

# 美藤果不同部位主要活性成分 及其功效机制研究进展

陈颖仪<sup>1</sup>, 黄俊源<sup>1</sup>, 王梓宇<sup>1</sup>, 谢蓝华<sup>2</sup>, 杜冰<sup>1</sup>, 黎攀<sup>1\*</sup>

(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642) (2. 珠海凤凰高科生物制药有限公司, 广东珠海 519090)

**摘要:** 美藤果 (*Plukenetia volubilis* Linneo) 又名南美油藤, 其原产于秘鲁亚马逊地区, 在中国云南大面积种植。美藤果被国际认可为一种可持续的农作物, 已被应用在食品、日化用品中, 具有广泛的应用前景。美藤果不同部位含有的主要活性成分各有侧重, 其种仁含有丰富的多不饱和脂肪酸、活性蛋白/肽、多糖等活性成分, 而美藤果叶和美藤果壳主要含有酚类物质, 如黄酮类、多酚类等。这些活性成分赋予了美藤果多种生物活性, 使其具有一定的抗氧化、抗炎、改善记忆力、辅助改善视力、降血压、降血脂等功效。然而目前缺乏对美藤果不同部位的活性成分和功效的系统性总结, 因此本文归纳了美藤果不同部位 (包括种仁、果壳、叶子) 的主要活性成分、功效, 以及重点介绍了美藤果活性成分的降血脂、降血糖, 降尿酸等作用机制, 旨在为美藤果产业高质量发展提供科学依据。

**关键词:** 美藤果; 美藤果壳; 美藤果叶; 生物活性; 作用机制

文章编号: 1673-9078(2025)03-401-413

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.3.0052

## Research Progress on the Main Active Components in Different Parts of Sacha Inchi and Their Efficacies and Mechanisms

CHEN Yingyi<sup>1</sup>, HUANG Junyuan<sup>1</sup>, WANG Ziyu<sup>1</sup>, XIE Lanhua<sup>2</sup>, DU Bing<sup>1</sup>, LI Pan<sup>1\*</sup>

(1. School of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

(2. Zhuhai Follow Gaoke Bio-pharmaceutical Co. Ltd., Zhuhai 519090, China)

**Abstract:** Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* Linneo, also known as South American oil vine) is native to the Peruvian Amazon and widely cultivated in Yunnan, China. Sacha inchi has been recognized as a sustainable crop worldwide, and has been widely used in food and daily necessities, thus has wide application prospects. The main active components in different parts of Sacha inchi vary. Its seeds are rich in active components such as polyunsaturated fatty acids, active proteins/peptides and polysaccharides, whilst the leaves and shells of Sacha inchi contain mainly phenolic compounds, such as flavonoids. These active components endow Sacha inchi with various biological activities, including antioxidant, anti-inflammatory, memory-improving, vision-improving, blood pressure-lowering, and blood lipid-reducing effects. However, there is a lack of systematic summary of the active components and efficacies of different parts of Sacha inchi. This article summarizes the

引文格式:

陈颖仪, 黄俊源, 王梓宇, 等. 美藤果不同部位主要活性成分及其功效机制研究进展 [J]. 现代食品科技, 2025, 41(3): 401-413.

CHEN Yingyi, HUANG Junyuan, WANG Ziyu, et al. Research progress on the main active components in different parts of Sacha inchi and their efficacies and mechanisms [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(3): 401-413.

收稿日期: 2024-01-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (32202058)

作者简介: 陈颖仪 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 健康食品研究与开发, E-mail: yingyi\_chen2000@126.com

通讯作者: 黎攀 (1990-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 新资源食品原料有效成分评价, E-mail: lp19900815@scau.edu.cn

primary active components and efficacies of different parts of Sacha inchi, including seeds, shells, and leaves, with a focus on the mechanisms underlying the lipid-lowering, blood sugar-reducing, and uric acid-lowering effects of Sacha inchi's active components, in order to provide a scientific foundation for the high-quality development of Sacha inchi industry.

**Key words:** Sacha inchi; Sacha inchi shells; Sacha inchi leaves; biological activity; action mechanism

美藤果 (*Plukenetia volubilis* Linneo) 学名为南美油藤, 又称为印加果, 属大戟科多年生木质藤本植物, 其原产于海拔 80~1 700 米的南美洲安第斯山脉地区热带雨林<sup>[1]</sup>, 在秘鲁、巴西等地区已有三千多年的食用历史<sup>[2]</sup>。美藤果是蛋白质和健康油脂的良好来源之一, 美藤果仁的蛋白质含量丰富 (约 27%), 其富含多种人体必需氨基酸, 约占氨基酸总量的 30%<sup>[3]</sup>; 果仁含油量为 50.08% (以湿基算), 其中美藤果油的不饱和脂肪酸占比高达 92.46%。在各种类不饱和脂肪酸中,  $\alpha$ -亚麻酸 ( $\alpha$ -Linolenic Acid, ALA) 的含量最高, 占 48%<sup>[4]</sup>。自 2013 年, 美藤果油被正式批准为国家新资源食品后, 其研究与应用得到了重视。美藤果油中的化学成分已被解析, 其功能也得到验证, 其中含量丰富的多不饱和脂肪酸 (Polyunsaturated Fatty Acids, PUFAs) 具有降血脂、辅助改善记忆<sup>[5]</sup>、保护肝脏<sup>[6]</sup>等作用。美藤果油根据其生物活性及物理化学性质, 可将其添加到乳液中改善纳米纤维膜的性能<sup>[7]</sup>、其抗氧化活性可应用于护肤品行业<sup>[8]</sup>。除美藤果油外, 美藤果种仁中还含有活性蛋白/肽、多糖等活性成分, 具有抗炎、降尿酸、免疫刺激活性<sup>[3]</sup>。

