

果蔬生物活性成分及功能研究进展

王雨贝, 李世豪, 李可昕, 刘佩冶, 曹健康*

中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083, 中国

*通讯作者: cjk@cau.edu.cn

摘要: 全球人类面临着代谢性疾病的发生率日益上升的危险, 而这些疾病的发生与人们的日常饮食密切相关。果蔬是人们重要的日常食物种类之一。在果蔬中含有种类丰富多样的植物次生代谢产物, 如多酚类物质、类黄酮类、萜烯类、萜类、生物碱、甾体皂苷、多糖等。这些天然产物具有多种的生理活性功能, 如抗氧化、抗肿瘤、降血糖、降血脂、神经保护、抗炎、抗菌和预防疾病等, 为预防人类代谢性疾病的发生具有重要意义。但是, 不同种类果蔬活性产物的组成与含量、功能表现与作用机制差异很大。本文综述了果蔬中主要的生物活性成分及其活性功能的研究进展, 以促进人们对果蔬原料功能成分的认识及其开发利用。

关键词: 果蔬; 生物活性; 功能; 次生代谢

1. 引言

联合国粮农组织等联合发布的《2022年世界粮食安全和营养状况》报告指出, 全球发达地区的人群面临着超重和肥胖的风险, 高血脂、高血糖和动脉粥样硬化等代谢性疾病的发生率不断上升的风险。饮食的健康和营养均衡越来越得到人们的广泛关注, 人们对于寻求健康功能食物的需求更加强烈。果蔬是人们健康饮食的重要组成部分, 既可为人们提供了花色品种丰富的食物种类, 也可为维持人体健康与预防代谢性疾病提供了丰富的营养物质和重要的生物活性成分。果蔬中的生物活性成分多种多样,

主要为果蔬次生代谢产物, 包括酚酸类物质^[1]、类黄酮类^[2]、萜烯类^[3]、萜类^[4]、生物碱^[5]、甾体皂苷等^[6], 不同果蔬中主要的生物活性成分的组成和含量差异较大。大量研究表明, 果蔬中生物活性成分普遍具有抗氧化、抗肿瘤、降血糖、降血脂、神经保护、抗炎、抗菌等功能, 有些还具有抗抑郁、改善睡眠等功能^[7,8]。随着人们对食品功能成分与人体健康的关注日益增加, 食物来源的生物活性成分的功能特性得到了越来越多的研究。为此, 综述了果蔬生物活性成分及功能研究进展, 为探讨果蔬营养与功能提供依据。

收稿日期: 2023-05-15

发表日期: 2023-06-21

支持项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1100904)和国家自然科学基金面上项目(32272371)

English edition of this article is available online at <https://cae.usp-pl.com/index.php/fnc/article/view/14>

果蔬生物活性成分复杂多样，主要种类见表 1。

表 1. 果蔬中主要的生物活性成分

种类	来源	提取方法	分离方法	含量 (mg/kg)	化合物名称	参考文献
花青素	蓝莓	1%柠檬酸热提取	HPLC-PDA-MS/MS	1717±7	矢车菊素-3-O-葡萄糖苷	[9]
		超声辅助提取	使用强阳离子交换(SCX)柱纯化, 使用 HPLC 方法分离	1082.3	飞燕草素-3-半乳糖苷, 氰基-3-半乳糖苷, 飞燕草素-3-阿拉伯糖苷	[10]
		微波提取	HPLC-DAD	1.02 g/mL	天竺葵素	[11]
	野櫻莓	超声辅助提取	UPLC ESI-MS	5673.2	花青素-3-O-木糖苷, 花青素-3-O-阿拉伯糖苷	[12]
酚酸	蜜桔	超声辅助提取	HPLC-PDA	2848.45±76.39	咖啡酸	[13]
	苹果	2%甲酸-70%甲醇提取	HPLC/UV	8.3 ± 0.5	没食子酸	[14]
				38.5±0.9	绿原酸	
				2.5±0.5	咖啡酸	
葡萄	乙酸乙酯提取	微高效液相色谱(μ-HPLC)	0.4±0.1	对香豆酸		
类黄酮	牛油果	固-液萃取	HPLC-DAD-ESI-QTOF-MS	3.95±0.18	反式白藜芦醇	[15]
	苹果	2%甲酸-70%甲醇提取	用 p-DMACA 检测	200.2±6.7	黄烷醇	[14]
	柑橘	果汁	HPLC, MS 和 MS-MS	700.08±25.41 mg/L	Lucenin-2 4'-methyl ether, 金雀花素, 3-羟基-3-甲基戊二酰糖苷基槲皮素, 柚皮芸香糖苷, Chrysoeriol 7-O-neoesperidoside, 橙皮苷	[17]
					1-表儿茶素, 芹菜素-7-O-β-d-glucopyranuronide, 异鼠李素-7-O-β-d-glucopyranuronide, 槲皮素-7-O-β-d-glucopyranoside, 7,3',4'-三羟基黄酮, 木犀草素, 槲皮素, 芹菜素, 槲皮素-3-单甲醚柚皮素, 柚皮苷, 山柰酚和山柰苷	[18]
蒽类	榴莲	乙醇萃取、环己烷氯仿提取	硅胶柱分馏, HPLC 鉴定	0.828×10 ⁻³	2-羟基熊果酸、熊果酸	[19]

续表 1.

种类	来源	提取方法	分离方法	含量 /(mg/kg)	化合物名称	参考文献
	柚子	丙酮提取	硅胶柱纯化, 二氯甲烷和异丙醇洗脱	1.138×10^4	柠檬苦素	[20]
	胡萝卜	己烷、丙酮和乙醇混合溶剂微波提取	过滤分离	517.9 ± 21.1 232.6 ± 20.5	总类胡萝卜素 β -胡萝卜素	[21]
蒽类	可可	冷丙酮提取	石油醚萃取离心	17.08 ± 2.10 13.74 ± 0.29	β -胡萝卜素 番茄红素	[22]
	柑橘	乙酸乙酯浸渍提取	HPLC	2.51	全反式胡萝卜素	[23]
	枸杞	水提-醇沉	分级沉淀分离, 凝胶渗透色谱法纯化	0.05% 0.03% 0.19%	枸杞多糖-I-1 枸杞多糖-I-2 枸杞多糖-I-3	[24]
多糖	百香果	热水浸提、超声辅助提取	GPC 分析	$10.21 \pm$ 2.06% $12.37 \pm$ 3.18%	热水提取多糖 超声辅助提取多糖	[25]
	山楂	水提-醇沉	Fehling liqueur 形成不溶性复合物, 乙醇洗涤纯化	2.19%	山楂水溶性多糖	[26]

2.1 酚酸类

酚酸类(phenolic acids)化合物泛指在一个苯环上有多个酚羟基取代的芳香羧酸类化合物, 通常在植物中以酰胺、酯或糖苷形式存在, 少部分以游离形式存在, 在植物种子发育、开花、果实发育及成熟过程中具有重要作用^[1]。酚酸是通过苯丙烷代谢途径产生的, 在一系列酶的作用下, 苯丙氨酸转化为反式肉桂酸, 反式肉桂酸转化为对香豆酸, 进一步转化可产生咖啡酸、绿原酸、芥子酸和阿魏酸等许多酚酸物质。植物细胞壁含有酯化酚酸, 在酸/碱水解时释放。酚酸在果蔬中广泛存在且种类丰富。果蔬中酚酸类化合物通常是用乙醇或其他有机溶剂进行提取后利用色谱或质谱分离鉴定。Wang 等^[14]利用高效

液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)分离鉴定了五个品种的苹果果皮和果肉中的酚酸, 有咖啡酸、没食子酸、绿原酸、对香豆酸等多种酚酸类物质。Sun 等^[13]从温州蜜桔和南丰蜜桔中提取分离出较高含量的阿魏酸, 也分离得到咖啡酸, 对香豆酸, 原儿茶酸等一系列酚酸。Fan 等^[15]用乙酸乙酯提取葡萄中白藜芦醇, 并用微高效液相色谱分离鉴定得到反式白藜芦醇。Clifford 等^[27]从黄花菜中提取分离得到 8 种酚酸, 并通过液相色谱-质谱联用定性分析, 将这 8 种酚酸分别确定为 3 种咖啡酰奎尼酸: 3-O-caffeoylquinic acid, 5-O-caffeoylquinic acid, 4-O-caffeoylquinic acid; 3 种对香豆酰奎尼酸: 3-O-p-coumaroylquinic acid, 4-

