

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2024.10.021

# 8种可食用柑橘果皮营养品质综合评价

张兴开<sup>1</sup>, 邓光环<sup>1</sup>, 朱镒<sup>1</sup>, 陈迪<sup>1</sup>, 唐树爽<sup>1</sup>, 曹冠华<sup>1\*</sup>, 贺森<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 云南中医药大学 中药学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南中医药大学 昆明市澜沧区域传统药物资源开发利用研发中心, 云南 昆明 650500; 3. 云南中医药大学 云南省傣医药与彝医药重点实验室, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 通过测定营养指标含量、抗氧化能力, 采用皮尔逊相关性分析、主成分分析和聚类分析对8种食用柑橘果皮营养品质进行综合评价, 阐明营养指标与抗氧化能力之间的相关性。结果表明, 8种柑橘果皮具有较高的营养价值和较强的抗氧化能力。样品总黄酮含量与1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基清除率呈正相关, 相关系数为0.96。主成分分析结果显示8种柑橘果皮间差异较小, 分为两大类。综合评价模型显示, 橙类柑橘果皮相较于宽皮柑橘果皮具有更优的营养品质, 橙类柑橘果皮中又以血橙果皮综合营养品质得分最高。综合结果表明8种柑橘果皮中, 血橙果皮营养价值和抗氧化活性最佳。

**关键词:** 柑橘果皮; 营养指标; 抗氧化能力; 主成分分析; 聚类分析

## Comprehensive Evaluation of the Nutritional Quality of Eight Edible Citrus Peels

ZHANG Xingkai<sup>1</sup>, DENG Guanghuan<sup>1</sup>, ZHU Di<sup>1</sup>, CHEN Di<sup>1</sup>, TANG Shushuang<sup>1</sup>, CAO Guanhua<sup>1\*</sup>, HE Sen<sup>1,2,3\*</sup>

(1. School of Traditional Chinese Medicine, Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500, Yunnan, China; 2. Kunming Lancang-Mekong Regional R&D Central for the Development Utilization of Traditional Medicine Resources, Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500, Yunnan, China; 3. Yunnan Key Laboratory for Dai and Yi Medicines, Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500, Yunnan, China)

**Abstract:** By measuring the nutritional indicator content and antioxidant capacity, employing Pearson correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis, the nutritional quality of eight varieties of edible citrus peels was comprehensively evaluated, elucidating the correlation between nutritional indicators and antioxidant capacity. The results showed that these eight edible citrus peels had high nutritional value and strong antioxidant capacity. The total flavonoid content of the samples was positively correlated with the clearance rate of 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) free radicals, with a correlation coefficient of 0.96. The results of principal component analysis showed minimal differences among the eight edible citrus peels which were categorized into two major classes. The comprehensive evaluation model indicated that orange citrus peels exhibited superior nutritional quality compared with broad-skinned citrus peels, with blood orange (*Citrus × aurantium* "Tarocco") citrus peels having the highest comprehensive nutritional quality score. The integrated results indicated that among the eight citrus peels, blood orange peel had the best nutritional value and antioxidant activity.

**Key words:** citrus peels; nutrient indicators; antioxidant capacity; principal component analysis; cluster analysis

基金项目: 云南省“万人计划”青年拔尖人才专项 (YNWR-QNBJ-2020-279); 国家自然科学基金项目 (82260743); 中央本级重大增减支项目“名贵中药资源可持续利用能力建设项目” (2060302-2101-24); 云南省中医药应用基础研究联合专项 (202001AZ070001-009、202101AZ070001-014); 昆明市国际(对外)科技合作基地 (GHJD-2021030); 云南省基础研究计划面上项目 (202201AT070219、202001AT070109); 云南省教育厅科学研究基金项目 (2023Y0450)

作者简介: 张兴开(1998—), 男(汉), 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与中药资源开发。

\*通信作者: 曹冠华(1985—), 男(汉), 高级实验师, 博士, 研究方向: 食品科学与中药资源开发; 贺森(1984—), 男(汉), 教授, 博士, 研究方向: 食品科学与中药资源开发。

引文格式:

张兴开,邓光环,朱镛,等. 8种可食用柑橘果皮营养品质综合评价[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(10): 157-164.  
ZHANG Xing kai, DENG Guang huan, ZHU Di, et al. Comprehensive Evaluation of the Nutritional Quality of Eight Edible Citrus Peels[J]. Food Research and Development, 2024, 45(10): 157-164.

柑橘(*Citrus reticulata* Blanco.)为芸香科柑橘属乔木植物的果实,是世界第一大水果,也是世界上重要的经济作物之一,涵盖橙、橘、柚、柑等1300余个品种<sup>[1-2]</sup>。我国作为世界第一大柑橘生产国和消费国,据统计,截至2021年,我国柑橘种植面积达248.7万hm<sup>2</sup>,产量达5595.61万t<sup>[3-4]</sup>。已有研究表明,柑橘果实中含有丰富的无机盐、维生素、有机酸、类黄酮、蛋白质和糖类等多种有益人体健康的物质,其果皮中同样富含多种生物活性成分,如类黄酮、生物碱、橙皮苷、柠檬苦素类似物、类胡萝卜素、精油和香豆素等,具有维持人体健康、预防疾病等作用,还可用作天然抗氧化剂及抑菌产品的重要来源,使机体免受活性氧自由基的损伤。在临床药用方面,柑橘果皮还具有“理气健脾、燥湿化痰”等功效<sup>[5-6]</sup>。此外,研究发现柑橘果皮中含有的挥发性物质——橘皮精油,具有促进胃肠蠕动和消化液分泌等作用,在减肥、美容等方面具有一定效果<sup>[7]</sup>。

果皮作为柑橘果实的重要组成部分,也是重要的可食用资源,其质量占果实总重的25%~40%,截至2021年,我国年产柑橘果皮超1600万t,但绝大部分果皮被当作生产废弃物处理,造成了资源的极大浪费<sup>[2,4-5]</sup>。因此,科学合理开发利用柑橘果皮,从而达到柑橘产业高效绿色发展,已成为目前学术界、行业界共同关注的问题<sup>[8]</sup>。目前,关于对柑橘果皮营养品质和抗氧化能力测定的研究鲜有报道,且对其综合品质进行系统性评价的相关报道尤为缺乏。基于此,本研究通过对常见的4种宽皮柑橘和4种橙类柑橘果皮营养指标含量和抗氧化能力进行测定,结合主成分分析法完成对其营养品质的综合评价,以期为以柑橘果皮为主要原料制备新型功能性食品和天然抗氧化剂的研发提供新的思路,助推柑橘果皮在食品领域的深度开发利用。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

