

蔬菜中酚类化合物的组分分析

陈彦凤¹ 综述 翁华春¹ 徐维盛² 审校

1 上海健康医学院医学技术学院,上海 201318;2 中国疾病预防控制中心营养与健康所,北京 100050

摘要:酚类化合物是一类植物体内的次级代谢产物,具有促进健康、降低慢性病风险的作用。果蔬中的酚类化合物约占膳食总酚类化合物摄入量的2/3。蔬菜作为膳食主要组成,种类繁多,酚类化合物来源广泛;酚类化合物结构多不稳定,极易氧化对蔬菜中酚类化合物的提取分离与组分分析检测技术提出更高要求。本文对蔬菜中酚类化合物的提取分离、组分分析检测技术以及常见蔬菜中主要酚类化合物含量的研究进展进行综述,以期对酚类化合物的有效提取分析和蔬菜资源的开发利用提供参考。

关键词:蔬菜 酚类化合物 组分分析 酚酸类 类黄酮

中图分类号:R151.3 O657 TS201.4

文献标志码:A

DOI:10.19813/j.cnki.weishengyanjiu.2025.06.023

酚类化合物是一类广泛存在于植物体内的次级代谢产物,常以聚合物多酚形式存在^[1],具有促进健康、降低慢性病风险的作用^[2]。该类化合物至少含有一个由羟基直接与芳香烃相连的基团,结构多变,目前已知的酚类化合物结构有8000多种,分为类黄酮和非类黄酮两大类,后者包括酚酸、木脂素、芪类和单宁等。酚类化合物主要存在于水果、蔬菜、谷物、茶叶、酒类、咖啡等植物性食物,表征其独特的气味等感官特征^[3-4]。果蔬中的酚类化合物约占膳食酚类化合物总摄入量的2/3^[4],其他食物如谷物、坚果以及茶叶、咖啡、酒类等也还有一定量的酚类化合物。蔬菜是膳食的主要组成部分之一,每日推荐摄入量为300~500 g,但蔬菜种类繁多,蔬菜中的酚类化合物分布不均,不同产地和品种的蔬菜中酚类组成和含量也相差较大^[5-6],研究发现蔬菜中17种酚酸的平均含量从高到低依次为花类(64.39 μg/g)、根类(56.68 μg/g)、叶类(53.44 μg/g)、茎类

(48.07 μg/g)、豆类(20.83 μg/g)、果实类(16.92 μg/g)^[7]。酚类化合物结构多不稳定,受水分、温度、光照等影响容易发生氧化等反应^[8],对酚类化合物的提取分离与组分分析检测技术提出更高要求。本文对蔬菜中酚类化合物的提取分离前处理、组分分析检测技术以及常见蔬菜中的主要酚类化合物的研究进展进行综述,以期对酚类化合物的有效提取分析和植物性食物资源的开发利用提供理论指导和技术支持。

1 蔬菜中酚类化合物的提取

1.1 提取方法

蔬菜中酚类化合物的测定取决于提取方法、化学性质、基质颗粒和共存的干扰物等^[8]。因此,从复杂的植物性食物基质中提取酚类化合物是目前分析测定该类物质的关键步骤之一,常用的提取方法有溶剂提取法(索氏法)、超声辅助萃取法和微波辅助提取法。张晓莉等^[6]研究发现百合鳞茎中总黄酮(total flavonoid content, TFC)提取率从高到低依次为超声辅助提取法、回流提取法和冷浸提取法。熊岑等^[9]发现在溶剂、料液比、提取时间和温度相同的条件下,超声波辅助提取法提取辣椒多酚的效果优于溶剂浸提法。微波能够破坏植物细胞壁,有利于提取植物化学物的提取^[10],与索氏提取法相比,微波辅助提取酚类化合物的效率更高、时间更短、溶剂用量更少^[11]。值得注意的是,微波可破坏酚类化合物中羟基和

基金项目:中国营养学会组崔莱植物功能成分与健康研究专项基金(No. CNS-NCL2023-254);重庆市九龙坡区公共卫生重点实验室建设项目(No. 20231201);北京市科学技术研究院项目(No. 24CA008-3)

作者简介:陈彦凤,女,博士,副主任技师,研究方向:卫生检验,E-mail: chenyanfeng2019@qq.com

通信作者:徐维盛,男,博士,研究员,研究方向:植物化学物、食物成分数据库,E-mail: hbxuweisheng@163.com

热敏性基团的氢键,适用于提取短链酚类物质^[8]。OUIFIGHOU等^[12]优化微波辅助提取的工艺参数从南瓜中提取酚类化合物,南瓜果肉和南瓜果皮的总酚(total phenolic content, TPC)含量分别为7954.1和5480.9 $\mu\text{g/g}$ 。

随着提取技术的发展,加压流体萃取法(pressurized liquid extraction, PLE)^[13]、高压脉冲电场法(pulsed electric field, PEF)^[14]和超临界流体萃取(supercritical fluid extraction, SCFE)^[15]等在蔬菜中酚类物质提取中得到推广应用^[16]。BARBOSA等^[17]等采用PLE取山茱萸叶中的酚类化合物,结果表明60 $^{\circ}\text{C}$ 、39%乙醇粗提液的总提取效率最高。SCFE以 CO_2 为溶剂,适用于非极性酚类化合物的萃取,KHAW等^[15]选择与 CO_2 共溶的有机溶剂作为联合提取溶剂从而提高对极性酚类化合物的提取效率。李雨竹等^[18]以80%乙醇水溶液为溶剂采用加速溶剂萃取法提取芹菜和花椰菜中的酚类,经LC-ESI-MS分析分别鉴定出14种和9种类黄酮化合物。RADZALI等^[19]以70%乙醇-水共溶剂的超临界 CO_2 萃取对没食子酸、没食子酸甲酯和咖啡酸等酚类化合物具有较高的提取率。此外,不同提取方法组合会进一步提高提取效率。SIMIĆ等^[20]发现经过SCFE处理后再采用超声辅助技术或微波辅助技术萃取的提取液中TPC含量明显提高。

