

潘景芝, 孟庆龙, 崔文玉, 等. 山药功能性成分及药理作用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 420–428. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010212

PAN Jingzhi, MENG Qinglong, CUI Wenyu, et al. Advances in Studies on Functional Components and Pharmacological Effects of *Dioscorea opposita* Thunb[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 420–428. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010212

· 专题综述 ·

山药功能性成分及药理作用研究进展

潘景芝^{1,2,3}, 孟庆龙², 崔文玉⁴, 朱双杰^{5,*}

(1. 滁州学院博士后工作站, 安徽滁州 239000;

2. 吉林工程技术师范学院经济与管理学院, 吉林长春 130052;

3. 合肥工业大学食品与生物工程学院, 安徽合肥 230009;

4. 长春市传染病医院国家中医药管理局中医药防治传染病重点研究室, 吉林长春 130123;

5. 滁州学院生物与食品工程学院, 安徽滁州 239000)

摘要: 山药作为我国传统药食同源植物, 也是健康食品的重要原料。山药中含有多糖、皂苷、多酚、蛋白质、微量元素等多种功能性成分, 且大量研究已经证实山药具有免疫调节、抗肿瘤、抗氧化、抗衰老、降血糖、降血脂以及调脾胃等多种功效。因此, 山药在医药、保健品和食品等诸多领域具有较好的开发潜力和应用前景。近年来, 山药功能性成分提取分离和药理作用受到国内外学者的广泛关注。不同种类、不同提取分离方法, 都会影响山药的功能性成分结构及其功效。本文系统综述了山药功能性成分及其热点的药理作用, 以期拓宽山药在多领域、多行业中的应用范围, 剖析功能性成分与药效间的相互关系, 为山药功能性食品和保健药品的开发和利用提供参考。

关键词: 山药, 功能性成分, 药理作用, 综述

中图分类号: TS218

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)01-0420-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010212



本文网刊:

Advances in Studies on Functional Components and Pharmacological Effects of *Dioscorea opposita* Thunb

PAN Jingzhi^{1,2,3}, MENG Qinglong², CUI Wenyu⁴, ZHU Shuangjie^{5,*}

(1. Postdoctoral Workstation of Chuzhou University, Chuzhou 239000, China;

2. School of Economics and Management, Jilin Engineering Normal University, Changchun 130052, China;

3. School of Food and Biological Science Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

4. Key Laboratory of Chinese Medicine Prevention and Treatment of Infectious Diseases of State Administration of Traditional Chinese Medicine, Changchun Hospital of Infectious Diseases, Changchun 130123, China;

5. School of Biological Science and Food Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

Abstract: *Dioscorea opposita* Thunb, as homologous plant of traditional medicine and food in our country, is the important raw material for healthy food. *D. opposita* mainly contains variety of functional components such as polysaccharides, saponins, polyphenols, proteins, and trace elements. Many researchers have confirmed that *D. opposita* has the effects of immune regulation, anti-tumor, anti-oxidation, anti-aging, lowering blood sugar, lowering blood lipids, and regulating the spleen and stomach. Consequently, *D. opposita* has good development potential and application prospects in the fields of medicine, health and food products. Recently, the extraction, separation and pharmacological effects of functional components from *D. opposita* have been drawing much attention from scholars around the world. However, different

收稿日期: 2022-01-24

基金项目: 滁州学院科研启动基金项目 (2022qd017); 安徽省博士后研究人员科研活动经费资助项目 (2022B616); 吉林省中医药科技项目 (2019162); 国家科技重大专项课题 (2017ZX10305501005)。

作者简介: 潘景芝 (1980-), 女, 博士, 讲师, 主要从事药食同源食品功能性开发方面的研究, E-mail: 352347739@qq.com。

* 通信作者: 朱双杰 (1975-), 男, 博士, 教授, 主要从事食品加工及食品工艺方面的研究, E-mail: zhushuangjie@163.com。

species, different extraction and separation methods affect the structure and efficacy of functional components. This paper systematically reviews the functional components and the hottest pharmacological effects of *D. opposita* to broaden the application scope of *D. opposita* in many fields and industries, and analyze the relationship between functional components and efficacy, to provide a reference for the development and utilization of *D. opposita* functional food and health medicine.

Key words: *Dioscorea opposita*; functional components; pharmacological effects; review

药食同源植物山药为薯蓣科薯蓣属草质藤本植物薯蓣(*Dioscorea opposita* Thunb)的干燥根茎^[1],别名土薯、山薯、玉延等,其以糯香可口的风味和稳定的保健功效一直受到人们的青睐。在我国夏商时期便有种植,明清之后作为药材应用,且《神农本草经》和《本草纲目》中均将其列为上品,主要分布于中国华北、西北以及长江流域的湖南、江西等地区^[2]。药味甘,性平,归脾、肺、肾经,具有“补脾养胃,生津益肺,补肾涩精”功效^[3]。山药作为传统药食同源材料,在我国具有数千年的食用历史,随着人民生活水平的不断提升,其作为健康食品的重要原料备受青睐。近年来,随着山药在糖尿病和癌症等疾病临床治疗中的应用,国内外学者对于山药功能性成分及药理作用的研究不断深入^[4-5]。本文通过对近年来山药多糖类、皂苷类、多酚类、脂肪酸、蛋白质和氨基酸、微量元素等功能性成分,以及山药免疫调节、抗肿瘤、抗氧化、抗衰老、降血糖、降血脂以及调脾胃等药理作用的最新研究进展进行阐述,以期拓宽山药在多领域、多行业中的应用范围,剖析功能性成分与药效间的相互关系,为山药功能性食品的开发和利用提供参考。

1 功能性成分

山药中不仅含有丰富的营养成分,还含有多种功能活性成分,如多糖类、皂苷类、多酚类、脂肪酸、蛋白质、氨基酸和微量元素等。

1.1 多糖类成分

多糖作为山药重要的功能性成分,是山药发挥药理作用的活性成分之一^[6-8]。由于多糖类成分的复杂性,山药多糖的结构分析仍处于探索阶段,尚不明确。近年来,山药多糖的研究大部分以一级结构为

主,即分子量、单糖组分、残基连接位置、糖苷键构型等方面。在对怀山药多糖的提取中,采用水提法分离出一种水溶性多糖 DOTP-B^[9];另有研究采用热水法浸提^[10],联合气相色谱/质谱(GC/MS)、傅立叶红外光谱仪、多角度激光光散射仪(MALLS)和核磁共振技术等对怀山药多糖结构进行初步表征分析,结果表明,山药多糖中主要单糖成分为葡萄糖 84.5%、木糖 11.4%、半乳糖 2.3% 和阿拉伯糖 1.4%。Ma 等^[11]对山药黏液多糖(DOMP)的研究表明,葡萄糖和蛋白质含量分别为 11.05% 和 13.39%,平均分子量为 9062 Da。同时,部分研究通过现代光谱技术与甲基化实验方法对山药多糖的主链构象二级结构进行了解析。Zhang 等^[12]采用热水法提取山药根茎中的粗多糖 DOP,并采用甲基化和 NMR 光谱分析了新型多糖 DOP0.1-S-1 的结构特征。铁棍山药纯多糖组分 CYP-A 是不含核酸和蛋白的均一多糖,且存在多股螺旋构象^[13]。表 1 对近年来山药多糖类成分的研究报道进行了概括。