4种宽皮柑橘分别为砂糖橘(*Citrus reticulata*'Sha Tang Ju'):产自广东省武鸣市;沃柑(*Citrus reticulata*'Oran'):产自广西省武鸣市;芦柑(*Citrus reticulata*'Ponkan'):产自湖北省宜昌市;不知火(*Citrus reticulata*'Shiranui'):产自四川省雅安市;4种橙类柑橘分别为冰糖橙(*Citrus aurantium*'Bing Tang'):产自湖南省

洪江市;脐橙(*Citrus aurantium*'Gan Nan Zao'):产自江西省赣州市;血橙(*Citrus aurantium*'Tarocco'):产自江西省赣州市;蜜香橙(*Citrus junos*'Siebold ex Tanaka'):产自广西省桂林市。

陈皮:云南新世纪中药饮片有限公司;过氧化氢、邻苯三酚、磷酸氢二钠(均为分析纯):天津市风船化学试剂科技有限公司;L-抗坏血酸、水杨酸(均为分析纯):天津市致远化学试剂有限公司;蒽酮、石油醚、三氯化铁、三氯乙酸、硫酸铵(均为分析纯):广东光华科技股份有限公司;2,6-二氯酚钠盐化合物(分析纯):阿法埃莎(中国)化学有限公司;芦丁标准品、D-半乳糖醛酸、1,1-二苯基-2-苦基肼(1,1-diphenyl-2-pyridylhydrazine, DPPH)(均为优级纯):上海源叶生物科技有限公司;新橙皮苷、对硝基苯酚(均为分析纯):上海麦克林生化科技股份有限公司;2,4,6-三(2-吡啶基)-1,3,5-三嗪(分析纯):北京索莱宝科技股份有限公司。

### 1.2 仪器与设备

SH10A 电子水分测定仪:上海菁海仪器有限公司;CP-214 电子分析天平、ST3100 pH计:奥豪斯仪器(常州)有限公司;KDN-12C 数显温控消化炉、SZF-06A 粗脂肪测定仪:上海新嘉电子有限公司;SX2-4-10 电炉:上海意丰电炉有限公司;SB-5200D 超声波清洗机:宁波新芝生物科技股份有限公司;SC-3614 低速离心机:安徽中科中佳科学仪器有限公司;UV-2550 紫外可见分光光度计:岛津(上海)实验器材有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 8种柑橘果皮营养指标含量测定

水分含量采用电子水分测定仪测定;橙皮苷含量采用分光光度法测定;维生素C含量参照GB 5009.86—2016《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》中的2,6-二氯酚滴定法进行测定;总黄酮含量采用文献[9]中的分光光度法测定;蛋白质含量参照GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的分光光度法测定;总糖含量采用蒽酮比色法<sup>[10]</sup>测定;还原糖含量参照3,5-二硝基水杨酸比色法<sup>[11]</sup>进行测定;粗脂肪含量参照GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的索氏抽提法进行测定;灰分含量参照GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》进行测定;果胶含量参照NY/T 2016—2011《水果及其制品中果胶含量的测定 分光光

度法》进行测定;相对电导率采用电极法<sup>[12]</sup>进行测定。

### 1.3.2 8种柑橘果皮抗氧化能力测定

#### 1.3.2.1 样品预处理及样品溶液制备

样品预处理:将柑橘果实洗净晾干,手工剥皮,置于105℃干燥箱中干燥至恒重后,粉碎过80目筛制得橘皮粉末,准确称取干燥的橘皮粉末1g于锥形瓶中,加入70%乙醇40mL,超声辅助提取5min后过滤,收集滤液,滤渣继续添加70%乙醇重复提取3次,过滤,将3次滤液合并后以70%乙醇定容至刻度,备用。

#### 1.3.2.2 样品铁离子抗氧化能力测定

柑橘果皮的铁离子抗氧化能力(ferric reducing antioxidant power, FRAP)测定参照文献<sup>[13]</sup>的方法,稍作调整,取1mL样品溶液与4mL70%乙醇混合均匀后,移取0.2mL上述混合溶液加入6mL经37℃水浴加热20min的FRAP工作液,于波长593nm处测定其吸光度。同时,以70%乙醇溶液代替样品溶液为空白,并以维生素C和陈皮为阳性对照。依据FRAP标准曲线( $y = 1.123 6x + 0.010 5$ ,  $R^2 = 0.999 2$ )即可计算各样品的FRAP。

#### 1.3.2.3 样品还原力测定

柑橘果皮还原力参照文献<sup>[14]</sup>的方法进行测定,取样品溶液40mL、蒸馏水20mL、磷酸钠缓冲液3mL和铁氰化钾溶液1.5mL混匀后于50℃水浴加热20min,快速冷却至室温后于反应液中加入2mL三氯化乙酸溶液终止反应,3000r/min离心5min,移取5mL上层清液至试管中,随后加入蒸馏水5mL和0.1%三氯化铁溶液0.5mL,摇匀后于波长700nm处测定吸光度。相同条件下,以维生素C和陈皮为阳性对照。依据吸光度大小判断样品还原力。

#### 1.3.2.4 DPPH 自由基清除率测定

柑橘果皮1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基清除率参照文献<sup>[15]</sup>的方法,稍作修改,准确吸取0.2mL样品溶液于洁净试管中,加入4mL0.1μmol/L DPPH溶液轻摇混匀,静置避光反应20min后于波长517nm处测吸光度 $A_1$ ;相同条件下,以无水乙醇代替DPPH溶液,测定吸光度 $A_2$ ;以70%乙醇代替样品溶液测定空白对照的吸光度 $A_0$ ;同时,以维生素C和陈皮为阳性对照。DPPH自由基清除率( $Y, \%$ )的计算公式(1)如下。

$$Y = \left( 1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

#### 1.3.2.5 羟基自由基清除率测定

柑橘果皮羟基自由基清除率参照文献<sup>[14]</sup>的方法,稍作修改,分别准确移取样品溶液、水杨酸-乙醇溶液、 $FeSO_4$ 溶液各1mL于试管中,随后加入1mL $H_2O_2$ 溶液,轻摇混匀后于37℃恒温水浴反应15min,于510nm波长处测吸光度 $A_1$ ;相同条件下,以蒸馏水分别