1.2 提取溶剂

酚类化合物极性不同,在萃取溶剂中的溶解性不同,常用的溶剂有甲醇、乙醇、丙酮、乙醚和乙酸乙酯等,极性强的酚类化合物多使用醇-水或丙酮-水的混合物提取。以水为溶剂提取菠菜叶中的类黄酮化合物的含量高于乙酸乙酯和乙醇,但乙醇对菠菜叶中单宁的提取效率高于水^[21]。酚类化合物在碱性条件下迅速氧化,且咖啡酸、绿原酸、没食子酸等酚类化合物对高pH值不稳定且随着pH升高发生的结构改变不可逆。FROND等^[22]以含0.03%盐酸的甲醇溶液提取紫薯、紫洋葱中的TFC含量高于乙醇-水溶液(3:2, V/V),表明酸化提取溶液可以提高蔬菜中酚类化合物的提取效率。但提取溶液中盐酸浓度过高也会影响酚类化合物的提取效率,以乙醇-水-盐酸溶液(8:2:1, V/V/V)为溶剂提取的紫甘蓝中TPC和总花色苷(total anthocyanin contents, ACY)含量分别低于草酸溶液和含3 mol/L HCl的乙醇-水溶液(3:2, V/V)^[23-24]。此外,紫甘蓝中以乙醇-水溶液(3:2, V/V)提取的TFC含量、以含3 mol/L HCl的乙醇-水溶液(3:2, V/V)提取的总ACY含

量均高于乙醇-正己烷溶液(4:3, V/V)提取液含量^[23-24];以乙醇-水溶液(3:7, V/V)提取洋葱中TPC和TFC的含量高于以甲醇为溶剂的提取液含量^[25-26],这表明醇水混合溶液的提取效率在一定程度上优于醇溶液。

2 蔬菜中TPC、TFC和ACY测定

类黄酮化合物是酚类化合物中以2-苯基色原酮为母核的一类衍生物,主要活性结构为羟基取代基。花青素类是唯一的离子型类黄酮化合物,以花色苷的形式存在于蔬菜中^[24],随pH的不同在蔬菜中呈现红色、紫色或蓝色。因此,可根据酚类化合物、类黄酮化合物、花青素的基团特征分别与特定显色试剂反应进行TPC、TFC、ACY含量测定。

2.1 测定方法

蔬菜中TPC、TFC和ACY含量的测定方法主要是分光光度法,分别为福林-酚法、铝离子显色法和pH示差法。福林-酚分光光度法测定蔬菜中TPC的方法包括Folin-Denis法和Folin-Ciocalteu法两种,原理是显色反应试剂中含有钼元素和钨元素,与酚类共存时发生氧化还原反应生成蓝色化合物,以没食子酸作为标准对照品对蔬菜中的TPC定量检测^[22,27]。铝离子显色法中的Al(III)与类黄酮化合物中的羰基和羟基结合形成Al配合物,适用于常见蔬菜中TFC的测定,多以槲皮素或芦丁当量计算TFC含量^[22,27]。pH示差法利用花色苷在不同pH值的吸光度不同,以飞燕草苷-3-O-葡萄糖苷为标准对照品测定蔬菜中的ACY^[27]。该类测定方法简单、经济,适用于大量蔬菜样品的酚类化合物快速筛查。

2.2 含量

研究发现,在甘蓝芸薹类、茄果类、块根块茎类、茎类、鳞茎类、叶菜类和水生类7类蔬菜中,TPC含量为3.9~4208.4 $\mu\text{g/g}$,含量最高的3种蔬菜是大蒜(4208.4 $\mu\text{g/g}$)^[26]、红菊苣(2161.5 $\mu\text{g/g}$)和黑胡萝卜(1985.0 $\mu\text{g/g}$)^[22];TFC含量为0.6~1194.8 $\mu\text{g/g}$,含量最高的蔬菜(部位)是紫茄(皮)(1194.8 $\mu\text{g/g}$)^[27]、紫甘蓝(1117.5 $\mu\text{g/g}$)^[24]和茄子(1017.9 $\mu\text{g/g}$)^[22];在检出ACY的8种蔬菜(部位)中,ACY含量为未检出~980.1 $\mu\text{g/g}$,含量相对较高的蔬菜是紫甘蓝(980.1 $\mu\text{g/g}$)^[24]、紫茄(皮)(607.8 $\mu\text{g/g}$)和紫薯(80.6 $\mu\text{g/g}$)^[22],这也证实了紫红色蔬菜中花色苷类多酚化合物含量相对较高。此外,从同一种蔬菜中不同部位提取的TPC、TFC和ACY含量也

不相同,茄皮的 TPC 含量高于茄肉;对白菜叶不同部位的酚类化合物测定结果显示,TPC 和 TFC 含量在外层白菜(叶)含量最高(分别为 3474.6 和 3281.7 $\mu\text{g/g}$)、中层白菜(叶)含量次之(分别为 1500.6 和 753.7 $\mu\text{g/g}$)、内层白菜(叶)含量最低(分别为 1488.1 和 612.9 $\mu\text{g/g}$)^[28]。由此可见,不仅不同种类蔬菜中酚类化合物的含量相差很大,同一种蔬菜不同部位的酚类化合物含量也不相同。

3 蔬菜中酚类化合物组分分析

蔬菜中的酚类化合物存在形式复杂,异构体、衍生物众多,除游离的单体酚外,多以酯键、醚键与纤维素、多肽、蛋白质、葡萄糖、有机酸等结合存在^[29],传统检测方法对酚类化合物单体的分离效果较差,高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)、液相色谱质谱联用法(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)和气相色谱质谱联用法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)是蔬菜中酚类化合物单体含量分离测定和组分鉴定最常用的方法。

