercetin glycoside, quercetin rhamnoside, quercitrin, rutin and quercetin were screened and obtained, which could distinguish 100% of Fuji apple in each appellation. Fruit sugar accumulation in each appellation was closely related to the appellation environment. Total carbohydrate and total acid content were significantly and negatively correlated with rainfall, and sucrose content was significantly and positively correlated with temperature difference. This study was expected to provide technical support for the development of Fuji apple industry and the protection of geographical indication products in China.

Key words: red Fuji apple; sugar; polyphenols; production region; regional authenticate

苹果是世界四大水果之一, 在我国的种植面积与产量约占全世界总面积和总产量的 50%^[1]。而红富士苹果又是我国苹果栽种面积最大的品种, 其产量超过我国苹果总产量一半之多^[2]。我国红富士苹果主产区有黄土高原(陕、甘、晋、豫)、环渤海湾(辽、鲁)、西南冷凉(云、川)和新疆特色产区等^[3]。红富士苹果的生长因受海拔和气候环境条件的影响, 在不同种植地区的果实品质会存在一定差异。山东烟台果实形态外观端正, 果肉甜脆^[4]。云南昭通果实成熟后呈金黄色(部分)、果肉细腻^[5]。陕西果实果形硕大且尺寸均匀、颜色鲜艳^[6]。甘肃静宁果实脆甜汁多^[7]。河南灵宝果实果面红润、酸甜可口^[8]。新疆阿克苏果实皮薄肉脆, 尤其果核周围形成了透明无色罕见的“冰糖心”结构^[9]。随着我国苹果研究的不断深入和产业的不断发展, 对苹果已从外在品质转入更深层次的内在营养品质的研究^[10]。苹果营养品质包括风味^[11]、滋味^[11]、质地^[12]、糖类物质^[13]、有机酸^[14]、多酚^[15]、矿物质元素及微量元素^[16]等。苹果果实营养品质是其商品等级划分的重要标志, 从根本上决定其市场竞争力。近年来市场中出现假冒红富士苹果的现象, 以新疆阿克苏红富士苹果为例, 不仅扰乱真正阿克苏红富士苹果的销售市场, 而且还破坏了其国家地理标志保护产品的称号, 因此对各产区红富士苹果进行溯源并保护其地理标志显得尤为重要^[17]。

农产品产地溯源是农产品溯源体系的重要组成部分, 有利于实施农产品原产地保护战略, 保护名牌, 保护特色产品, 稳定市场秩序^[18]。常见的农产品溯源方法有感官特性评价、特征成分指纹图谱分析^[19]、光谱分析^[20]、基因技术^[21]、稳定同位素法^[22]、矿物元素分析^[23]、微生物图谱^[24]等。张雁鸣等^[25]利用稳定同位素对不同省份的西瓜进行了溯源研究, 可以实现新疆、广西、海南和山东 4 个产地的西瓜样本区分; 李富荣等^[26]检测分析不同产地陈皮中 32 种矿质元素含量的差异, 筛选基于矿质元素指纹分析技术的有效产地溯源指标。上述溯源方法在检测分析时需依靠

相关高精检测设备, 但设备普及性相对较差, 多数测试基于科研机构委托, 使得市场应用受到限制, 而且当地土地施肥、果实的果品和品级对溯源有不小的影响, 使得溯源的精准度受制于果实品质品级。同时, 这些检测分析手段, 忽略了农产品市场消费者感兴趣的果品营养品质特色品质, 使得地方果品特色品质的开发与市场应用受限。由此, 基于地方果品营养品质, 选用更为广谱性的检测分析方法, 开发助于农产品特色品质挖掘与产业发展的新型溯源方式值得探索。

本文对多产区红富士苹果营养品质指标进行检测并结合产区气象因子分析, 对比各产区果实糖、总酸、糖酸比、总酚、多酚等 18 个营养品质指标差异。采用正交偏最小二乘判别分析和线性判别分析对果品地方特色品质评价指标进行筛选建模, 同时筛选出的营养品质指标也可用于农产品溯源, 不仅操作简单, 而且节省成本, 在能起到农产品追溯区分的同时可以为农产品产地和品牌的保护作用提供支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

冰乙酸、丙酮、硫酸、硼酸、盐酸、 β -羟基乙醇、邻苯二甲醛、抗坏血酸 均为分析纯, 天津市致远化学试剂有限公司; 草酸、碘化钾、碘酸钾、酒石酸钾钠、硫酸钾、氢氧化钠、碳酸钠、无水乙醇、亚甲基蓝、亚铁氰化钾、乙酸锌、福林酚 均为分析纯, 南京化学试剂有限公司; 甲酸、甲醇 色谱级, 天津赛孚瑞科技有限公司; 果糖、蔗糖、葡萄糖、山梨醇、儿茶素、表儿茶素、根皮苷、绿原酸、槲皮素糖苷类、槲皮苷、槲皮素鼠李糖苷、芦丁、槲皮素 均为标准品(含量 $\geq 99.9\%$), Sigma-Aldrich 公司。

DZKW-D-2 电热恒温水浴锅 中国北京永光明医疗仪器厂; CPA1245 万分之一电子天平 德国 Sartorius 公司; UV-2450 紫外分光光度计、LC-20A 高效液相色谱仪 日本 Shimadzu 公司; TGL-20B 高速台式离心机 中国上海安亭科学仪器厂。

1.2 实验方法

1.2.1 样品采集 于 2021 年 11 月份分别在山东烟台、甘肃静宁、河南灵宝、陕西洛川、云南昭通、新疆阿克苏 6 个产区,选择成熟度相似的富士苹果若干(所选果树树龄相当,栽培管理和树势基本一致)、色泽相近、大小均匀、无机械损伤、无病虫害的果实用于实验。每个产区随机抽取苹果 15 个,每 3 个苹果混合取样(沿果实赤道线附近选取果肉),设置 5 个重复实验。将选取果肉切碎并放置(−80 ℃ 冰箱)备用,为后期测定相关指标做准备。

表 1 不同苹果(生长期)产区信息
Table 1 Information on different apple (growing season) producing areas

序号	产区	样品数 (个)	生长期温 (℃) ^[27]	生长期降雨量 (mm) ^[27]	纬度
1	新疆阿克苏	5	14.5	10.90	39°28'57"~41°30'10"
2	甘肃静宁	5	11.1	63.10	35°01'~35°45'
3	云南昭通	5	9.7	81.40	26°55'~28°36'
4	陕西洛川	5	10.1	88.96	35°26'29"~36°04'12"
5	河南灵宝	5	8.2	89.70	110°21'42"~112°01'24"
6	山东烟台	5	7.4	104.02	36°16'~38°23'