代替 $H_2O_2$ 和样品溶液,以此测定溶液本底吸光度 $A_2$ 和空白对照的吸光度 $A_0$ ;同时,以维生素C和陈皮为阳性对照。根据公式(1)计算出不同样品对·OH的清除率。

#### 1.3.2.6 超氧阴离子自由基清除率

柑橘果皮超氧阴离子自由基清除率参照文献<sup>[16]</sup>的方法,稍作修改,准确吸取1mL样品溶液和5mL Tris-HCl缓冲液于试管中混匀后于25℃水浴加热20min,随后加入1mL经25℃预热的邻苯三酚溶液,继续加热反应5min后,往反应液中加入1mL HCl终止反应,并于波长320nm处测定反应液的吸光度 $A_1$ 。相同条件下,以蒸馏水分别代替邻苯三酚溶液和样品溶液,以此测定溶液本底吸光度 $A_2$ 和空白对照的吸光度 $A_0$ ;同时,以维生素C和陈皮为阳性对照。根据公式(1)计算出不同样品对 $O_2^{\cdot-}$ 的清除率。

## 1.4 数据处理与分析

所有试验重复3次,数据以平均值±标准差表示。采用Microsoft Excel 2010和SPSS 26.0软件完成数据的处理分析和标准化;采用SPSS 26.0软件的变异数分析法完成单因素方差分析;采用Origin 2021完成皮尔逊相关性分析、主成分分析、聚类分析和数据可视化。

## 2 结果与分析

### 2.1 8种柑橘果皮营养指标测定结果分析

对8种柑橘果皮营养指标含量的测定结果见表1,包括水分、橙皮苷、维生素C、总黄酮、蛋白质、总糖、还原糖、粗脂肪、灰分、果胶含量和相对电导率。

由表1可知,8种柑橘果皮水分含量为(68.58±0.34)%~(78.99±0.34)%,其中血橙果皮的水分含量最高,为(78.99±0.34)%,其次为蜜香橙果皮,水分含量为(78.50±0.22)%,砂糖橘果皮水分含量最低,为(68.58±0.34)%,砂糖橘果皮与其余7种柑橘果皮的水分含量相比,差异显著( $P < 0.05$ )。橙皮苷作为柑橘果皮的主要有效成分之一,具有维持血管正常渗透压、抗癌、抗菌、抗氧化等多种生理活性<sup>[6]</sup>。8种柑橘果皮橙皮苷含量测定结果显示,冰糖橙果皮的橙皮苷含量最高,达(84.34±0.30)mg/g,显著高于其余柑橘果皮( $P < 0.05$ ),其中沃柑果皮的橙皮苷含量最低,为(38.99±0.23)mg/g。维生素C可通过还原反应消除超氧化物、羟基自由基和单线态氧,从而保护机体免受过氧化损伤,因此在维持机体正常生长发育和增强机体对疾病的抵抗力方面发挥着重要作用<sup>[17-19]</sup>。本研究中,8种柑橘果皮维生素C含量分布在(66.31±2.42)~(145.80±10.79)mg/100g,其中脐橙果皮的维生素C含量最高,为(145.80±10.79)mg/100g,其次为冰糖橙,芦柑果皮的维生素C含量最低,为(66.31±2.42)mg/100g,显著低于砂糖橘、不知火、冰糖橙、脐橙、血橙和蜜香橙6种果皮的维生素C含量( $P < 0.05$ )。

表1 8种柑橘果皮营养指标测定结果

Table 1 Determination results of nutritional indicators of eight citrus peels

果皮样品	水分含量/%	橙皮苷含量/(mg/g)	维生素C含量/(mg/100g)	总黄酮含量/%	蛋白质含量/%	总糖含量/%	还原糖含量/%	粗脂肪含量/%	灰分含量/%	果胶含量/(g/kg)	相对电导率/%
砂糖橘	68.58±0.34 <sup>c</sup>	49.04±0.40 <sup>f</sup>	120.31±2.60 <sup>c</sup>	1.00±0.08 <sup>b</sup>	3.91±0.42 <sup>a</sup>	27.68±0.59 <sup>d</sup>	9.32±0.13 <sup>a</sup>	1.40±0.18 <sup>b</sup>	1.38±0.45 <sup>a</sup>	18.61±2.15 <sup>a</sup>	64.69±0.85 <sup>d</sup>
沃柑	76.35±0.33 <sup>b</sup>	38.99±0.23 <sup>e</sup>	75.07±1.40 <sup>e</sup>	0.70±0.01 <sup>d</sup>	1.87±0.40 <sup>d</sup>	24.98±0.95 <sup>d</sup>	6.77±0.02 <sup>b</sup>	0.85±0.19 <sup>b</sup>	0.89±0.06 <sup>b</sup>	13.41±2.10 <sup>b</sup>	25.21±0.87 <sup>e</sup>
芦柑	71.48±0.24 <sup>d</sup>	77.95±1.17 <sup>b</sup>	66.31±2.42 <sup>e</sup>	1.25±0.01 <sup>a</sup>	1.87±0.40 <sup>d</sup>	18.45±0.34 <sup>e</sup>	6.72±0.04 <sup>b</sup>	1.35±0.50 <sup>b</sup>	0.73±0.02 <sup>b</sup>	11.06±0.58 <sup>bc</sup>	48.87±0.73 <sup>c</sup>
不知火	75.45±1.10 <sup>b</sup>	65.51±0.47 <sup>e</sup>	98.36±2.94 <sup>d</sup>	0.91±0.03 <sup>bc</sup>	1.27±0.07 <sup>e</sup>	30.38±1.20 <sup>d</sup>	2.66±0.02 <sup>c</sup>	0.79±0.16 <sup>b</sup>	1.36±0.06 <sup>a</sup>	5.14±0.83 <sup>c</sup>	78.28±0.14 <sup>c</sup>
冰糖橙	72.57±0.43 <sup>c</sup>	84.34±0.30 <sup>a</sup>	145.51±8.83 <sup>a</sup>	0.84±0.02 <sup>c</sup>	3.41±0.14 <sup>abc</sup>	38.13±3.85 <sup>e</sup>	6.71±0.11 <sup>b</sup>	7.66±0.12 <sup>a</sup>	0.98±0.05 <sup>b</sup>	9.05±1.33 <sup>cd</sup>	81.79±0.56 <sup>c</sup>
脐橙	73.40±0.29 <sup>c</sup>	75.88±0.30 <sup>e</sup>	145.80±10.79 <sup>a</sup>	0.63±0.06 <sup>e</sup>	3.07±0.18 <sup>c</sup>	41.44±3.66 <sup>e</sup>	5.08±0.06 <sup>d</sup>	7.32±0.14 <sup>a</sup>	0.87±0.04 <sup>b</sup>	7.08±0.84 <sup>de</sup>	12.07±0.20 <sup>b</sup>
血橙	78.99±0.34 <sup>a</sup>	77.45±0.30 <sup>b</sup>	137.88±7.45 <sup>ab</sup>	0.65±0.05 <sup>de</sup>	3.20±0.20 <sup>bc</sup>	63.29±2.53 <sup>a</sup>	6.48±0.11 <sup>c</sup>	7.19±0.40 <sup>a</sup>	0.87±0.04 <sup>b</sup>	5.32±0.66 <sup>e</sup>	79.76±0.24 <sup>b</sup>
蜜香橙	78.50±0.22 <sup>a</sup>	73.61±0.80 <sup>d</sup>	127.30±5.69 <sup>bc</sup>	0.71±0.01 <sup>d</sup>	3.75±0.30 <sup>ab</sup>	52.57±6.66 <sup>b</sup>	6.72±0.05 <sup>b</sup>	7.69±0.46 <sup>a</sup>	0.91±0.02 <sup>b</sup>	10.60±1.08 <sup>c</sup>	35.85±0.69 <sup>f</sup>