1.2 皂苷类

皂苷类成分既是药食同源植物山药中的营养成分,也是其重要的功能性化合物^[14-15]。在已发现的山药活性成分中,皂苷类约占 50% 以上^[16-17]。Xue 等^[18]从山药中分离得到了 9 种新的呋喃甾醇皂苷(如表 2 所示)和 11 种甾体皂苷。山药不同品种皂苷类成分含量也存在一定差异。Nan 等^[19]通过比较分析瑞昌山药、铁棍山药、龙岩山药和安源山药的营养和药用特性,在龙岩山药和安源山药未检测到薯蓣皂苷,而瑞昌山药和铁棍山药中薯蓣皂苷含量较高。

1.3 多酚类

表 1 山药多糖类成分单糖组分及结构特征

Table 1 Monosaccharide components and structural characteristics of polysaccharides in Chinese yam						
种类	名称	提取方法	提取率(%)	单糖组分	结构特征	参考文献
怀山药	DOTP-B	水提法	6.0	葡萄糖:半乳糖=14.6:1.0	平均分子量为5623 Da,主链部分由→4)-α-D-葡萄糖(1→残基)组成,支链含约6%→6)-β-D-半乳糖(1→残基)	[9]
	山药多糖	热水浸提	4.2	木糖:葡萄糖:阿拉伯糖:半乳糖=8.1:60.4:1:1.6	C3和C4位置支化的β-葡聚糖,即β-1,3-葡聚糖、β-1,4-葡聚糖,另外含少量α-葡聚糖,分子量为6.6×10 ⁴ Da	[10]
山药	DOMP	水提醇沉	5.71	阿拉伯糖:葡萄糖:甘露糖=3.33:23.45:62.52	平均分子量为9062 Da,DOMP颗粒是直径为0.18 μm的球体,在溶液中聚集	[11]
	DOP0.1-S-1	热水浸提	1.4	半乳糖组成	平均分子量为10000 Da,甲基化和NMR光谱分析表明DOP0.1-S-1组成为1,4-β-半乳糖	[12]
铁棍山药	CYP-A	水提醇沉	13.95	鼠李糖:阿拉伯糖:甘露糖:葡萄糖:半乳糖:半乳糖醛酸=3.08:4.11:25.59:8.72:3.44:1	分子量为1.87×10 ³ kDa,含有1→2,1→3,1→4,1→6和1→3,6型的糖苷键及α、β两种糖苷键构型,具有多分支或侧链的大分子,存在多股螺旋构象	[13]

表 2 山药中的呋甾萜醇皂苷成分

Table 2 Furostanol steroid saponins components in Chinese yam

序号	名称	分子式
1	26-O- β -D-glucopyranosyl-25(R)-furost- $\Delta^{5(6)}$ -en-3 β , 22 α -methoxyl, 26-dihydroxy-3-O- β -D-glucopyranosyl(1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucopyranoside	C ₄₆ H ₇₆ O ₁₉
2	26-O- β -D-glucopyranosyl-25(R)-furost- $\Delta^{5(6)}$ -en-3 β , 22 α -methoxyl, 26-dihydroxy-3-O- β -D-glucopyranosyl(1 $\rightarrow$ 2)- β -D-glucopyranoside	C ₄₆ H ₇₆ O ₁₉
3	26-O- β -D-glucopyranosyl-25(R)-furost- $\Delta^{5(6)}$ -en-3 β , 22 α -hydroxyl, 26-trihydroxy-3-O- α -L-rhamnopyranosyl(1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucopyranosyl(1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucopyranoside	C ₅₁ H ₈₄ O ₂₃
4	26-O- β -D-glucopyranosyl-25(R)-furost- $\Delta^{5(6)}$ -en-3 β , 22 α -hydroxyl, 26-trihydroxy-3-O- α -L-rhamnopyranosyl(1 $\rightarrow$ 2)- β -D-glucopyranosyl(1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucopyranoside	C ₅₁ H ₈₄ O ₂₃
5	26-O- β -D-glucopyranosyl-25(R)-furost- $\Delta^{5(6)}$ -en-3 β , 22 α -hydroxyl, 26-trihydroxy-3-O- α -L-rhamnopyranosyl(1 $\rightarrow$ 2)- β -D-glucopyranosyl(1 $\rightarrow$ 3)- β -D-glucopyranosyl(1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucopyranoside	C ₅₇ H ₉₄ O ₂₈
6	26-O- β -D-glucopyranosyl-25(R)-furost- $\Delta^{5(6)}$ -en-3 β , 22 α -hydroxyl, 26-trihydroxy-3-O- β -D-glucopyranosyl(1 $\rightarrow$ 2)- β -D-glucopyranosyl(1 $\rightarrow$ 3)- β -D-glucopyranosyl(1 $\rightarrow$ 4)-[α -L-rhamnopyranosyl(1 $\rightarrow$ 2)]- β -D-glucopyranoside	C ₆₃ H ₁₀₄ O ₃₃
7	26-O- β -D-glucopyranosyl-25(S)-furost- $\Delta^{5(6)}$ -en-3 β , 22 α -hydroxyl, 6-trihydroxy-3-O- α -L-rhamnopyranosyl(1 $\rightarrow$ 2)- β -D-glucopyranoside	C ₄₅ H ₇₄ O ₁₈
8	26-O- β -D-glucopyranosyl-25(S)-furost- $\Delta^{5(6)}$ -en-3 β , 22 α -hydroxyl, 26-trihydroxy-3-O- α -L-rhamnopyranosyl(1 $\rightarrow$ 2)- β -D-glucopyranosyl(1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucopyranoside	C ₅₁ H ₈₄ O ₂₃
9	26-O- β -D-glucopyranosyl-25(S)-furost- $\Delta^{5(6)}$ -en-3 β , 22 α -hydroxyl, 26-trihydroxy-3-O- α -L-rhamnopyranosyl(1 $\rightarrow$ 2)- β -D-glucopyranosyl(1 $\rightarrow$ 3)- β -D-glucopyranosyl(1 $\rightarrow$ 4)- β -D-glucopyranoside	C ₅₇ H ₉₄ O ₂₈

多酚类化合物是一类含有一个或多个羟基取代基的植物化合物,是广泛存在于植物体内的重要二级芳香代谢物^[20-21]。山药多酚类化合物以其丰富的生物学功能受到广大学者的关注^[22-23]。Chaniad 等^[24]从山药豆中分离出 11 种具有抗氧化潜力的物质,其中 7 种属于多酚类。Ngan 等^[25]从广山药中分离出三种新的多酚类化合物,结构如表 3 所示。