美藤果叶和美藤果壳作为美藤果产业加工的副产物之一, 其中富含多酚、黄酮, 皂苷等多种活性成分, 具有抗氧化、降血压、抑菌等活性, 且经动物实验证实其食用安全性<sup>[9]</sup>。目前关于美藤果的综述性文献主要聚焦在美藤果蛋白和油脂方面, 而国外文献也没有对美藤果不同部位的活性成分功能的机制进行总结<sup>[10]</sup>。因此本文主要从美藤果不同部位的活性成分、功效及主要作用机制进行归纳总结, 以期美藤果资源的研究与开发提借鉴作用。

## 1 美藤果不同部位的主要活性成分

不同部位具有不同的活性成分, 美藤果种仁的主要活性成分为多糖、活性蛋白/肽、不饱和脂肪酸<sup>[11-17]</sup>; 美藤果壳的主要活性成分为多酚类物质、木质素<sup>[18,19]</sup>; 而美藤果叶的主要活性成分为皂苷、甾醇及多酚类物质等<sup>[20]</sup>。美藤果不同部位主要活性成分及其类别见图 1, 具体组成成分见表 1。

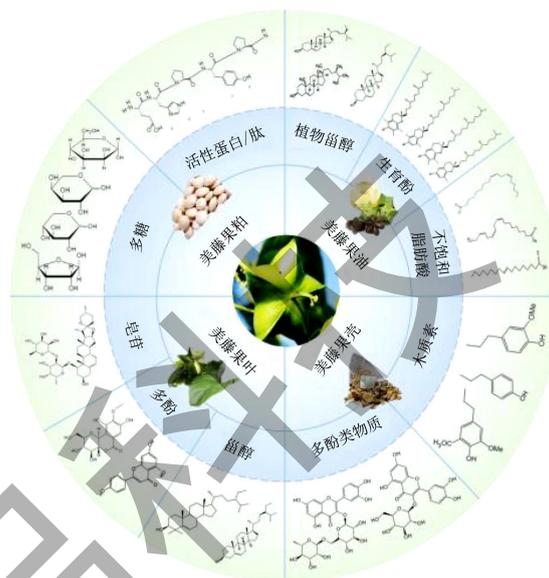


图 1 美藤果不同部位主要活性成分及其类别

Fig.1 The major active components and their categories in different parts of Sacha inchi

### 1.1 美藤果种仁

#### 1.1.1 多糖

多糖广泛存在于植物、动物和微生物中, 通常由 10 个以上单糖缩合而成<sup>[21]</sup>。美藤果种仁的碳水化合物含量为 6.00%~19.29% ( $m/m$ ), 总纤维的含量为 6.59%~13.86%<sup>[4]</sup>。相关研究表明<sup>[11]</sup>, 美藤果种仁中粗多糖的得率为 1.96%, 经 DEAE-52 阴离子交换色谱柱纯化后, 得到纯度为 98.2% 的多糖组分, 具有显著的抗氧化、免疫调节和免疫刺激活性。

Tian 等<sup>[11]</sup>对美藤果粕提取出的多糖组分 (*Plukenetia volubilis* L. Polysaccharide-1, PVLVP-1) 进行结构、免疫活性探究。PVLVP-1 是一种杂多糖, 其分子量为 144 ku, 由葡萄糖、甘露糖、阿拉伯糖、半乳糖、核糖、鼠李糖和木糖组成, 且摩尔百分比依次为 69.76%:14.86%:10.53%:2.42%:1.23%:0.27%:0.93%。IRNMR、甲基化分析结果显示, PVLVP-1 是一种葡甘露聚糖, 主链由  $\rightarrow 6$ - $\beta$ -D-Glc-1  $\rightarrow$  组成, 支链由  $\rightarrow 4$ - $\beta$ -D-Glc-(1  $\rightarrow$ ,  $\rightarrow 4$ -D-Manp-(1  $\rightarrow$ ,  $\rightarrow 3$ )- $\beta$ -D-Glc-(1  $\rightarrow$  和  $\rightarrow 1$ )-D-Araf 残基组成。此外, PVLVP-1 在碱性环境下能与刚果红形成复合物, 说明其具有三螺

旋结构。赵文俊等<sup>[12]</sup>将美藤果粕经提取纯化得到  $M_w$  为 401 479 u 的可溶性膳食纤维 (Sacha Inchi Soluble Dietary Fiber, SISDF), 由半乳糖醛酸、鼠李糖、木糖和半乳糖组成, 其单糖相对含量依次为 46.49%、18.95%、17.60%、11.25%, 是一种以  $\beta$ -吡喃糖为主链的大分子杂多糖, 可能具有一定的免疫活性。

1.1.2 多不饱和脂肪酸

美藤果油是以美藤果种仁为原料经榨油 / 浸提工序制成的一种淡黄色透明状液体<sup>[22]</sup>。美藤果种仁中含油量为 33.4%~54.3%, 不同品种、不同种植地区的美藤果种仁的含油量不同, Chirinos 等<sup>[13]</sup>对 16 个不同品种美藤果种仁的脂质含量进行测定, 发现不同品种美藤果种仁的含油量均在 33.4%~37.6% 范围内。除了品种和产地会影响美藤果仁的含油量外, 不同前处理方法和提取方式均会导致美藤果仁的出油量发生差异。如将美藤果种仁经过烘烤后再进行溶剂提取, 其出油率能提高到 54%, 而直接使用超临

