

多酚在植物中的分布及其生物活性研究进展

赵盈¹, 於天², 郑志刚², 陈位三¹, 弓思涵¹, 宋天宝¹, 李先宽^{1*}, 於洪建^{2*}

1. 天津中医药大学, 天津 301617

2. 无锡市世纪生物工程有限公司, 江苏 无锡 214000

摘要: 天然酚类化合物广泛存在于植物中, 资源、种类丰富且具有多种药效如抗氧化、抗炎、抗病毒、抑菌、心脏保护、预防肥胖与糖尿病等多种药效作用。目前, 植物多酚应用于食品、医药、化工、畜牧养殖等多个领域, 利用纳米、微胶囊等技术可提高其生物利用度, 从而产生较好的生物学效应。以植物多酚为研究对象, 通过 Phenol-Explorer 等数据库挖掘, 结合文献研究, 综述其在植物中的分布、种类、生物活性及开发利用现状, 为植物多酚的综合开发利用及植物多酚新资源的发现提供新思路。

关键词: 植物; 多酚; 抗氧化; 抗炎; 抗病毒; 抑菌; 心脏保护; 预防肥胖; 糖尿病

中图分类号: R286.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2023)17-5825-08

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2023.17.035

Research progress on distribution and bioactivity of polyphenols in plants

ZHAO Ying¹, YU Tian², ZHENG Zhi-gang², CHEN Wei-san¹, GONG Si-han¹, SONG Tian-bao¹, LI Xian-kuan¹, YU Hong-jian²

1. Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China

2. Wuxi Century Biological Engineering Co., Ltd., Wuxi 214000, China

Abstract: Natural phenolic compounds are widely found in plants, with rich resources and varieties, and have various efficacy, such as antioxidant, anti-inflammatory, antiviral, antibacterial, heart protection, prevention of obesity and diabetes, etc. At present, plant polyphenols are used in food, medicine, chemical industry, animal husbandry and other fields. Nano and microcapsule technologies can improve their bioavailability to produce better biological effects. Taking plant polyphenols as the research object, this study summarizes their distribution, species, biological activity and development and utilization status in plants through Phenol Explorer database mining and literature research, with view to providing new ideas for the comprehensive development and utilization of plant polyphenols and the discovery of new plant polyphenol resources in the future.

Key words: plant; polyphenols; antioxidant; anti-inflammation; antiviral; antibacterial; heart protection; prevention of obesity; diabetes

植物多酚是一类具有多元酚类结构的次生代谢物, 广泛分布于植物的果实、根、皮、叶等组织器官中, 含量仅次于纤维素、半纤维素和木质素^[1]。世界卫生组织专家认为多酚类化合物是人类“第7类营养素”, 因其基本来源于天然植物, 不良反应小, 是一座绿色环保、可再生的资源宝库。植物多酚结构复杂, 分类方法多样, 根据植物来源对多酚进行分类为学者所认可^[2]。自然界中已分离鉴定出8000余种天然酚类化合物及其衍生物^[2], 茶多酚、白藜

芦醇、姜黄素、茶黄素、原花青素等, 因其较强的生物活性广泛应用于医药、食品等领域。植物多酚最早以鞣质为研究对象^[3], 目前研究主要聚焦于黄酮、酚酸、芪、木酚素类化合物。植物多酚具有多种生理功能, 大部分植物中都含有不同种类、含量不等的植物多酚。不同来源植物多酚的生物活性不同, 经结构修饰后往往具有更高生物活性和更好临床疗效。目前, 植物多酚在自然界不同植物中的分布规律、分布类型、稳定性、开发利用现状等未见

收稿日期: 2023-01-03

基金项目: 天津市道地药材生态种植及质量保障项目(2022); 天津市科技计划项目(21ZYCGSN00660)

作者简介: 赵盈(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为药用植物种质资源与质量评价。E-mail: zhaoying191026@163.com

*通信作者: 李先宽(1984—), 男, 硕士生导师, 副教授, 从事药用植物种质资源与质量评价研究。E-mail: lixiankuan@tjucm.edu.cn

於洪建(1967—), 男, 研究员, 从事植物提取物和健康食品开发研究。E-mail: yuhjian@vip.163.com

系统研究^[4-5]，本文以植物多酚为研究对象，从植物多酚种类、多酚在植物资源中的分布、多酚的生物活性及植物多酚的开发利用现状等方面收集资料进行研究，以期对植物多酚的合理开发利用、植物多酚新资源的发现等提供理论依据。

1 植物多酚分类及构效关系

1.1 植物多酚分类

酚是羟基与芳烃核（苯环或稠苯环）直接相连形成的有机化合物，含有一个以上羟基的芳香族化合物统称为多酚^[6]。Harborne 等^[7]按照其化学结构中碳原子的骨架结构进行分类，使植物多酚的结构更加清