1.2.2 指标测定 总糖含量参考 GB/T 10782-2006^[28]的方法;总酸含量参考 GB/T 12456-2008^[29]的方法;总酚含量参考福林酚法^[30]测定;多酚含量参考贾一鸣^[31]多酚测定方法;单糖含量参考刘玉莲等^[32]单糖测定方法。

维生素 C(V_C)的测定:采用实验室改良滴定方法进行测定。取 8 g 样品于 150 mL 锥形瓶中,依次加入 50 mL 2% 草酸、1 mL 6% 碘化钾溶液并滴加 3 滴 1% 淀粉指示剂(现配现用),再用标定好的 0.001 N(0.000167 mol/L)碘酸钾溶液滴定至铁青色(30 s 不褪色即滴定终点),进行 3 次测定,并记录用量,同时做空白实验,通过碘酸钾滴定溶液消耗量计算维生素 C 含量。

1.3 数据处理

测定的总糖、总酸、总酚、V_C、多酚、单糖等,每个产区取 15 个样品分 5 组测定,每组数据测 3 个平行。测定数据利用 SPSS 25.0 进行不同产区间的方差分析、显著性分析和判别分析,相关性分析使用 R 语言(pheatmap),用 SIMCA13.0 进行正交偏最小二乘判别分析。

2 结果与分析

2.1 红富士苹果 6 大主产区营养指标比较

由表 2 可知,各地区果实营养品质指标存在差异,变异系数范围 8.77%~43.23%。变异系数最大的营养品质指标为绿原酸 43.23%,平均值为 0.09 mg/g,含量变化范围 0.02~0.18 mg/g;其次是山梨醇 42.67%,平均值为 5.18 mg/g,含量变化范围 2.74~10.20 mg/g;再是芦丁 37.82%,平均值为 0.80 mg/g,含量变化范

围 0.49~1.77 mg/g,变异系数最小的营养品质指标是糖酸比 6.86,平均值为 56.84,含量变化范围 43.54~61.98。纵观 18 种果实营养品质指标,变异系数越大的绿原酸、山梨醇、芦丁、根皮苷和槲皮素等指标可以作为各产区果实的差异营养品质指标,且可以区分各产区果实。

表 2 不同产区品质指标结果分析
Table 2 Analysis of quality index results in different production areas

指标	平均值	标准偏差	变异系数(%)	最小值	最大值
总糖(%)	10.93	1.64	14.9	8.56	14.78
总酸(%)	0.19	0.03	16.98	0.14	0.26
糖酸比	56.84	3.90	6.86	43.54	61.98
V _C (mg/100 g)	3.68	1.01	27.31	2.32	5.57
总酚(g/100 g)	0.74	0.15	19.79	0.45	1.02
果糖(mg/g)	71.86	6.30	8.77	60.35	83.21
葡萄糖(mg/g)	26.27	5.15	19.62	16.33	37.35
蔗糖(mg/g)	25.78	5.68	22.04	19.11	39.41
山梨醇(mg/g)	5.18	2.21	42.67	2.74	10.20
儿茶素(mg/g)	0.08	0.02	22.16	0.04	0.11
表儿茶素(mg/g)	0.12	0.03	22.49	0.07	0.18
根皮苷(mg/g)	0.07	0.02	35.18	0.02	0.13
绿原酸(mg/g)	0.09	0.04	43.23	0.02	0.18
槲皮素糖苷类(mg/g)	0.15	0.04	28.02	0.08	0.24
槲皮苷(mg/g)	0.17	0.04	24.65	0.10	0.23
槲皮素鼠李糖苷(mg/g)	0.14	0.04	25.47	0.09	0.21
芦丁(mg/g)	0.80	0.30	37.82	0.49	1.77
槲皮素(mg/g)	0.04	0.01	31.88	0.03	0.06

由表 3 可知,不同产区间果实总糖含量有所不同,新疆阿克苏地区红富士苹果总糖含量最高为 13.66%±0.72%,与其他产区果实总糖有显著差异($P<0.05$);红富士苹果总酸含量各产区间存在显著差异($P<0.05$),最高为新疆阿克苏地区总酸含量为 0.25%±0.01%。糖酸比与果实的总糖总酸含量密切相关,新疆阿克苏、甘肃静宁和云南昭通红富士苹果糖酸比适中。研究表明,苹果风味品质主要取决于糖、酸含量及其配比关系,低糖高酸的果实口感过酸,高糖低酸的果实口感淡薄,都不符合鲜食要求^[33]。本研究发现新疆阿克苏果实糖酸比趋于中等水平,该地区苹果口感更佳,与何引^[34]对不同地区红富士苹果风味研究相一致;各产区红富士苹果 V_C 含量除甘肃静宁和陕西洛川间无显著差异外($P>0.05$),其余各产区果实相互间具有显著差异($P<0.05$),且新疆阿克苏红富士苹果 V_C 含量最高为 5.28±0.2 mg/100 g,研究发现^[35]果实中 V_C 的含量与当地果园土壤所施氮肥和灌溉水量的大小均有关系。

果糖含量对于其他三类可溶性糖在各产区红富士苹果中含量最高,其中陕西洛川地区红富士果糖含量最高为 82.49±0.56 mg/g 与其他产区具有显著差异($P<0.05$)。各地区苹果果实中果糖的含量最高,葡萄糖和蔗糖含量次之,山梨醇含量较低。研究发现苹

表 3 各主产区红富士苹果品质指标对比
Table 3 Comparison of quality indicators of red Fuji apples in the main producing areas