界  $CO_2$  提取法的出油率能达到 54.3%<sup>[23]</sup>。Li 等<sup>[24]</sup>利用  $MS^2$  对美藤果油中的多不饱和甘油三酯进行鉴定, 发现美藤果油主要由亚油酸和  $\alpha$ -亚麻酸组成。对美藤果油的营养成分进行分析, 发现美藤果油的不饱和脂肪酸含量为 90.9%~93.2%<sup>[25]</sup>, PUFAs 占绝大部分 (78.15%~84.49%), 其中  $\omega$ -3 不饱和脂肪酸主要为 ALA。美藤果油的不饱和脂肪酸显著高于其它植物性油脂, 人们日常食用的植物性油脂, 其中的  $\omega$ -6 PUFAs 占大多数, 导致  $\omega$ -3 PUFAs 摄入不足, 两者之间的失衡可能会影响人体健康<sup>[26]</sup>。而美藤果油中的  $\omega$ -6/ $\omega$ -3 比值约为 0.72~0.76<sup>[10]</sup>, 两者之间的比例均衡。对美藤果油、亚麻油, 元宝枫油等 28 种功能性食用油的脂肪酸组成进行比较, 发现美藤果油的 PUFAs 含量最高 (约 82.0%)<sup>[27]</sup>, 其中 ALA 的含量为 48.2%<sup>[4]</sup>, 高于其它新资源食品油脂, 如元宝枫油 (1.85%)<sup>[28]</sup>、翅果油树籽油 (7.11%)<sup>[29]</sup>、乳木果油 (1.57%)<sup>[30]</sup>等, 说明美藤果油与一些常用油相比更具营养价值。

表 1 美藤果不同部位活性成分的组成

Table 1 The composition of active components in different parts of Sacha inchi

部位	活性成分	分类	组成	参考文献
	多糖	—	葡萄糖、甘露糖、阿拉伯糖、半乳糖、核糖、鼠李糖、木糖	[11]
		可溶性膳食纤维	半乳糖醛酸、鼠李糖、木糖、半乳糖	[12]
不饱和脂肪酸	—	$\omega$ -6	亚油酸	[13]
		$\omega$ -3	$\alpha$ -亚麻酸	
		$\omega$ -9	油酸	
生育酚	—	$\alpha$ -生育酚、 $\beta$ -生育酚、 $\gamma$ -生育酚、 $\delta$ -生育酚	[13]	
植物甾醇	—	菜油甾醇、豆甾醇、 $\beta$ -谷固醇	[13]	
美藤果种仁	多酚	酚	羟基酪醇、酪醇	[14]
		异香豆素	岩白菜素	
		类黄酮	猫尾草异黄酮、根皮素-葡萄糖苷、异鼠李糖苷、木犀草素、芹菜素	
		裂环烯醚萜类	甲基脱羧甲基橄榄苦苷元、橄榄苦苷酸、橄榄苦苷元	
		木脂素	松脂素、丁香脂素、羟基松脂醇	
		有机酸	壬二酸	
活性蛋白	—	白蛋白	[15]	
活性肽	—	—	EHPYPR、DDAVRLPH、LLEPDVR、EADGTLR、ALVEKAKAS、LVGPDGLH、YVDGPKL、TGDGSLRPY、WLDVK	[16]
		—	MVVKK、KVLV、RLLVWELER、WLPDVK、TVLLPR、TGGWSPLK、WKPW、FLTMEPR、VVLDVK、LTGLNKL、KLSLEWWLK、FVKLL	[17]
		—	—	
美藤果壳	多酚	酚酸	原儿茶酸、肉桂酸、对香豆酸、邻肉桂酸、香豆酸、没食子酸、单宁	[18,19]
		类黄酮	芦丁、异槲皮苷、儿茶素	[19]
		类黄酮	山柰酚、芹菜素、异鼠李素	
美藤果叶	多酚	酚酸	没食子酸、4-羟基苯甲酸、香草酸、咖啡酸、丁香酸、对香豆酸、阿魏酸、芥子酸	[20]
	皂苷	—	—	

### 1.1.3 活性蛋白/肽

近年来,植物性蛋白因其绿色、健康的特点得到了消费者的青睐,因此植物源蛋白的功能活性也成为了食品行业研究的新热点<sup>[31]</sup>。美藤果仁脱脂后的蛋白质含量为54.67%,高于大豆(40.23%)、核桃(50.20%)中的蛋白质含量,是一种高蛋白农作物<sup>[32]</sup>。Li等<sup>[15]</sup>从脱脂美藤果粕中提取出的清蛋白,其中清蛋白(43.7%)、球蛋白(22.3%)和醇溶蛋白(31.9%)占大多数,仅有少量的谷蛋白(3.0%)。经分析发现美藤果清蛋白含有两种多肽,其平均分子量分别为51.1 ku和13.6 ku。不同处理方式可能会影响肽段的结构和组成,He等<sup>[16]</sup>将美藤果粕经碱性蛋白酶和中性蛋白酶水解后得到了九种肽段,分别为EHPYPR、DDAVRLPH、LLEPDVR、EADGTLR、ALVEKAKAS、LVGPDGLH、YVDGPKL、TGDGSLRPY和VVLDVK。Wang等<sup>[17]</sup>将美藤果粕在胰蛋白酶的水解作用下得到了24种小分子量肽。从美藤果粕中分离出的多肽都含有疏水氨基酸、带电氨基酸(谷氨酸)和杂环氨基酸(脯氨酸),可能具有较强的抗癌能力<sup>[16]</sup>。

### 1.1.4 其它活性成分

除了多糖、不饱和脂肪酸和活性蛋白/肽等活性成分外,美藤果种仁中还存在着其它活性物质,如多酚、生育酚、植物甾醇等。对16种不同品种的美藤果籽进行分析<sup>[13]</sup>,其中总酚含量为64.6~80.0 mg/GAE 100 g,总生育酚含量为78.6~137.0 mg/100 g,植物甾醇的总和含量为75.7~86.2 mg/100 g。在总生育酚中, $\alpha$ -、 $\beta$ -、 $\gamma$ -、 $\delta$ -生育酚的含量范围分别为1.1~1.3、0.8~1.0、56.8~81.4、29.2~47.6 mg/100 g,其中, $\gamma$ -生育酚的占比最高,约为57.4%~68.2%,生育酚具有的抗氧化活性对不饱和脂肪酸起到了保护作用。此外,美藤果油中还含有类黄酮、木脂素和有机酸等多酚类物质<sup>[13]</sup>,可能也具有一定的抗氧化活性。