晰。本文按照该分类方法将天然酚类化合物分为黄酮、酚酸、木酚素、芪、其他多酚 5 个类别以及黄酮醇、黄烷醇、羟基苯甲酸、羟基肉桂酸等 30 个次类别，见图 1。黄酮类化合物所占的比例最大，超过 4000 种天然酚类化合物都归属于此，而其中一半以上都以黄酮、黄烷醇、黄酮醇 3 种物质形式存在^[8]；酚酸类化合物同样是植物多酚的重要来源，羟基肉桂酸和羟基苯甲酸类所占比例最高^[9]；木酚素也称植物木脂素，其体内生物利用度低，需转化为肠木酚素才能得到较好的吸收；芪类化合物含有 1,2-二苯乙烯骨架结构，多以二苯乙烯、菲类及其聚合物等形式存在。

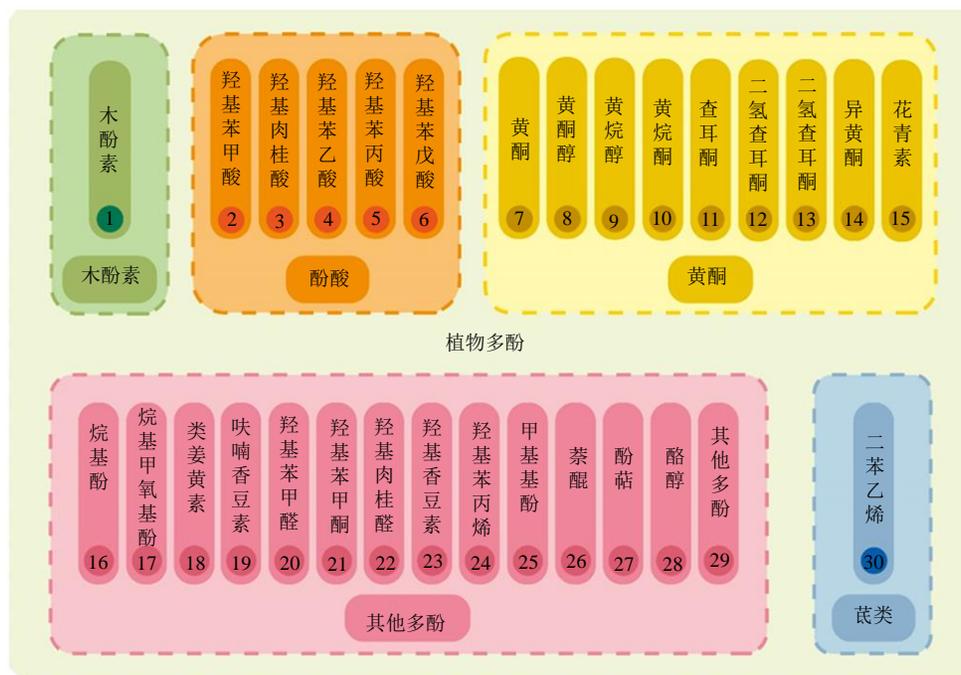


图 1 植物多酚的分类

Fig. 1 Classification of plant polyphenols

1.2 植物多酚构效关系

不同来源植物多酚的生物活性不同，研究表明芹菜尤其是旱芹中的黄酮类成分治疗原发性高血压疗效显著^[10]；柠檬、来檬、柚等均属于芸香科柑橘属植物，该属植物中黄烷醇占黄酮类总量的 80%，黄烷醇类成分橙皮苷对肠炎的防治具有重要意义^[8]；富含花青素的植物多呈深色，且花青素的抗氧化作用是 Vc 的 30 倍，是目前活性最强的天然抗氧化剂^[11]；酚酸具有广泛的生物活性，在极性溶剂中，没食子酸具有较强的抗氧化活性^[12]，它还可以将肿瘤细胞抑制在 G₁ 期发挥抗癌作用^[13]；木酚素因其高抗氧化活性和抑制脂质过氧化作用^[14]，在心血管领域被广泛应用；芪类化合物在抗糖尿病及抑制 α -葡萄糖苷

酶活性方面具有较好疗效^[15]，见表 1。

多酚在植物资源中分布广泛，种类数量庞杂，复杂的化学结构和功能的多样性是对其开展重点研究的原因之一^[32]。至少含有一个羟基的芳香环是多酚结构的共同属性，外界因素诱导可使多酚在原有的结构上经羟基化、甲氧基化、脱糖基化、单体聚合等结构修饰，形成功能衍生物发挥抗氧化、抗炎、抗病毒、抑菌、心脏保护、预防肥胖与糖尿病等多种药效作用^[33]。特定结构对多酚类化合物生物活性的影响也已经得到了证实。Xie 等^[34]研究表明黄芩苷和杨梅素的抑菌效果显著，两者都具有的邻苯三酚结构是发挥抑菌活性的关键，没食子酸抗氧化活性的增强也与邻苯三酚结构有关^[35]。Tan 等^[36]研究