3.1 分析方法

HPLC 适用于蔬菜中沸点高且不易挥发性化合物的酚类化合物单体的定性定量分析。吴新平等^[30]采用 HPLC 梯度分离测定莲藕中酚类化合物组成主要有儿茶素、表儿茶素和没食子儿茶素等类黄酮物质和焦性没食子酸、天麻素等非黄酮类物质以及咖啡酸、香豆酸等酚酸。Gu 等^[25]采用 HPLC-二极管阵列检测器分析检测 4 种蔬菜中的 9 种酚酸和 9 种黄酮,发现姜、蒜和洋葱中类黄酮含量较高,酚酸类含量偏低,其中槲皮素和山奈酚是其中主要的酚类化合物。

质谱通过离子化、质量分析和定量测定对样品中的已知和未知化合物进行分离鉴定,LC-MS 可以准确地识别和测定植物样品提取的痕量的酚类化合物^[31]。郭会平等^[32]采用超高效液相色谱-质谱联用法(ultra performance liquid chromatography-mass spectrometry, UPLC-MS)解析番茄的液相色谱峰鉴定化合物的信息得出,绿原酸和芦丁是番茄中含量较多的酚酸类物质,结合主成分分析对 6 种不同番茄进行了区分。DEL 等^[33]采用 LC-MS 对生甜红椒中的 40 种多酚类化合物进行了鉴定和定量测定,结果表明类黄酮化合物是该红甜椒中主要的酚类化合物,占酚类化合物总含量的 62.6%,包括 10 种黄酮醇、15 种黄酮和 2 种黄酮。Gu 等^[25]在 HPLC-二极管阵列检

测器定量分析黑胡萝卜、蒜、姜和洋葱中 9 种酚酸和 9 种类黄酮化合物含量的基础上,又采用液相色谱-电喷雾四极杆飞行时间质谱法(liquid chromatography-electrospray quadrupole time-of-flight mass spectrometry, LC-ESI-QTOF/MS)鉴定了阿魏酸、绿原酸、*p*-羟基苯甲酸和 *p*-香豆酸 4 种酚类化合物。李雨竹等^[18]以 80%乙醇水溶液为提取溶剂采用加速溶剂萃取法建立了高效液相色谱-电喷雾-串联质谱(high performance liquid chromatography-electrospray ionization-tandem mass spectrometry, HPLC-ESI-MS)分离鉴定类黄酮化合物的方法,从芹菜中鉴定出包括木犀草素、芹菜苷和芹菜素等 14 种类黄酮化合物,从花椰菜中鉴定出以山奈酚及其衍生物为主的 9 种类黄酮化合物。

GC-MS 多用于分离、鉴定和分析蔬菜中挥发性的酚酸和类黄酮等酚类化合物及其衍生物。KAVITA 等^[34]采用 GC-MS 法对洋葱贮藏过程中 13 种多酚类化合物进行定量分析,含量最高的是槲皮素,其次是咖啡酸和苯甲酸。KALASEE 等^[35]将新鲜韭菜叶水提取液经 GC-MS 分析鉴定发现的 108 种化合物中,含量最高的是酚类化合物 2-甲氧-4-乙烯苯酚。由此可见,色谱质谱联用技术在蔬菜中酚类化合物的分离和鉴定中有着独特的优势。

3.2 酚酸类化合物组分的含量

酚酸中少部分以游离态的形式存在,多数以结合态形式存在^[36],包括羟基苯甲酸类和羟基肉桂酸两类化合物。蔬菜中羟基肉桂酸含量是羟基苯甲酸的 10 余倍^[7]。由表 1 可见,甘蓝芸薹类、茎类、块根块茎类、鳞茎类、茄果类和叶菜类蔬菜中酚酸类化合物总含量最高的是黑茄(皮)(9044.2 $\mu\text{g/g}$),其次是紫茄(皮)(6691.2 $\mu\text{g/g}$)和黑茄(肉)(5891.8 $\mu\text{g/g}$)^[27]。除茄子外,甘蓝芸薹类蔬菜中孢子甘蓝以甲醇-水溶液(7:3, V/V)为溶剂超声辅助提取的酚酸含量最高(5118.9 $\mu\text{g/g}$)^[37]。从酚酸组成分析,常见蔬菜中检出频率较高的是咖啡酸和 *p*-香豆酸、没食子酸、对羟基苯甲酸、绿原酸,单一蔬菜种类中采用 UPLC-MS/MS 方法最多检出 16 种酚酸类化合物,包括阿魏酸及其衍生物、辛酸酸、咖啡酸、香豆酸等^[37]。比较同种蔬菜不同部位的酚酸含量发现,无论是紫茄、黑茄还是白茄,茄皮的酚酸类化合物含量明显高于茄肉部分^[27];对于西蓝花和花椰菜中酚酸类化合物组分分析发现,顶部(头)的酚酸类化合物含量高于茎和叶^[38]。