1.4 脂肪酸

山药中富含多种脂肪酸,对人体健康十分有益^[26],其中包括亚油酸、亚麻酸等人体必需的不饱和脂肪酸(如表 4 所示)。山药还能够促进机体内短链脂肪酸的产生。Zhang 等^[27]结果表明,山药能够提高抗生毒素相关性腹泻小鼠体内短链脂肪酸水平。刘露等^[28]研究发现,山药低聚糖在模拟结肠环境中被乳

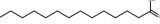
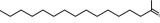
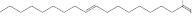
表 3 山药中的多酚类成分

Table 3 Polyphenols components in Chinese yam

序号	名称	结构	参考文献	序号	名称	结构	参考文献
1	3,5-二甲氧基槲皮素		[24]	6	2,4,6,7-四羟基-9,10-二氢菲		[24]
2	儿茶素		[24]	7	杨梅素		[24]
3	槲皮素		[24]	8	diospersimilosides A		[25]
4	山奈酚		[24]	9	diospersimilosides B		[25]
5	2,4,3',5'-四羟基联苺		[24]	10	diosbiphenanthrene		[25]

表 4 山药中脂肪酸成分

Table 4 Fatty acid components in Chinese yam

序号	名称	结构式	分子式	分子量(Da)
1	辛酸		C ₈ H ₁₆ O ₂	144
2	壬酸		C ₉ H ₁₈ O ₂	158
3	壬二酸		C ₉ H ₁₆ O ₄	188
4	十二酸		C ₁₂ H ₂₄ O ₂	200
5	十四酸		C ₁₄ H ₂₈ O ₂	228
6	十五酸		C ₁₅ H ₃₀ O ₂	242
7	十六酸		C ₁₆ H ₃₂ O ₂	256
8	亚麻酸		C ₁₈ H ₃₀ O ₂	278
9	亚油酸		C ₁₈ H ₃₂ O ₂	280
10	油酸		C ₁₈ H ₃₄ O ₂	282
11	十九酸		C ₁₉ H ₃₈ O ₂	298
12	11-二十烯酸		C ₂₀ H ₃₈ O ₂	310
13	二十酸		C ₂₀ H ₄₀ O ₂	312
14	二十二酸		C ₂₂ H ₄₄ O ₂	340

酸菌作为碳源利用,能够产生对人体健康产生积极作用的短链脂肪酸(如乳酸、乙酸和丙酸等)。

1.5 蛋白质和氨基酸

山药中还富含各类蛋白质和氨基酸,且必需氨基酸种类齐全,营养价值较高^[29]。Li 等^[30]对山药主要糖蛋白 30CYGP N-聚糖型的组成进行分析,结果共观察到 6 个 30CYGP N-聚糖,其中 3 个用木糖修饰,3 个用木糖和岩藻糖修饰。罗海玲等^[31]采用蛋白质双向电泳技术,比较分析了山药块茎不同发育过程中,物质积累相关的关键蛋白的变化情况,结果表明,不同发育时期共有 179 个蛋白发生明显变化,对其中差异较大的 52 个蛋白点进行质谱鉴定,31 个差异表达的蛋白被鉴定,且主要是与糖代谢和淀粉合成有关的酶。蒋方程等^[32]比较研究蕲春山药、铁棍山药和淮山药不同品种氨基酸的含量,结果表明,蕲春山药中氨基酸总量最高,必需氨基酸占比最高,且组氨酸的含量也最高,同时该三种山药中均未检出色氨酸。

1.6 微量元素

随着科学技术的不断发展和中医理论的不完善,微量元素在药材治疗和药效中的补充与调节作用已引起了许多学者的关注^[33]。Chen 等^[34]比较分析不同产地山药微量元素含量,结果表明,与连江产山药相比,河南产山药微量元素 Fe 和 Mn 的含量明显提高,分别达到 1.6 和 3.0 倍。康艳萍^[35]采用火焰原子吸收光谱法测得山药中富含 Zn、Cu、Co、Mn 等元素。蒋方程等^[32]对蕲春山药、铁棍山药和淮山药三种不同山药品种微量元素的含量进行比较发现,蕲春山药中 Fe、Cu、Co 含量最高,铁棍山药中 Zn 含量最高,淮山药中 Fe 含量最低。

1.7 其他

尿囊素是尿酸的衍生物,分子式为 C₄H₆N₄O₃,其作为咪唑类杂环化合物,也是山药质量控制的重要指标之一^[36]。杨静等^[37]从怀山药中分离得到丰富的植物甾醇类物质,包括菜油甾醇、豆甾醇和谷甾醇等。冯文明等^[38]从山药中分离出山药庚酮 A 等 8 个二苯基庚烷类化合物。

2 药理活性

近年来,山药多种药理活性,如免疫调节、抗肿瘤、抗氧化、抗衰老、降血糖、降血脂以及调脾胃等受到国内外学者的关注。

2.1 免疫调节作用

山药中多种功能性成分不仅能够提高非特异性免疫功能,对特异性免疫功能也可以起到增强作用^[39-41]。樊乃境等^[42]研究表明山药蛋白肽可以通过促进免疫能力低下小鼠的中枢和外周免疫器官的发育、改善机体免疫细胞状态、调节体内免疫活性物质的分泌表达,提高机体免疫能力,发挥其免疫活性。Niu 等^[43]也通过体内和体外实验研究,验证了山药糖蛋白(DOT)可以作为免疫调节物质进行开发的观点。山药的免疫调节作用与剂量呈现出一定的依赖性。Hao 等^[44]探讨分析山药水溶性多糖(WYPs)在小鼠模型体内免疫调节的潜力,结果表明,WYPs 能够明显增强小鼠模型的免疫状态,并呈现剂量依赖性,可以作为免疫调节功能性食品的潜在成分进行开发。徐俊杰等^[45]探究了不同剂量的山药多糖对低强度连续微波辐射致小鼠免疫系统功能损伤的保护作用及其免疫机制。与其他中药相比,山药表现出较好的免疫调节效果。高长墨等^[46]通过比较淮山药、薏米、蒲公英、酸枣仁等四种药食同源常见中药的免疫功能发现,淮山药能够促进免疫抑制小鼠脾脏指数恢复,提供吞噬细胞功能。Wang 等^[47]研究发现,山药提取物(16% 薯蓣皂苷元和 10% 多糖)能够增强虹鳟鱼的刺激免疫调节作用。赵伟鑫等^[48]研究发现,山药多糖能够提高断奶仔猪机体免疫性能,改善仔猪肠道形态结构并增强消化酶活性,有利于猪用绿色中草药饲料添加剂的开发。表 5 对近年来山药功能性成分免疫调节作用的报道进行了概括。