注:同列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

黄酮是指两个苯环通过中心的3个碳原子与苯酚羟基连接而形成的一系列化合物,广泛存在于各种植物中,具有较强的抗氧化、抗炎、调节血压和血糖等特性,通常被用作膳食补充剂,以促进机体健康和预防疾病<sup>[20-21]</sup>。8种柑橘果皮总黄酮含量分布在(0.63±0.06)%~(1.25±0.01)%,芦柑果皮的总黄酮含量最高,显著高于其余柑橘果皮( $P<0.05$ )。砂糖橘果皮的蛋白质含量最高,为(3.91±0.42)%,其次为蜜香橙果皮,不知火果皮的蛋白质含量最低,为(1.27±0.07)%,显著低于其余7种柑橘果皮的蛋白质含量( $P<0.05$ )。血橙果皮的总糖含量最高,为(63.29±2.53)%,显著高于其余柑橘果皮( $P<0.05$ ),芦柑果皮的总糖含量最低,为(18.45±0.34)%。8种柑橘果皮的还原糖含量分布在(2.66±0.02)%~(9.32±0.13)%,其中砂糖橘果皮的总糖含量最高,不知火果皮最低;粗脂肪含量分布在(0.79±0.16)%~(7.69±0.46)%,其中4种橙类柑橘(冰糖橙、脐橙、血橙和蜜香橙)果皮与4种宽皮柑橘(砂糖橘、沃柑、芦柑和不知火)果皮的粗脂肪含量相比,差异显著( $P<0.05$ );砂糖橘果皮灰分含量最高,为(1.38±0.45)%,其次是不知火果皮,为(1.36±0.06)%,砂糖橘和不知火果皮灰分含量显著高于其他6种样品( $P<0.05$ );果胶含量分布在(5.14±0.83)~(18.61±2.15)g/kg,其中砂糖橘果皮果胶含量最高,不知火果皮果胶含量最低。

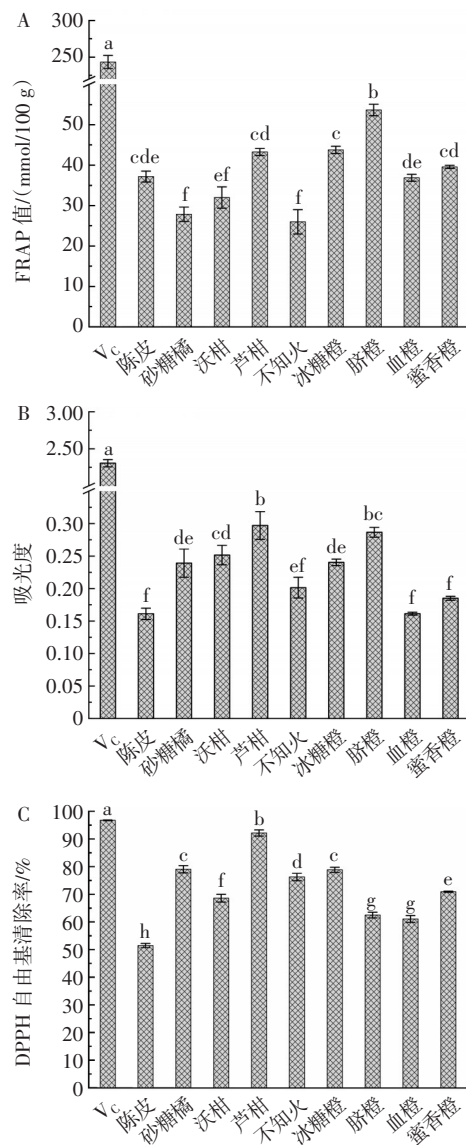
相对电导率的大小可以反映植物细胞的衰老程度<sup>[12]</sup>。8种柑橘果皮相对电导率的测定结果分布在(12.07±0.20)%~(81.79±0.56)%,冰糖橙果皮相对电导率最高,达(81.79±0.56)%,显著高于其余柑橘果皮样品( $P<0.05$ ),其次是血橙果皮,相对电导率为(79.76±0.24)%,脐橙果皮相对电导率最低,为(12.07±0.20)%。