表1 常见蔬菜中酚酸类化合物的组成及含量⁽¹⁾

蔬菜类别	蔬菜名称(部位)	提取方法	提取溶剂	仪器方法	酚酸类化合物	含量/($\mu\text{g/g}$)	参考文献	
甘蓝芸薹类	抱子甘蓝	浸提法	甲醇	HPLC	没食子酸、对羟基苯甲酸、阿魏酸	803.3	[26]	
	抱子甘蓝	超声辅助提取	甲醇-水溶液(7:3, V/V)	UPLC-MS/MS	阿魏酸等 ⁽²⁾	5118.9	[37]	
	花椰菜(顶)	浸提法	甲醇	LC-MS/MS	咖啡酸、 <i>p</i> -香豆酸、绿原酸	662.6	[38]	
	花椰菜(茎)	浸提法	甲醇	LC-MS/MS	咖啡酸、 <i>p</i> -香豆酸、绿原酸	78.5	[38]	
	花椰菜(叶)	浸提法	甲醇	LC-MS/MS	咖啡酸、 <i>p</i> -香豆酸、绿原酸	344.1	[38]	
	花椰菜	超声辅助提取	甲醇-水溶液(7:3, V/V)	UPLC-MS/MS	阿魏酸等 ⁽²⁾	482.2	[37]	
	结球甘蓝	浸提法	甲醇	HPLC	没食子酸、对羟基苯甲酸、咖啡酸、阿魏酸	111.8	[26]	
	芥蓝	超声辅助提取	甲醇-水溶液(7:3, V/V)	UPLC-MS/MS	阿魏酸等 ⁽²⁾	2033.3	[37]	
	西蓝花	超声辅助提取	甲醇-水溶液(7:3, V/V)	UPLC-MS/MS	阿魏酸等 ⁽²⁾	2935.6	[37]	
	西蓝花(内茎)	浸提法	甲醇	LC-MS/MS	咖啡酸、 <i>p</i> -香豆酸、绿原酸	37.4	[38]	
茎类	西蓝花(头)	浸提法	甲醇	LC-MS/MS	咖啡酸、 <i>p</i> -香豆酸、绿原酸	2116.4	[38]	
	西蓝花(外茎)	浸提法	甲醇	LC-MS/MS	咖啡酸、 <i>p</i> -香豆酸、绿原酸	257.0	[38]	
	西蓝花(叶)	浸提法	甲醇	LC-MS/MS	咖啡酸、 <i>p</i> -香豆酸、绿原酸	1691.6	[38]	
	欧芹	浸提法	甲醇	HPLC	没食子酸、对羟基苯甲酸	42.9	[26]	
	芹菜	超声辅助提取	乙醇-水溶液(5:5, V/V)	HPLC-DAD	没食子酸、绿原酸、咖啡酸、阿魏酸	925.1	[39]	
	芹菜(根)	超声辅助提取	甲醇-水溶液(8:2, V/V)	HPLC-PDA	没食子酸、3,4-二羟基苯甲酸、丁香酸、咖啡酸、 <i>p</i> -香豆酸、阿魏酸、肉桂酸	1599.1	[40]	
	块根块茎类	白萝卜	超声辅助提取	甲醇-水溶液(7:3, V/V)	UPLC-MS/MS	阿魏酸等 ⁽²⁾	0.1	[37]
		黑胡萝卜	浸提法	乙醇-水溶液(3:7, V/V)	HPLC-DAD	咖啡酰酒石酸、绿原酸、咖啡酸、香豆酸	30.5	[25]
		黑胡萝卜	浸提法	含0.03% HCl的甲醇溶液	HPLC-PDA/-ESI+-MS	丁香酸、绿原酸、阿魏酰奎宁酸、新绿原酸、咖啡酸、阿魏酸	568.6	[22]
		姜	浸提法	乙醇-水溶液(3:7, V/V)	HPLC-DAD	苯酚酸	1.8	[25]
樱桃萝卜		超声辅助提取	甲醇-水溶液(7:3, V/V)	UPLC-MS/MS	阿魏酸等 ⁽²⁾	0.1	[37]	
紫薯		浸提法	酸化甲醇-水溶液(8:2, V/V)	HPLC-ESI-Qq-MS2	绿原酸、没食子酸	506090.0 ⁽⁴⁾	[41]	
鳞茎类	紫薯	浸提法	含0.03% HCl的甲醇溶液	HPLC-PDA/-ESI+-MS	羟基苯甲酸、二羟基苯甲酸、丁香酸、绿原酸、阿魏酸	506.1	[22]	
	大蒜	浸提法	乙醇-水溶液(3:7, V/V)	HPLC-DAD	苯酚酸	2.4	[25]	
	大蒜	浸提法	甲醇	HPLC	没食子酸、对羟基苯甲酸、咖啡酸、阿魏酸	1396.1	[26]	
	红洋葱	浸提法	含0.03% HCl的甲醇溶液	HPLC-PDA/-ESI+-MS	丁香酸	259.0	[22]	
	蒜(皮)	超声辅助提取	乙醇-水溶液(8:2, V/V)	HPLC-QTOF MS	咖啡酸、阿魏酸、对香豆酸、 <i>N</i> -反式对香豆酰真蛎胺、愈创木基甘油- β -咖啡酸酯、愈创木基甘油- β -阿魏酸酯	65.4	[42]	

3.3 类黄酮化合物组分的含量

大多数类黄酮与糖结合成苷类存在,小部分以游离苷元的形式存在,且多数呈黄色或淡黄色^[44]。类黄酮化合物主要包括黄酮醇类、黄酮类、黄酮烷类、黄烷三醇类、异黄酮类和花青素类,其中花青素类化合物是一类水溶性天然色素,在蔬菜中常与糖类结合形成糖苷或被有机酸类酰化,随 pH 的不同在蔬菜中呈现红色、紫色或蓝色。由表 2 可见,甘蓝芸薹类、块根块茎类、鳞茎类、茄果类和叶菜类蔬菜中花青素类化合物含量最高的是黑茄(皮)^[27],其次是紫甘蓝^[24]和紫薯^[22]。在这几类蔬菜中,检出频率较高的花青素类化合物是飞燕草素和矢车菊素。单一蔬菜种类中采用 HPLC-PDA/-ESI+-MS 方法最多检出 11 种花青素类化合物,主要是芍药色素的糖苷类衍生物等^[37]。对其他类黄酮化合物的组分含量分析见表 3,甘蓝芸薹类、茎类、块根块茎类、鳞茎类、茄果类和叶菜类中类黄酮化合物(不包括花青素类)含量最高的是西蓝花(3324.0 μg/g),其次是卷心菜(3252.8 μg/g)和芥蓝(2274.8 μg/g)^[37]。在这些常见蔬菜中,检出频率较高的是槲皮素和山

奈酚。Li 等^[37]采用 UPLC-MS/MS 方法在单一蔬菜种类中最多检出 58 种类黄酮化合物,包括山奈素及其衍生物、槲皮素及其衍生物、异鼠李素及其衍生物、芦丁等。