## 1.2 美藤果壳

美藤果壳作为美藤果加工的副产物之一,其往往被丢弃而没有得到很好的利用。美藤果壳中的主要活性成分为酚类化合物(7.45%),还含有少量的生育酚(0.31%)。林锦铭等<sup>[19]</sup>用乙醇对美藤果壳中的多酚物质进行提取,多酚得率为4.79%,其主要组成成分为没食子酸、芦丁、儿茶素、单宁和异槲皮素。Chirinos等<sup>[18]</sup>分析了美藤果壳的酚类物质组

成,其中缩合单宁占大多数(93.1%),其次为游离/结合酚酸、木质素、黄酮和类黄酮等,其中的游离/结合酚酸经鉴定为肉桂酸衍生物、原儿茶酸和羟基肉桂酸衍生物等。然而Sanchez-Reinoso等<sup>[33]</sup>采用微波提取法提取美藤果壳中的多酚类物质,其得到的多酚物质中只含有原儿茶醛、苯甲醛等结构,猜测微波处理可能使多酚的结构发生变化。因此,不同加工方式可能会导致多酚结构及其活性的变化,这有待进一步的研究。

## 1.3 美藤果叶

近几年,美藤果叶的研究取得了一定进展,主要集中在其活性成分、生物活性和潜在应用领域方面。Nascimento等<sup>[34]</sup>采用不同极性的溶剂对美藤果叶中的活性物质进行提取,发现各溶剂提取物中均存在酚类化合物、类固醇和/或萜类化合物,而甲醇、乙醇和水提取物中存在黄酮类化合物,且甲醇提取物中的黄酮类化合物为山奈酚。总体上,美藤果叶中的糖类化合物含量最高(84.17%~92.88%),其次为总酚(5.34%~10.85%),及少量蛋白质。Tran等<sup>[35]</sup>对美藤果叶醇提取物中的活性物质进行鉴定,发现其中含有黄酮类化合物、皂苷、甾醇和三萜、酚类、单宁等物质。Lin等<sup>[36]</sup>发现美藤果叶水提取物中还原糖的含量最高(31.71%),其次为果胶、淀粉等,多酚的含量为6.76%、皂苷的含量为8.49%,而山奈酚的含量极低,仅为0.11 g/kg干物重。有少量研究报道了美藤果叶中的主要成分,但其具体的活性成分还需进一步的研究。

## 2 美藤果主要活性成分的功能

美藤果因其含有多糖、不饱和脂肪酸、活性蛋白/肽、多酚等活性成分,具有降血脂、抗炎、改善肠道菌群和抗氧化等活性<sup>[22]</sup>,具体活性成分功能见表2。

### 2.1 美藤果种仁

#### 2.1.1 多糖

研究表明<sup>[11,12]</sup>,PVL-1和SISDF均表现出良好的免疫和抗氧化活性,在体外清除1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(2,2-Diphenyl-1-Picrylhydrazyl, DPPH)、·OH和2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(2,2'-Azino-Bis(3-Ethylbenzothiazoline-6-Sulfonic Acid), ABTS)实验中,在0.2~2 mg/mL

的质量浓度范围内,当 SISDF 的质量浓度达到 2 mg/mL 时, DPPH·、·OH 和 ABTS<sup>+</sup> 的清除率达到最高,对应的自由基清除为 70% 左右。与 SISDF 相比, PVLV-1 具有较高的抗氧化活性,当 PVLV-1 的质量浓度达到 0.8 mg/mL 时,其 DPPH·、·OH 和 ABTS<sup>+</sup> 的清除率约为 80%~90%。此外, PVLV-1 和 SISDF 均能诱导 RAW264.7 细胞增殖,增强免疫细胞因子白细胞介素 -6 (Interleukin-6, IL-6)、肿瘤坏死因子 (Tumour Necrosis Factor-Alpha, TNF- $\alpha$ ) 和白细胞介素 -1 $\beta$  (Interleukin-1 Beta, IL-1 $\beta$ ) 的表达,说明美藤果仁多糖具有较好的免疫调节活性。多糖的生物活性与其结构密切相关,多糖的分子质量、单糖组成、糖苷键和基团都会影响其活性<sup>[45]</sup>。阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖和木糖可能与多糖的降血糖活性有着密切联系<sup>[46]</sup>,而糖醛酸可能与抗氧化活性有关<sup>[47]</sup>。美藤果粕中提取出的可溶性膳食纤维 SISDF 与其它植物来源可溶性膳食纤维相比具有较高的抗氧化活力,可能与其含有较多的半乳糖醛酸有关<sup>[12]</sup>。有相关研究显示,  $\beta$ -D-吡喃葡萄糖糖基单位是增强免疫活性所必需的<sup>[48]</sup>,也有实验结果证明具有三螺旋结构的多糖更容易与细胞上的受体结合,从而能增强其活性<sup>[49]</sup>,而 PVLV-1 具有较好的免疫调节活性,推测与其具有三螺旋葡聚糖结构有关。

表 2 美藤果不同部位的活性成分及其功能

Table 2 The active components and their functions in different parts of Sacha inchi