表1 不同来源植物多酚的主要生物活性

Table 1 Main biological activities of polyphenols from different plant sources

多酚类别	生物活性	示例植物	文献
黄酮	降血压、抗氧化、抗炎、抗癌	旱芹、蚕豆	10,16
黄烷酮	抗炎、抗氧化、神经保护、调节糖脂代谢、抑菌	柚、柠檬、甘牛至	17-19
黄酮醇	抗氧化、抗肿瘤、降糖脂、抗炎	洋葱、菠菜、西蓝花	20-22
花青素	抗氧化、抗炎、抗糖尿病	黑樱桃、接骨木、蓝莓	23-25
酚酸	抗菌、抗炎、抗癌、抗氧化、免疫调节	银杏、悬钩子、柑橘	9,26-27
木酚素	心血管保护、抗肿瘤、抗氧化	芝麻、亚麻	28-29
芪类	抗病毒、抗炎、抗癌、调血脂、抗肥胖	葡萄、越橘	30-31

表明红茶提取物中的茶黄素-3,3'-二酸酯在清除二苯基苦基苯肼自由基和 2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐时表现出最佳的能力,这与其结构中含有两个没食子基有关。鞣花鞣质类化合物糖松素 (lambertianin) A 对葡萄糖的吸收作用强于地榆鞣质 (sanguin) H-6, 研究结果表明相比于羟基数量的多少, 没食子酰的构型对其活性产生的影响更大^[37]。多酚化合物特定结构的改变会导致生物化学性质的差异, 经结构修饰后往往具有更高生物活性和更好临床疗效。

Charlton 等^[38]研究表明黄酮类化合物及其代谢物在体外的抗氧化活性取决于母核结构上的官能团种类、数目、排列位置, 进而影响其清除促氧化剂的有效性。Nguyen 等^[39]发现黄酮类化合物对纯化主蛋白酶的抑制作用与 B 环 C_{3'}、C_{4'}、C_{5'}, C 环 C₃, A 环 C₇ 的羟基, C 环 C₂ 和 C₃ 之间的双键及 A 环 C₈ 的糖基化有关。B 环对抗氧化活性的影响最为显著, B 环上的羟基为自由基提供氢和电子, 使其产生相对稳定的自由基^[38]; 而甲氧基的引入会产生空间效应改变整个分子的平面度, 使化合物的抗氧化活性降低^[40]; B 环上 C-3' 与 C-4' 处的邻苯二酚结构增强了化合物对脂质过氧化的抑制作用, 但当 B 环中不存在邻苯二酚结构时, C₂ 和 C₃ 间的双键与 C₃、C₄ 羰基共存时能有效清除自由基^[33]; 而 A 环取代基的改变对于清除自由基的能力几乎没有影响。

2 多酚在植物中的分布状况

几乎所有植物都会产生一定量的多酚作为次级代谢产物。为了厘清多酚在植物中的分布状况, 促进植物多酚在生命健康领域的应用, 本文通过检索 Phenol-Explorer 数据库^[4]内的信息, 筛选出对人类健康有益的植物多酚资源, 并按照克朗奎斯客分类系统将其进行整理排序。从 Phenol-Explorer 数据库内记载的 452 种食物中所含有的 502 种多酚中整理

得到含有多酚的资源植物共 56 科、132 属、217 种, 图 2 中仅展示多酚种类最丰富的前 10 科资源植物。图 2-A 的桑基图展示了前 10 科资源植物中多酚的种类归属及不同种类多酚在不同科植物中所占的比重。图中显示黄酮类总量占比最大, 酚酸总量次之, 蔷薇科中所含的黄酮醇与羟基肉桂酸贡献较大, 十字花科与杜鹃花科植物也含有较多的黄酮醇; 杜鹃花科与唇形科植物中的酚酸类化合物较多, 以羟基肉桂酸为首, 羟基苯甲酸次之; 葡萄科植物含有的葡萄多酚开发利用程度高, 其本质是芪类化合物, 在杜鹃花科越橘属植物中含有的芪类化合物却未见系统研究, 为新资源利用提供了可能; 花青素属黄酮类化合物, 主要来源于颜色较深的浆果中, 目前笃斯越橘花色苷已被证实可以通过调节肠道微生物起来增强 PD-L1 抗体的抗肿瘤效率^[41], 加强对越橘属植物的研究可在缓解野生蓝莓资源的可持续利用现状方面发挥作用。图 2-B 选取 10 个科中多酚含量相对丰富的代表性植物, 罗列其主要的生理活性, 分析结果表明大多数资源植物既可作为膳食多酚为人类提供健康饮食, 具有的生物活性同样也为医药界所青睐, 如伞形科植物莳萝的抗糖尿病作用^[42]、芸香科植物调料九里香的肝保护作用^[43], 为研发新药、挖掘热点成分提供了新思路。