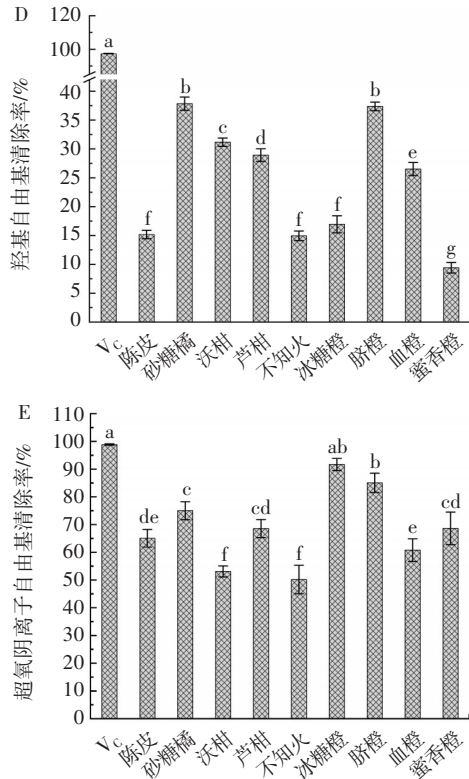
## 2.2 8种柑橘果皮抗氧化能力

物质清除自由基的能力在很大程度上反映其本身的抗氧化活性<sup>[22]</sup>。由于不同抗氧化成分存在着不同的抗氧化机理,采用单一指标不能充分反映样品的抗氧化能力<sup>[23]</sup>,因此本研究通过测定样品的铁离子抗氧化能力(FRAP)、还原力、DPPH自由基清除率、羟基自由

基( $\cdot\text{OH}$ )清除率和超氧阴离子自由基( $\text{O}_2^{\cdot-}$ )清除率来评价8种柑橘果皮的抗氧化能力,测定结果见图1。

由图1A可知,以维生素C和陈皮为阳性对照,8种柑橘果皮样品的铁离子抗氧化能力分布在(25.99±3.01)~(53.67±1.42)mmol/100g,其中脐橙果皮铁离子抗氧化





A. 铁离子抗氧化能力; B. 还原力法评价样品抗氧化能力; C. 对 DPPH 自由基清除率; D. 羟基自由基清除率; E. 超氧阴离子自由基清除率。不同小写字母表示样品间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 1 8 种柑橘果皮抗氧化能力

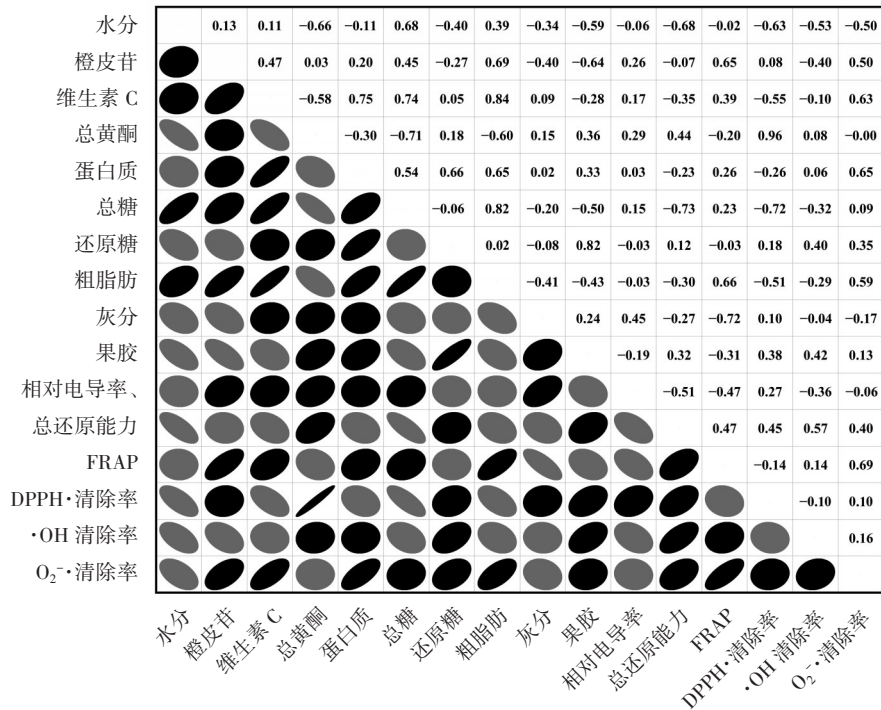
Fig.1 Antioxidant capacity of eight citrus peels

能力最强,显著高于其余 7 种样品及对照陈皮 ( $P < 0.05$ ), 不知火果皮铁离子抗氧化能力最弱。由图 1B 可知, 芦柑果皮还原力最强, 吸光度为  $0.30 \pm 0.02$ , 其次为脐橙果皮, 吸光度为  $0.29 \pm 0.01$ , 血橙果皮还原力最弱, 吸光度为  $0.16 \pm 0.00$ , 8 种柑橘果皮样品还原力均高于对照陈皮。由图 1C 可知, 8 种柑橘果皮 DPPH 自由基清除率均显著高于对照陈皮 ( $P < 0.05$ ), DPPH 自由基清除率分布在  $(61.08 \pm 1.24)\% \sim (92.17 \pm 1.12)\%$ , 其中芦柑果皮 DPPH 自由基清除率最高, 显著高于其余样品 ( $P < 0.05$ ), 血橙果皮清除率最低。由图 1D 可知, 砂糖橘果皮羟基自由基清除率最高, 为  $(37.85 \pm 1.15)\%$ , 其次为脐橙果皮, 为  $(37.37 \pm 0.74)\%$ , 砂糖橘果皮和脐橙果皮与其余 6 种样品及对照陈皮的羟基自由基清除率相比, 差异显著 ( $P < 0.05$ ), 蜜香橙果皮羟基自由基清除率最低, 仅为  $(9.41 \pm 0.91)\%$ 。由图 1E 可知, 冰糖橙果皮超氧阴离子自由基清除率最高, 达  $(91.67 \pm 2.21)\%$ , 其次为脐橙果皮, 清除率为  $(85.05 \pm 3.49)\%$ , 显著高于对照陈皮及其余 6 种样品 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3 基于 8 种柑橘果皮样品营养价值及抗氧化能力的综合评价