O-p-coumaroylquinic acid, *5-O-p-coumaroylquinic acid* 以及 2 种阿魏酰奎尼酸: *3-O-feruloylquinic acid*, *4-O-feruloylquinic acid*。酚酸的分离与鉴定技术已经很成熟, 随着代谢组学分析技术的广泛应用, 研究者不断从果蔬中发现和鉴定出新的酚酸化合物。

2.2 类黄酮类化合物

类黄酮类(Flavonoids)化合物是指以 2-苯基色原酮为骨架衍生的一类化合物的总称, 是重要的植物次生代谢产物, 类黄酮通常以糖苷的形式积聚在植物细胞的液泡中。在化学结构上, 类黄酮有三个环(C6-C3-C6)作为它们的基本骨架。根据结构差异, 基于中心杂环的氧化程度, 类黄酮一般分为七个亚类: 黄酮醇、黄酮、异黄酮、花青素、黄烷酮、黄烷醇和查耳酮。类黄酮的生物合成以对香豆酰辅酶 A 酯(*p-coumaroyl-CoA*)和丙二酰辅酶 A(*malonyl-CoA*)为起点, 香豆酰辅酶 A 酯来源于苯丙烷类代谢途径, 丙二酰辅酶 A 来自乙酰辅酶 A。类黄酮生物合成途径会产生不同的代谢分支, 产生不同亚类化合物^[2]。类黄酮其他两个环上的甲基和羟基位点可以被修饰, 各种类型的花青素和黄酮醇可以通过酰化、甲基化和糖基化合成相对稳定的黄酮类化合物在果蔬的果肉组织、果皮和种子中积累, 大部分与糖结合以糖苷类形式存在, 少部分以游离形式存在, 赋予果蔬丰富的颜色和多种多样的生理功能。

一般会利用有机溶剂或者水来分离提取果蔬中的类黄酮物质, 再经离子交换柱或色谱柱进行分离纯化。类黄酮类物质及其糖苷化合物

的分离与鉴定技术难度相对较高, 所以需要利用高效液相色谱-串联质谱联用仪(liquid chromatograph-mass spectrometer, LC-MS/MS)、超高效液相色谱-串联质谱仪(ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS)等进行实验操作。Zhang 等^[10]用超声辅助进行提取, 强离子交换柱纯化和高效液相色谱分离从蓝莓果渣中获得了一系列类黄酮化合物中的花色苷物质。这些物质涵盖如下: 飞燕草素-3-半乳糖苷(*delphinidin-3-galactoside*)、飞燕草素-3-葡萄糖苷(*delphinidin-3-glucoside*)、矢车菊素-3-半乳糖苷(*cyanidin-3-galactoside*)、飞燕草素-3-阿拉伯糖苷(*delphinidin-3-arabinoside*)、矢车菊素-3-葡萄糖苷(*cyanidin-3-glucoside*)、矮牵牛素-3-半乳糖苷(*petunidin-3-galactoside*)、锦葵色素-3-半乳糖苷(*malvidin-3-galactoside*)、锦葵色素-3-阿拉伯糖苷(*malvidin-3-arabinoside*)等。Ferreira 等^[9]也从蓝莓中提取获得了飞燕草素-3-半乳糖苷、矢车菊素-3-葡萄糖苷等。Benbouguerra 等^[28]用丙酮提取葡萄果皮中的类黄酮, 并用高效液相色谱分离鉴定, 得到了黄烷醇和花色苷。其中, 绿色时期和接近转色期的葡萄果皮黄烷醇含量较高, 而转色期和成熟期果实果皮中花色苷的含量更高。López-Cobo 等^[29]在牛油果果肉、果皮以及种子中分离提取得到儿茶素、表儿茶素等一系列黄烷醇类化合物。Tian 等^[18]用 80%的乙醇水溶液提取山莓果实中的类黄酮化合物, 并用不同目数的聚酰胺(30-60 目)分离纯化, 得到 12 种不同类别的黄酮化合物, 包括 1-表儿茶素(1-epicatechin), 芹

菜素-7-O- β -d-葡萄糖萜苷酸(apigenin-7-O- β -d-glucopyranuronide), 异鼠李素-7-O- β -d-葡萄糖苷(isorhamnetin-7-O- β -d-glucopyranuronide), 槲皮素-7-O- β -d-吡喃葡萄糖苷(quer-cetagenin-7-O- β -d-glucopyranoside), 7,3',4'-三羟基黄酮(7,3',4'-trihydroxyflavone), 木犀草素(luteolin), 槲皮素(quer-cetin), 芹菜素(apigenin), 槲皮素-3-单甲醚(quer-cetin-3-monomethyl ether), 柚皮素(naringenin), 山奈酚(kaempferol)和山奈素(kaempferide)。

2.3 萜类化合物

萜类化合物(Terpenoids)是由异戊二烯(C_5)以头头或头尾方式连接而成的一类天然化合物(C_5H_8)_n的统称, 是植物次生代谢物中结构和数量最多的一类化合物, 包括倍半萜类、单萜类、倍半萜、二萜类、三萜类、多戊烯醇、植物甾醇、油菜素类固醇化合物, 涉及类胡萝卜素及其分解产物、细胞分裂素、赤霉素、叶绿素、生育酚和质体素的生物合成^[30]。萜类化合物都来自通用的五碳结构单元—异戊焦磷酸(isopentenylpyrophosphate, IPP)及其烯丙基异构体二甲基烯丙基焦磷酸(dimethylallyl diphosphate, DMAPP)。萜类合成途径主要是胞内甲羟戊酸(mevalonic acid, MVA)途径和质膜4-磷酸甲基赤藓糖醇(methylerythritol 4-phosphate, MEP)。

其中, 类胡萝卜素类化合物是地球上第二大天然色素, 是四萜类化合物, 有750多种。类胡萝卜素类色素主要为 C_{40} 亲脂性异戊二烯类化合物。类胡萝卜素的呈色范围从无色到黄色、橙色和红色, 构成了许多水果、花卉和蔬菜

的颜色。在类胡萝卜素合成过程中, 会产生许多中间产物及衍生物, 如八氢番茄红素是一种无色类胡萝卜素, 具有三个共轭双键。八氢番茄红素通过生成六氢番茄红素、 ζ -胡萝卜素等, 逐渐去饱和形成番茄红素。番茄红素在番茄红素环化酶的催化下产生具有环状末端端基(如 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素)的类胡萝卜素。 β -胡萝卜素羟化生成玉米黄质, 玉米黄质环化形成玉米黄质, 经过两次催化生成紫黄质等多种化合物^[2]。胡萝卜和红薯中的 β -胡萝卜素, 西红柿和西瓜的番茄红素, 红辣椒中的辣椒红素, 万寿菊花中的叶黄素, 类胡萝卜素及其氧化和酶促裂解产物对于植物的各种生物过程至关重要。

不同果蔬中含有的萜类化合物结构比较复杂, 其种类和含量差异也比较大, 尚有许多萜类化合物未被分离鉴定出来。通常会使用有机溶剂来提取果蔬中的萜类物质, 再经硅胶柱或色谱柱分离纯化后用质谱或核磁共振波谱对其进行鉴定。Tai等^[31]分离鉴定了黄花菜中的14种类胡萝卜素。它们分别为: 新黄质(neoxanthin), 紫黄质(violaxanthin), 紫黄质(violeoxanthin), 叶黄素(lutein), 13-顺式-叶黄素5,6-环氧化物(13-*cis*-lutein 5,6-epoxide), 叶黄素5,6-环氧化物(lutein 5,6-epoxide), β -隐黄质(β -cryptoxanthin), 玉米黄质(zeaxanthin), 全反式 β -胡萝卜素(all-*trans*- β -carotene)及其顺式异构体。Montesano等^[32]发现南瓜中富含不同具有生物活性的萜类化合物, 包括葫芦素等三萜化合物、倍半萜以及类胡萝卜素等四萜化合物。Kikuchi等^[33]用南瓜种子中进行研究, 从中分离提取从而得到了具有

潜在抗癌活性的 7-氧代多氟醚-8-烯-3 α ,29-二醇 3-乙酸-29-苯甲酸酯(7-oxomultiflor-8-ene-3 α ,29-diol-3-acetate-29-benzoate)等 6 种多氟烷型三萜。Szewczyk 等^[34]对黄花菜蒸馏获得的精油组分进行了分析,发现其主要成分是含氧单萜 1,8-桉叶素,并且具有良好的抗氧化活性。Qin 等^[35]用丙酮从柚子中提取得到一种三萜类化合物柠檬苦素,具有的抗癌、抗氧化、抗病毒等多种生物活性。