部位	活性成分	功能	参考文献
美藤果籽	多糖	抗氧化活性、免疫刺激活性	[11,12]
	不饱和脂肪酸	降血脂活性、抗炎活性、降血糖活性、改善肠道菌群活性、免疫刺激活性、改善记忆力活性、改善视力活性、抗氧化活性	[22,37-40]
	活性蛋白/肽	免疫刺激活性、抗炎活性、降尿酸活性	[15,16,41]
	多酚	抗氧化活性	[42]
美藤果壳	多酚	抗氧化活性、降血压活性	[18,43]
美藤果叶	多酚	抗氧化、抑菌活性、抗癌活性、降血糖活性	[34,36,44]

### 2.1.2 不饱和脂肪酸

$\omega$ -3 PUFAs 是人体必需脂肪酸,人体无法合成,只能从外界摄入<sup>[50]</sup>。许多研究表明,补充  $\omega$ -3 PUFAs 具有消炎<sup>[51]</sup>、降血脂<sup>[52]</sup>、调节肠道菌

群<sup>[53]</sup>、治疗酒精性脂肪肝<sup>[54]</sup>的功效。存在于食物中的  $\omega$ -3 多不饱和脂肪酸主要为 ALA、二十二碳六烯酸 (Docosahexaenoic Acid, DHA) 和二十碳五烯酸 (Eicosapentaenoic Acid, EPA)。美藤果油含有丰富的 ALA,通过动物实验,已被证实其可通过调节胰岛 B 细胞的功能和凋亡实现降血糖功效<sup>[55]</sup>。微藻裂殖壶油-鱼油-美藤果油的混合物可通过调节脂肪酸合成等蛋白信号途径改善肠道微生物群组成和脂质代谢<sup>[56]</sup>。美藤果油可通过增强 Nrf-2/HO-1 抗氧化通路,保护 A $\beta$ <sub>25-35</sub> 诱导的 SH-SY5Y 阿尔兹海默症细胞<sup>[57]</sup>。除此之外,因其含有较多的维生素 E (190 mg/100 g),具有显著的抗氧化活性,美藤果油可作为一种功能性化妆品原料<sup>[58]</sup>。

### 2.1.3 活性蛋白/肽

通过细胞实验证明,美藤果粕清蛋白具有良好的免疫调节活性, TNF- $\alpha$  作为一种由免疫系统产生的细胞信号分子,其可促进免疫细胞间的通信,调节免疫应答<sup>[59]</sup>。美藤果粕清蛋白可直接促进脾淋巴细胞的增殖、增强 RAW264.7 巨噬细胞的胞吞能力及促进 IL-2、TNF- $\alpha$ 、NO 等细胞因子的分泌<sup>[15]</sup>,且避免 NO 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的过度产生。通过动物实验得出美藤果粕白蛋白可减轻炎症、氧化应激和调节 D-半乳糖诱导的衰老小鼠的肠道微生物群来延缓皮肤老化<sup>[41]</sup>。美藤果粕粗肽可通过上调 caspase-3 蛋白表达和 BAX、P53 基因表达来阻滞 G0/G1 的细胞周期,从而抑制 HepG2 细胞的增殖,在九种肽段中, LLEPDVR、ALVEKAKAS、TGDGSLRPY 肽段表现出更高的细胞增殖抑制率<sup>[16]</sup>。Wang 等<sup>[17]</sup>将美藤果粕经水解后得到了 24 种小分子量肽,主要为分子量 <1 ku 的寡肽。美藤果粕蛋白水解物能通过调节尿酸产生和代谢相关基因的表达和降低 Tlr4、Map3k8、Pik3cg 等基因的表达,从而降低大鼠血清中的尿酸水平和黄嘌呤氧化酶的活性,改善了高尿酸血症大鼠的肾脏损伤。

### 2.2 美藤果壳

美藤果壳中含有没食子酸、芦丁、儿茶素、单宁和异槲皮素等多酚类物质,蔡欣等<sup>[9]</sup>研究发现美藤果壳水提物具有良好的抑制血管紧张素转化酶 (Angiotensin Converting Enzyme, ACE) 的活性,降低自发性高血压大鼠的血压,且抑制效果优于菊花和银杏叶提取物。急性经口毒性实验和动物实验表明,美藤果壳提取物为食品级无毒<sup>[9]</sup>。除此之外,

美藤果壳提取物具有良好的抗氧化活性<sup>[19]</sup>,用丙酮/水/乙酸复配液提取得到的提取物中含有较高含量的总酚物质,在清除 ABTS<sup>+</sup> (93.9  $\mu\text{mol TE/g}$ )、·OH 吸收能力 (145.0  $\mu\text{mol TE/g}$ ) 和铁离子还原能力 (114.0  $\mu\text{mol TE/g}$ ) 等方面表现出更强的生物活性<sup>[18]</sup>。林锦铭等<sup>[19]</sup>研究发现,美藤果壳多酚在·OH 和 DPPH· 的清除能力方面远强于维生素 C (Vitamin C, Vc)、叔丁基对苯二酚 (Tert-Butylhydroquinone, TBHQ) 及 2,6-二叔丁基对甲酚 (2,6-Di-Tert-Butyl-4-Methylphenol, BHT),当质量浓度均为 700 mg/L 时,美藤果壳多酚对羟自由基的清除作用分别是 Vc 的 6.61 倍、TBHQ 的 3.19 倍和 BHT 的 41.30 倍。在相同情况下,其 DPPH 的清除能力是 Vc 的 1.76 倍、TBHQ 的 1.24 倍和 BHT 的 7.02 倍。美藤果壳多酚具有优异的抗氧化活性可能与其含有较高浓度的缩合单宁有关<sup>[60]</sup>。