产区	总糖 (%)	总酸 (%)	糖酸比	V _C (mg/100 g)	总酚 (g/100 g)	果糖 (mg/g)	葡萄糖 (mg/g)	蔗糖 (mg/g)	山梨醇 (mg/g)
阿克苏	13.66±0.72 ^a	0.25±0.01 ^a	55.11±1.47 ^{bc}	5.28±0.20 ^a	0.52±0.04 ^b	73.14±0.5 ^b	34.15±3.11 ^a	36.86±2.35 ^a	9.48±0.55 ^a
静宁	11.75±1.23 ^b	0.21±0.01 ^b	56.42±2.83 ^{ab}	3.58±0.11 ^c	0.85±0.12 ^a	71.21±1.41 ^b	24.26±0.56 ^d	21.76±1.19 ^d	3.75±0.26 ^{de}
灵宝	9.05±0.42 ^d	0.15±0.01 ^d	60.56±1.42 ^a	2.41±0.08 ^c	0.78±0.11 ^a	73.58±2.66 ^b	25.83±0.93 ^{cd}	24.79±0.78 ^c	4.00±0.23 ^{cd}
洛川	10.13±0.80 ^c	0.20±0.02 ^{bc}	52.14±6.00 ^c	3.47±0.03 ^c	0.80±0.07 ^a	82.49±0.56 ^a	28.48±0.85 ^b	27.23±1.29 ^b	6.25±0.64 ^b
烟台	10.58±0.79 ^c	0.18±0.01 ^c	58.51±0.98 ^{ab}	2.78±0.08 ^d	0.64±0.12 ^b	63.66±1.66 ^d	17.89±1.25 ^e	20.16±0.78 ^d	3.24±0.39 ^e
昭通	10.45±0.32 ^c	0.18±0.01 ^c	58.28±2.49 ^{ab}	4.56±0.07 ^b	0.82±0.09 ^a	67.08±3.91 ^c	27.00±1.4 ^{bc}	23.87±1.62 ^c	4.39±0.32 ^c
产区	儿茶素 (mg/g)	表儿茶素 (mg/g)	根皮苷 (mg/g)	绿原酸 (mg/g)	槲皮素糖苷类 (mg/g)	槲皮苷 (mg/g)	槲皮素鼠李糖苷 (mg/g)	芦丁 (mg/g)	槲皮素 (mg/g)
阿克苏	0.05±0.003 ^c	0.12±0.005 ^{bc}	0.05±0.007 ^b	0.08±0.051 ^{ab}	0.11±0.009 ^d	0.17±0.017 ^b	0.12±0.008 ^c	0.72±0.134 ^{bc}	0.03±0 ^e
静宁	0.08±0.003 ^c	0.09±0.013 ^d	0.06±0.009 ^b	0.10±0.005 ^{ab}	0.14±0.026 ^c	0.18±0.013 ^b	0.10±0.013 ^c	0.64±0.027 ^c	0.05±0.006 ^b
灵宝	0.10±0.008 ^a	0.13±0.032 ^b	0.09±0.040 ^a	0.10±0.077 ^{ab}	0.21±0.025 ^a	0.11±0.009 ^d	0.16±0.019 ^b	1.38±0.237 ^a	0.03±0.002 ^d
洛川	0.09±0.005 ^{bc}	0.11±0.016 ^{cd}	0.08±0.001 ^a	0.09±0.006 ^{ab}	0.17±0.013 ^b	0.22±0.013 ^a	0.18±0.007 ^a	0.61±0.074 ^c	0.06±0.003 ^a
烟台	0.07±0.005 ^d	0.10±0.011 ^{cd}	0.05±0.008 ^b	0.07±0.012 ^b	0.10±0.012 ^d	0.15±0.014 ^c	0.11±0.013 ^c	0.84±0.142 ^b	0.04±0.001 ^c
昭通	0.10±0.003 ^b	0.16±0.010 ^a	0.10±0.011 ^a	0.13±0.018 ^a	0.18±0.002 ^b	0.23±0.006 ^a	0.19±0.017 ^a	0.61±0.089 ^c	0.03±0 ^e

注:不同小写字母表示具有显著性差异($P<0.05$), $n=5$ 。

果、梨、草莓属于单糖积累型果树,其中果糖是苹果果实可溶性糖的主要组分,其次是葡萄糖、蔗糖^[36]。Róth 等^[37]研究发现,果糖是金冠、澳洲青苹、富士系等果实中主要的可溶性糖组分,其次是蔗糖和葡萄糖,山梨醇组分占比最低。本实验的结果与刘玉莲等^[38]研究结果一致。新疆阿克苏、陕西洛川、云南昭通、山东烟台地区在山梨醇含量上有显著差异($P<0.05$)且阿克苏产区果实最高为 9.44 ± 0.51 mg/g,与周文静等^[39]研究发现“糖心”果实的出现,果实中山梨醇含量较高相符。又因阿克苏糖心苹果属于晚熟作物,新疆阿克苏属于高纬度地区,太阳辐射强白天日照时间长、光照充分,果实内部糖分能够大量积累,是由于有充裕的日照时间,从而促使果实能进行大量的光合作用,同时此地区夜晚时间相对较短,且昼夜温差大,减少作物的呼吸作用,有利于果实内部糖分积累^[40-41]。Bowen 等^[42]研究认为沙质土壤、酸性土壤和盐碱地以及老果园、有机质含量低的果园,常常会缺钙,导致果实钙含量偏低对“糖心”的形成和山梨醇的堆积有影响。郑朝霞等^[43]对陕西省苹果主产区果园土壤特性进行研究,发现洛川地区土壤性质为中性偏碱,本研究发现陕西洛川产区果实山梨醇含量仅次于新疆阿克苏产区。在上述四种可溶性糖中山梨醇的变异系数最大,说明不同产区红富士苹果间山梨醇含量差异较大。

甘肃静宁、河南灵宝、山东烟台、新疆阿克苏等产区果实儿茶素含量存在显著差异($P<0.05$),其中果实中儿茶素含量最低是新疆阿克苏产区 0.05 ± 0.003 mg/g;表儿茶素、根皮苷与绿原酸在各产区果实之间含量差异并不显著($P>0.05$),槲皮素糖苷类、槲皮苷、槲皮素鼠李糖苷、槲皮素和芦丁在果实中的含量各产区间互有差异,河南灵宝果实槲皮素糖苷类含量最高为 0.21 ± 0.025 mg/g,云南昭通中槲皮苷含量最

高为 0.23 ± 0.006 mg/g,果实中槲皮素鼠李糖苷含量最高的地区是云南昭通为 0.19 ± 0.017 mg/g,陕西洛川果实中槲皮素含量最高为 0.06 ± 0.003 mg/g,芦丁含量最高是河南灵宝产区果实为 1.38 ± 0.234 mg/g。结果说明不同产区富士苹果果实中多酚物质种类及含量均有差异,变异系数为22.16%~43.23%,其中绿原酸含量变异程度最大,儿茶素含量变异程度最小。结合表2分析,产区果实营养品质指标变异系数较大,差异较为显著的指标均有代表该产区果实的特征,并能作为潜在区分各产区果实的有效因子。综上所述,自然环境、气候条件、土壤属性及施肥和灌溉方式是造成各产区红富士苹果中营养品质差异主要原因。