2.4 多糖类

多糖是由 10 个以上单糖组成的聚合糖高分子碳水化合物。多糖的结构一般包括构成糖链的单糖种类、顺序、糖环类别、糖苷键的异头碳构型、分支位点、空间构象等。尽管植物多糖的结构千变万化,但合成通路基本一致。植物多糖生物合成途径主要包括 3 个步骤:(1)蔗糖经过一系列转化生成尿苷二磷酸(uridine diphosphate glucose, UDP)-葡萄糖、尿苷二磷酸葡萄糖-甘露糖和鸟苷二磷酸岩藻糖-岩藻糖。(2)UDP-葡萄糖转化为其他核苷二磷酸(nucleoside diphosphate, NDP)单糖。(3)最后通过不同的糖基转移酶将单糖从糖核苷酸供体结合到生长中的多糖聚合物中,随后这些重复单元被聚合,形成植物多糖。UDP-葡萄糖是多糖合成途径中其他 NDP 单糖合成的基础,在整个合成的过程中起着至关重要的作用。果蔬中含有大量淀粉、纤维素、果胶、半纤维素、木葡聚糖和菊粉等天然多糖。活性多糖具有以下特点:一级主链结构有 $\beta(1\rightarrow3)$ -D-葡聚糖分支度适中,分子质量在一定范围,溶解性好;单糖上的活性羟基被磷酸基团、

硫酸基团、甲基化基团等功能团取代;高级结构具有特定的有序空间构象^[36]。多糖物质主链上常带有大量的侧链,组成糖链的单糖主要有葡萄糖、鼠李糖、阿拉伯糖、甘露糖、木糖、岩藻糖等,由它们形成的不同类型复合物共同形成了多糖复杂结构。

多糖的结构、组成与功能往往受到材料前处理及提取分离方法的影响。一般是通过水提取、乙醇沉淀的方法得到果蔬粗多糖,再经过 DEAE 纤维素阴离子交换柱、Sephadex 葡聚糖凝胶柱层析等方法纯化,制备均一多糖。Gong 等^[24]将枸杞果实干燥、粉碎后,经蒸馏水提取、乙醇沉淀等过程获得粗多糖,通过膜透析得到不同的渗余物,通过 Sephadex G-100 柱上的凝胶渗透得到均一多糖。Teng 等^[25]的研究中用热水提取百香果,经乙醇混合并放置过夜沉淀多糖,透析截留 3500 Da 并冻干得到精制多糖。Bensaci 等^[26]将山楂果实果肉与蒸馏水搅拌 24 小时,过滤后经乙醇沉淀,获得粗制水溶性多糖,利用超声辅助提取有利于提高多糖得率。Nie 等^[20]用超声波辅助磷酸缓冲液提取秋葵中的多糖粗提液,经 DEAE 柱分离纯化后用去离子水和 0.1 mol/L NaCl 溶液洗脱收集,得到秋葵多糖。多糖物质的活性功能除了与多糖组成有关外,还受到其物理结构特性的影响,研究果蔬多糖精细结构有助于深入阐释其构效关系。由于多糖的高度异质性和复杂性,多糖的组成、糖苷键构型、连接方式、空间结构以及聚合物等精细结构的分析需要借助高效阴离子色谱(high performance anion exchange chromatography, HPAEC),

高效体积排阻色谱(high performance size exclusion chromatography, HPSEC), 气相色谱-质谱联用(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS), LC-MS, 核磁共振波谱法等现代仪器分析方法。

果蔬中生物活性成分的功能已得到了充分研究, 普遍具有抗氧化、抗肿瘤、抗炎抗菌等功能, 但是, 不同种类生物活性成分的具体功能特性又具有很大的差异。果蔬中生物活性成分的主要功能见表 2。

3. 果蔬中生物活性成分的主要功能

表 2. 果蔬中生物活性成分的主要功能

种类	来源	提取方法	功能	作用机制	参考文献
酚酸 类化 合物	石榴皮	70%乙醇提取	抗肿瘤	促进直肠癌细胞的凋亡, 抑制炎症和肿瘤细胞的增殖, 抑制 Wnt/ β -Catenin 信号通路。	[37]
		70%甲醇提取	抗炎、抗氧化	保护红细胞免受自由基诱导的裂解。下调促炎介质 NF κ B、iNOS 和 IL-6 的过度表达。	[38]
		50%甲醇提取	抗炎	通过抑制 TNF-R1, TNF- α , IL-1 β , IL-6 和 NF- κ B 氧化应激标志物, 减轻有关节炎的疼痛和炎症。	[39]
多酚 物质	桑葚	水提取	抗肿瘤	延缓了 TSGH 8301 异种移植模型中的肿瘤生长。	[40]
	荔枝果肉	95 %乙醇提取	降血脂	下调脂肪酰合成酶(FAS)的 mRNA 和相应的蛋白表达水平。	[41]
	葡萄皮	丙酮-水提取	抗氧化	邻二羟基酚和没食子酸基, 橙花青素, 黄酮类化合物, 对香豆酸、阿魏酸等酚酸氧化或橙花青素的抗氧化活性增加。	[28]
	百香果皮	60%乙醇提取	防止肥胖	抑制肥胖大鼠体重增加和脂肪含量, 降低血清中的炎症细胞因子和肝脏中的硫代巴比妥酸值。	[42]
	芒果果肉	80%乙醇提取	抗动脉粥样硬化	增加大鼠载脂蛋白 A1-B 比率, 调节高密度脂蛋白代谢, 减轻非酒精性脂肪性肝炎。	[43]
类黄 酮类	柑橘果皮	70%乙醇提取	降血脂	降低食用高脂肪饮食的小鼠的体重增加、肝脏重量和附睾白色脂肪组织(eWAT)重量。	[44]
		甲醇提取	抗氧化	有较强的 DPPH 和超氧自由基清除活性。	[45]
	葡萄茎皮	乙醇浸提, 硅胶柱纯化。	神经保护	白藜芦醇激活 CaMKII 信号通路, 增加海马突触可塑性和 CREB 的转录, 延缓阿尔兹海默症的发生。	[46]
	柚子皮	超声提取	降血脂	降低高脂血症小鼠的体重、肝器官指数、血清甘油三酯、低密度脂蛋白胆固醇和总胆固醇水平, 提高血清高密度脂蛋白胆固醇水平。减轻高脂血症小鼠脂肪肝细胞的退行性损伤。	[47]
	常山胡柚果皮	0.1%碳酸钙溶液提取, 树脂乙醇洗脱。	抗炎	抑制 IL-1 β 、IL-6、IL-12、TNF- α 和 IFN- γ , 显著抑制全身和肝内炎症。通过抑制磷酸化的 NF- κ B 和 MAPK 发挥保肝和抗炎作用。	[48]
	橙皮	乙醇提取	抑菌	根皮素对金黄色葡萄球菌, 粪肠球菌, 铜绿假单胞菌, 大肠杆菌, 沙门氏菌和白色念珠菌有抑制作用。	[49]

蒴类	柑橘果皮	水蒸馏法	抗氧化	较强的清除 DPPH 能力和有效抑制脂质过氧化的作用。	[50]
	柚子种子	丙酮提取, 硅胶柱纯化	抗氧化	柠檬苦素增强 Nrf2 及其下游基因 HO-1 和 NQO1 的转录, 激活 Nrf2-ARE 途径, 促进抗氧化相关基因表达。	[20]

续表 2.