### 2.3 美藤果叶

美藤果叶含有黄酮类、皂苷、甾醇和酚类、单宁等物质,具有良好的抗氧化活性和抑菌活性<sup>[44]</sup>。研究表明,美藤果叶醇提物可通过提高线虫体内超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和谷胱甘肽过氧化酶的活性,及谷胱甘肽的含量来延长秀丽隐杆线虫的寿命<sup>[61]</sup>。不同溶剂提取得到的美藤果叶提取物的 DPPH 清除能力在 62.8%~88.3% 范围内,具有一定的抗氧化活性<sup>[34]</sup>。美藤果叶不仅具有抗氧化活性,还能改善胰岛素抵抗和保护胰岛细胞,缓解由链脲佐菌素诱导的 I 型糖尿病<sup>[36]</sup>。此外,美藤果叶提取物还能抑制 HeLa 和 A549 细胞等癌细胞的增殖,具有一定抗癌活性。通过亚慢性毒性研究,美藤果叶乙醇提取物在 7 000 mg/kg 的质量浓度范围内对瑞士白化小鼠没有产生任何不利影响,证实了美藤果叶醇提物在该浓度范围内可以安全食用,无毒副作用<sup>[34]</sup>。

## 3 美藤果主要活性成分作用机制

### 3.1 美藤果油降血脂作用机制

高脂血症通常是指由脂质代谢或运输异常,引起血清中总胆固醇 (Total Cholesterol, TC)、甘油三酯 (Triglycerides, TG) 或低密度脂蛋白 (Low Density Lipoproteins, LDL) 的水平升高,而过高的脂质水平可能会诱发动脉粥样硬化或心脑血管疾病等慢性疾病<sup>[62]</sup>。ALA 通过降低固醇调节元件结合

蛋白 1C (Sterol-Regulatory Element Binding Protein 1 C, SREBP-1C)、乙酰辅酶 A 羧化酶 (Acetyl-CoA Carboxylase, ACC) 和脂肪酸合成酶 (Fatty Acid Synthase, FAS) 的表达,从而减少脂合成<sup>[63]</sup>。美藤果油富含 ALA 和其它 PUFAs,可通过肠-肝轴等多个通路调节生物体的 TG、TC 水平。美藤果油降血脂机制如图 2 所示。

高脂血症与胆汁酸的代谢有关,胆汁酸是一种两亲物质,可与脂类物质结合并形成混合物,进而促进脂质的消化和吸收、将体内过剩的胆固醇排出体外,维持肠道微生态平衡<sup>[64]</sup>。美藤果油调节生物体内胆汁酸的水平,提高由高脂饮食下调的 *SLC10A1* 基因的表达,激活钠离子牛磺胆酸共转运蛋白 (Sodium/Taurocholate Cotransporting Polypeptide, NTCP)。NTCP 分布在肝脏细胞表面,能促进门静脉血中胆汁酸的重吸收。胆汁酸重吸收有助于维持胆汁酸的稳定浓度,确保有足够浓度的胆汁酸用于脂质消化和胆固醇代谢<sup>[65]</sup>。同时,美藤果油能上调非钠依赖型有机阴离子转运体 (Sodium-Independent Organic Anion Transporter 3, OAT3) 的 *SLC22A8* 基因的表达,促进肝细胞对胆汁酸的重吸收,上调了编码胆汁酸辅酶 A: 氨基酸 N-酰基转移酶 (Bile Acid-CoA: Amino Acid N-Acyltransferase, Baat) 的表达。Baat 表达的增加,可抑制非结合型胆汁酸的积累,提高肝脏中牛磺胆酸 (Taurocholic Acid, TCA)、牛磺鹅脱氧胆酸 (Taurochenodeoxycholic Acid, TCDCA) 等初级结合胆汁酸的含量<sup>[66]</sup>。TCA、TCDCA 是核激素受体法尼醇 X 受体 (Farnesoid X Receptor, FXR) 的激活剂,FXR 存在于肝脏、肠道和肾脏等多个器官组织中,其下游激活物包括小异二聚体配体 (Small Heterodimer Partner, SHP)、过氧化物酶体增殖物活化受体 (Peroxisome Proliferator-Activated Receptor, PPAR $\alpha$ )、载脂蛋白 II (Apolipoprotein, ApoC II)、氨基末端蛋白激酶 (Jun N-Terminal Kinase, JNK),上述下游蛋白参与胆汁酸的合成、脂肪酸的生成和  $\beta$ -氧化,对血脂起着调控作用<sup>[67]</sup>。美藤果油可提高 RXP $\gamma$  和 FXR 的编码基因,下调 *Scd2*、*CD36*、*Fabp5* 等基因的表达,从而达到抑制脂质的摄取和合成、促进脂肪酸氧化的作用。

肝脂肪酶 (Hepatic Lipase, LIPC) 主要在肝脏发挥作用,其参与调节脂质代谢,能促进高密度脂蛋白 (High Density Lipoprotein, HDL) 颗粒的形成

和胆固醇的代谢，有助于清除血液中的三酰甘油和磷脂<sup>[68]</sup>。美藤果油能上调 LIPC 的表达，抑制 1- 酰基甘油 -3- 磷酸 O- 酰基转移酶（1-Acylglycerol-3-Phosphate O-Acyltransferase, AGPAT）和脂蛋白脂肪酶（Lipoprotein Lipase, LPL）的表达，达到清除血液 TG、抑制 TG 合成和抑制脂肪积累的作用<sup>[69]</sup>。磷脂酰乙醇胺（Phosphatidyl Ethanolamine, PE）和磷脂酰胆碱（Phosphatidylcholine, PC）比例的失衡可能会导致肝脏内 TG 的积累。高脂饮食会导致 PC 与 PE 的比率上升，美藤果油通过下调 LPLATs 的表达和上调 LyspPLA 的表达来平衡 PC 与 PE 比例<sup>[70]</sup>，从而抑制 TG 的积累。