3 植物多酚的开发利用现状

流行病学资料显示, 增加植物性食物摄入量可以降低非传染性慢性疾病的风险, 研究表明植物多酚在多种疾病的预防和治疗中发挥作用。近年来多酚的研究涉及食品、医药、化工、畜牧养殖等领域, 目前更着重于植物多酚的综合开发利用, 详见图 3。

以“多酚”“功能食品”为关键词检索多个数据库发现, 没有将多酚或植物多酚定义为新食品原料或功能食品原料, 但市面上已有的保健食品和已被列入新食品原料目录中的产品, 绝大部分都含有多

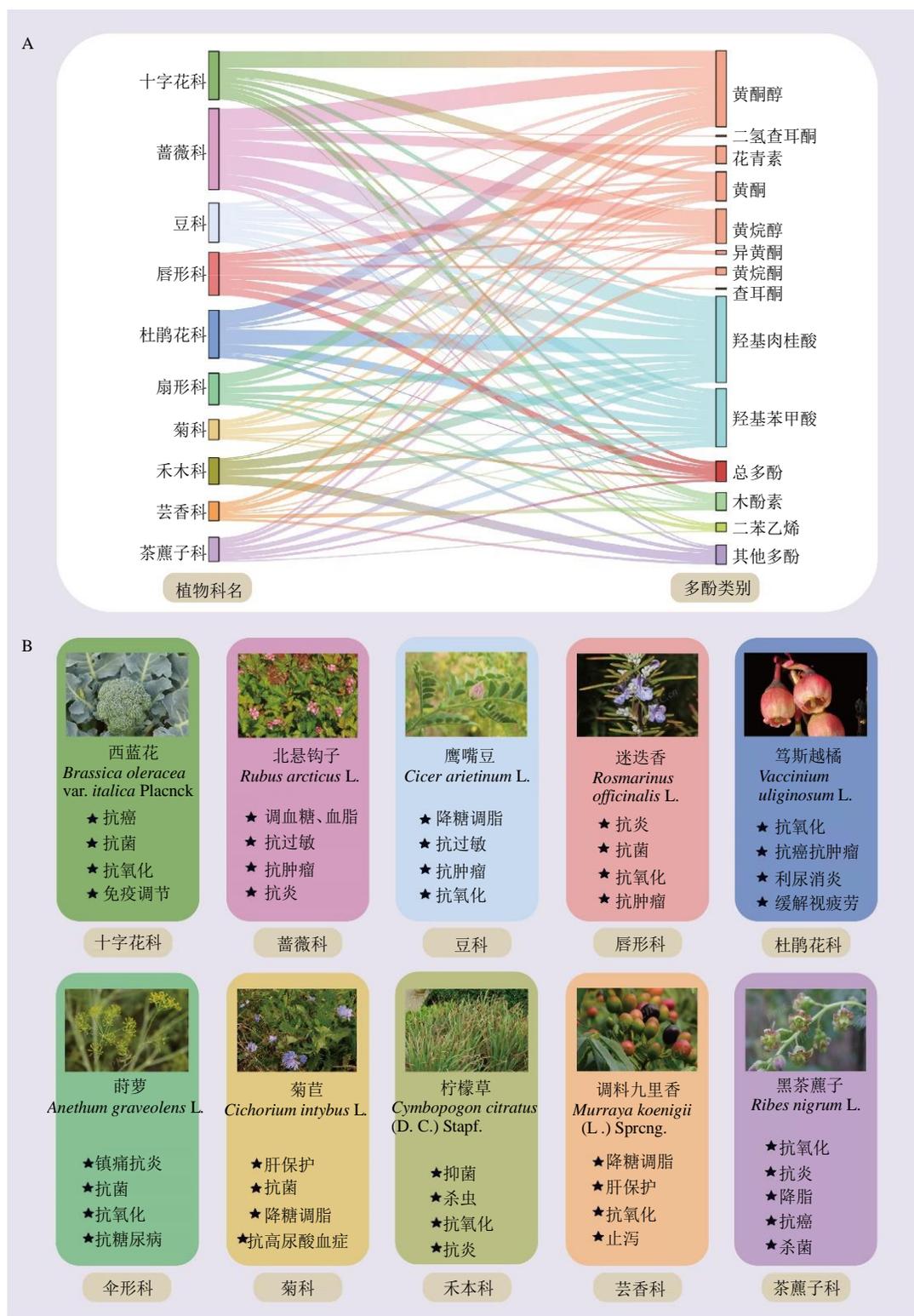


图2 前10科资源植物含多酚种类桑基图(A)和多酚生物活性高的代表性植物及其主要药理活性(B)