3.4 酚类化合物组分的总含量分析

由图 1 可见,对常见蔬菜中的酚类化合物各组分的含量进行差异分析发现,各酚类化合物组分的总含量最高的前 5 种蔬菜从高到低依次是抱子甘蓝、茄子、卷心菜、西蓝花和芥蓝。从 3 类组分的构成分析,抱子甘蓝中酚酸是最主要的酚类化合物,类黄酮的总含量约为酚酸类的 1/4;卷心菜中酚酸类和黄酮类总含量较为接近,各约占 50%;茄子中酚类化合物绝大多数是酚酸类,而花青素类仅约占 5%;西蓝花中的主要组分为黄酮类化合物,酚酸类占比约为 30%。比较这 29 种蔬菜中酚类化合物组分的总含量平均值,发现总含量较高的两类蔬菜是茄果类和甘蓝芸薹类,其次从高到低依次是叶菜类、鳞茎类、茎类和块根块茎类。其中,茄果类蔬菜中酚酸类化合物含量高于类黄酮,而芸薹甘蓝类蔬菜中酚酸类与黄酮类化合物约各占总含量的一半。

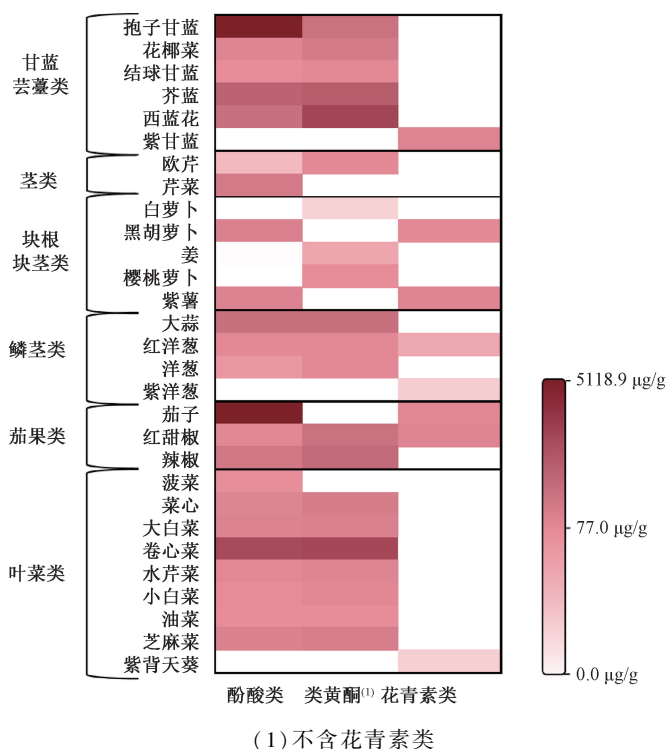


图 1 常见蔬菜中酚类化合物含量热图

4 结语

蔬菜中酚类化合物的含量和组成因种类、部位、成熟期等而不同,贮藏加工、烹饪方式等也会影响到摄入人体的酚类化合物^[40]。此外,在蔬菜剩余残渣中的不溶性结合酚类也与抗氧化活性显

著相关^[29]。因此,后续有待进一步研究提取分离的影响因素,提高结合酚类尤其是不溶性酚类的提取利用效率,并深入探究不同酚类化合物组分及其配伍的体内外生物学活性,为合理膳食,均衡营养、有效防治慢性病提供依据。