2.2 抗肿瘤作用

山药及其叶部对不同肿瘤细胞表现出调节细胞通路关键基因、抗细胞增殖等作用^[49]。孙雯雯等^[50]比较分析山药提取物(含总多糖 324.90 mg/g)联合树突状细胞-细胞因子诱导的杀伤细胞(DC-CIK)对结肠癌 HT29 细胞干细胞荷瘤裸鼠的治疗效果,结果表明,联合治疗组 PI3K/Akt 通路中关键基因 *PI3KR1*, Wnt/ β -catenin 通路中关键基因 *Wnt1*, Notch 通路中关键基因 *Notch1* 的 mRNA 表达均有所下调,即联合治疗组抑瘤效果最佳。谭辉等^[51]的研究结果表明,紫山药花青素各剂量组对 HepG2 肝癌细胞,MDA-MB-231 乳腺癌细胞增殖均有一定的抑制作用,且

表 5 山药功能性成分的免疫调节作用
Table 5 Immunomodulatory effects of functional components from Chinese yam

功能性成分	实验设计	药理作用	机理	参考文献
山药蛋白肽	研究山药蛋白肽对环磷酰胺所致免疫功能低下昆明种小鼠的免疫调控作用和机制。	增强机体的免疫防御能力。	免疫器官指数↑ 乳酸脱氢酶(LDH)和酸性磷酸酶(ACPase)活性↑ 淋巴细胞增殖能力↑ 细胞因子IL-1α、IL-6、IFN-γ水平↑ 免疫球蛋白IgG、IgM水平↑	[42]
山药糖蛋白(DOT)	评估山药糖蛋白的免疫调节活性及其可能的分子机制。	促生活性强大,明显提高正常小鼠的细胞免疫、体液免疫和吞噬系统功能。	激活由T细胞特异性介导的细胞免疫,通过促进抗体产生来增强体液免疫; 通过MAPKs和NF-κB信号通路刺激巨噬细胞分泌IL-6、TNF-α和NO; 巨噬细胞的胞饮功能↑	[43]
水溶性多糖(WYPs)	比较分析正常小鼠和环磷酰胺抑制小鼠的免疫调节功能。	具有明显的免疫调节潜力,且呈现剂量依赖性。	脾脏和胸腺指标↑ 改善巨噬细胞吞噬、淋巴细胞增殖和NK细胞活性,刺激巨噬细胞、淋巴细胞和血清中细胞因子、免疫相关酶和免疫球蛋白的产生。	[44]
山药多糖	探究山药多糖对低强度连续微波辐射致小鼠免疫系统功能损伤的保护作用。	对小鼠免疫功能损伤具有一定的预防和保护作用。	微波辐射损伤小鼠的巨噬细胞吞噬指数↑ T淋巴细胞增殖的刺激指数及血清IgG水平↑ 血清IL-4水平↓	[45]
淮山药水煎液	研究怀山药对环磷酰胺抑制ICR小鼠免疫的调控作用。	对免疫抑制小鼠具有明显的免疫恢复作用。	脾脏淋巴细胞增殖↑ 提高脾脏指数↑ Th1细胞活性↑ 增强细胞免疫功能↑ 增强腹腔巨噬细胞的吞噬作用↑	[46]
山药提取物(16%薯蓣皂苷元和10%多糖)	研究山药提取物对虹鳟鱼免疫反应的影响。	对血清免疫因子和肠道免疫基因显著调节。	血清免疫因子IL-6、IL-12、TNF-α、C4水平↑ 肠道免疫相关基因 <i>GPx1</i> 、 <i>TNF-α</i> 转录↑ H因子、HSP90BA和HSC70A表达↑	[47]
山药多糖	评估山药多糖对28日龄三元杂交断奶仔猪免疫性能和肠道形态结构的影响。	提高断奶仔猪机体免疫性能,改善仔猪肠道形态结构并增强消化酶活性。	仔猪血清免疫指标浓度↑ 小肠绒毛高度↑ 绒毛高度/隐窝深度↑ 小肠淀粉酶↑ 脂肪酶和蛋白酶活性↑ 小肠隐窝深度↓	[48]

注:↑表示提高或增强,↓表示降低或减弱。

细胞抑制率呈现药物浓度、作用时间依赖性。周丽等^[52]研究表明,淮山药叶乙醇提取物(主要含黄酮和皂苷类物质)对肿瘤细胞 HUVEC、A549、MCF-7 和 SW480 均显示出较强的抑制活性作用,且量效关系明显。另外,山药还能够通过调节炎症反应、氧化应激反应,增加能量补给等途径改善癌症相关机体的疲劳状况。Wang 等^[53]选用癌症相关小鼠研究山药多糖(CYP)的抗疲劳活性,结果表明,CYP 增加了小鼠力竭游泳时间,腓肠肌的 ATP 含量,降低了肌肉中 IL-1β、MDA、BUN 和 LDH 的水平,并上调了 SOD 活性。

2.3 抗氧化作用

山药中多种功能性成分均具有抗氧化作用^[54-56],其中以山药多糖类成分抗氧化作用的研究相对较多。在山药多糖美拉德反应产物(DOP-MRP)抗氧化作用的评价研究中,通过测定对羟自由基(HRS)、DPPH 自由基清除和铁离子还原(FRAP)等作用,得到 DOP-MRP 抗氧化活性较高,即能够提供更多氢原子以稳定自由基^[57]。陈建双等^[58]的研究结果表明,山药多糖的 DPPH 自由基清除率和羟自由基清除率明显高于水提取物。王静等^[59]研究发现,山药多糖通过提高细胞抗氧化能力,抑制细胞的氧化应激,抑制生物大分子氧化损伤,从而有效保护丙烯酰胺诱导的巨噬细胞氧化损伤。与此同时,山药多酚类成分的抗氧化作用也引起了学者们的重视。孟永海等^[60]的

研究结果表明,山药总多酚提取物对 DPPH 自由基和 ABST 自由基均表现出较好的清除能力,且对 Fe³⁺的还原能力也较强。

2.4 抗衰老作用

在全球老龄化严重趋势下,进一步提高老龄人群生活质量,延缓衰老已成为全球学者的研究热点之一^[61]。山药作为传统药食同源中药,其抗衰老功效的探索也受到一定青睐^[62]。通过对 D-半乳糖诱导衰老动物模型的研究,一方面,山药多糖能够增强实验动物的学习能力,减轻实验动物的空间记忆障碍,且其抗衰老作用可能是通过修复器官功能^[63],提高 *klotho* 基因在实验动物体内的表达来实现^[63-64];另一方面,紫山药多糖能够显著提高 D-半乳糖衰老模型大鼠肝、脑中 T-AOC、GSH-Px 活力、GSH 含量,降低过氧化产物 MDA 含量,从而发挥抗大鼠肝、脑衰老损伤的作用,其机理可能与 p53/p21 信号通路有关^[65]。

2.5 降血糖作用

近年来,糖尿病(DM)已成为一种病因复杂的常见病,患病率在世界范围内不断增加,因此糖尿病患者早期发现及饮食管理变得十分重要^[66]。山药不仅对糖尿病模型动物显示出较好的降糖作用^[67],还能够减轻肥胖糖尿病肾病模型动物的体重,改善其肾功能,对肠道微生物菌群有所调节,且作用效果呈剂量依赖性^[68]。赵磊等^[69]对南瓜、山药、葛根和桑叶配