种类	来源	提取方法	功能	作用机制	参考文献
蒴类	胡萝卜	索氏提取	免疫调节	饲喂类胡萝卜素可以增强小鼠免疫力, 促进淋巴细胞等数量增加, 且由 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素、玉米黄质、番茄红素等的类胡萝卜素复合物比仅含有仅含 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素的提取物免疫调节作用更强	[51]
	美果榄	己烷/丙酮/乙醇萃取	抗氧化	类胡萝卜素具有自由基清除活性。叶黄素和 β -隐黄质含量与 ABTS 抗氧化活性呈正相关	[52]
多糖	洋葱	逐级提取	抗菌	四种多糖对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、鼠伤寒沙门氏菌的抑菌活性均为 DASS>CHSS>HBSS>CASS	[53]
	龙眼果肉	蒸馏水提取	免疫调节	增强小鼠巨噬细胞的吞噬活性。	[54]
	龙眼果肉	超声提取	抗肿瘤	增强小鼠腹腔巨噬细胞的延迟型过敏和吞噬作用, 增强脾淋巴细胞的增殖, 对 S180 肿瘤有较强的抑制作用。	[55]
	蓝莓果肉	水提醇沉	抗疲劳	可延长小鼠力竭游泳时间, 提高运动耐力	[56]
	白刺果实	水提醇沉	降血脂	防止肝脏脂肪堆积, 改善高脂血症。	[57]
	木枣	水提醇沉	降血脂	降低甘油三酯含量和丙氨酸氨基转移酶活性, 抑制脂质积累。	[58]
	长寿金柑果汁	热沉淀	降血脂	降低胆固醇含量, 抑制脂质过氧化物的形成, 通过清除体内的自由基来降低血脂。	[59]
	新鲜秋葵果实	水提醇沉淀	对抗胃刺激和炎症	具有对幽门螺杆菌的抗黏附活性, 对特定的幽门螺杆菌表面受体有阻断能力。	[60]
	秋葵果实	超声辅助提取	改善肠道菌群	促进益生菌生长的良好底物, 可以被益生菌用来维持生存和代谢活动。	[20]
	金樱子	水提取, DEAE-52 离子交换纤维素柱纯化, Sephadex G-200 柱净化。	抗氧化 神经保护	增强抗氧化酶活性、总抗氧化能力和抑制丙二醛水平, 保护 SH-SY5Y 细胞免受过氧化氢诱导的损伤。 通过激活 Nrf2/HO-1 信号通路调节体内氧化应激水平, 达到神经保护作用。	[61] [61]

3.1 抗氧化作用

正常情况下细胞内自由基的产生与清除的

处于动态平衡状态，但是随着衰老或由于外界的胁迫，使机体中自由基过量积累而打破这一平衡，会造成细胞的氧化损伤和过快衰老，导致多种疾病的发生。果蔬中化学成分普遍具有抗氧化活性，能够调节机体抗氧化代谢系统，保持细胞氧化还原稳态和脂质膜稳定。特别是多酚类物质、维生素 C 等极易通过自身氧化来清除自由基、直接或间接抑制脂质过氧化。Lu 等^[50]提取的柑橘果皮活性成分中主要组分为单萜类，其中柠檬烯为主要化合物。该柑橘果皮提取物表现出较强的 DPPH(1,1-二苯基-2-三硝基苯肼, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl)清除能力和有效抑制脂质过氧化作用。Apraj 等^[45]制备了柑橘皮的甲醇提取物，其提取物成分主要为聚甲氧基黄酮类化合物，包括了 D-柠檬烯, 4H-吡喃-4-酮, 2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基, 2-甲氧基-4-乙炔基苯酚和正十六烷酸等。该柑橘皮提取物具有较强的 DPPH 和超氧自由基清除活性，具有抗胶原酶和抗弹性蛋白酶潜力，可作为抗衰老护肤配方中的强效防皱剂。Vuolo 等^[42]制备的百香果皮提取物能提高肝脏谷胱甘肽还原酶、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)和超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性，降低脂质吸收、脂质过氧化水平和脂肪积累。Benbouguerra 等^[28]发现葡萄皮提取物的抗氧化能力与其中酚类物质含量高度相关，邻二羟基酚、没食子酸、橙花青素、黄酮类化合物、对香豆酸、阿魏酸等酚类氧化或橙花青素的二次氧化会引起抗氧化活性的增加。Wang 等^[14]发现红肉苹果中的酚酸、类黄酮、花色苷、黄烷

醇等物质含量比白肉苹果中的含量高，红肉苹果提取物具有更加强大的自由基清除能力，从而体现较强的抗氧化活性。Cichewicz 等^[62]在冻干黄花菜中发现了一种新的萜苷 stelladerol 具有很强的抗氧化活性，在体外实验中，10 μmol/L 的 stelladerol 对脂质氧化的抑制率可达 94.6 ± 1.4%，远高于维生素 E。Liu 等^[61]从金樱子果实中分离出多糖，其中含有的硒多糖具有抗氧化作用，可以降低脂质过氧化，增强机体对氧化损伤的抵抗。

3.2 抗肿瘤、抗癌作用

癌症或恶性肿瘤是由基因突变引起的细胞异常或不受控制生长的一系列疾病^[63]。细胞发生炎症后，促肿瘤炎症因子通过阻断抗肿瘤免疫和对上皮细胞和癌细胞施加直接的促肿瘤信号和功能来促进癌症^[64]。抗肿瘤常见的机制包括细胞周期阻滞、抗血管生成和细胞凋亡，能够直接发挥肿瘤杀伤能力^[65]。果蔬中的多酚类、类黄酮类、多糖类及萜醌类物质可以通过阻滞细胞周期、诱导细胞凋亡和抑制相关信号通路发挥抗肿瘤和抗癌作用。Zhong 等^[55]发现龙眼多糖对 S180 荷瘤小鼠肿瘤的抑制率高达 95.08%，这可能与显著增强了腹腔巨噬细胞的延迟型过敏和吞噬作用，增强了脾淋巴细胞的增殖等有关。Ahmed 等^[37]鉴定了石榴皮乙醇提取物成分，含有没食子酸、原儿茶酸、儿茶素、芦丁等，可以促进 n-甲基亚硝基脲灌胃诱导的结直肠癌细胞的凋亡，抑制炎症和肿瘤细胞的增殖，抑制 Wnt/β-Catenin 信号通路。Cichewicz 等^[66]报道了黄花菜根的甲醇提取物中萜醌类化合物可以抑

制乳腺癌和肺癌细胞的增殖，但没有表现出细胞毒性作用，其可能机制是通过诱导癌细胞分化而显示出抗增殖活性。Chen 等^[40]的研究发现桑葚水提取物作为补充剂与紫杉醇协同作用处理 TSGH 8301 人膀胱癌细胞系，增强了紫杉醇

3.3 抗炎作用

炎症是一种适应性反应，是由有害刺激和条件引发的，如感染和组织损伤。急性炎症和局部慢性炎症多与组织损伤有关，系统性慢性炎症则与组织功能障碍有关^[67]。果蔬提取物表现出显著的抗炎作用，且作用效果较于提取的单一组分更为明显，其作用途径主要为通过抑制 NF- κ B(nuclear transcription factor kappa B)信号通路抑制促炎细胞因子的释放和巨噬细胞炎症反应。Ramlagan 等^[38]研究了石榴果皮甲醇提取物(pomegranate mesocarp extract, PME)对暴露于晚期糖基化终产物(advanced glycation end products, AGEs)和过氧化氢(H₂O₂)的模拟糖尿病样氧化应激细胞模型的保护作用，从而发现了富含多酚类的 PME 提取物可以保护红细胞免受 2,2'-偶氮二异丁基脒二盐酸盐(2,2'-azobis (2-amidinopropane) dihydrochloride, AAPH)自由基诱导的裂解，防止抗氧化酶活性下降和抑制活性氧(reactive oxygen species, ROS)产生。PME 通过抑制白细胞介素-6(interleukin-6, IL-6)分泌对前脂肪细胞有抗炎作用。PME 可下调 AGEs 处理后促炎介质 NF- κ B、iNOS(inducible nitric oxide synthase)和 IL-6 的过度表达。PME 降低脂肪组

的细胞毒性并诱导严重的 G2/M 停滞、有丝分裂突变和随后的细胞凋亡，还能够通过激活 PTEN(Phosphatase and tensin homolog) 和 Caspase 3 的表达，延缓了 TSGH 8301 异种移植模型中的肿瘤生长。

织水平的氧化应激和炎症，有减轻肥胖相关疾病如胰岛素抵抗和 II 型糖尿病的倾向。Karwasra 等^[39]也研究了石榴皮甲醇-水提取物对炎症的抑制作用，发现在该石榴提取物中总安石榴苷含量为 11.8%(w/w)，还含有没食子酸和鞣花酸等物质。该石榴皮提取物能够通过抑制肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α), TNF 受体-1(TNF receptor-1, TNF-R1), 白细胞介素-1 β (interleukin-1 β , IL-1 β), IL-6 和 NF- κ B 氧化应激标志物，有助于减轻关节炎疼痛和炎症。Liu 等^[68]通过建立慢性不可预见性轻度应激模型，发现黄花菜乙醇提取物可能是通过改善单胺和神经营养因子系统来表现抗炎作用，对大鼠额叶皮质和海马区 IL-1 β 、IL-6 和 TNF- α 的表达水平产生影响。Lengsfeld 等^[60]发现秋葵多糖具有对幽门螺杆菌的抗黏附活性，对特定的幽门螺杆菌表面受体有阻断能力，能够对抗炎症性疾病。Jiang 等^[48]报道了常山胡柚果皮黄酮可以抑制 IL-1 β 、IL-6、IL-12、TNF- α 和 IFN- γ 显著抑制全身和肝内炎症，并通过抑制磷酸化的 NF- κ B 和丝裂原活化蛋白激酶(mitogen-activated protein kinase, MAPK)发挥肝保护和抗炎作用，从而减轻肝脏病变。Xiao 等^[69]的研究发现荔枝甲醇提取物可改善抗氧化状态，减少核因子 E2 相关因子 2(NF-E2-related factor 2, Nrf2)的核转