2.2 红富士苹果 6 大主产区各类指标相关性分析

对 6 大产区红富士苹果各类指标进行相关性分析,图1结果表明各指标之间存在一定关联性。总糖含量与蔗糖和山梨糖醇含量在 $P<0.01$ 差异水平下,呈极显著相关,尤其与山梨醇含量的相关性最强($r=0.64$)。在 $P<0.01$ 差异水平下,总糖含量还与总酸和 V_C 含量呈极显著正相关,与总酚、儿茶素、槲皮素糖苷类、槲皮素鼠李糖苷、根皮苷含量呈极显著负相关。果实的风味品质与其糖、酸等物质含量和配比关系紧密相关,适度的甜酸度的果实更容易让人接受^[44]。蔗糖含量与葡萄糖、果糖、山梨醇含量表现出显著正相关($P<0.05$),且与葡萄糖和山梨醇含量相关性极强($r=0.90$ 、 $r=0.95$),这与酶活性和糖代谢相关基因的差异有关,如蔗糖磷酸合酶(SPS)、蔗糖合酶(SS)是蔗糖积累的关键酶,酸性转化酶(AI)和NAD-SDH 主要调控己糖积累^[45]。蔷薇科植物光合产物主要以蔗糖形式在源-库之间转运。此外,库细胞中韧皮部运输效率、糖的跨膜运输能力以及环境条件和栽培技术等外界因素也决定了果实糖分的积

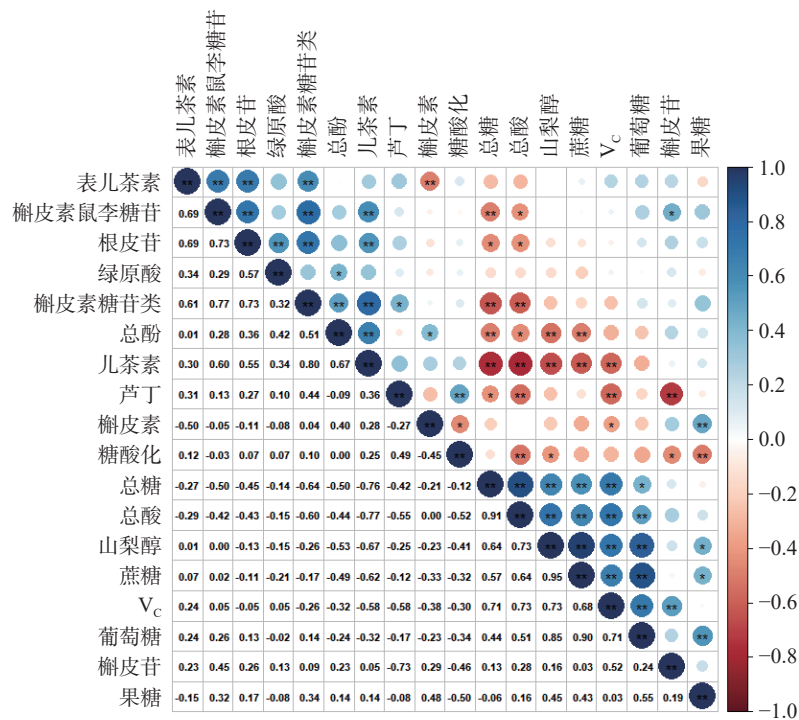


图 1 六大主产区红富士苹果品质指标相关性分析

Fig.1 Correlation analysis of quality indexes of red Fuji apples in six major producing areas

注: *表示相关性显著($P<0.05$); **表示相关性极显著($P<0.01$)。

累^[46]。V_C含量与蔗糖、葡萄糖、山梨醇含量呈极显著正相关($P<0.01$),与儿茶素和芦丁含量呈极显著负相关($P<0.01$)。说明在果实中果实中V_C含量与它们的含量彼此之间相互影响,研究表明V_C与果实生长期的长短有密切关系,在果实的生长期中糖代谢又是关键的果实代谢途径。因而它们彼此之间存在紧密联系^[47]。总酚含量与儿茶素和槲皮素糖苷类呈极显著相关($P<0.01$),相关系数分别为0.67和0.52,与蔗糖和山梨醇呈极显著负相关($P<0.01$),相关系数分别为-0.49和-0.53,与根皮苷、绿原酸、槲皮素呈显著相关($P<0.05$)。儿茶素和表儿茶素含量都与根皮苷、槲皮素糖苷类和槲皮素鼠李糖苷含量呈极显著正相关($P<0.01$),其中表儿茶素含量还与槲皮素含量呈极显著负相关($r=-0.50$)。根皮苷含量与绿原酸、槲皮素糖苷类和槲皮素鼠李糖苷含量呈极显著正相关。说明多酚类物质含量彼此会受影响和约束。

2.3 红富士苹果 6 大主产区各类指标正交偏最小二乘判别分析

正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)和PCA相似,也是基于降维的多维向量分析方法。但是OPLS-DA为有监督的分析,可以预设分类,弥补了PCA方法的不足,强化组间差异,同时可以量化特征化合物造成组分差异的程度。由图2A可知,各主产区红富士苹果营养品质指标含量存在显著性差异,OPLS-DA分析可以实现6大产区红富士苹果的良好分离。OPLS-DA模型为 Q^2 值0.794,矩阵 R^2X 值0.885,区分参数 R^2Y 值0.874,说明该模型对6大产区红富士苹果具有良好的稳定性和较好的预测能

力。变量投影重要性(variable important in projection, VIP)可以进一步量化OPLS-DA的每个变量对样品分类的贡献。VIP值越大,变量在不同样品间的差异越显著,通常可以将VIP>1表示为关键变量。由图2C所示,VIP>1品质指标为果糖、槲皮苷、槲皮素、芦丁、槲皮素鼠李糖苷、V_C、葡萄糖、总酚,以上8个指标可以作为更好区分不同产区果实品质指标。由表4可知,在OPLS-DA模型中,利用18种营养品质指标对阿克苏、灵宝、洛川、烟台和昭通产区果实判别正确率达100%,静宁产区果实判别率为60%,无法判别的产区果实,产区果实总体判别正确率为93.33%。

表 4 不同产区红富士苹果 OPLS-DA 判别分析结果

Table 4 OPLS-DA discriminant analysis results of red Fuji apples in different producing areas

方法	产区	预测组信息								
		样本 个数	判别正 确率(%)	阿克苏	静宁	灵宝	洛川	烟台	昭通	无法 识别
OPLS-DA	阿克苏	5	100	5	0	0	0	0	0	0
	静宁	5	60	0	3	0	1	1	0	0
	灵宝	5	100	0	0	5	0	0	0	0
	洛川	5	100	0	0	0	5	0	0	0
	烟台	5	100	0	0	0	0	5	0	0
	昭通	5	100	0	0	0	0	0	5	0
	总计	30	93.33	5	3	5	6	6	5	0