#### 2.3.1 8 种柑橘果皮营养指标含量与抗氧化能力相关性分析

皮尔逊相关性分析常用于评估两个指标间的相关程度<sup>[24]</sup>。通过 Origin 2021 软件将 8 种柑橘果皮的营养指标含量与抗氧化能力进行皮尔逊相关性分析, 结果见图 2。



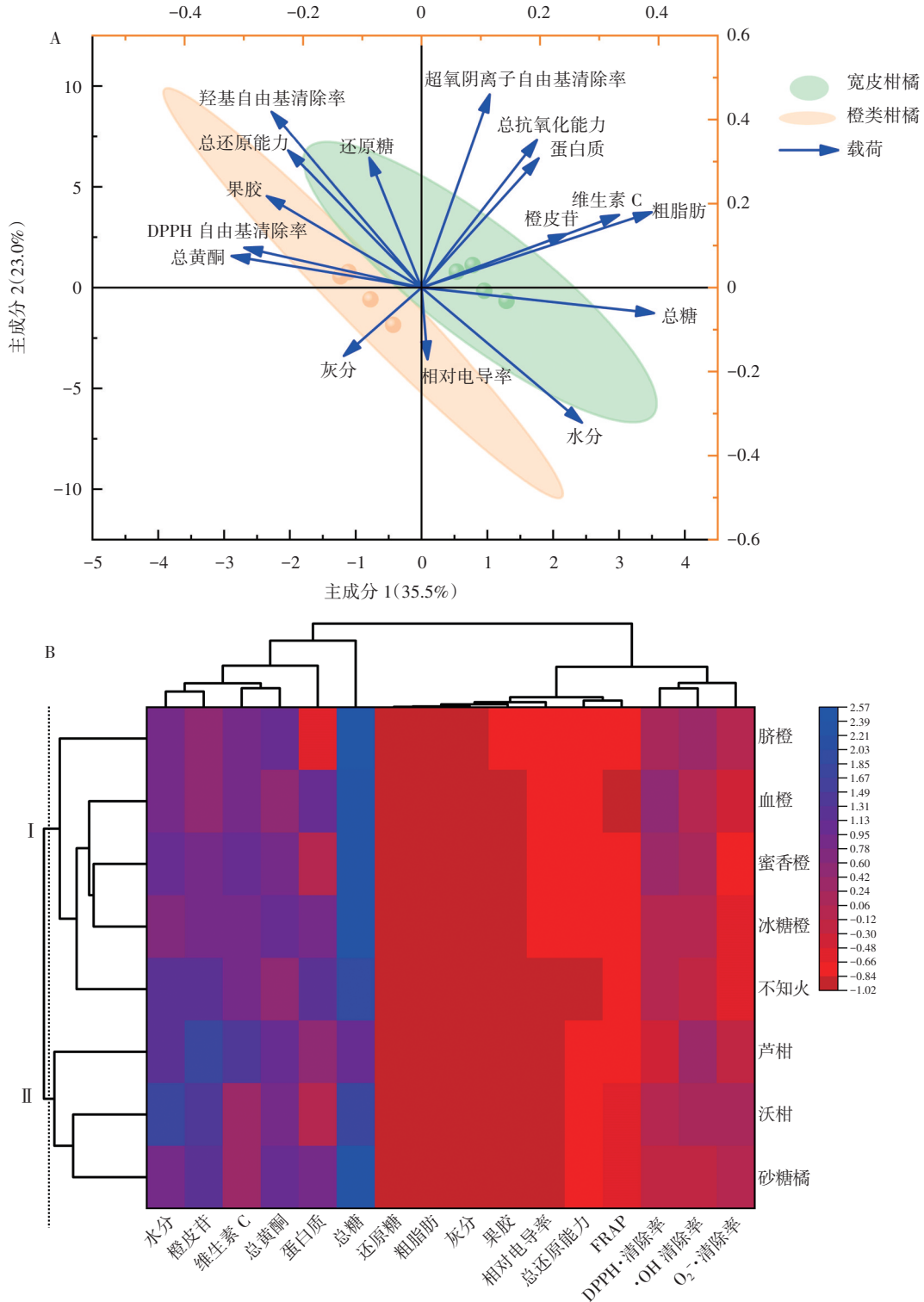
黑色和灰色椭圆分别表示两个指标间相关性呈正相关和负相关, 椭圆越扁, 相关性越强。

图 2 8 种柑橘果皮营养指标含量与抗氧化能力相关性分析

Fig.2 Pearson correlation analysis of nutritional indicator content and antioxidant capacity of eight citrus peels

由图2可知,柑橘果皮橙皮苷、总黄酮和维生素C含量与样品抗氧化能力、自由基清除率呈现出一定正相关性,尤以样品总黄酮含量与DPPH自由基清除率相关性最高,相关系数达0.96。

2.3.2 8种柑橘果皮营养品质主成分分析和聚类分析  
根据营养指标含量和抗氧化能力测定结果,构建8种柑橘果皮营养价值和抗氧化能力分类模型,结果如图3所示。



A.8种柑橘果皮主成分分析;B.8种柑橘果皮聚类分析;I和II表示根据 Origin 2021 软件提供的“树状聚类热图”工具进行的聚类分析,将8种柑橘分为I和II两类。

图3 8种柑橘果皮主成分分析及聚类分析

Fig.3 Principal component analysis and cluster analysis of eight citrus peels

由图 3A 可知,4 种宽皮柑橘果皮和 4 种橙类柑橘果皮未完全分离,表明 8 种柑橘果皮营养品质和抗氧化能力差异较小。由图 3B 可知,当距离约为 5 时,可将 8 种样品分为两类,第 1 类包括脐橙、血橙、蜜香橙、冰糖橙和不知火,第 2 类包括芦柑、沃柑和砂糖橘。

### 2.3.3 基于主成分分析模型的 8 种柑橘果皮营养品质综合评价

根据主成分分析结果,以特征值大于 1 为提取标准,共提取出 5 个主成分,结果见表 2。

表 2 各主成分对 8 种柑橘果皮综合品质的特征值和累计贡献率  
Table 2 Eigenvalues and cumulative contribution of each principal component to the comprehensive quality of eight citrus peels