表 2 常见蔬菜中花青素类化合物的组成及含量⁽¹⁾

蔬菜类别	蔬菜名称(部位)	提取方法	提取溶剂	仪器方法	花青素类化合物	含量/($\mu\text{g/g}$)	参考文献
甘蓝芸薹类 块根块茎类	紫甘蓝	沸水浴	水	HPLC-DAD	矢车菊素	445.5	[24]
	黑胡萝卜	浸提法	含 0.03% HCl 的甲醇溶液	HPLC-PDA/-ESI ⁺ -MS	花青素-3-(对香豆基)-二葡萄糖苷-5-葡萄糖苷	224.5	[22]
	紫薯	沸水浴	水	HPLC-DAD	芍药色素、矢车菊素	57.4	[24]
	紫薯	浸提法	酸化甲醇-水溶液(8:2, V/V)	HPLC-ESI-QqQ-MS2	芍药色素、矢车菊素	289910.0 ⁽²⁾	[41]
鳞茎类	紫薯	浸提法	含 0.03% HCl 的甲醇溶液	HPLC-PDA/-ESI ⁺ -MS	芍药苷-3-O-槐糖苷-5-O-葡萄糖苷、芍药苷-3-O-葡萄糖苷、芍药苷-3-对羟基苯甲酰槐糖苷-5-葡萄糖苷、芍药苷-3-咖啡酰-对羟基苯甲酰槐糖苷、芍药苷-3-咖啡酰-对羟基苯甲酰槐糖苷-5-葡萄糖苷、芍药苷-3-咖啡酰-对羟基苯甲酰槐糖苷-5-葡萄糖苷、芍药苷-3-咖啡酰-对羟基苯甲酰槐糖苷-5-葡萄糖苷、芍药苷-3-咖啡酰-阿魏酰基糖苷-5-葡萄糖苷	423.7	[22]
	红洋葱	浸提法	含 0.03% HCl 的甲醇溶液	HPLC-PDA/-ESI ⁺ -MS	矢车菊素-3-O-葡萄糖苷、矢车菊素-3-O-海藻糖苷、矢车菊素-3-(6"-丙二酰-葡萄糖苷)、矢车菊素-3-(6"-丙二酰-海藻糖苷)	55.6	[22]
	紫洋葱	沸水浴	水	HPLC-DAD	矢车菊素	29.3	[24]
	白茄(皮)	浸提法	甲醇-水溶液(2:8, V/V)	UPLC-MS/MS	飞燕草素-3-芸香糖苷-5-葡萄糖苷、飞燕草素-3-芸香糖苷-葡萄糖苷、飞燕草素-3-葡萄糖苷、飞燕草素-7-芸香糖苷	215.1	[27]
	白茄(肉)	浸提法	甲醇-水溶液(2:8, V/V)	UPLC-MS/MS	飞燕草素-3-芸香糖苷-5-葡萄糖苷、飞燕草素-3-芸香糖苷-葡萄糖苷、飞燕草素-3-葡萄糖苷、飞燕草素-8-芸香糖苷	72.4	[27]
	黑茄(皮)	浸提法	甲醇-水溶液(2:8, V/V)	UPLC-MS/MS	飞燕草素-3-芸香糖苷-5-葡萄糖苷、飞燕草素-3-芸香糖苷-葡萄糖苷、飞燕草素-3-葡萄糖苷	1162.2	[27]
	黑茄(肉)	浸提法	甲醇-水溶液(2:8, V/V)	UPLC-MS/MS	飞燕草素-3-芸香糖苷-5-葡萄糖苷、飞燕草素-3-芸香糖苷-葡萄糖苷、飞燕草素-3-葡萄糖苷	194.6	[27]
	红甜椒	浸提法	含 0.03% HCl 的甲醇溶液	HPLC-PDA/-ESI ⁺ -MS	矢车菊素-3-O-葡萄糖苷、矢车菊素-3-O-(6"-丙二酰-葡萄糖苷)	392.0	[22]
	茄子	浸提法	含 0.03% HCl 的甲醇溶液	HPLC-PDA/-ESI ⁺ -MS	飞燕草素-3-O-(6"-p-香豆酰-葡萄糖苷)	87.2	[22]
	茄子(皮)	浸提法	酸化甲醇-水溶液(8:2, V/V)	HPLC-ESI-QqQ-MS2	飞燕草素、矮牵牛素、天竺葵色素、飞燕草素	354060.0 ⁽²⁾	[41]
紫茄(皮)	沸水浴	水	HPLC-DAD	飞燕草素	387.2	[24]	
紫茄(皮)	浸提法	甲醇-水溶液(2:8, V/V)	UPLC-MS/MS	飞燕草素-3-芸香糖苷-5-葡萄糖苷、飞燕草素-3-芸香糖苷-葡萄糖苷、飞燕草素-3-葡萄糖苷	336.6	[27]	
紫茄(肉)	浸提法	甲醇-水溶液(2:8, V/V)	UPLC-MS/MS	飞燕草素-3-芸香糖苷-5-葡萄糖苷、飞燕草素-3-芸香糖苷-葡萄糖苷、飞燕草素-3-葡萄糖苷	45.4	[27]	
叶菜类	紫背天葵	沸水浴	水	HPLC-DAD	矢车菊素	28.6	[24]

注:(1)原文献以干重计的含水量数据参考《中国食物成分表标准版》^[43]中水分含量折算为以湿重计的含水量;(2) $\mu\text{g/g}$ 提取物;HPLC:高效液相色谱;UPLC:超高效液相色谱;DAD/PAD:二极管阵列;ESI:电喷雾;QqQ:三重四极杆;QTOF:四极杆飞行时间;MS:质谱

表3 常见蔬菜中类黄酮化合物(不包括花青素类)的组成及含量⁽¹⁾

蔬菜类别	蔬菜名称(部位)	提取方法	提取溶剂	仪器方法	类黄酮化合物	含量/($\mu\text{g/g}$)	参考文献
甘蓝芸薹类	抱子甘蓝	浸提法	甲醇	RP-HPLC	儿茶素、槲皮素	1122.5	[26]
	抱子甘蓝	超声辅助提取	甲醇-水溶液(7:3, V/V)	UPLC-MS/MS	山奈酚等 ⁽²⁾	1328.9	[37]
花椰菜	花椰菜	超声辅助提取	甲醇-水溶液(7:3, V/V)	UPLC-MS/MS	山奈酚等 ⁽²⁾	882.1	[37]
		浸提法	甲醇	RP-HPLC	儿茶素、槲皮素	262.1	[26]
卷心菜	卷心菜	超声辅助提取	甲醇-水溶液(7:3, V/V)	UPLC-MS/MS	山奈酚等 ⁽²⁾	3252.8	[37]
		超声辅助提取	甲醇-水溶液(7:3, V/V)	UPLC-MS/MS	山奈酚等 ⁽²⁾	3324.0	[37]
莖类	欧芹	浸提法	甲醇	RP-HPLC	儿茶素、槲皮素	224.0	[26]
	芹菜(根)	超声辅助提取	甲醇-水溶液(8:2, V/V)	HPLC-PDA	儿茶素、芦丁三水合物、芹菜素-7-葡萄糖苷、槲皮素、柚皮素、山奈酚、异鼠李素	1028.9	[40]
块根块茎类	白萝卜	超声辅助提取	甲醇-水溶液(7:3, V/V)	UPLC-MS/MS	山奈酚等 ⁽²⁾	26.2	[37]
	黑胡萝卜	浸提法	乙醇-水溶液(3:7, V/V)	HPLC-DAD	槲皮素、山奈酚-3-葡萄糖苷、槲皮素-3-葡萄糖苷酸、儿茶素、槲皮素-3-葡萄糖苷	7.3	[25]
姜	姜	浸提法	乙醇-水溶液(3:7, V/V)	HPLC-DAD	山奈酚、表儿茶素没食子酸酯	57.4	[25]
		超声辅助提取	甲醇-水溶液(7:3, V/V)	UPLC-MS/MS	山奈酚等 ⁽²⁾	2274.8	[37]
櫻桃萝卜	櫻桃萝卜	超声辅助提取	甲醇-水溶液(7:3, V/V)	UPLC-MS/MS	山奈酚等 ⁽²⁾	105.0	[37]
		浸提法	酸化甲醇-水溶液(8:2, V/V)	HPLC-ESI-Qq-MS2	儿茶素、芦丁	102590.0 ⁽⁴⁾	[41]
大蒜	大蒜	浸提法	乙醇-水溶液(3:7, V/V)	HPLC-DAD	山奈酚、表儿茶素、槲皮素、儿茶素、表儿茶素没食子酸酯、槲皮素-3-葡萄糖苷	14.6	[25]
		浸提法	甲醇	HPLC	儿茶素、槲皮素	1386.1	[26]
红洋葱	红洋葱	浸提法	含0.03% HCl的甲醇溶液	HPLC-PDA/-ESI+MS	槲皮素-3,4-O-双葡萄糖苷、槲皮素-3-O-葡萄糖苷	251.1	[22]
		浸提法	乙醇-水溶液(3:7, V/V)	HPLC-DAD	儿茶素、山奈酚、槲皮素、槲皮素-3-葡萄糖苷酸、表儿茶素、山奈酚-3-葡萄糖苷、槲皮素-3-葡萄糖苷	19.9	[25]