2.4 基于线性判别分析的红富士苹果产地判别模型

应用线性判别分析函数对不同产区红富士苹果进行判别分析,通过共线性诊断分析,选取检测的

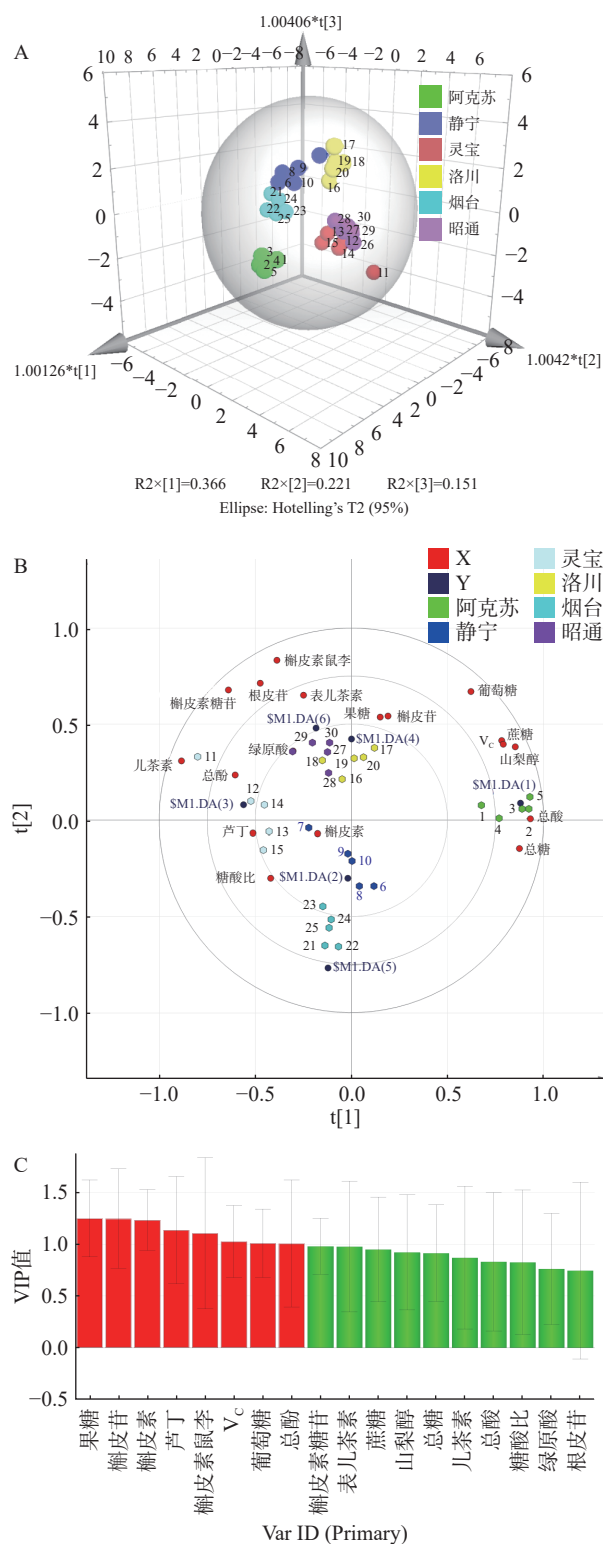


图2 不同产区红富士苹果品质指标 OPLS-DA 建模结果
Fig.2 Modeling results of OPLS-DA for quality indicators of Red Fuji apples in different producing areas

注: A.得分图; B.双标图; C.变量 VIP 图; 数字 1~30 表示各产区样品数; 阿克苏(1~5)、静宁(6~10)、灵宝(11~15)、洛川(16~20)、烟台(21~25)、昭通(26~30)。

18 项指标作为自变量, 不同红富士苹果产地作为分组变量, 建立红富士苹果不同产地判别模型如下:

图 3 为判定函数 1 和判定函数 2 区分阿克苏、静宁、灵宝、洛川、烟台和昭通产区红富士苹果的散

点图。通过威尔克 Lambda 分析, 假设显著性水平 ($\alpha=0.05$), 判别函数 1 和判别函数 2 对分类结果达到显著水平, 其判别结果可接受。判别函数 1 的方差百分比为 48.7%, 相关性为 0.998; 判别函数 2 的方差百分比为 32.4%, 相关性为 0.997; 选取判别函数 1 作为主要判别函数对红富士苹果不同产地判别的主要依据。根据不同红富士苹果产区, 划分为阿克苏、静宁、灵宝、洛川、烟台和昭通 6 类。在 F 值 (3.84~2.71) 下选取 V_C 、山梨醇、儿茶素、槲皮素糖苷类、槲皮苷、槲皮素鼠李糖苷、芦丁和槲皮素 8 个指标可以明显判别出红富士苹果的产地, 这说明威尔克 Lambda 判别分析有效。

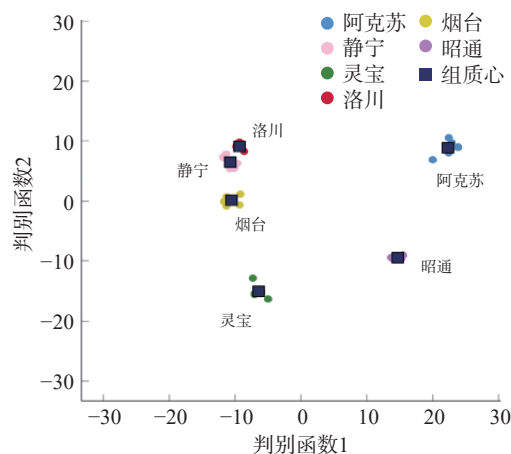


图3 判别函数区分红富士苹果产区散点图
Fig.3 Scatter map of red Fuji apples producing area by discriminant function

$$Y_1 = 580.697A + 56.654B + 2602.865C - 3911.633D + 4092.489E - 664.299F + 152.425G + 14729.423H - 2205.191$$

$$Y_2 = 361.251A + 35.81B + 12505.731C - 6239.672D + 5165.692E - 2991.75F + 68.716G + 29546.001H - 1908.752$$

$$Y_3 = 201.694A + 40.906B + 7451.257C - 1910.456D + 1940.498E - 1432.912F + 43.462G + 12185.856H - 714.374$$

$$Y_4 = 342.649A + 55.549B + 12261.978C - 6412.855D + 5104.817E - 1764.125F + 1.891G + 30495.941H - 2065.973$$

$$Y_5 = 292.444A + 30.853B + 9564.348C - 5336.965D + 4133.706E - 2200.433F + 88.808G + 24459.653H - 1248.076$$

$$Y_6 = 484.894A + 19.596B + 7939.051C - 3378.908D + 5419.815E - 533.913F - 89.214G + 7802.528H - 1846.375$$

式中, 1~6 分别代表阿克苏、静宁、灵宝、洛川、烟台和昭通地区; A 为测定 V_C 值、B 为测定山梨醇值、C 为测定儿茶素值、D 为测定槲皮素糖苷类值、E 为测定槲皮苷值、F 为测定槲皮素鼠李糖苷值、G 为测定芦丁值、H 为测定槲皮素值。