方提取物研究发现,其通过改善 ICR 小鼠糖代谢、脂代谢以及氧化应激等代谢途径,能够预防小鼠高脂高糖诱导形成糖调节受损(IGR)。山药还能够在降糖的同时对微量元素起到补给的作用。Zhang 等^[70]研究发现,山药多糖-锌包合物对糖尿病大鼠具有强效降血糖作用,降低葡萄糖和胰岛素水平,降低丙二醛含量,增加肝脏内 SOD 和 T-AOC 活性,因而山药多糖-锌包合物可以开发为具有降糖作用的锌补充剂功能食品。

2.6 降血脂作用

近年来,流行病学和实验研究均表明,饮食调节在胆固醇稳态调节中起着重要作用^[71]。Uthirapathy 等^[72]研究发现,山药块茎的乙醇提取物对于高脂饮食诱导的高脂血症模型动物,能够明显降低胆固醇和低密度脂蛋白水平,从而表现出较好的降血脂效果。雷艳等^[73]的研究结果表明,决明子山药黄豆复配能够降低 SD 大鼠高脂饮食诱发的高脂血症,相关指标明显改善。

2.7 脾胃调节作用

山药可以增加大鼠的体重,增强大鼠胃肠蠕动,改善胃肠功能,从而改善脾虚症状,达到健脾益胃的目的^[74]。山药多糖对小鼠肝缺血再灌注损伤中的脾脏组织损伤具有保护作用^[75]。王巧俐等^[76]采用山药芝麻糊对习惯性便秘脾肺气虚型患者进行治疗,结果患者症状量化总积分和中医证候量化积分均明显降低,且无明显不良反应。

2.8 其他作用

山药还具有多种改善机体健康状况的特殊作用^[77]。Zhong 等^[78]通过对山药薯蓣皂苷的研究发现,其能够有效降低糖尿病肾病大鼠胰腺损伤、肾功能标志物和肾脏病例变化。高子涵等^[79]研究表明,山药多糖对糖尿病肾病小鼠肾功能具有一定的保护作用,其机制可与抑制高糖激活的糖醛还原酶 AR/P38MAPK/CREB 信号通路有关。

3 结语与展望

目前,对于山药功能性成分的研究主要集中在多糖等大分子物质上,但由于大分子物质结构的复杂性和分子质量的分散性,为其分子结构与药理活性之间关系的明确带来了困难。现代药理研究证实,山药具有免疫调节、抗肿瘤、抗氧化、抗衰老、降血糖、降血脂以及调脾胃等多种药理活性,充分展示了山药在医药、保健品和食品等多领域的功能特性。

对于山药功能性成分的研究仍存在以下需要解决的问题:首先,上述药理作用主要集中在体外细胞和体内动物模型实验,下一步应加强山药功能性成分的分离,并适当开展临床实验,深入探析山药对人体健康的调节作用机制及其安全性,为其推广应用提供重要保障;其次,进一步明确山药功能性成分与药理活性的构效与量效关系,及其作用的分子机制,为山药功能性食品和保健药品的精准开发利用提供参

考。今后可以在传统分析方法创新的基础上,深入解析山药功能性物质结构,强化山药小分子化合物的分离鉴定,丰富其功能性成分的种类。另外,也可以从功能性成分结构与药理活性之间的作用规律,探究山药更多功能活性,为相关功能性产品的开发提供理论基础。

山药作为药食同源的功能性食品,还存在很多亟待深入系统研究的问题,为其食用、保健药用的安全性提供保障。因此,充分挖掘山药各类功能性物质成分,重视山药下游功能性产品的开发,使其在功能性食品和保健药品等行业发挥应有的作用。

参考文献

- [1] 董俊美,李锦超,孟义江,等.山药种质资源鉴评与品种选育研究进展[J].河南农业科学,2021,50(11):6-14. [DONG J M, LI J C, MENG Y J, et al. Research progress on germplasm resources identification and breeding of Chinese yam[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2021, 50(11): 6-14.]
- [2] 冯学锋,黄璐琦,格小光,等.山药道地药材形成源流考[J].中国中药杂志,2008(7):859-862. [FENG X F, HUANG L Q, GE X G, et al. Textual research on origin and development of genuine medicinal herbs of Shanyao[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2008(7): 859-862.]
- [3] 国家药典委员会.中华人民共和国药典:2020年版一部[M].北京:中国医药科技出版社,2020. [National Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China: Volume 1, 2020 edition[M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020.]
- [4] ZENG M, REN Y, ZHANG B, et al. In vitro non-small cell lung cancer inhibitory effect by new diphenylethane isolated from stems and leaves of *Dioscorea oppositifolia* L. via ER β -STAT3 pathway[J]. Frontiers in Pharmacology, 2021, 12: 34.
- [5] YUE G G L, WONG L S, LEUNG H W, et al. Evaluation of the safety profiles of estrogenic Chinese herbal medicines in breast cancer[J]. Phytomedicine, 2019, 56: 103-117.
- [6] ZHOU S, HUANG G, CHEN G. Extraction, structural analysis, derivatization and antioxidant activity of polysaccharide from Chinese yam[J]. Food Chemistry, 2021, 361: 130089.
- [7] JIA X, WANG X, LIU Y, et al. Structural characterization of an alkali-extracted polysaccharide from *Dioscorea opposita* Thunb. with initial studies on its anti-inflammatory activity[J]. Journal of Carbohydrate Chemistry, 2021: 1-17.
- [8] 李哲,陈斐斐,韩小康,等.山药多糖关节腔注射对兔膝关节骨性关节炎炎症因子及关节软骨代谢的影响[J].中国实验方剂学杂志,2021,27(23):88-96. [LI Z, CHEN F F, HAN X K, et al. Effect of joint cavity injection of *Dioscoreae rhizoma* polysaccharides on inflammatory factors and articular cartilage metabolism in rabbit knee osteoarthritis[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2021, 27(23): 88-96.]
- [9] ZHI F, YANG T L, WANG Q, et al. Isolation, structure and activity of a novel water-soluble polysaccharide from *Dioscorea opposita* Thunb[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019: 1201-1209.
- [10] 许春平,孙懿岩,白家峰,等.怀山药多糖的提取、硫酸酯化