另外，美藤果油可通过调控肠道菌群发挥调节脂代谢的作用。与高脂饮食相比，美藤果油干预可

提高肠道中 *Roseburia*、*Turicibacter*、*Butyrivibrio* 和 *Alistipes* 的丰度，降低 *Akkermansia* 的丰度<sup>[71]</sup>。*Roseburia*、*Turicibacter*、*Butyrivibrio* 和 *Alistipes* 被认为是丁酸产生菌，丁酸是一种短链脂肪酸（Short Chain Fatty Acids, SCFAs）。SCFAs 参与调节能量稳态、脂质和碳水化合物代谢等一系列的生理过程<sup>[72]</sup>，其通过激活 FXR 进一步影响胆汁酸的代谢<sup>[73]</sup>，此外，SCFAs 激活腺苷酸活化蛋白激酶（Adenosine 5'-Monophosphate-Activated Protein Kinase, AMPK）来降低脂肪酸合成速率、促进脂肪氧化<sup>[74]</sup>。

综上，美藤果油可通过调节胆汁酸合成和肝肠循环，抑制甘油三酯的合成和调节肠道菌群进而改善脂质代谢。

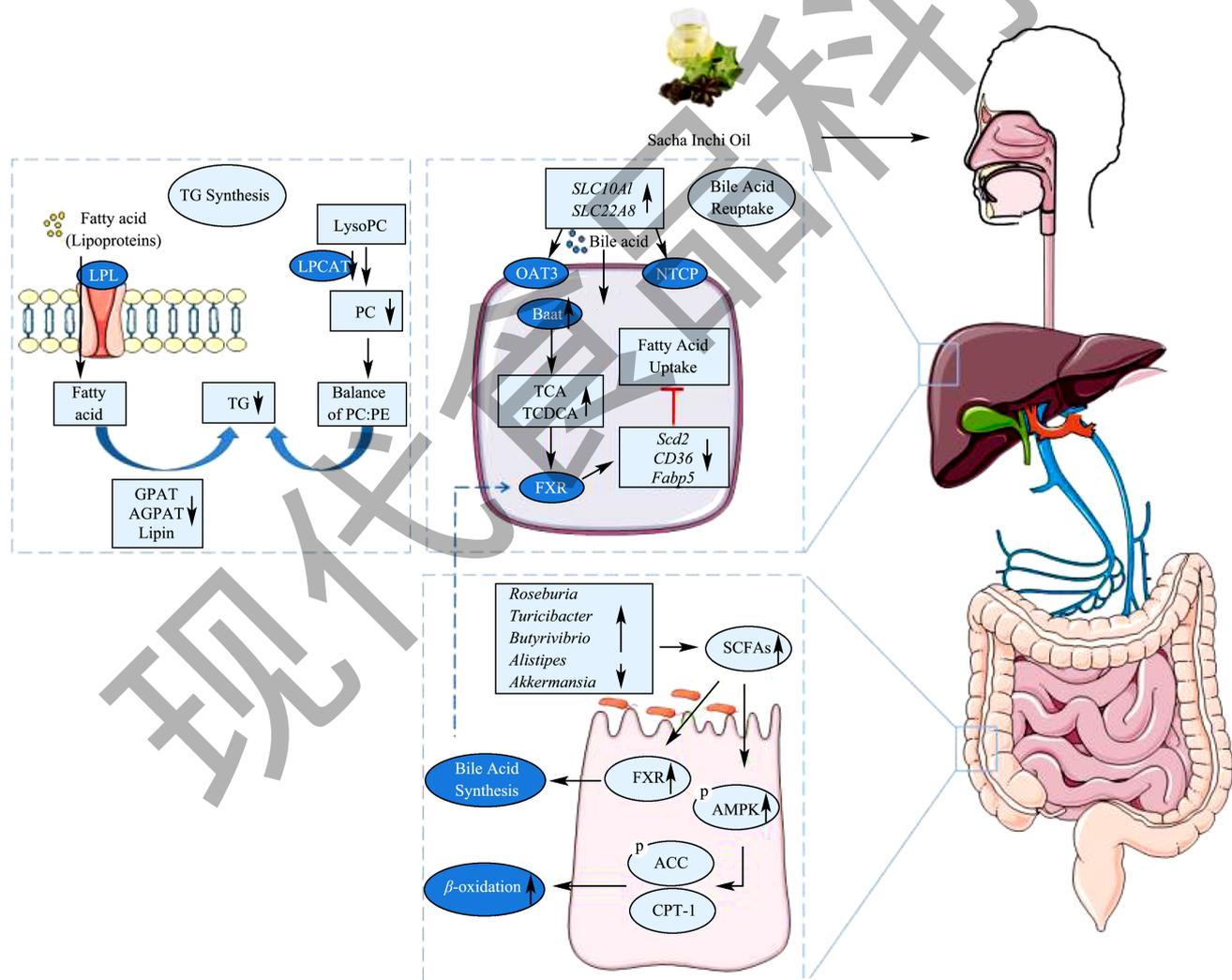


图 2 美藤果油降血脂机制

Fig.2 Hypolipidemic mechanism of Sacha inchi oil

### 3.2 美藤果油降血糖作用机制

II型糖尿病 (Diabetes Mellitus Type II, T2DM) 是一种代谢疾病, 伴随着胰岛 B 细胞功能受损和外周胰岛素抵抗等症状<sup>[75]</sup>。胰岛素是维持血糖平衡的核心, 体内出现胰岛素分泌不足的情况和存在胰岛素抵抗时, 血液中葡萄糖的转运和利用速率降低, 高血糖水平可能导致氧化应激、损伤胰岛  $\beta$  细胞, 进而加重胰岛  $\beta$  细胞的功能障碍<sup>[46]</sup>。 $\omega$ -3 PUFAs 可通过 G 蛋白偶联受体调控炎症, 增强胰岛  $\beta$  细胞的功能<sup>[76]</sup>。研究发现美藤果油可通过促进胰岛素分泌、调节氧化应激信号、调节胰岛素敏感性等通路实现降血糖活性<sup>[55]</sup>, 如图 3 所示。