Fig. 2 Sankey chart of polyphenol-containing species of top 10 families of plants (A) and representative plants with high bioactivity of polyphenols and their main pharmacological activities (B)

酚。Jacob 等^[44]开发的新型保健品“Fitnox”，主要功能成分为小花山柰黄酮、石榴皮多酚和辣木叶皂

苷，具有补充电解质、抗疲劳、抗氧化作用。植物多酚和淀粉之间的相互作用可以改善淀粉基食品的



图3 植物多酚开发利用现状及前景展望

Fig. 3 Current situation and prospect of development and utilization of plant polyphenols

品质，同时也对多酚起到保护和缓释作用，利于开发健康功能型淀粉制品，提升植物多酚在食品工业的资源化利用价值^[45]。柿子具有极高营养价值，利用纳米技术制备成单宁粉，既缓解了柿子不耐贮藏的问题，又可以利用微胶囊技术制备成保健产品^[46]。蜜柚富含酚类物质，与膳食纤维结合形成复杂食物基质可以促进低分子量化合物（如对羟基苯丙酸、3-苯丙酸）的生成，同样具备功能性食品的特性^[47]。

多酚自身具有水溶性低、稳定性差、释放迅速等特性，经体内代谢后产生较低的生物学效应^[48]，改善体内多酚生物利用度低的现状成为当前医药界亟待解决的难题。植物多酚在医药领域具有较大的开发价值。酚酸类多酚化合物鞣质酸在临床上被广泛用作止血剂和抗菌剂^[49]；李建飞等^[50]优化了石榴皮中石榴多酚的提取工艺并制备成石榴多酚含片，以期在调节肠道微生物菌群变化方面有一定的应用价值；Xu 等^[51]研究发现槲皮素可以影响谷胱甘肽、酶、信号转导途径和活性氧的产生，当与金属离子或配合离子形成络合物或与其他材料制备成新型槲皮素制剂，其生物利用度和抗氧化作用得到增强，

基于此可以提高槲皮素的临床疗效，丰富其天然资源的充分利用。洪鑫月等^[52]研究表明，多酚化合物与金属离子形成的配合物对黄嘌呤氧化酶活性有一定程度的抑制作用，对多酚化合物进行结构修饰、改造可以实现降尿酸食品功能因子和新型降尿酸化合物的研发利用。

在材料、环境、能源、工业生产、畜牧养殖等领域，植物多酚同样展示出其优势。Zhu 等^[53]对莲不同部位的活性成分进行定量分析，发现作为加工副产品的种胚中总酚含量最高，在动物饲养和制药工业领域具有良好应用前景。茶多酚、褐藻多酚抑制人体内酪氨酸酶的活性，从而抑制左旋多巴氧化和黑色素的生成，起到防晒美白的作用^[54-55]。将多酚作为改性剂应用在木材化学变色、改善木材尺寸稳定性、减少木材抗防腐剂重金属流失等方面，木材变色等研究已实现产业化^[56]。Flemming 等^[57]证实多酚可以减少致龋细菌的生长，还可以降低细菌对牙齿表面的黏附并改善其对牙釉质薄膜的侵蚀。为改善低温冷冻技术导致水产品品质下降的现状，王帅等^[58]在水产品保鲜领域对多酚进行研究，除茶

多酚外, 蓝莓叶多酚、葡萄多酚的抑菌、抗脂质氧化活性也具有显著功效。

4 结语与展望

有着“资源宝库”美誉的多酚类化合物受到各界科研工作者的青睐, 植物多酚凭借其安全低毒的优势得到广泛地综合利用。从天然植物中分离鉴定出的多酚类化合物高达 8000 余种, 我国已对活性较高的化合物开展了大量研究, 并在数年前对某些单体成分进行了新药研发, 如丹参多酚酸盐注射液、松仁红衣多酚口服液^[59-60]等。目前我国植物多酚产业化水平已接近国际水平, 但因研究起步较晚, 许多产业如银杏黄酮、茶多酚等并未在国内产生良好效益^[61]。聚焦研究热点成分, 会陷入“明星成分”研究较为完善但仍无法开发利用新资源的窘境, 对于我国庞大的健康产业需求来说, 开发利用植物多酚新资源势在必行。因此, 本文从 Phenol-Explorer 数据库中筛选对人类健康有益的膳食多酚并梳理相应的植物资源, 根据不同科、属及不同种类的多酚化合物进行科学统计, 以促进植物多酚资源的高效利用, 为将来植物多酚研究提供新思路。