- 修饰及抗氧化活性研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 50–55. [XU C P, SUN Y Y, BAI J F, et al. Study on the extraction, sulfation modification and antioxidant activity of yam polysaccharides[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 40(3): 50–55.]
- [11] MA F, WANG R, LI X, et al. Physical properties of mucilage polysaccharides from *Dioscorea opposita* Thunb[J]. Food Chem, 2020, 311: 126039.
- [12] ZHANG C Q, CHEN X, DING K. Structural characterization of a galactan from *Dioscorea opposita* Thunb. and its bioactivity on selected *Bacteroides* strains from human gut microbiota[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 218: 299–306.
- [13] 于海芬. 铁棍山药多糖的纯化、结构及胃肠调节活性研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2019. [YU H F. Study on purification, structure and gastrointestinal regulating activity of *Dioscorea opposita* Thunb. cv. Tiegun polysaccharide[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2019.]
- [14] HOU L X, LI S, ZHANG F R, et al. Effect of exogenous jasmonic acid on physiology and steroidal saponin accumulation in *Dioscorea zingiberensis*[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 186: 1–10.
- [15] SALEHI B, SENER B, KILIC M, et al. *Dioscorea* plants: A genus rich in vital nutra-pharmaceuticals-A review[J]. Iranian Journal of Pharmaceutical Research: IJPR, 2019, 18(Suppl1): 68.
- [16] WANG R, LI X, LIU L, et al. Preparation and characterization of edible films composed of *Dioscorea opposita* Thunb. mucilage and starch[J]. Polymer Testing, 2020, 90: 106708.
- [17] ZHANG F, SHEN B, JIANG W, et al. Hydrolysis extraction of diosgenin from *Dioscorea nipponica* Makino by sulfonated magnetic solid composites[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2019, 21(12): 1–11.
- [18] XUE Z, CAO Z, JIN M, et al. New steroid saponins from *Dioscorea zingiberensis* yam and their medicinal use against I/R via anti-inflammatory effect[J]. Food & Function, 2021, 12(18): 8314–8325.
- [19] NAN S, WANG P, ZHU Q, et al. Comprehensive characterization of yam tuber nutrition and medicinal quality of *Dioscorea opposita* and *D. alata* from different geographic groups in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(11): 2839–2848.
- [20] LEBOT V, MALAPA R, MOLISALÉ T. Development of HP-TLC method for rapid quantification of sugars, catechins, phenolic acids and saponins to assess yam (*Dioscorea* spp.) tuber flour quality[J]. Plant Genetic Resources, 2019, 17(1): 62–72.
- [21] SHI Y, ZHOU S, FAN S, et al. Encapsulation of bioactive polyphenols by starch and their impacts on gut microbiota[J]. Current Opinion in Food Science, 2021, 38: 102–111.
- [22] LI Q M, LI Y, ZOU J H, et al. Influence of adding Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) flour on dough rheology, gluten structure, baking performance, and antioxidant properties of bread[J]. Foods, 2020, 9(3): 256.
- [23] CAO Y, LI H, HAO Z, et al. Two new diarylheptanoids and a new phenylhexanol derivative from the bulbils of *Dioscorea opposita* Thunb. and their α -glucosidase inhibitory activity[J]. Phytochemistry Letters, 2021, 44: 142–148.
- [24] CHANIAD P, TEWTRAKUL S, SUDSAI T, et al. Anti-inflammatory, wound healing and antioxidant potential of compounds from *Dioscorea bulbifera* L. bulbils[J]. Plos One, 2020, 15(12): e0243632.
- [25] NGAN N T T, HOANG N H, HIEN N T, et al. Cytotoxic phenanthrenes and phenolic constituents from the tubers of *Dioscorea persimilis*[J]. Phytochemistry Letters, 2020, 40: 139–143.
- [26] HOU L, LI S, TONG Z, et al. Geographical variations in fatty acid and steroid saponin biosynthesis in *Dioscorea zingiberensis* rhizomes[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 170: 113779.
- [27] ZHANG N, LIANG T, JIN Q, et al. Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) alleviates antibiotic-associated diarrhea, modifies intestinal microbiota, and increases the level of short-chain fatty acids in mice[J]. Food Research International, 2019, 122: 191–198.
- [28] 刘露, 张雁, 魏振承, 等. 肠道益生菌体外发酵山药低聚糖产短链脂肪酸的研究[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(4): 49–56. [LIU L, ZHANG Y, WEI Z C, et al. Study on production of short chain fatty acids from yam oligosaccharides by intestinal probiotics fermentation *in vitro*[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(4): 49–56.]
- [29] DOSS A, TRESINA P S, MOHAN V R. Amino acid composition of wild yam (*Dioscorea* spp.)[J]. Food Research, 2019, 3(5): 617–621.
- [30] LI C, LU Y, CHEN X, et al. Analysis of the N-glycoforms and immunoactivity of Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) glycoprotein 30CYGP[J]. J Proteome Res, 2020, 19(1): 28–35.
- [31] 罗海玲, 龚明霞, 周芸伊, 等. 山药块茎发育过程中淀粉积累及差异蛋白分析[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(6): 61–69. [LUO H L, GONG M X, ZHOU Y Y, et al. Analysis of starch accumulation and differentially expressed proteins during the development of Chinese yam tuber[J]. Journal of South China Agricultural University, 2018, 39(6): 61–69.]
- [32] 蒋方程, 李傲然, 何静仁, 等. 不同品种山药的营养成分分析及其水提物的体外抗氧化能力研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(4): 6–11. [JIANG F C, LI A R, HE J R, et al. Analysis of nutritious compositions in *Rhizoma dioscoreae* from different varieties and antioxidant properties of their water extracts *in vitro*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(4): 6–11.]
- [33] 杨李东, 高林, 周长兵, 等. 火焰原子吸收光谱法测定山药中微量元素的含量[J]. 化工技术与开发, 2019, 48(3): 42–44. [YANG L D, GAO L, ZHOU C B, et al. Content determination of metal elements in Chinese yam by flame atomic absorption spectrometry[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2019, 48(3): 42–44.]
- [34] CHEN W Z, YANG G Z. Comparison and analysis of ten elements in *Dioscorea alata* Linn. from Lianjiang and *Dioscorea opposita* Thunb. from Henan[J]. Storage and Process, 2018, 18(1): 113–117.
- [35] 康艳萍. 黄芪、山药、黄精、银杏叶、五味子中微量元素测定研究[J]. 广州化工, 2020, 48(15): 127–129. [KANG Y P. Study on determination of trace elements in the traditional Chinese medicine[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 48(15): 127–129.]
- [36] 马蕊, 王露露, 陈随清. 山药商品规格及其质量特性分析[J]. 中成药, 2020, 42(7): 1936–1942. [MA R, WANG L L,