不同产地红富士苹果的判别分析结果如表 5 所示。根据判别模型对阿克苏、静宁、灵宝、洛川、烟台和昭通 6 个产区的红富士苹果样品进行分类, 利用回代检验(原始)和留一交叉验证对判别模型进行检验。阿克苏、静宁、灵宝、洛川、烟台和昭通 6 个产区的红富士苹果样品回代检验的整体判别率均为

表 5 不同产区红富士苹果的判别结果

Table 5 Discrimination results of red Fuji apples from different producing areas

方法	产区	预测组信息						整体判别 正确率(%)
		阿克苏	静宁	灵宝	洛川	烟台	昭通	
原始	阿克苏(n=5)	5	0	0	0	0	0	100
	静宁(n=5)	0	5	0	0	0	0	
	灵宝(n=5)	0	0	5	0	0	0	
	洛川(n=5)	0	0	0	5	0	0	
	烟台(n=5)	0	0	0	0	5	0	
	昭通(n=5)	0	0	0	0	0	5	
交叉验证	阿克苏(n=5)	5	0	0	0	0	0	100
	静宁(n=5)	0	5	0	0	0	0	
	灵宝(n=5)	0	0	5	0	0	0	
	洛川(n=5)	0	0	0	5	0	0	
	烟台(n=5)	0	0	0	0	5	0	
	昭通(n=5)	0	0	0	0	0	5	

100%,对于以上 6 个产区留一交叉验证的判别率也均为 100%(表 5)。

2.5 红富士苹果 6 大主产区环境因子与各类指标相关性分析

对生长期红富士苹果各产区温差,降雨量 2 项环境因子(表 1)和 18 种营养品质指标(表 3)进行相关性分析,结果(图 4)表明,在 $P<0.05$ 的条件下,果实生长期温差与红富士苹果的蔗糖含量呈显著正相关($r=0.82$);果实生长期降雨量与红富士苹果的总酸含量和总糖含量呈显著负相关($r=-0.86$, $r=-0.81$),多酚类物质与降雨量呈正相关,与果实生长期温差呈负相关。干旱地区降雨量相对较少,其果实总糖含量,总酸含量越大与降雨量显著负相关,这与孙智广等^[48]研究结果相似;蔗糖含量与温差呈显著正相关,说明温差越大,降雨量越少果实的糖分代谢越强,这与殷淑燕等^[49]研究结果一致。

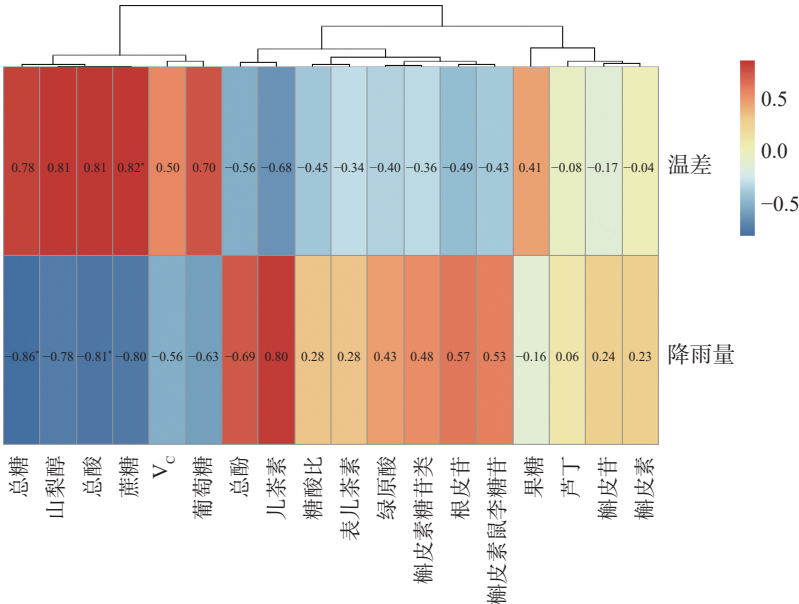


图 4 红富士苹果主产区环境因子与指标相关性分析

Fig.4 Correlation analysis of environmental factors and indicators in main Red Fuji apples producing areas

注:“*”表示相关性显著($P<0.05$)。

3 结论

本研究对新疆阿克苏、甘肃静宁、山东烟台、陕西洛川、河南灵宝和云南昭通等 6 大主产区红富士苹果 18 个营养品质指标分析,明确了红富士苹果种营养品质指标存在地域差异。在糖类方面,阿克苏红富士苹果山梨醇含糖量偏高,陕西洛川红富士苹果果糖含量偏高;在多酚物质方面,甘肃静宁红富士苹果绿原酸含量偏高,河南灵宝红富士苹果儿茶素和根皮素等含量偏高,云南昭通红富士苹果槲皮苷和表儿茶素等含量偏高,山东烟台红富士苹果芦丁等含量偏高,陕西洛川红富士苹果根皮苷含量偏高;新疆阿克苏红富士苹果总糖含量偏高,甘肃静宁红富士苹果总酚含量偏高,烟台红富士苹果糖酸比含量偏高。采用

正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)和线性判别分析建立模型,OPLS-DA 模型可以将 6 大主产区红富士苹果样品 93.33% 准确识别,通过 VIP 值确定了果糖、槲皮苷、槲皮素、芦丁、槲皮素鼠李糖苷、 V_C 、葡萄糖、总酚 8 个有效区分指标。基于线性判别分析,选取 V_C 、山梨醇、儿茶素、槲皮素糖苷类、槲皮素鼠李糖苷、槲皮苷、芦丁和槲皮素 8 个特征营养品质指标建立的判别模型,6 个产区红富士苹果回代检验(原始)和留一交叉验证的整体判别率均为 100%。本论文再次证明环境因素对果实糖积累有影响,得到总糖和总酸含量与降雨量显著负相关($P<0.05$),蔗糖含量与温差呈显著正相关。因此,利用多品质指标化学计量法对不同产区红富士苹果判别是有效可行。对于构建判别模型时,所选用的样本数量越多,该模

型也越有说服力,为确保判别模型的准确判别率,今后还需要继续增加样品数量,来不断修正判别模型的各项系数。建立多指标判别模型对富士苹果产区进行划分,有利于实现我国果实品质调控和品牌维护,为不同产区富士苹果溯源和质量控制提供了基础依据。