目前, 人们除了加强锻炼来提高免疫力, 抵御外界致病因子, 食补植物多酚已成为日常保健养生的重要途径。虽然膳食多酚多来源于自然界, 成分普遍安全, 但人类长期使用个别纯化化合物的安全性和潜在的风险仍不确定^[62], 有证据表明超量抗氧化剂的使用可能会打破自身生理平衡甚至危害健康和生命^[63], 建议通过更多的临床试验数据来弥补目前关于其他种类多酚药效部分的空白^[64]。将来植物多酚的相关研究应重点关注以下几个方面: (1) 优化多酚的快速提取和分离方法, 进一步阐明多酚在体内吸收、代谢、转运作用机制, 为探索其药理作用机制和扩大临床应用奠定理论基础; (2) 利用结构修饰、制剂包埋、协同配伍等手段验证多酚与其他材料或物质结合的可行性从而提高多酚的口服生物利用度; (3) 在明确植物来源的基础上, 尽可能明确其含有的多酚类物质的种类、含量以及各类成分之间因交互作用对人类健康产生的具体影响; (4) 定义植物多酚作为功能食品原料的效用, 鉴定、量化多酚类化合物代谢产物潜在的药理活性, 从健康饮食的角度制定多酚相关的饮食设计, 从而优化不同人群的饮食建议, 以期达到科学合理地饮食摄入。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 袁莹, 李乐, 陈静霞, 等. 多酚类化合物的提取及功效研究进展 [J]. 粮食与油脂, 2018, 31(7): 15-17.
- [2] 杨巍巍, 邓航, 李娇, 等. 植物多酚化合物抗氧化损伤研究进展 [J]. 现代食品, 2020(16): 74-78.
- [3] 于聪聪, 耿雪莹, 姚玉阳, 等. 超声辅助在植物单宁类物质提取分离中的应用 [J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(13): 4319-4327.
- [4] Koch W. Dietary polyphenols-important non-nutrients in the prevention of chronic noncommunicable diseases. A systematic review [J]. *Nutrients*, 2019, 11(5): 1039.
- [5] 易莹, 樊敏, 李权. 常见植物多酚化合物的介绍 [J]. 化学教育: 中英文, 2022, 43(11): 1-6.
- [6] Abdul Rahim R, Jayusman P A, Muhammad N, et al. Recent advances in nanoencapsulation systems using PLGA of bioactive phenolics for protection against chronic diseases [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, 16(24): 4962.
- [7] Wang W, Heideman L, Chung C S, et al. Cell-cycle arrest at G₂/M and growth inhibition by apigenin in human colon carcinoma cell lines [J]. *Mol Carcinog*, 2000, 28(2): 102-110.
- [8] 左龙亚. 柑橘亚属植物果皮多酚类物质提取及其抗氧化、抑菌活性检测 [D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [9] 杨钦钦, 陈民利. 中药酚酸类物质通过调节肠道菌群防治心血管疾病的研究进展 [J]. 中成药, 2022, 44(12): 3920-3926.
- [10] 安平祥, 缪天玲. 浅述早芹治疗 20 例原发性高血压的临床疗效 [J]. 中西医结合心血管病电子杂志, 2018, 6(5): 181-182.
- [11] 金文进. 植物花青素及其应用前景 [J]. 畜禽业, 2020, 31(3): 11.
- [12] 何雅静, 张群琳, 谷利伟, 等. 柑橘中酚酸类化合物及其生物活性与机理的研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 301-306.
- [13] 郑雪花, 杨君, 杨跃辉. 没食子酸药理作用的研究进展 [J]. 中国医院药学杂志, 2017, 37(1): 94-98.
- [14] Rodríguez-García C, Sánchez-Quesada C, Toledo E, et al. Naturally lignan-rich foods: A dietary tool for health promotion? [J]. *Molecules*, 2019, 24(5): 917.
- [15] 姜丽丽, 尹航, 闫明睿, 等. 天然芪类化合物及其抗 α -葡萄糖苷酶活性的研究进展 [J]. 上海中医药大学学报, 2021, 35(2): 116-124.
- [16] 李程勋, 徐晓俞, 李爱萍, 等. 蚕豆花水提取物的 UPLC-ESI-QTOF 质谱联用分析及抗氧化活性研究 [J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(5): 663-675.
- [17] 杨蕾, 王敏, 洪林, 等. 自然干旱胁迫对梁平柚品质及功能成分的影响 [J]. 经济林研究, 2022, 40(3):