位, 并降低肝脏中 Nrf2 靶基因的表达, 可用于预防和控制酒精性肝病; 荔枝甲醇提取物抑制了脂质合成基因的表达, 增加了脂肪酸 β -氧化基因的表达, 从而改善甘油三酯代谢水平。Vuolo 等^[42]制备的百香果皮提取物降低血清中的炎症细胞因子和肝脏中的硫代巴比妥酸值, 降低炎症反应。

3.4 降血脂、预防心血管疾病

高脂血症是高血压、动脉粥样硬化等心血管疾病发展的主要危险因素之一。心血管疾病的特征之一是血管功能障碍, 主要涉及修饰的浆脂蛋白、血管内皮细胞和平滑肌细胞、迁移细胞以及这些细胞产生的分子之间复杂的相互作用。从果蔬中提取的多糖能够调节脂蛋白代谢, 表现出显著的降血脂功能。Rjeibi 等^[57]制备的白刺果实粗多糖(polysaccharides from *Nitraria retusa* fruits, NRFP)具有降血脂功能, 对 Triton X-100 诱导的高脂血症和肝损伤具有保护作用, 如用 250 mg/kg 的 NRFP 治疗的高脂血症小鼠的肝脏结构得到了改善。NRFP 可以显著降低丙二醛(malondialdehyde, MDA)水平, 防止肝脏和心脏中的脂质过氧化, 同时 NRFP 可以维持膜的完整性, 降低氧化损伤中相关酶的活性。Zeng 等^[59]发现喂食长寿金柑多糖能降低大鼠的血脂, 减少细胞膜的脂质过氧化, 可能与其增加了体内脂酶的活性, 从而加速了甘油三酯(triglycerides, TG)的分解, 降低了胆固醇含量有关; 还可能与其增强了 SOD、GSH-Px 和谷胱甘肽-S-转移酶(glutathione-S-transferase, GST)的活性, 抑制了脂质过氧化物的形成有关。秋子梨膳

食纤维可以通过减少食物中脂肪酸和胆固醇的吸收, 干扰胆汁酸代谢, 改善肝脏脂质代谢来降低血脂水平, 从而显著降低了高脂肪饮食诱导的肥胖小鼠的体重增加和脂质、胆固醇水平^[70]。

此外, 多酚和类黄酮等次生代谢产物也可以降低血脂水平, 发挥对血管功能的保护作用。Gao 等^[44]从柑桔果皮 70%乙醇提取物中纯化富集了聚甲氧基黄酮(polymethoxyflavones, PMFs), 纯化的 PMFs 可以有效地缓解小鼠高脂肪饮食(high fat diet, HFD)引起的高脂血症。PMFs 还显著降低了 HFD 小鼠的低密度脂蛋白胆固醇(low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C)水平, 改善小鼠的肝脏脂肪变性, 减少脂肪组织。Yu 等^[47]从柚子皮中提取柚皮苷, 灌胃柚皮苷 5 周后发现, 柚皮苷能显著降低高脂血症小鼠的体重、肝器官指数、血清 TG、LDL-C 和总胆固醇(total cholesterol, TC)水平, 能提高血清高密度脂蛋白胆固醇水平, 显著提高了 GSH-Px 和 SOD 活性。肝脏组织病理学分析表明, 柚皮苷可减轻高脂血症小鼠脂肪肝细胞的退行性损伤。Domínguez-Avila 等^[42]鉴定了芒果果肉 80%乙醇提取物的主要成分为绿原酸、没食子酸、香草酸和原儿茶酸, 用芒果果肉提取物饲喂 Wistar 大鼠后, 发现具有抗动脉粥样硬化和保肝作用, 可以增加载脂蛋白 A1-B 比率, 调节高密度脂蛋白代谢, 减轻非酒精性脂肪性肝炎。Su 等^[41]的研究表明新鲜荔枝果肉 95%乙醇提取物明显抑制了高脂肪饮食引起的小鼠血清总胆固醇和甘油三酯水平的增加。

3.5 免疫调节作用

免疫功能对于预防和清除感染十分重要,免疫系统是抵御病原体的第一道防线,在身体机能受损之前提供保护。其中,先天免疫主要由巨噬细胞、树突状细胞和自然杀伤(natural killer, NK)细胞代表。生物活性物质可以通过上调抗炎细胞因子来发挥免疫调节作用,刺激抗体的合成,影响NK细胞和巨噬细胞的吞噬活性外,促进T和B淋巴细胞的增殖^[29]。果蔬多糖、类胡萝卜素等天然产物可通过刺激巨噬细胞吞噬活性发挥免疫调节作用。Deng等^[71]提取分离苦瓜粗多糖,经DEAE阴离子交换柱纯化后,用于小鼠腹腔注射,结果表明苦瓜多糖能够直接刺激淋巴细胞,有效地增强免疫抑制小鼠的细胞和体液免疫功能。此外,苦瓜多糖能够刺激正常和ConA诱导的脾淋巴细胞的增殖,可用作有效的免疫刺激剂。Rong等^[54]研究了龙眼多糖对巨噬细胞吞噬的影响,发现6.25~50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的龙眼多糖对小鼠巨噬细胞的吞噬作用有增强作用,且呈剂量依赖性。其中,50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的LPD2处理使巨噬细胞的吞噬能力提高至对照组的 $205.1 \pm 9.3\%$ 。

3.6 神经保护作用

神经保护作用是指使用某些物质能够扭转一些神经损害或者防止神经损害的进一步加深。这些物质往往对于神经元细胞有防止细胞退化的功能^[72]。果蔬中的酚类物质、生物碱、甾体皂苷、多糖等多种物质能够调节相关信号通路或蛋白表达发挥神经保护作用。Choi等^[46]用乙醇提取葡萄茎皮中的白藜芦醇,该提取物可以激活CaMKII信号通路,从而通过脑源性神经营养

因子(brain-derived neurotrophic factor, BDNF)依赖性途径增加海马突触可塑性和cAMP反应元件结合蛋白(cyclic-AMP response binding protein, CREB)的转录,通过调节CaMKII-BDNF-CREB依赖性信号通路来介导海马长期增强的形成,从而延缓阿尔兹海默症的发生,发挥神经保护作用。Liu等^[61]发现含硒的金樱子多糖可以上调人神经母细胞瘤细胞中的Nrf2和血红素氧合酶1(heme oxygenase-1, HO-1),通过激活典型的抗氧化应激信号通路Nrf2/HO-1,起到神经保护作用。Savla等^[5]研究了番木瓜叶的甲醇提取物—番木瓜碱作为神经保护候选物的有效性。番木瓜碱可以抑制A β -42聚集,且对PC12衍生神经元中抗神经生长因子(nerve growth factor, NGF)诱导的细胞毒性具有神经保护作用,并赋予细胞内微管显著的稳定性。Wang等^[73]研究了荔枝籽乙醇提取物皂苷(lychee seed saponins, LSS)的神经保护作用及其相关机制。LSS通过抑制阿尔兹海默病(Alzheimer's disease, AD)大鼠海马细胞凋亡,显著改善认知功能,减轻神经元损伤。LSS使半胱氨酸蛋白酶-3的mRNA表达和Bax(BCL2-associated X)的蛋白表达下调,而Bcl-2(B-cell lymphoma-2)的蛋白表达和Bcl-2/Bax的比例增加。LSS通过调节细胞凋亡途径显著改善AD大鼠的认知功能并预防神经元损伤。

3.7 抗疲劳作用

疲劳是由剧烈运动后代谢物的积累、能量和物质的消耗以及大量自由基的产生等多种因素引起的,它不仅是一种症状,还可能导致一系列严重的继发问题,如焦虑、抑郁、认知障碍等,