主成分(PC)	特征值( $\lambda$ )	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
PC1	5.69	35.54	35.54
PC2	3.68	22.97	58.51
PC3	2.56	15.98	74.49
PC4	2.24	14.01	88.50
PC5	1.10	6.88	95.38

表 3 8 种柑橘果皮营养品质综合得分及排名

Table 3 Comprehensive nutritional quality score and ranking of the eight citrus peels

样品	$F_1$		$F_2$		$F_3$		$F_4$		$F_5$		综合评价	
	得分	排名	得分	排名	得分	排名	得分	排名	得分	排名	得分	排名
砂糖橘	-87.73	7	12.90	4	20.74	1	2.26	4	-0.58	6	-25.56	6
沃柑	-55.61	6	-15.24	6	0.50	4	-13.25	8	0.55	3	-25.97	7
芦柑	-94.31	8	17.36	3	-14.71	8	3.55	3	1.44	2	-32.63	8
不知火	-27.26	5	-48.17	8	-6.91	7	5.09	2	-1.66	7	-22.22	5
冰糖橙	36.25	4	21.01	2	-0.34	5	9.90	1	-0.17	5	19.77	4
脐橙	56.10	3	34.81	1	-6.88	6	-7.36	7	-1.91	8	26.78	2
血橙	100.19	1	-17.08	7	4.20	2	0.05	5	0.52	4	33.73	1
蜜香橙	72.37	2	-5.59	5	3.40	3	-0.23	6	1.81	1	26.11	3

蜜香橙果皮的综合营养品质均优于 4 种宽皮柑橘砂糖橘、沃柑、芦柑和不知火果皮,表明橙类柑橘果皮与宽皮柑橘类果皮相比,橙类柑橘果皮具有更好的营养价值和抗氧化活性;而橙类柑橘果皮样品中综合得分由高到低排序为血橙>脐橙>蜜香橙>冰糖橙,表明 8 种柑橘果皮样品中,血橙果皮营养价值最高、抗氧化能力最高,综合营养品质最优。

### 3 结论

本研究结果表明,8 种柑橘果皮营养价值较高、抗氧化能力较强。皮尔逊相关性分析结果显示柑橘果皮橙皮苷、总黄酮和维生素 C 含量与样品抗氧化能力呈现出一定正相关性,其中总黄酮含量与 DPPH 自由基清除率相关性最高,相关系数达 0.96。主成分分析结果表明 8 种柑橘果皮间差异较小,聚类分析将其分为两类。综合评价模型结果显示,橙类柑橘果皮综合营养品质均优于宽皮柑橘,表明相较于宽皮柑橘果皮,橙

由表 2 可知,所提取的 5 个主成分累计方差贡献率达 95.38%,几乎可反映样品所有信息,可用这 5 个主成分来评价 8 种柑橘果皮的综合品质<sup>[25-26]</sup>。其中主成分 1 包括水分、维生素 C、总糖和粗脂肪含量,主成分 2 包括铁离子抗氧化能力、还原力、羟基自由基和超氧阴离子自由基清除率,主成分 3 包括蛋白质、还原糖、灰分和果胶含量,主成分 4 包括橙皮苷、总黄酮含量以及相对电导率和 DPPH 自由基清除率,主成分 5 为还原糖含量。据此,根据标准化数据,采用 SPSS 26.0 软件计算出每个样本的主成分得分,以  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  和  $F_5$  表示。随后对各主成分的方差贡献率进行加权,并根据下列公式计算各样品综合得分。

$$Cq = F_1 \times Z_1 + F_2 \times Z_2 + F_3 \times Z_3 + F_4 \times Z_4 + F_5 \times Z_5$$

式中: $Cq$  为样品综合得分; $F_1 \sim F_5$  分别表示 5 个主成分得分; $Z_1 \sim Z_5$  分别表示分别表示 5 个主成分的加权方差贡献率。

8 种柑橘果皮样品加权综合得分和排名见表 3。

由表 3 可知,4 种橙类柑橘冰糖橙、脐橙、血橙和

类柑橘果皮具有更优的营养品质,橙类柑橘果皮中又以血橙果皮综合营养品质得分最高,综合得分的大小排序为血橙>脐橙>蜜香橙>冰糖橙,表明 8 种柑橘果皮中,血橙果皮营养价值和抗氧化活性最佳。综上所述,这些发现揭示了 8 种柑橘果皮的潜在健康益处,有助于指导以柑橘果皮为主要原料制备新型功能性食品和天然抗氧化剂的研发,也可为柑橘果皮在食品领域的深度开发利用提供数据支持和理论参考。

### 参考文献:

- [1] 徐明月,郑金铠,毕金峰,等.柑橘皮中短波红外干燥特性和品质研究[J].中国食品学报,2017,17(8):64-73.  
XU Mingyue, ZHENG Jinkai, BI Jinfeng, et al. Studies on the drying characteristics and qualities of *Citrus* peels by medium- and short-wave infrared drying[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(8): 64-73.
- [2] 车金鑫,郭虹雨,陈珂琴,等.柑橘废弃物利用的研究进展[J].食品与发酵工业,2022,48(20):300-306.  
CHE Jinxin, GUO Hongyu, CHEN Keqin, et al. Research progress