参考文献

- [1] 陈红,王倩,高强.我国苹果产业发展及其影响因素分析—基于7个主产省份的面板数据[J].中国果树,2019,195(1):92-95. [CHEN H, WANG Q, GAO Q. Analysis of apple industry development and its influencing factors in China-based on panel data of seven major producing provinces[J]. China Fruits, 2019, 195(1): 92-95.]
- [2] 杨振锋,聂继云,李静,等.富士苹果几项品质指标分析[J].山西果树,2007,116(2):8-9. [YANG Z F, NIE J Y, LI J, et al. Fuji apple several quality index analysis[J]. Journal of Fruit Resources, 2007, 116(2): 8-9.]
- [3] 张聪颖,畅倩,霍学喜.中国苹果生产区域变迁分析[J].经济地理,2018,38(8):141-151. [ZHANG C Y, CHANG Q, HUO X X. Analysis on the layout of China's apple production transition[J]. Economic Geography, 2018, 38(8): 141-151.]
- [4] 梁群.烟台苹果营销渠道优化研究[D].烟台:烟台大学,2019. [LIANG Q. Research on optimization of Yantai apple marketing channel[D]. Yantai: Yantai University, 2019.]
- [5] 文波.云南昭通苹果生产存在的问题及对策[J].果树实用技术与信息,2019,290(1):4-6. [WEN B. Problems and countermeasures of apple production in Zhaotong, Yunnan Province[J]. Applied Technology and Information for Fruit Tree, 2019, 290(1): 4-6.]
- [6] 吴小珍,郝祥蕊,宋凯,等.减量增效套餐肥对洛川‘红富士’苹果品质和土壤多样性影响的研究[J].天津农业科学,2022,28(12):29-36. [WU X Z, HAO X R, SONG K, et al. Research on the effect of reduction and efficiency package fertilizer on the quality and soil diversity of Luochuan 'Red Fuji' apples[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2022, 28(12): 29-36.]
- [7] 王多利,王博博.静宁县苹果产业发展现状与潜力研究[J].中国农业文摘-农业工程,2020,32(2):16-17. [WANG D L, WANG B B. Research on development status and potential of apple industry in Jingning County[J]. Agricultural Science and Engineering in China, 2020, 32(2): 16-17.]
- [8] 吕海霞,贾晓辉,高艳华.河南灵宝苹果产贮销现状及发展对策分析[J].中国果树,2020,206(6):123-125,133. [LÜ H X, JIA X H, GAO Y H. Analysis on present situation and development countermeasure of apple production and marketing in Henan Lingbao[J]. China Fruits, 2020, 206(6): 123-125, 133.]
- [9] 谢季云,白友强,杜林笑,等.不同采收期对阿克苏富士苹果贮藏品质的影响[J].保鲜与加工,2019,19(6):40-44. [XIE J Y, BAI Y Q, DU L X, et al. Effect of different harvesting period on storage quality of Aksu Fuji apple[J]. Storage and Process, 2019, 19(6): 40-44.]
- [10] 李晓敏.河南省苹果品种发展及栽培利用研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2018. [LI X M. Study of apple variety development and cultivation in Henan[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2018.]
- [11] BEJAEI M, XU H. Internal quality attributes and sensory characteristics of 'Ambrosia' apples with different dry matter content after a two-week and a ten-week air storage at 1 °C[J]. Foods, 2023, 12(1): 219.
- [12] BONGIORNI S, ARISI I, CECCANTONI B, et al. Apple polyphenol diet extends lifespan, slows down mitotic rate and reduces morphometric parameters in drosophila melanogaster: A comparison between three different apple cultivars[J]. Antioxidants, 2022, 11(11): 2086.
- [13] BELTRAO M R, NUNES M C, GOUVINHAS I, et al. Apple flour in a sweet Gluten-Free bread formulation: Impact on nutritional value, glycemic index, structure and sensory profile[J]. Foods, 2022, 11(20): 3172-3172.
- [14] ZHU D S, REN X J, WEI L W, et al. The difference of sensory qualities of apple fruit among eight cultivated varieties[J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science, 2018, 186(3): 012072-012072.
- [15] WANG G P, WANG J ZH, HAN X P, et al. Effects of spraying calcium fertilizer on photosynthesis, mineral content, sugar-acid metabolism and fruit quality of Fuji apples[J]. Agronomy, 2022, 12(10): 2563.
- [16] D'ASSANTE R, DE L M, FERRARO S, et al. Beneficial metabolic effect of a nutraceuticals combination (monacolin k, yeasted red rice, polyphenolic extract of annurca apple and berberine) on acquired hypercholesterolemia: A prospective analysis[J]. Metabolites, 2021, 11(4): 223.
- [17] 谭慧林,金永生,吴忠红,等.阿克苏地区红富士苹果产业现状及提高商品性建议措施[J].保鲜与加工,2021,21(2):140-144. [TAN H L, JIN Y S, WU Z H, et al. Status of Red Fuji apple industry in Aksu prefecture and measures to improve its commodity quality[J]. Storage and Process, 2021, 21(2): 140-144.]
- [18] YE H, YANG J, XIAO G, et al. A comprehensive overview of emerging techniques and chemometrics for authenticity and traceability of animal-derived food[J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134216.
- [19] SIOW C S, CHAN E W C, WONG C W, et al. Antioxidant and sensory evaluation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) tea formulated with cocoa bean hull of different origins[J]. Future Foods, 2021, 5: 100108.
- [20] HAN M, LI S, LI C, et al. Quality evaluation of *Syringae Folium* using the five-wavelength fusion fingerprint technique combined with chemometric analysis and quantitative analysis of active constituents[J]. Journal of chromatography B, Analytical technologies in the biomedical and life sciences, 2022, 1213: 123520.
- [21] 冯彬.基于基质辅助激光解析/电离-飞行时间质谱的肽质量指纹图谱微生物分类鉴定算法研究与应用[D].厦门:厦门大学,2020. [FEN B. Research and application of algorithms for microbial classification and identification based on peptide mass fingerprinting by matrix-assisted laser desorption/ionization-time of flight mass spectrometry [D]. Xiamen: Xiamen University, 2020.]
- [22] NIE J, YANG J, LIU C, et al. Stable isotope and elemental profiles determine geographical origin of saffron from China and Iran[J]. Food Chemistry, 2022, 405: 134733.
- [23] LI Z M, TAN M M, DENG H X, et al. Geographical origin differentiation of rice by LC-MS-Based non-targeted metabolomics[J]. Foods, 2022, 11(21): 3318.
- [24] 王雪山.不同环境清香类型白酒发酵微生物种群结构比较及溯源解析[D].无锡:江南大学,2018. [WANG X S. Microbial community structure and microbial source tracking of Chinese light-flavor liquor fermentation in different environments[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.]
- [25] 张雁鸣,刘志,范盈盈,等.西瓜稳定同位素与多元特征分