甚至可能导致与生物调节和免疫系统相关的严重疾病^[73]。果蔬中多种天然成分都能发挥抗疲劳作用。Wang 等^[74]发现欧芹中的类黄酮物质具有明显的缓解游泳运动导致的小鼠疲劳症状，其作用机制可能与调控 Keap1/Nrf2 和 AMPK/PGC-1 α 通路从而提高抗氧化能力有关。Bai 等^[56]制备的蓝莓多糖可延长小鼠力竭游泳时间，降低血尿素氮、血乳酸和 MDA 含量，并明显提高肝糖原、肌糖原水平及 SOD 和乳酸脱氢酶的活性。蓝莓多糖还能提高小鼠的有氧代谢能力和运动耐力。

3.8 抗菌作用

微生物耐药性是目前面临的一个重要问题，多重耐药性微生物菌株的出现和传播对全球公共卫生构成严峻的挑战^[49]。果蔬中生物活性物质多具有一定的抗菌活性，是开发更加安全高效的天然抗菌剂的重要来源。Ma 等^[53]用 70% 的乙醇-水溶液提取洋葱多糖，发现该提取物对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、鼠伤寒沙门氏菌有抑菌活性均，且抗菌活性可能与其中硫酸盐的含量有关，硫酸盐可以提高破坏细胞壁和细胞质膜的能力抑制菌体生长。Szewczyk 等^[33]从不同品种黄花菜中提取了精油组分，发现精油中主要成分是含氧单萜 1,8-桉叶素，并且含有大量相同的未知成分，研究发现其对革兰氏阴性菌表现出较强的抗菌活性。Oikeh 等^[49]对发现新鲜橙皮提取物对金黄色葡萄球菌，粪肠球菌，铜绿假单胞菌，大肠杆菌，沙门氏菌和白色念珠菌均有抑制作用。橙皮提取物中的类黄酮具有调节酶活性和抑制细胞增

殖的能力，对入侵的病原体具有防御作用。单宁可以和富含脯氨酸的蛋白质形成复合物，抑制细胞蛋白质合成，抑制病原体的生长。Alexandre 等研究了石榴提取物中酚类化合物的抗菌活性，发现石榴皮提取物对金黄色葡萄球菌、蜡样芽孢杆菌和铜绿假单胞菌等多种病原菌均有选择性抗菌作用，但不会对有益菌产生影响。

3.9 改善肠道菌群的作用

肠道菌群是指生活在人类以及其他动物(包括昆虫)消化道中的微生物。将肠道菌群调节到更有利的状态，保持稳态，与降低发生各种代谢、免疫和神经疾病的风险有关，还可能增强肠道屏障功能，减少慢性炎症的发生^[75]。果蔬中的膳食纤维和多糖、多酚、类黄酮，以及其他天然产物，能够调节肠道微生物的组成，增加菌群多样性，从而发挥改善肠道菌群的作用。Jiang 等^[76]发现山楂多糖能促进一氧化氮、IL-2、IL-6 和 TNF- α 的分泌，增加类杆菌 *Bacteroidetes* 和疣鼻菌 *Verrucomicrobia* 的丰度，减少蛋白菌 *Proteobacteria* 的丰度，从而调节肠道微生物群，在免疫调节中发挥作用。Peng 等^[70]的报道秋子梨膳食纤维干预改善了小鼠肠道微生物群的多样性，同时调节了肠道微生物群组成，增加了一些关键细菌如短链脂肪酸产生菌的丰度，还可以增加 *Firmicutes*、*Bacteroidetes*、*Akkermansia*、*Parabacteroides*、*Alistipes* 和 *Alloprevotella* 的菌的相对丰度，从而对缓解高脂血症和改善肠道细菌生态系统有相当积极的作用。Liu 等^[77]发现柚子果实膳食纤维的持水、持油和膨胀能力延缓了葡萄糖的扩散，抑制了 α -淀粉酶，并且还影

响了胆固醇胶束的形成。这种可溶性膳食纤维能够降低高血糖小鼠的总胆固醇含量以及类杆菌 *Bacteroidetes*、变形杆菌 *Proteobacteria* 和反刍杆菌 *Ruminococcaceae* 的丰度,但是也增加了韧皮菌 *Firmicutes*、乳酸菌 *Lactobacillus* 以及普雷沃特氏菌 *Prevotellaceae* 的丰度。Jiang 等^[76]发现了榴莲果皮多糖(*Durio zibethinus* Murr rind polysaccharides, DZMP)能够显著提高大鼠的肠道转运率、动情素、胃泌素和短链脂肪酸的浓度,降低体蛋白水平,改善大鼠的胃肠道蠕动。高剂量 DZMP 大鼠肠道菌群的 Shannon 指数和 Chao1 指数高于便秘大鼠,脱硫弧菌 *Desulfovibrio* 的相对丰度明显下降。可见 DZMP 能够通过调节肠道菌群来改善便秘的作用。Zhang 等^[78]对高脂肪饮食喂养的大鼠饲喂金樱子低分子量多糖可以显著降低韧皮类/类杆菌 *Firmicutes/Bacteroidetes* 的比例,显著增加 *Alistipes*、*Prevotella* 和 *Akkermansia* 的相对丰度,调节肠道微生物群。Wang 等^[73]对欧芹中的类黄酮物质的研究发现其对肠道微生态的调节也起着重要的作用。

4. 结语与展望

全球人群营养健康方面面临着营养不足和营养过剩的双重问题,肥胖、糖尿病、高血压和高血脂等代谢综合症类问题突出。世界卫生组织在促进人类健康饮食的建议中提出每人每天至少需要食用400 g(即5种)水果和蔬菜。随着社会经济的发展和人们生活水平的提高,果蔬对人类机体健康的作用会受到越来越广泛的关注。

果蔬中生物活性物质的基本结构已得到广泛确定,具体成分不断被分离纯化和鉴定,主要包括酚酸类、类黄酮类、萜醌类、萜类、生物碱和甾体皂苷等。这些天然产物的生物活性功能也得到不断发掘与验证,相关研究成果对于明确果蔬的功能特性及其对机体的作用提供了重要依据。但是,果蔬种类繁多,仍有许多果蔬中的功能活性成分未得到鉴定和解析,果蔬提取物的功能物质的主效成分及相关作用机理仍需进一步探究。另外,大多数研究针对体外实验或实验动物,基于人体的临床实验等研究还较为匮乏,关于活性物质的稳定性和使用时的安全剂量问题也少有考虑。此外,果蔬中不同种类生物活性成分在功能上可能存在交叉和重叠效应(图1),但是对于复合生物活性成分的功能尚缺乏渗入研究。

近年来,网络药理学已经成为生物活性功能成分研究领域的前沿和热点之一。基于网络药理学原理^[79],在高通量组学数据分析、虚拟计算、数据库检索基础上,进行果蔬生物活性物质的筛选和复配、活性功能网络构建,可以广泛揭示果蔬中生物功能活性成分的有效性、毒性和代谢特性。随着研究的系统深入,果蔬生物活性成分与人体健康的关系将会得到全面阐释,其生物活性功能及医疗保健价值将会得到充分挖掘、深度开发和综合利用。



图 1. 果蔬中的生物活性成分及其功能

利益冲突

本文作者没有需要声明的利益冲突。

参考文献

- [1] Kumar N, Goel N. Phenolic acids: Natural versatile molecules with promising therapeutic applications. *Biotechnology Reports*, 2019, 24: e00370.
- [2] Shen N, Wang T, Gan Q, et al. Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity. *Food Chemistry*, 2022, 383: 132531.
- [3] Diaz-Muñoz G, Miranda IL, Sartori SK, et al. Anthraquinones: An Overview. *Studies in Natural Products Chemistry*, 2018, 58: 313–338.
- [4] Toll D. Biosynthesis and biological functions of terpenoids in plants. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 2014, 123: 127–141.
- [5] Savla P, Das G, Mondal P, et al. Methanolic extract of papaya leaves shows neuroprotective effect. *Chemistry Select*, 2017, 2(29): 9454–9457.
- [6] Xie H, Shi X, Wang B, et al. Steroidal saponins from *Allium chinense* and their inhibitory effects on pancreatic lipase. *Phytochemistry Letters*, 2023, 55: 22–29.
- [7] Monsalve B, Concha-Meyer A, Palomo I, et al. Mechanisms of endothelial protection by natural bioactive compounds from fruit and vegetables. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2017, 89: 615–633.
- [8] Majerska J, Michalska A, Figiel A. A review of new directions in managing fruit and vegetable processing by-products. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 88: 207–219.
- [9] Ferreira LF, Minuzzi NM, Rodrigues RF, et al. Citric acid water-based solution for blueberry bagasse anthocyanins recovery: Optimization and comparisons with microwave-assisted extraction (MAE). *LWT*, 2020, 133.
- [10] Zhang X, Wang S, Wu Q, et al. Recovering high value-added anthocyanins from blueberry pomace with ultrasound-assisted extraction. *Food Chemistry: X*, 2022, 16: 100476.
- [11] Xue H, Xu H, Wang X, et al. Effects of microwave power on extraction kinetic of anthocyanin from blueberry powder considering absorption of microwave energy. *Journal of Food Quality*, 2018.