参考文献

- [1] DELGADO A M, ISSAOUI M, CHAMMEM N. Analysis of main and healthy phenolic compounds in foods[J]. J AOAC Int, 2019, 102(5): 1356-1364.
- [2] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2023.
- [3] VUOLO M M, LIMA V S, JUNIOR M R M. Chapter 2-Phenolic compounds: structure, classification, and antioxidant power[M]//Maira Rubi Segura Campos. Bioactive compounds. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019: 33-50.
- [4] DE LA ROSA L A, MORENO-ESCAMILLA J O, RODRIGO-GARCÍA J, et al. Chapter 12-Phenolic compounds [M]//YAHIA E A. Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019: 253-271.
- [5] 李静, 赵海峰. 多酚类化合物的主要食物来源[J]. 卫生研究, 2017, 46(1): 169-173.
- [6] 张晓莉, 李晓东, 王国庆, 等. 百合鳞茎总黄酮不同提取方法比较[J]. 山东化工, 2023, 52(9): 12-15.
- [7] ZHANG L Q, LI Y, LIANG Y, et al. Determination of phenolic acid profiles by HPLC-MS in vegetables commonly consumed in China[J]. Food Chem, 2019, 276: 538-546.
- [8] ALARA O R, ABDURAHMAN N H, UKAEGBU C I. Extraction of phenolic compounds; a review[J]. Curr Res Food Sci, 2021, 4: 200-214.
- [9] 熊岑, 阮沛仪, 郭晓刚, 等. 辣椒中多酚的提取工艺和抗氧化活性研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(2): 89-94.
- [10] ALARA O R, ABDURAHMAN N H, UKAEGBU C I. Soxhlet extraction of phenolic compounds from *Vernonia cinerea* leaves and its antioxidant activity [J]. J Appl Res Med Aroma, 2018, 11: 12-17.
- [11] KARAMI Z, EMAM-DJOMEH Z, MIRZAEI H A, et al. Optimization of microwave assisted extraction (MAE) and soxhlet extraction of phenolic compound from licorice root[J]. J Food Sci Technol, 2015, 52(6): 3242-3253.
- [12] OUFIGHOU A, BRAHMI F, ACHAT S, et al. Microwave-assisted extraction of total phenolics from pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) pulp and peel: optimization process, antioxidant and antimicrobial properties[J]. J Food Meas Charact, 2024, 18(5): 3199-3214.
- [13] TRIPODO G, IBÁÑEZ E, CIFUENTES A, et al. Optimization of pressurized liquid extraction by response surface methodology of Goji berry (*Lycium barbarum* L.) phenolic bioactive compounds [J]. Electrophoresis, 2018, 39(13): 1673-1682.
- [14] CARULLO D, CARPENTIERI S, FERRARI G, et al. Influence of mechanical comminution of raw materials and PEF treatment on the aqueous extraction of phenolic compounds from artichoke wastes[J]. J Food Eng, 2024, 369: 111939.
- [15] KHAW K Y, PARAT M O, SHAW P N, et al. Solvent supercritical fluid technologies to extract bioactive compounds from natural sources: a review [J]. Molecules, 2017, 22(7): 1186.
- [16] SUWAL S, MARCINIAK A. Technologies for the extraction, separation and purification of polyphenols-a review[J]. Nepal J Biotech, 2019, 6(1): 74-91.
- [17] BARBOSA A M, SANTOS K S, BORGES G R, et al. Separation of antibacterial biocompounds from *Hancornia speciosa* leaves by a sequential process of pressurized liquid extraction[J]. Sep Purif Technol, 2019, 222: 390-395.
- [18] 李雨竹. 茎菜类植物中黄酮成分的提取解析[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.
- [19] RADZALI S A, MARKOM M, SALEH N M. Co-Solvent selection for supercritical fluid extraction (SFE) of phenolic compounds from *labisia pumila* [J]. Molecules, 2020, 25(24): 5859.
- [20] SIMIĆ S, AČIMOVIĆ M, VIDOVIĆ S, et al. Viola odorata: influence of supercritical fluid extraction on the efficiency of ultrasound-and microwave-assisted extraction of bioactive compounds [J]. Croat J Food Sci Technol, 2021, 13(2): 191-200.
- [21] OGUNDOLIRE A, HÜSEYİN O, TAVALI İ E. Phytochemical analysis and identification of bioactive compounds in spinach leaves (*Spinacia oleracea* L.) [C]//International Agricultural, Biological, Life Science Conference, 2023: 830.
- [22] FROND A D, IUHAS C I, STIRBU I, et al. Phytochemical characterization of five edible purple-reddish vegetables: anthocyanins, flavonoids, and phenolic acid derivatives [J]. Molecules, 2019, 24(8): 1536.
- [23] 邹仕昱, 彭小强, 邓泽元, 等. 胡萝卜、红甜椒、芹菜和紫甘蓝抗氧化相互作用[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(3): 1-7.
- [24] 杭园园, 梁颖, 李艺, 等. 部分紫色蔬菜中酚类物质及维生素 C 含量分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(4): 16-20, 26.
- [25] GU C H, HOWELL K, DUNSHEA F R, et al. LC-ESI-QTOF/MS characterisation of phenolic acids and flavonoids in polyphenol-rich fruits and vegetables and their potential antioxidant activities [J]. Antioxidants, 2019, 8(9): 405.
- [26] FATIMA T. Nutraceutical potential and health benefits of different polyphenol-rich vegetables stalk extracts by exploring antioxidant activities [J]. Lat Am J Pharm, 2024, 43(1): 225-233.
- [27] COLAK N, KURT-CELEBI A, GRUZ J, et al. The