- 169-179.
- [18] Memariani Z, Abbas S Q, Ul Hassan S S, *et al.* Naringin and naringenin as anticancer agents and adjuvants in cancer combination therapy: Efficacy and molecular mechanisms of action, a comprehensive narrative review [J]. *Pharmacol Res*, 2021, 171: 105264.
- [19] Duletić-Laušević S, Alimpić A, Kolarević S, *et al.* Antineurodegenerative, antioxidant and antibacterial activities and phenolic components of *Origanum majorana* L. (Lamiaceae) extracts of different origin [J]. *J Appl Bot Food Qual*, 2018, 91: 126-134.
- [20] 梁雪岩. 洋葱在功能食品中的应用及发展前景 [J]. 现代食品, 2020(13): 106-108.
- [21] 李波, 张馨元, 刘鸿雁, 等. 菠菜和菠菜子本草考证 [J]. 中国中医药信息杂志, 2020, 27(1): 9-13.
- [22] Duan Y B, Eduardo Melo Santiago F, Rodrigues Dos Reis A, *et al.* Genotypic variation of flavonols and antioxidant capacity in broccoli [J]. *Food Chem*, 2021, 338: 127997.
- [23] Acero N, Gradillas A, Beltran M, *et al.* Comparison of phenolic compounds profile and antioxidant properties of different sweet cherry (*Prunus avium* L.) varieties [J]. *Food Chem*, 2019, 279: 260-271.
- [24] Jeon S, Kim M, Kim B. Polyphenol-rich black elderberry extract stimulates transintestinal cholesterol excretion [J]. *Appl Sci*, 2021, 11(6): 2790.
- [25] Duan Y M, Tarafdar A, Chaurasia D, *et al.* Blueberry fruit valorization and valuable constituents: A review [J]. *Int J Food Microbiol*, 2022, 381: 109890.
- [26] 朱梦莹, 任佳妮, 沈娜, 等. 银杏外种皮化学成分、生物活性和资源利用的研究进展 [J]. 华西药学期刊, 2022, 37(5): 587-593.
- [27] 王建雄, 肖小武, 王栋, 等. 悬钩子属酚酸类成分及其生物活性研究进展 [J]. 药品评价, 2021, 18(16): 965-969.
- [28] 于洋, 宋永才, 杨立峰. 芝麻素通过 Nrf2 信号通路对氧化应激诱导的小鼠成骨细胞骨形成的影响机制 [J]. 沈阳药科大学学报, 2022, 39(12): 1464-1470.
- [29] 陈昫昫, 王进英, 王兴瑞, 等. 青海亚麻籽中木脂素含量测定及抗氧化活性分析 [J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 177-182.
- [30] de Filippis B, Ammazalorso A, Fantacuzzi M, *et al.* Anticancer activity of stilbene-based derivatives [J]. *ChemMedChem*, 2017, 12(8): 558-570.
- [31] Pemmari T, Hämäläinen M, Ryyti R, *et al.* Dried bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) alleviates the inflammation and adverse metabolic effects caused by a high-fat diet in a mouse model of obesity [J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(19): 11021.
- [32] Manso T, Lores M, de Miguel T. Antimicrobial activity of polyphenols and natural polyphenolic extracts on clinical isolates [J]. *Antibiotics (Basel)*, 2021, 11(1): 46.
- [33] Latos-Brozio M, Masek A. Structure-activity relationships analysis of monomeric and polymeric polyphenols (quercetin, rutin and catechin) obtained by various polymerization methods [J]. *Chem Biodivers*, 2019, 16(12): e1900426.
- [34] Xie Y X, Chen J, Xiao A P, *et al.* Antibacterial activity of polyphenols: Structure-activity relationship and influence of hyperglycemic condition [J]. *Molecules*, 2017, 22(11): 1913.
- [35] 黄剑, 李书艺, 祝振洲, 等. 相互作用下多酚对肌原纤维蛋白结构和性质的影响研究进展 [J]. 食品科学, 2022, 43(9): 373-382.
- [36] Tan Q Y, Peng L J, Huang Y Y, *et al.* Structure-activity relationship analysis on antioxidant and anticancer actions of theaflavins on human colon cancer cells [J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67(1): 159-170.
- [37] Chen Y. Study on the active polyphenol constituents in differently colored *Rubus Chingii* Hu and the structure-activity relationship of the main ellagitannins and ellagic acid [J]. *LWT*, 2020, 121: 108967.
- [38] Charlton N C, Mastuygin M, Török B, *et al.* Structural features of small molecule antioxidants and strategic modifications to improve potential bioactivity [J]. *Molecules*, 2023, 28(3): 1057.
- [39] Nguyen T T H, Jung J H, Kim M K, *et al.* The inhibitory effects of plant derivate polyphenols on the main protease of SARS coronavirus 2 and their structure-activity relationship [J]. *Molecules*, 2021, 26(7): 1924.
- [40] Papuc C, Goran G V, Predescu C N, *et al.* Plant polyphenols as antioxidant and antibacterial agents for shelf-life extension of meat and meat products: Classification, structures, sources, and action mechanisms [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2017, 16(6): 1243-1268.
- [41] Wang L Y, Jiang G Q, Jing N, *et al.* Bilberry anthocyanin extracts enhance anti-PD-L1 efficiency by modulating gut microbiota [J]. *Food Funct*, 2020, 11(4): 3180-3190.
- [42] 刘恬恬, 周高, 勾林晶, 等. 蒺藜精油及提取物的化学成分和药理活性的研究进展 [J]. 中草药, 2022, 53(8): 2582-2596.
- [43] Balakrishnan R, Vijayaja D, Jo S H, *et al.* Medicinal profile, phytochemistry, and pharmacological activities of *Murraya koenigii* and its primary bioactive compounds [J]. *Antioxidants (Basel)*, 2020, 9(2): 101.
- [44] Jacob J, Gopi S, Divya C. A randomized single dose