- [12] Elez Garofulić I, Repajić M, Zorić Z, et al. Evaluation of microwave-and ultrasound-assisted extraction techniques for revalorization of black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) fruit pomace anthocyanins. Sustainability, 2023, 15(9): 7047.
- [13] Sun Y, Qiao L, Shen Y, et al. Phytochemical profile and antioxidant activity of physiological drop of citrus fruits. Journal of Food Science, 2013, 78(1): C37–C42.
- [14] Wang X, Li C, Liang D, et al. Phenolic compounds and antioxidant activity in red-fleshed apples. Journal of Functional Foods, 2015, 18(Part B): 1086–1094.
- [15] Fan E, Zhang K, Jiang S, et al. Analysis of trans-resveratrol in grapes by micro-high performance liquid chromatography. Analytical Sciences, 2018, 24: 1019–1023.
- [16] López-Cobo A, Gómez-Caravaca AM, Pasini F, et al. HPLC-DAD-ESI-QTOF-MS and HPLC-FLD-MS as valuable tools for the determination of phenolic and other polar compounds in the edible part and by-products of avocado. LWT, 2016, 73: 505–513.
- [17] Barreca D, Bellocco E, Leuzzi U, et al. First evidence of C- and O-glycosyl flavone in blood orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) juice and their influence on antioxidant properties. Food Chemistry, 2014, 149: 244–252.
- [18] Tian J, Si X, Wang Y, et al. Bioactive flavonoids from *Rubus corchorifolius* inhibit α -glucosidase and α -amylase to improve postprandial hyperglycemia. Food Chemistry, 2021, 341(Part 1).
- [19] Feng J, Yi X, Huang W, et al. Novel triterpenoids and glycosides from durian exert pronounced anti-inflammatory activities. Food Chemistry, 2018, 241: 215–221.
- [20] Nie X, Fu Y, Wu D, et al. Ultrasonic-assisted extraction, structural characterization, chain conformation, and biological activities of a pectic-polysaccharide from okra (*abelmoschus esculentus*). Molecules, 2020, 25(5).
- [21] Hiranvarachat B, Devahastin S, Chiewchan N, et al. Structural modification by different pretreatment methods to enhance microwave-assisted extraction of β -carotene from carrots. Journal of Food Engineering, 2013, 115(2): 190–197.
- [22] Sereno AB, Bampi M, dos Santos IE, et al. Mineral profile, carotenoids and composition of cocona (*Solanum sessiliflorum* Dunal), a wild Brazilian fruit. Journal of Food Composition and Analysis, 2018, 72: 32–38.
- [23] Sun Y, Liu D, Chen J, et al. Effects of different factors of ultrasound treatment on the extraction yield of the all-trans- β -carotene from citrus peels. Ultrason. Sonochem, 2011, 18(1): 243–249.
- [24] Gong G, Dang T, Deng Y, et al.

- Physicochemical properties and biological activities of polysaccharides from *Lycium barbarum* prepared by fractional precipitation. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 109: 611–618.
- [25] Teng H, He Z, Li X, et al. Chemical structure, antioxidant and anti-inflammatory activities of two novel pectin polysaccharides from purple passion fruit (*Passiflora edulia* Sims) peel. Journal of Molecular Structure, 2022, 1264.
- [26] Bensaci N, Abdi A, Ben Aziza H, et al. Characterization and biological evaluation of *Craetagus azarolus* fruit polysaccharides. Journal of Molecular Structure, 2022, 1270.
- [27] Clifford MN, Wu W, Kuhnert N. The chlorogenic acids of *Hemerocallis*. Food Chemistry, 2006, 95(4): 574–578.
- [28] Benbouguerra N, Richard T, Saucier C, et al. Voltammetric behavior, flavanol and anthocyanin contents, and antioxidant capacity of grape skins and seeds during ripening (*Vitis vinifera* var. *merlot*, *tannat*, and *syrah*). Antioxidants, 2020, 9(9): 1–19.
- [29] Santiago-López L, Hernández-Mendoza A, Vallejo-Cordoba B, et al. Food-derived immunomodulatory peptides. Journal of the Science of Food Agriculture, 2016, 96(11): 3631–3641.
- [30] Huang X, Wang C, Zhao Y, et al. Mechanisms and regulation of organic acid accumulation in plant vacuoles. Horticulture Research, 2021, 8: 227.
- [31] Tai C, Chen B. Analysis and stability of carotenoids in the flowers of daylily (*Hemerocallis disticha*) as affected by various treatments. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(12): 5962–5968.
- [32] Montesano D, Rocchetti G, Putnik P, et al. Bioactive profile of pumpkin: an overview on terpenoids and their health-promoting properties. Current Opinion in Food Science, 2018, 22: 81–87.
- [33] Kikuchi T, Takebayashi M, Shinto M, et al. Three new multiflorane-type triterpenes from pumpkin (*Cucurbita maxima*) seeds. Molecules, 2013, 18(5): 5568–5579.
- [34] Szewczyk K, Kalembe D, Miazga-Karska M, et al. The essential oil composition of selected *Hemerocallis* cultivars and their biological activity. Open Chemistry, 2019, 17(1): 1412–1422.
- [35] Qin S, Lv C, Wang Q, et al. Extraction, identification, and antioxidant property evaluation of limonin from pummelo seeds. Animal Nutrition, 2018, 4(3): 281–287.
- [36] Fang X, Wang H, Zhou X, et al. Transcriptome reveals insights into biosynthesis of ginseng polysaccharides. BMC Plant Biology, 2022, 22.
- [37] Ahmed HH, El-Abhar HS, Hassanin EAK, et

- al. *Punica granatum* L. suppresses colon cancer through downregulation of Wnt/ β -catenin in rat model. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 2017, 27(5): 627–635.
- [38] Ramlagan P, Rondeau P, Planesse C, et al. *Punica granatum* L. mesocarp suppresses advanced glycation end products (AGEs)- and H₂O₂-induced oxidative stress and pro-inflammatory biomarkers. *Journal of Functional Foods*, 2017, 29: 115–126.
- [39] Karwasra R, Singh S, Sharma D, et al. Pomegranate supplementation attenuates inflammation, joint dysfunction via inhibition of NF- κ B signaling pathway in experimental models of rheumatoid arthritis. *Journal of Food Biochemistry*, 2019, 43(8).
- [40] Chen NC, Chyau CC, Lee YJ, et al. Promotion of mitotic catastrophe via activation of PTEN by paclitaxel with supplement of mulberry water extract in bladder cancer cells. *Scientific Reports*, 2016, 6: 1–13.
- [41] Su D, Zhang R, Hou F, et al. Lychee pulp phenolics ameliorate hepatic lipid accumulation by reducing miR-33 and miR-122 expression in mice fed a high-fat diet. *Food & Function*, 2017, 8: 808–815.
- [42] Vuolo MM, Lima GC, Batista ÂG, et al. Passion fruit peel intake decreases inflammatory response and reverts lipid peroxidation and adiposity in diet-induced obese rats. *Nutrition Research*, 2020, 76: 106–117.
- [43] Domínguez-Avila JA, Astiazaran-Garcia H, Wall-Medrano A, et al. Mango phenolics increase the serum apolipoprotein A1/B ratio in rats fed high cholesterol and sodium cholate diets. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(4): 1604–1612.
- [44] Gao Z, Wang ZY, Guo Y, et al. Enrichment of polymethoxyflavones from *Citrus reticulata* ‘Chachi’ peels and their hypolipidemic effect. *Journal of Chromatography B*, 2019, 1124: 226–232.
- [45] Apraj VD, Pandita NS. Evaluation of skin anti-aging potential of *Citrus reticulata* blanco peel. *Pharmacognosy Research*, 2016, 8(3): 160–168.
- [46] Choi J, Choi SY, Hong Y, et al. The central administration of vitisin a, extracted from *Vitis vinifera*, improves cognitive function and related signaling pathways in a scopolamine-induced dementia model. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2023, 163, 114812.
- [47] Yu X, Meng X, Yan Y, et al. Extraction of naringin from pomelo and its therapeutic potentials against hyperlipidemia. *Molecules*, 2022, 27(24): 9033.
- [48] Jiang J, Yan L, Shi Z, et al. Hepatoprotective and anti-inflammatory effects of total flavonoids of *Qu Zhi Ke* (peel of *Citrus changshan-huyou*) on non-alcoholic fatty liver disease in