- CHEN S Q. Analysis of commodity specifications and quality characteristics of *Dioscorea opposita* Thunb[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2020, 42(7): 1936–1942.]
- [37] 杨静, 白冰, 刘绣华, 等. HPLC 法同时测定山药中的植物甾醇[J]. 食品科技, 2019, 44(6): 321–325. [YANG J, BAI B, LIU X H, et al. Determination of phytosterols in *Dioscorea opposita* Thunb[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(6): 321–325.]
- [38] 冯文明, 韩竹箴, 王峰涛. 山药化学成分研究[J]. 中草药, 2018, 49(21): 5034–5039. [FENG W M, HAN Z Z, WANG Z T. Chemical constituents from *Dioscorea opposita*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2018, 49(21): 5034–5039.]
- [39] MENG X, HU W, WU S, et al. Chinese yam peel enhances the immunity of the common carp (*Cyprinus carpio* L.) by improving the gut defence barrier and modulating the intestinal microflora[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2019, 95: 528–537.
- [40] 许远征, 庞红利, 李洪影, 等. 山药多糖对肿瘤小鼠的抗肿瘤作用和免疫调节作用的研究[J]. 医药论坛杂志, 2020, 41(9): 8–10, 15. [XU Y Z, PANG H L, LI H Y, et al. Research on anti-tumor and immunomodulatory effects of yam polysaccharides on tumor mice[J]. Journal of Medical Forum, 2020, 41(9): 8–10, 15.]
- [41] 孔晨先, 肖波, 柳全文, 等. 山药多糖对动物机体免疫调节作用的 Meta 分析[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(19): 206–213. [KONG C X, XIAO B, LIU Q W, et al. Meta-analysis of the immunomodulatory effect of Chinese yam (*Dioscorea opposita* rhizoma) polysaccharides on the animal body[J]. Food Research and Development, 2021, 42(19): 206–213.]
- [42] 樊乃境, 王冬梅, 高悦, 等. 山药蛋白肽对免疫能力低下小鼠的免疫调节作用[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(6): 101–107. [FAN N J, WANG D M, GAO Y, et al. Immunomodulatory effects of the iron yam peptides on mice with immunocompromised[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(6): 101–107.]
- [43] NIU X F, HE Z H, LI W F, et al. Immunomodulatory activity of the glycoprotein isolated from the Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb)[J]. Phytotherapy Research, 2017, 31(10): 1557–1563.
- [44] HAO L X, ZHAO X H. Immunomodulatory potentials of the water-soluble yam (*Dioscorea opposita* Thunb) polysaccharides for the normal and cyclophosphamide-suppressed mice[J]. Food and Agricultural Immunology, 2016, 27(5): 667–677.
- [45] 徐俊杰, 王珺, 杨占群. 山药多糖对低强度连续微波辐射小鼠免疫系统功能的影响[J]. 上海中医药杂志, 2019, 53(11): 82–85. [XU J J, WANG J, YANG Z Q. Effect of yam polysaccharides on immune system function of mice exposed to continuous low-density microwave radiation[J]. Shanghai Journal of Traditional Chinese Medicine, 2019, 53(11): 82–85.]
- [46] 高长翌, 李方琪, 严婧, 等. 淮山药等 4 种药食同源中药对免疫抑制小鼠免疫功能影响的对比研究[J]. 中国实验诊断学, 2020, 24(5): 837–841. [GAO C Z, LI F Q, YAN J, et al. Comparative study on the effects of *Dioscorea opposita* Thunb. and other three kinds of medicine and food homology of traditional Chinese medicine on immune function in immunosuppressive mice[J]. Chinese Journal of Laboratory Diagnosis, 2020, 24(5): 837–841.]
- [47] WANG F, LIU H, LIU F, et al. Effects of Chinese yam (*Dioscorea oppositifolia* L.) dietary supplementation on intestinal microflora, digestive enzyme activity and immunity in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Aquaculture Research, 2020, 51(11): 4698–4712.
- [48] 赵伟鑫, 曹猛猛, 靳艳, 等. 山药多糖对断奶仔猪免疫性能和肠道形态结构的影响研究[J]. 中国饲料, 2021(11): 37–41. [ZHAN W X, CAO M M, JIN Y, et al. Effect of Chinese yam polysaccharide on immune performance and intestinal morphology of weaned piglets[J]. China Feed, 2021(11): 37–41.]
- [49] KANU A N, EZEocha C V, OGUNKA N P. A review on bioactive compounds of yam varieties for human disease management[J]. Asian Food Science Journal, 2018: 1–10.
- [50] 孙雯雯, 窦金霞, 张琳, 等. 山药提取物联合 DC-CIK 细胞疗法对结肠癌 HT29 干细胞荷瘤裸鼠的体内抗肿瘤研究[J]. 中草药, 2017, 48(7): 1362–1368. [SUN W W, DOU J X, ZHANG L, et al. In vivo antitumor effect of Chinese yam extract combined with DC-CIK on nude mice bearing colon cancer HT29 stem cells[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2017, 48(7): 1362–1368.]
- [51] 谭辉, 耿耘, 杨洋. 紫山药花青素提取工艺及抗肿瘤活性筛选[J]. 现代中药研究与实践, 2018, 32(2): 41–44. [TAN H, GENG Y, YANG Y, et al. Extraction process and antitumor activity screening of anthocyanin from purple *Dioscorea alata* L.[J]. Research and Practice on Chinese Medicines, 2018, 32(2): 41–44.]
- [52] 周丽, 史新敏, 任香梅, 等. 淮山药叶乙醇提取物黄酮和皂苷含量及抗氧化抗肿瘤活性研究[J]. 食品科技, 2015, 40(8): 204–207. [ZHOU L, SHI X M, REN X M, et al. Antioxidant and cytotoxic activity of ethanol extract of *Rhizoma Dioscoreae* leaves[J]. Food Science and Technology, 2015, 40(8): 204–207.]
- [53] WANG Y, LIU Y, ZHANG Y, et al. Effects of the polysaccharides extracted from Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) on cancer-related fatigue in mice[J]. Food & Function, 2021, 12(21): 10602–10614.
- [54] ZHANG Z, WANG X, LIU C, et al. The degradation, antioxidant and antimutagenic activity of the mucilage polysaccharide from *Dioscorea opposita*[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 150: 227–231.
- [55] 陈丽叶, 常希光, 冯晓光, 等. 山药多糖的体外抗氧化活性[J]. 食品科学, 2021, 42(19): 122–128. [CHEN L Y, CHANG X G, FENG X G, et al. In vitro antioxidant activity of Chinese yam polysaccharides[J]. Food Science, 2021, 42(19): 122–128.]
- [56] 王彦平, 杨会会, 钱志伟, 等. 响应面法优化紫山药中原花青素超声提取工艺及抗氧化性研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(13): 181–185, 190. [WANG Y P, YANG H H, QIAN Z W, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of procyanidins from purple yam by response surface methodology and antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(13): 181–185, 190.]
- [57] LI Q, LI X, REN Z, et al. Physicochemical properties and antioxidant activity of Maillard reaction products derived from *Dioscorea opposita* polysaccharides[J]. LWT, 2021: 111833.
- [58] 陈建双, 李佳欣, 杨洋, 等. 山药水提物提取工艺优化及抗氧化活性分析[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(6): 155–159. [CHEN J S, LI J X, YANG Y, et al. Optimization of water extract process from yam and its antioxidant activity analysis[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(6): 155–159.]
- [59] 王静, 韩莹, 连珺怡, 等. 山药多糖对丙烯酰胺诱导的巨噬细