- of citrus waste utilization[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(20): 300-306.
- [3] 肖飞, 薛莲, 王国军, 等. 不同叶面肥对柑橘果实品质及产量的影响[J]. 现代农业科技, 2024(2): 45-47.
- XIAO Fei, XUE Lian, WANG Guojun, et al. Effects of different foliar fertilizers on quality and yield of *Citrus* fruits[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024(2): 45-47.
- [4] 李丽, 蒋景龙, 胡佳乐, 等. 不同品种柑橘果皮精油关键香气物质筛选[J]. 食品工业科技, 2023, 44(24): 259-269.
- LI Li, JIANG Jinglong, HU Jiale, et al. Screening of key aroma components in essential oils from *Citrus* peels of different cultivars[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(24): 259-269.
- [5] 余歆, 张晓楠, 赵晓春. 柑橘果皮的生物活性物质和重要园艺性状[J]. 园艺学报, 2021, 48(4): 825-836.
- YU Xin, ZHANG Xiaonan, ZHAO Xiaochun. Bioactive compounds in *Citrus* peel and peel-related important horticultural traits[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2021, 48(4): 825-836.
- [6] 许克静, 黄河, 梁森, 等. 不同干燥温度下橘皮的干燥特性及香味变化[J]. 现代食品科技, 2022, 38(2): 256-265.
- XU Kejing, HUANG Ke, LIANG Miao, et al. The drying characteristics and aroma changes of orange peel at different drying temperatures[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(2): 256-265.
- [7] 王会全, 刘鑫, 吴英祥, 等. 柑橘果皮精油提取工艺及成分分析研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(21): 92-99.
- WANG Huiquan, LIU Xin, WU Yingxiang, et al. The study on essential oil extraction technology and component analysis of *Citrus* peel[J]. Food Research and Development, 2018, 39(21): 92-99.
- [8] 蒋变玲, 王志花, 张东京, 等. 四种柑橘果皮主要活性物质测定和抗氧化能力对比研究[J]. 阜阳师范大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 51-56.
- JIANG Bianling, WANG Zhihua, ZHANG Dongjing, et al. Determination of main bioactive compounds and comparison of antioxidant capacity of four cultivars of citrus peels[J]. Journal of Fuyang Normal University (Natural Science), 2021, 38(1): 51-56.
- [9] WU J D, YE M, WANG Z G. Extraction, purification and anti-hyperlipidemic activities of total flavonoids from corn silk[J]. Pakistan Journal of Zoology, 2017, 49(6): 2173-2179.
- [10] 李晓旭, 李家政. 优化蒽酮比色法测定甜玉米中可溶性糖的含量[J]. 保鲜与加工, 2013, 13(4): 24-27.
- LI Xiaoxu, LI Jiazheng. Determination of the content of soluble sugar in sweet corn with optimized anthrone colorimetric method[J]. Storage & Process, 2013, 13(4): 24-27.
- [11] EKISSI A C, KOUAME K B, NIABA K P V, et al. Physicochemical characterization of two species of wild edible mushrooms: *Lentinus brunneofloccosus* pegler and *Auricularia auricularia judae*[J]. Food and Nutrition Sciences, 2021, 12(3): 319-331.
- [12] 李静浩, 孙光伟, 白森, 等. 烤烟电导率与其耐烤性的关系研究[J]. 江西农业学报, 2022, 34(3): 28-32, 52.
- LI Jinghao, SUN Guangwei, BAI Sen, et al. Study on relationship between electrical conductivity and curing resistance of flue-cured tobacco[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2022, 34(3): 28-32, 52.
- [13] BENZIE I F F, STRAIN J J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of 'antioxidant power': The FRAP assay[J]. Analytical Biochemistry, 1996, 239(1): 70-76.
- [14] 曹冠华, 张雪, 邢瀚文, 等. 阳春砂仁干品盐砂仁姜砂仁抗氧化活性比较分析[J]. 时珍国医国药, 2019, 30(10): 2381-2384.
- CAO Guanhua, ZHANG Xue, XING Hanwen, et al. Antioxidant activity comparison and analysis of fructus amomi and its processed products with salt and ginger sauce[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2019, 30(10): 2381-2384.
- [15] 李剑梅, 朱万芹, 柴林山, 等. 蛹虫草多酚提取工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(8): 111-117.
- LI Jianmei, ZHU Wanqin, CHAI Linshan, et al. Optimization of extraction process of *Cordyceps militaris* polyphenols and its antioxidant activity[J]. Food Research and Development, 2023, 44(8): 111-117.
- [16] 穆兴燕, 吴胜, 郭银萍, 等. 不同溶剂提取对刺梨物质含量变化及抗氧化活性的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(17): 68-75.
- MU Xingyan, WU Sheng, GUO Yinping, et al. Effects of different solvents on active component content and antioxidant activity of *Rosa roxburghii* trutt extract[J]. Food Research and Development, 2023, 44(17): 68-75.
- [17] RIETJENS I M C M, BOERSMA M G, DE HAAN L, et al. The prooxidant chemistry of the natural antioxidants vitamin C, vitamin E, carotenoids and flavonoids[J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2002, 11(3/4): 321-333.
- [18] PADAYATTY S J, KATZ A, WANG Y H, et al. Vitamin C as an antioxidant: Evaluation of its role in disease prevention[J]. Journal of the American College of Nutrition, 2003, 22(1): 18-35.
- [19] AVERSA R, PETRESCU R V V, APICELLA A, et al. We are addicted to vitamins C and E-a review[J]. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016, 9(4): 1003-1018.
- [20] KARAK P. Biological activities of flavonoids: An overview[J]. International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research, 2019, 10(4): 1567-1574.
- [21] LIU J, MA G M, WANG Y, et al. *Moringa oleifera* leaf flavonoids protect bovine mammary epithelial cells from hydrogen peroxide-induced oxidative stress *in vitro*[J]. Reproduction in Domestic Animals = Zuchthygiene, 2020, 55(6): 711-719.
- [22] NIE Z P, WAN C P, CHEN C Y, et al. Comprehensive evaluation of the postharvest antioxidant capacity of majiayou pomelo harvested at different maturities based on PCA[J]. Antioxidants, 2019, 8(5): 136.
- [23] ZHANG X K, CAO G H, BI Y, et al. Comprehensive analysis of 34 edible flowers by the determination of nutritional composition and antioxidant capacity planted in Yunnan Province China[J]. Molecules, 2023, 28(13): 5260.
- [24] NUNES N, FERRAZ S, VALENTE S, et al. Biochemical composition, nutritional value, and antioxidant properties of seven seaweed species from the Madeira Archipelago[J]. Journal of Applied Phycology, 2017, 29(5): 2427-2437.
- [25] JIN N, JIN L, WANG S Y, et al. A comprehensive evaluation of effects on water-level deficits on tomato polyphenol composition, nutritional quality and antioxidant capacity[J]. Antioxidants, 2022, 11(8): 1585.
- [26] ZHOU D C, ZHENG G, JIA L Y, et al. Comprehensive evaluation on anti-inflammatory and anti-angiogenic activities *in vitro* of fourteen flavonoids from *Daphne Genkwa* based on the combination of efficacy coefficient method and principal component analysis[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2021, 268: 113683.