- phenolics and antioxidant properties of black and purple versus white eggplant cultivars[J]. *Molecules*, 2022,27(8):2410.
- [28] SEONG G U, HWANG I W, CHUNG S K. Antioxidant capacities and polyphenolics of Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *Pekinensis*) leaves [J]. *Food Chem*, 2016, 199:612-618.
- [29] 邢晨, 王俐娟, 王晓琴. 可食用植物不同形态酚类化合物研究进展 [J]. *食品科学*, 2020, 41(5): 266-275.
- [30] 吴新平, 漆欣, 王丽梅, 等. 莲藕酚类物质组成分析及合成机制研究 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(9): 221-231.
- [31] KUMAR B R. Application of HPLC and ESI-MS techniques in the analysis of phenolic acids and flavonoids from green leafy vegetables (GLVs) [J]. *J Pharm Anal*, 2017, 7(6): 349-364.
- [32] 郭会平. 利用酚酸指纹图谱结合主成分分析对番茄鉴别的应用研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [33] DEL BURGO-GUTIÉRREZ C, CID C, LUDWIG I A, et al. LC-MS/MS analysis elucidates the different effects of industrial and culinary processing on total and individual (poly) phenolic compounds of piquillo pepper (*Capsicum annuum* cv. Piquillo) [J]. *J Agric Food Chem*, 2023, 71(15): 6050-6060.
- [34] KAVITA V, ADIANI V, MISHRA B B. Gamma irradiation enhanced flavor volatiles and selected biochemicals in onion (*Allium cepa* L.) during storage [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2024, 209:112690.
- [35] KALASEE B, MITTRAPARP-ARTHORN P. Phytochemicals, antioxidant, and antibacterial activities of fresh and dried Chinese chive (*Allium tuberosum* Rottler) leaf extracts [J]. *ASEAN J Sci Tech Report*, 2023, 26(4): 1-10.
- [36] 魏云潇, 余作龙, 韩超, 等. 果蔬酚酸的研究及在保鲜中应用进展 [J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(7): 22-26.
- [37] LI Z F, LEE H W, LIANG X, et al. Profiling of phenolic compounds and antioxidant activity of 12 cruciferous vegetables [J]. *Molecules*, 2018, 23(5): 1139.
- [38] YILMAZ M A, CAKIR O, ARICA E, et al. An LC-MS/MS method validation for the phytochemical quantification of four edible plants [J]. *J Inst Sci & Tech*, 2018, 8(1): 179-187.
- [39] 闫亚茹. 三种绿色蔬菜多酚的分离鉴定及生物活性研究 [D]. 西安: 西安工程大学, 2018.
- [40] SALAMATULLAH A M, ÖZCAN M M, ALKALTHAM M S, et al. Influence of boiling on total phenol, antioxidant activity, and phenolic compounds of celery (*Apium graveolens* L) root [J]. *J Food Process Preserv*, 2021, 45(2): e15171.
- [41] 潘瑶. 日常膳食中四种水果/蔬菜提取物及其中四种主要的植物化学物相互作用规律及机制的探讨 [D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [42] 高若容, 王佃烈, 黄雪松. 固相萃取-高效液相色谱法同时测定蒜皮中六种酚类物质 [J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(22): 266-272.
- [43] 杨月欣. 中国食物成分表标准版 [M]. 6 版. 北京: 北京大学医学出版社, 2018.
- [44] 王玲玲, 边祥雨, 高蔚娜, 等. 植物类黄酮提取纯化技术研究进展 [J]. *营养学报*, 2019, 41(6): 606-610.

收稿日期: 2024-08-06

(上接第 1020 页)

- [61] LIN W Q, XIAO T, FANG Y Y, et al. The Association of malnutrition and health-related factors among 474, 467 older community-dwellers: a population-based data mining study in Guangzhou, China [J]. *Nutrients*, 2024, 16: 1338.
- [62] CRICHTON M, CRAVEN D, MACKAY H, et al. A systematic review, meta-analysis and meta-regression of the prevalence of protein-energy malnutrition: associations with geographical region and sex [J]. *Age Ageing*, 2019, 48(1): 38-48.
- [63] CEREDA E, PEDROLI C, KLERSY C, et al. Nutritional status in older persons according to healthcare setting: a systematic review and meta-analysis of prevalence data using MNA [J]. *Clin Nutr*, 2016, 35: 1282-1290.
- [64] KUSHWAHA S, KHANNA P, SRIVASTAVA R, et al. Estimates of malnutrition and risk of malnutrition among the elderly (≥ 60 years) in India: a systematic review and meta-analysis [J]. *Ageing Res Rev*, 2020, 63: 101137.
- [65] EWUNIE T M, HARERU H E, DEJENE T M, et al. Malnutrition among the aged population in Africa: A systematic review, meta-analysis, and meta-regression of studies over the past 20 years [J]. *PLoS One*, 2022, 17(12): e0278904.
- [66] CHUANSANGEAM M, WUTHIKRAIKUN C, SUPAPUENG O, et al. Prevalence and risk for malnutrition in older Thai people: A systematic review and meta-analysis [J]. *Asia Pac J Clin Nutr*, 2022, 31(1): 128-141.
- [67] 中国营养学会. 中国居民膳食指南 (2022) [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2022.

收稿日期: 2025-06-12