- parallel study on enhancement of nitric oxide in serum and saliva with the use of natural sports supplement in healthy adults [J]. *J Diet Suppl*, 2018, 15(2): 161-172.
- [45] 陈南, 高浩祥, 何强, 等. 植物多酚与淀粉的分子相互作用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 497-505.
- [46] 冯娟, 张鹏, 李江阔, 等. 柿子加工产品研究进展 [J]. 保鲜与加工, 2020, 20(3): 204-209.
- [47] 唐溶雪. 柑橘多酚体外发酵与生物转化应用研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [48] Luca S V, Macovei I, Bujor A, *et al.* Bioactivity of dietary polyphenols: The role of metabolites [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2020, 60(4): 626-659.
- [49] Wang C W, Zhou H Y, Niu H Y, *et al.* Tannic acid-loaded mesoporous silica for rapid hemostasis and antibacterial activity [J]. *Biomater Sci*, 2018, 6(12): 3318-3331.
- [50] 李建飞, 李明明, 招艳怀, 等. 云南蒙自甜石榴皮多酚提取工艺及多酚含片配方优化 [J]. 热带农业科学, 2022, 42(8): 67-73.
- [51] Xu D, Hu M J, Wang Y Q, *et al.* Antioxidant activities of quercetin and its complexes for medicinal application [J]. *Molecules*, 2019, 24(6): 1123.
- [52] 洪鑫月, 吴健妹, 罗小乔, 等. 多酚化合物对黄嘌呤氧化酶抑制作用的研究进展 [J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 1-8.
- [53] Zhu Z H, Zhong B M, Yang Z H, *et al.* LC-ESI-QTOF-MS/MS characterization and estimation of the antioxidant potential of phenolic compounds from different parts of the lotus (*Nelumbo nucifera*) seed and rhizome [J]. *ACS Omega*, 2022, 7(17): 14630-14642.
- [54] 黄琳, 马烁, 赵华, 等. 茶多酚提取及其在日用化学品中的应用进展 [J]. 精细石油化工, 2022, 39(1): 64-67.
- [55] 陈红红, 王勤, 陈贝, 等. 褐藻多酚在化妆品中的应用及研究进展 [J]. 渔业研究, 2020, 42(1): 90-96.
- [56] 王超, 余养伦. 植物多酚对木材加工性能的影响和应用 [J]. 木材科学与技术, 2021, 35(3): 1-5.
- [57] Flemming J, Meyer-Probst C T, Speer K, *et al.* Preventive applications of polyphenols in dentistry-a review [J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(9): 4892.
- [58] 王帅, 任丹丹, 吴哲, 等. 多酚类化合物及其在水产品保鲜中的应用研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(21): 7200-7206.
- [59] 王宇, 李伟刚, 陈卓. 丹参多酚酸盐注射液治疗心绞痛及对血清脑钠肽等水平的影响 [J]. 西北药学杂志, 2022, 37(1): 116-120.
- [60] 侯静. 松仁红衣多酚的提取纯化及抗氧化活性的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2015.
- [61] 於洪建. 我国健康植物多酚产业发展研究 [D]. 沈阳: 沈阳药科大学, 2016.
- [62] Luo J, Si H W, Jia Z Q, *et al.* Dietary anti-aging polyphenols and potential mechanisms [J]. *Antioxidants (Basel)*, 2021, 10(2): 283.
- [63] Crawford C, Brown L L, Costello R B, *et al.* Select dietary supplement ingredients for preserving and protecting the immune system in healthy individuals: A systematic review [J]. *Nutrients*, 2022, 14(21): 4604.
- [64] Uddin M S, Al Mamun A, Kabir M T, *et al.* Neuroprotective role of polyphenols against oxidative stress-mediated neurodegeneration [J]. *Eur J Pharmacol*, 2020, 886: 173412.

[责任编辑 时圣明]