- 胞氧化损伤的保护作用[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(20): 52-59. [WANG J, HAN Y, LIAN J Y, et al. Protective effect of *Rhizoma dioscoreae* polysaccharides on oxidative damage induced by acrylamide in macrophages[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(20): 52-59.]
- [60] 孟永海, 孟祥瑛, 付敬菊, 等. 超声波协同酶解法对山药总多酚提取及抗氧化活性影响研究[J]. 辽宁中医药大学学报, 2020, 22(4): 63-66. [MENG Y H, MENG X Y, FU J, et al. Extraction and antioxidant activity of total polyphenols from Chinese yam by ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis[J]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2020, 22(4): 63-66.]
- [61] CHEN G, HUANG C, SHI P, et al. Mechanism of Chinese yam for the treatment of aging-related diseases based on network pharmacology[J]. European Journal of Integrative Medicine, 2021, 41: 101254.
- [62] 胡聪, 孟祥龙, 宁晨旭, 等. 山药的研究进展及其抗衰老的网络药理学分析[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2020, 22(7): 2348-2365. [HU C, MENG X L, NING C X, et al. Research progress of Chinese yam and its network pharmacological analysis of anti-aging[J]. Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica-World Science and Technology, 2020, 22(7): 2348-2365.]
- [63] WANG X, HUO X, LIU Z, et al. Investigations on the anti-aging activity of polysaccharides from Chinese yam and their regulation on *Klotho* gene expression in mice[J]. Journal of Molecular Structure, 2020, 1208: 127895.
- [64] 刘哲. 怀山药多糖分离纯化、抗衰老活性及其对 *Klotho* 基因的表达调控研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019. [LIU Z. Study on isolation, purification, anti-aging activity of Huai yam polysaccharide and its regulation on *Klotho* gene expression[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.]
- [65] 张丽梅, 程永强, 宋曙辉. 紫山药多糖对 D-半乳糖衰老模型大鼠肝、脑的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 196-200. [ZHANG L M, CHENG Y Q, SONG S H. Effect of purple yam polysaccharide on the liver and brain of D-galactose induced aging rats[J]. Food Science, 2017, 38(13): 196-200.]
- [66] 朱海清, 杨倩倩, 王冰, 等. 2 型糖尿病患者饮食自我管理 with 糖化血红蛋白控制情况的关系研究[J]. 中华糖尿病杂志, 2021, 13(12): 1123-1129. [ZHU H Q, YANG Q Q, WANG B, et al. Diet self-management and control of glycosylated hemoglobin A_{1c} in patients with type 2 diabetes mellitus[J]. Chinese Journal of Diabetes, 2021, 13(12): 1123-1129.]
- [67] LIANG X, HUANG Y Q, CHEN J P, et al. Antioxidant activity of polysaccharides in yam bulbils and their hypoglycemic effect in diabetic mice[J]. Agricultural Science & Technology, 2015, 16(7): 1332-1335.
- [68] 张文杰, 赖星海, 陈佳薇. 山药多糖治疗肥胖糖尿病肾病大鼠的效果观察及对其肾功能和肠道微生态的影响[J]. 中国微生物学杂志, 2021, 33(1): 37-42. [ZHANG W J, LAI X H, CHEN J W. Effect of yam polysaccharides in the treatment of obese diabetic nephropathy rats and its effect on renal function and intestinal microecology[J]. Chinese Journal of Microecology, 2021, 33(1): 37-42.]
- [69] 赵磊, 姜飞, 王成涛, 等. 南瓜、山药、葛根和桑叶配方辅助降血糖作用的研究[J]. 中国食品学报, 2018, 18(7): 46-56. [ZHAO L, JIANG F, WANG C T, et al. Studies on assistant hypoglycemic effect of a diet formula prepared with pumpkin, yam, kudzu vine root, and mulberry leave[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(7): 46-56.]
- [70] ZHANG Y, KHAN M Z H, YUAN T, et al. Preparation and characterization of *D. opposita* Thunb polysaccharide-zinc inclusion complex and evaluation of anti-diabetic activities[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 121: 1029-1036.
- [71] NTCHAPDA F, TCHATCHOUANG F C, MIAFFO D, et al. Hypolipidemic and anti-atherosclerogenic effects of aqueous extract of *Ipomoea batatas* leaves in diet-induced hypercholesterolemic rats[J]. Journal of Integrative Medicine, 2021, 19(3): 243-250.
- [72] UTHIRAPATHY S, AHAMAD J, PORWAL O, et al. GCMS analysis and hypolipidemic activity of *Dioscorea bulbifera* L. in high fat diet induced hypercholesterolemic rats[J]. Research Journal of Phytochemistry, 2021, 15(1): 23-29.
- [73] 雷艳, 胡吉蕾, 刘青青, 等. 决明子山药黄豆浆复配对高脂血症大鼠血脂代谢的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(5): 48-53. [LEI Y, HU J L, LIU Q Q, et al. Effects of semen cassia yam soybean on blood lipid metabolism in hyperlipidemic rats[J]. Food Research and Development, 2019, 40(5): 48-53.]
- [74] SUN Y, LIU T, SI Y, et al. Integrated metabolomics and 16S rRNA sequencing to investigate the regulation of Chinese yam on antibiotic-induced intestinal dysbiosis in rats[J]. Artificial Cells, Nanomedicine and Biotechnology, 2019, 47(1): 3382-3390.
- [75] 宋俊杰, 陈英, 范军朝, 等. 山药多糖对小鼠肝缺血再灌注损伤中的肝脾组织的保护作用[J]. 实用医药杂志, 2018, 35(4): 343-346. [SONG J J, CHEN Y, FAN J C, et al. Protection of Chinese yam polysaccharides on liver and spleen tissue in hepatic ischemia-reperfusion injury mice[J]. Practical Journal of Medicine & Pharmacy, 2018, 35(4): 343-346.]
- [76] 王巧俐, 陈辉, 向未, 等. 山药芝麻糊调理习惯性便秘脾肺气虚型效果观察[J]. 实用中医药杂志, 2020, 36(8): 996-997. [WANG Q L, CHEN H, XIANG W, et al. Observation on the effect of Chinese yam and sesame paste on habitual constipation with deficiency of spleen and lung deficiency[J]. Journal of Practical Traditional Chinese Medicine, 2020, 36(8): 996-997.]
- [77] DOMÉNIENÉ A, VENSUTONIS P R. *Dioscorea* spp: Comprehensive review of antioxidant properties and their relation to phytochemicals and health benefits[J]. Molecules, 2022, 27(8): 2530.
- [78] ZHONG Y, LIU J, SUN D, et al. Dioscin relieves diabetic nephropathy via suppressing oxidative stress and apoptosis, and improving mitochondrial quality and quantity control[J]. Food & Function, 2022, 13(6): 3660-3673.
- [79] 高子涵, 李瑞芳, 吕行直, 等. 山药多糖对糖尿病肾病小鼠肾功能和醛糖还原酶通路的影响[J]. 中药材, 2019, 42(3): 643-646. [GAO Z H, LI R F, LÜ X Z, et al. Effects of *Dioscorea opposita* polysaccharide on renal function and aldose reductase pathway in mice with diabetic nephropathy[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2019, 42(3): 643-646.]