- 析及其产地溯源技术研究[J]. 核农学报, 2020, 34(S1): 61–68.
- [ZHANG Y M, LIU Z, FAN Y Y, et al. Study on the stable isotope and Multi-Element analysis of watermelon and its origin traceability[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(S1): 61–68.]
- [26] 李富荣, 刘雯雯, 文典, 等. 基于矿质元素指纹分析的陈皮产地溯源研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 295–302. [LI F R, LIU W W, WEN D, et al. Study on origin tracing of dried tangerine peel using mineral element fingerprints[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 295–302.]
- [27] 天气预报[Z]. 中国气象局, 2022年6月–10月, <https://weather.cma.cn/web/weather/>. [Weather forecast[Z]. China Meteorological Administration, From June to October 2022, <https://weather.cma.cn/web/weather/>.]
- [28] 国家标准化管理委员会. GB/T 10782-2006 食品中总糖含量的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 10782-2006 Determination of total sugar content in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.]
- [29] 国家标准化管理委员会. GB/T 12456-2008 食品中总酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12456-2008 Determination of total acids in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.]
- [30] CHEN L Y, CHENG C W, LIANG J Y. Effect of esterification condensation on the Folin-Ciocalteu method for the quantitative measurement of total phenols[J]. Food Chemistry, 2015, 170: 10–15.
- [31] 贾一鸣. 阿克苏红富士苹果品质多指标关联与分级模型构建[D]. 塔里木: 塔里木大学, 2022. [JIA Y M. Construction of Aksu Fuji apple quality multi-index correlation and grading model. Tarim: Tarim University, 2022.]
- [32] 刘玉莲, 车飞, 郭延平, 等. 苹果着色期花青苷和糖组分含量变化及关联性[J]. 食品科学, 2013, 34(17): 47–52. [LIU Y L, CHE F, GUO Y P, et al. Correlation between changes in soluble sugars and anthocyanins contents during fruit coloration[J]. Food Science, 2013, 34(17): 47–52.]
- [33] BRUYN J W, KEULEN H A. Determination of sugar and acid content in apple[J]. Euphytica, 1968, 17(2): 197–201.
- [34] 何引. 红富士苹果地方品质特征因子分析[D]. 塔里木: 塔里木大学, 2020. [HE Y. Factor analysis of local quality characteristics of Red Fuji apple[D]. Tarim: Tarim University, 2020.]
- [35] 赵满兴, 曹超仁, 王咪咪, 等. 不同水肥处理对‘木枣’果实维生素C、黄酮和出干率的影响[J]. 农学报, 2015, 5(9): 77–81. [ZHAO M X, CAO C R, WANG M M, et al. Effect of fertilizer-water treatments on Vitamin C, flavones and dry output rate of Chinese Jujube ‘Muzao’[J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(9): 77–81.]
- [36] 李娅楠, 闫雷玉, 张波, 等. 不同苹果品种果实糖酸组分特征研究[J]. 果树学报, 2021, 38(11): 1877–1889. [LI Y N, YAN L Y, ZHANG B, et al. A study on sugar and organic acid components in different apple cultivars[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(11): 1877–1889.]
- [37] RÓTH E, BERNA A, BEULLENS K, et al. Postharvest quality of integrated and organically produced apple fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 45(1): 11–19.
- [38] 刘玉莲, 车飞, 王海, 等. 苹果果实中糖、酸和花青苷的组分及含量特征分析[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(6): 236–242. [LIU Y L, CHE F, WANG H, et al. Characteristics of components and content of soluble sugars, organic acids and anthocyanin in apple fruit[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(6): 236–242.]
- [39] 周文静, 李文胜, 王安丽, 等. 两种贮藏条件下冰糖心红富士苹果品质变化[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(8): 1431–1442. [ZHOU W J, LI W S, WANG A L, et al. Quality changes of sugar core Red Fuji apple under two storage conditions[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2020, 57(8): 1431–1442.]
- [40] 江道伟. 不同产地红富士苹果果实和叶片糖积累及其相关酶活性变化研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011. [JIANG D W. Study on changes of sugar accumulation and related enzymes activities in different habitats of Fuji apple fruits and leaves[D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2011.]
- [41] 臧国忠, 陈尚武, 马会勤, 等. 套袋对富士苹果果实发育期光合同化物积累的影响[J]. 中国果树, 2009(4): 19–23. [ZANG G Z, CHEN S W, MA H Q, et al. Effect of bagging on the accumulation of photocontracides in Fuji apple fruit during development[J]. China Fruits, 2009(4): 19–23.]
- [42] BOWEN J H, WATKINS C B. Fruit maturity, carbohydrate and mineral content relationships with watercore in ‘Fuji’ apples[J]. Postharvest Biol. Technol., 1997, 11: 31–38.
- [43] 郑朝霞, 王颖, 石磊等. 陕西省苹果主产区土壤有机质、氮磷钾养分含量与分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1191–1198. [ZHENG C X, WANG Y, SHI L, et al. Contents and distribution of soil organic matter and nitrogen, phosphate, potassium in the main apple production regions of Shaanxi Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(5): 1191–1198.]
- [44] 王海波, 陈学森, 辛培刚, 等. 几个早熟苹果品种果实糖酸组分及风味品质的评价[J]. 果树学报, 2007, 24(4): 513–516. [WANG H B, CHEN X S, XIN P G, et al. Study on sugar and acid constituents in several early apple cultivars and evaluation of their flavor quality[J]. Journal of Fruit Science, 2007, 24(4): 513–516.]
- [45] ZHU Z, LIU R L, LI B Q, et al. Characterisation of genes encoding key enzymes involved in sugar metabolism of apple fruit in controlled atmosphere storage[J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 3323–3328.
- [46] YAMAKI S. Metabolism and accumulation of sugars translocated to fruit and their regulation[J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2010, 79(1): 1–15.
- [47] 赵树堂. 李果实发育过程中糖、酸、V_C及矿质元素含量变化[D]. 保定: 河北农业大学, 2003. [ZHAO S T. Changes in contents of sugar, acid, Vitamin C and mineral element during fruit development of four plum cultivars[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2003.]
- [48] 孙智广. 红露苹果水心病的发生原因与防治措施[J]. 烟台果树, 2010(1): 38–39. [SUN Z G. Causes and control measures of Watery Heart disease in Red Dew apples[J]. Yantai Fruits, 2010(1): 38–39.]
- [49] 殷淑燕, 张钰敏, 李美荣, 等. 气候变化对洛川苹果物候期的影响[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 86–90, 95. [YIN S Y, ZHANG Y M, LI M R, et al. Influence of climate change on apple phenophase in Luochuan[J]. Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition), 2011, 39(6): 86–90, 95.]