- rats via modulation of NF- κ B and MAPKs. *Phytomedicine*. 2019, 64.
- [49] Oikeh EI, Oviasogie FE, Omoregie ES. Quantitative phytochemical analysis and antimicrobial activities of fresh and dry ethanol extracts of *Citrus sinensis* (L.) Osbeck (sweet Orange) peels. *Clinical Phytoscience*, 2020, 6.
- [50] Lu Q, Huang N, Peng Y, et al. Peel oils from three *Citrus* species: Volatile constituents, antioxidant activities and related contributions of individual components. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56: 4492–4502.
- [51] Ekam VS, Udosen EO, Chigbu AE. Comparative effect of carotenoid complex from Golden Neo-Life Dynamite (GNLD) and carrot extracted carotenoids on immune parameters in albino Wistar rats. *Nigerian Journal Of Physiological Sciences*, 2006, 21(1-2): 1–4.
- [52] Moo-Huchin VM, González-Aguilar GA, Moo-Huchin M, et al. Carotenoid composition and antioxidant activity of extracts from tropical fruits. *Chiang Mai Journal of Science*, 2017, 44: 605–616.
- [53] Ma Y, Zhu D, Thakur K, et al. Antioxidant and antibacterial evaluation of polysaccharides sequentially extracted from onion (*Allium cepa* L.). *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 111: 92–101.
- [54] Rong Y, Yang R, Yang Y, et al. Structural characterization of an active polysaccharide of longan and evaluation of immunological activity. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 213: 247–256.
- [55] Zhong K, Wang Q, He Y, et al. Evaluation of radicals scavenging, immunity-modulatory and antitumor activities of longan polysaccharides with ultrasonic extraction on in S180 tumor mice models. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2010, 47(3): 356–360.
- [56] Bai B. Research on the influence of anti-fatigue effect and movement ability of blueberry polysaccharides on aged mice. *The Open Biomedical Engineering*, 2015, 9: 314–317.
- [57] Rjeibi I, Feriani A, Hentati F, et al. Structural characterization of water-soluble polysaccharides from *Nitraria retusa* fruits and their antioxidant and hypolipidemic activities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 129: 422–432.
- [58] Ji X, Liu F, Peng Q, et al. Purification, structural characterization, and hypolipidemic effects of a neutral polysaccharide from *Ziziphus Jujuba cv. Muzao*. *Food Chemistry*, 2018, 245: 1124–1130.
- [59] Zeng H, Chen P, Chang Q, et al. Hypolipidemic effect of polysaccharides from *Fortunella margarita* (Lour.) Swingle in hyperlipidemic rats. *Food and Chemistry Toxicology*, 2019, 132: 110663.

- [60] Lengsfeld C, Titgemeyer F, Faller G, et al. Glycosylated compounds from Okra inhibit adhesion of *Helicobacter pylori* to human gastric mucosa. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(6): 1495–1503.
- [61] Liu X, Liu J, Liu C, et al. Selenium-containing polysaccharides isolated from *Rosa laevigata* Michx fruits exhibit excellent anti-oxidant and neuroprotective activity *in vitro*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 209(Part A): 1222–1233.
- [62] Cichewicz RH, Nair MG. Isolation and characterization of stelladerol, a new antioxidant naphthalene glycoside, and other antioxidant glycosides from edible daylily (*Heemerocallis*) flowers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(1): 87–91.
- [63] Martínez-Jiménez F, Muiños F, Sentís I, et al.. A compendium of mutational cancer driver genes. *Nature Reviews Cancer*, 2020, 20: 555–572.
- [64] Greten FR, Grivennikov SI. Inflammation and cancer: Triggers, mechanisms, and consequences. *Immunity*, 2019, 51(1): 27–41.
- [65] Guo R, Chen M, Ding Y, et al. 2022. Polysaccharides as potential anti-tumor biomacromolecules —A review. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 1–12.
- [66] Cichewicz RH, Zhang Y, Seeram NP, et al. Inhibition of human tumor cell proliferation by novel anthraquinones from daylilies. *Life Sciences*, 2004, 74(14): 1791–1799.
- [67] Medzhitov R. Origin and physiological roles of inflammation. *Nature*, 2008, 454: 428–435.
- [68] Liu X, Luo L, Liu B, et al. Ethanol extracts from *Hemerocallis citrina* attenuate the upregulation of proinflammatory cytokines and indoleamine 2,3-dioxygenase in rats. *Journal of Ethnopharmacol*, 2014, 153(2): 484–490.
- [69] Xiao J, Zhang R, Huang F, et al. The biphasic dose effect of lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) pulp phenolic extract on alcoholic liver disease in mice. *Food & Function*, 2017, (1): 189–200.
- [70] Peng F, Ren X, Du B, et al. Insoluble dietary fiber of pear fruit pomace (*Pyrus ussuriensis* Maxim) consumption ameliorates alterations of the obesity-related features and gut microbiota caused by high-fat diet. *Journal of Functional Foods*, 2022, 99.
- [71] Deng YY, Yi Y, Zhang LF, et al. Immunomodulatory activity and partial characterisation of polysaccharides from *Momordica charantia*. *Molecules*, 2014, 19(9): 13432–13447.
- [72] Levi SM, Brimble AM. A Review of neuroprotective agents. *Current Medicinal Chemistry*, 2004, 11(18): 2383–2397.
- [73] Wang X, Wu J, Yu C, et al. Lychee seed saponins improve cognitive function and prevent neuronal injury via inhibiting neuronal

- apoptosis in a rat model of Alzheimer's disease. *Nutrients*, 2017, 9(2): 105.
- [74] Wang Y, Zhang Y, Hou M, et al. Anti-fatigue activity of parsley (*Petroselinum crispum*) flavonoids via regulation of oxidative stress and gut microbiota in mice. *Journal of Functional Foods*, 2022, 89.
- [75] Borgonovi TF, Virgolin LB, Janzanti NS, et al. Fruit bioactive compounds: Effect on lactic acid bacteria and on intestinal microbiota. *Food Research International*, 2022, 161.
- [76] Jiang H, Dong J, Jiang S, et al. Effect of *Durio zibethinus* rind polysaccharide on functional constipation and intestinal microbiota in rats. *Food Research International*, 2020, 136.
- [77] Liu H, Zeng X, Huang J, et al. Dietary fiber extracted from pomelo fruitlets promotes intestinal functions, both *in vitro* and *in vivo*. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 252.
- [78] Jing Y, Zhang Y, Yan M, et al. Structural characterization of a heteropolysaccharide from the fruit of *Crataegus pinnatifida* and its bioactivity on the gut microbiota of immunocompromised mice. *Food Chemistry*, 2023, 413.
- [79] Hopkins AL. Network pharmacology: The next paradigm in drug discovery. *Nature Chemical Biology*, 2008, 4: 682–690.

Research progress on bioactive components and functions of fruits and vegetables

Yubei Wang, Shihao Li, Kexin Li, Peiye Liu, Jiankang Cao*

College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

*Corresponding author:cjk@cau.edu.cn

Abstract: Globally, humans are at the risk of increasing incidence of metabolic diseases, the occurrence of which is closely linked to people's daily diet. Fruits and vegetables are one of the important daily food types of people. Varieties of plant secondary metabolites are contained in fruits and vegetables, including phenolic acids, flavonoids, anthraquinones, terpenes, alkaloids, steroidal saponins and polysaccharides. These metabolites usually have multiply bioactive functions, such as antioxidant, antitumor, hypoglycemic, hypolipidemic, neuroprotection, anti-inflammatory, antibacterial and disease prevention, which is of great importance in preventing the occurrence of human metabolic diseases. However, the composition and content, bioactive functions and mechanisms of action of these metabolites in different types of fruits and vegetables vary greatly. The research progress of the main bioactive components of fruits and vegetables and their multi-functions are reviewed in this paper to promote people's understanding and utilization of functional components of fruits and vegetables

Keywords: Fruits and Vegetables; Bioactivity; Function; Secondary Metabolism