长期高血糖刺激可能会促使活性氧 (Reactive Oxygen Species, ROS) 和促炎因子的产生<sup>[77]</sup>。美藤果油可抑制胰腺组织中促炎因子 IL-6、TNF- $\alpha$  的释放, 下调糖尿病大鼠体内核因子  $\kappa$ B (Nuclear Factor Kappa-B, NF- $\kappa$ B) 的表达。NF- $\kappa$ B 是一种蛋白质复合物, 未受到刺激时, 其在细胞质内与 NF- $\kappa$ B 抑制蛋白结合 (Inhibitor of NF- $\kappa$ B, I $\kappa$ B) 处于非活化状态。IL-6、IL- $\beta$ 、TNF- $\alpha$  等促炎因子与 IL-1R、TNF-R1 受体结合后, 导致  $\kappa$ B 抑制因子激酶  $\alpha$  (Inhibitor of Kappa-B Kinase  $\alpha$ , IKK $\alpha$ )、

IKK $\beta$  磷酸化。IKK 的磷酸化促使 I $\kappa$ B 的磷酸化, 导致 I $\kappa$ B 的降解, 激活 NF- $\kappa$ B 信号。被激活的 NF- $\kappa$ B 进入细胞核内, 与 DNA 结合上调炎症因子的表达<sup>[78]</sup>。

当存在炎症和氧化应激时, 细胞因子刺激 BH3 蛋白的活化, BH3 结合 B 细胞淋巴瘤 2 (B-Cell Lymphoma-2, BCL-2), 抑制 BCL-2 的表达, 进而激活促凋亡因子 BAX 和改变线粒体膜通透性, 促使细胞色素 C 的释放, 激活 caspase 的表达, 最终导致细胞的凋亡<sup>[79]</sup>。美藤果油可逆转糖尿病大鼠胰腺腺细胞中 BCL-2 蛋白的下调, 下调促凋亡蛋白 Bax 和 cleaved-caspase3 的表达。此外, Alayón 等<sup>[80]</sup>通过临床实验发现美藤果油可提高 SIRT1 基因的表达, SIRT1 是一类去乙酰化酶, 其能通过去除乙酰基团调控各种靶蛋白的活性, 参与调控葡萄糖代谢、脂质代谢等, 抑制氧化应激反应, 进而保护胰岛  $\beta$  细胞和改善胰岛素抵抗<sup>[81]</sup>。同时, 美藤果油干预可降低糖尿病大鼠血清和胰腺组织中 MDA 水平, 提高血清中 SOD、GPx 水平。

综上, 说明美藤果油通过改善炎症和氧化应激, 调节凋亡蛋白的活性进而保护胰岛  $\beta$  细胞和改善胰岛素抵抗。

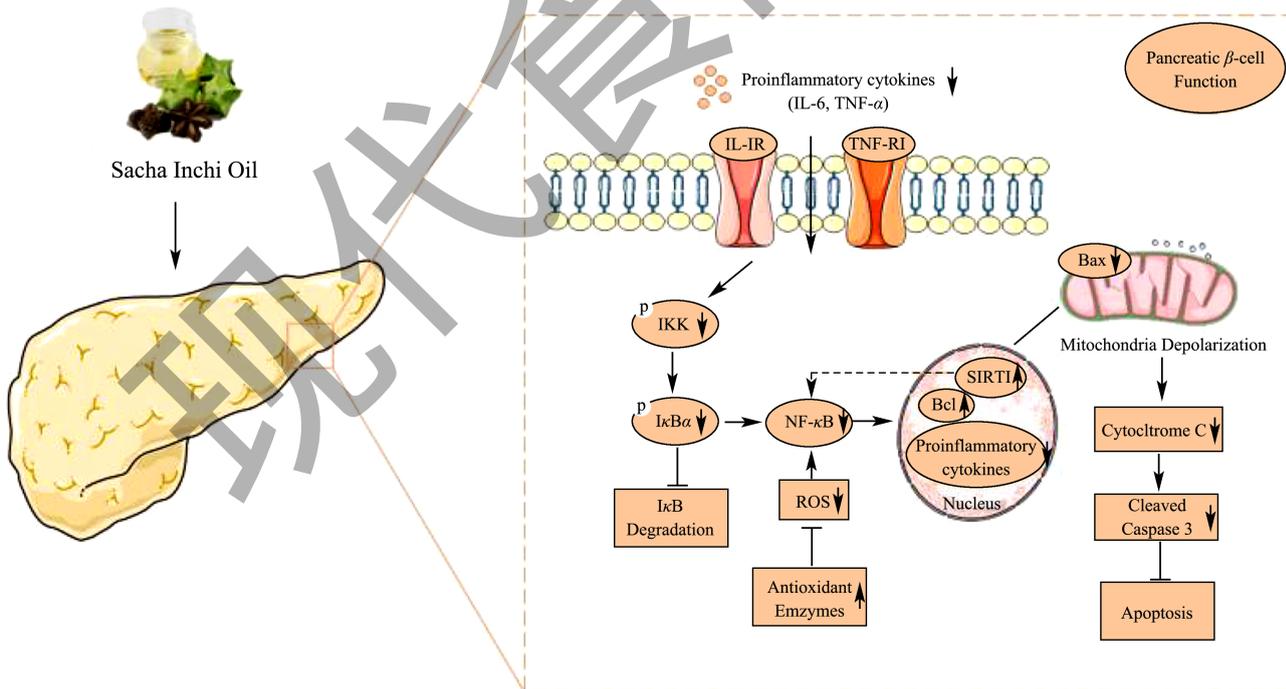


图 3 美藤果油降血糖机制

Fig.3 Hypoglycemic mechanism of Sacha inchi oil

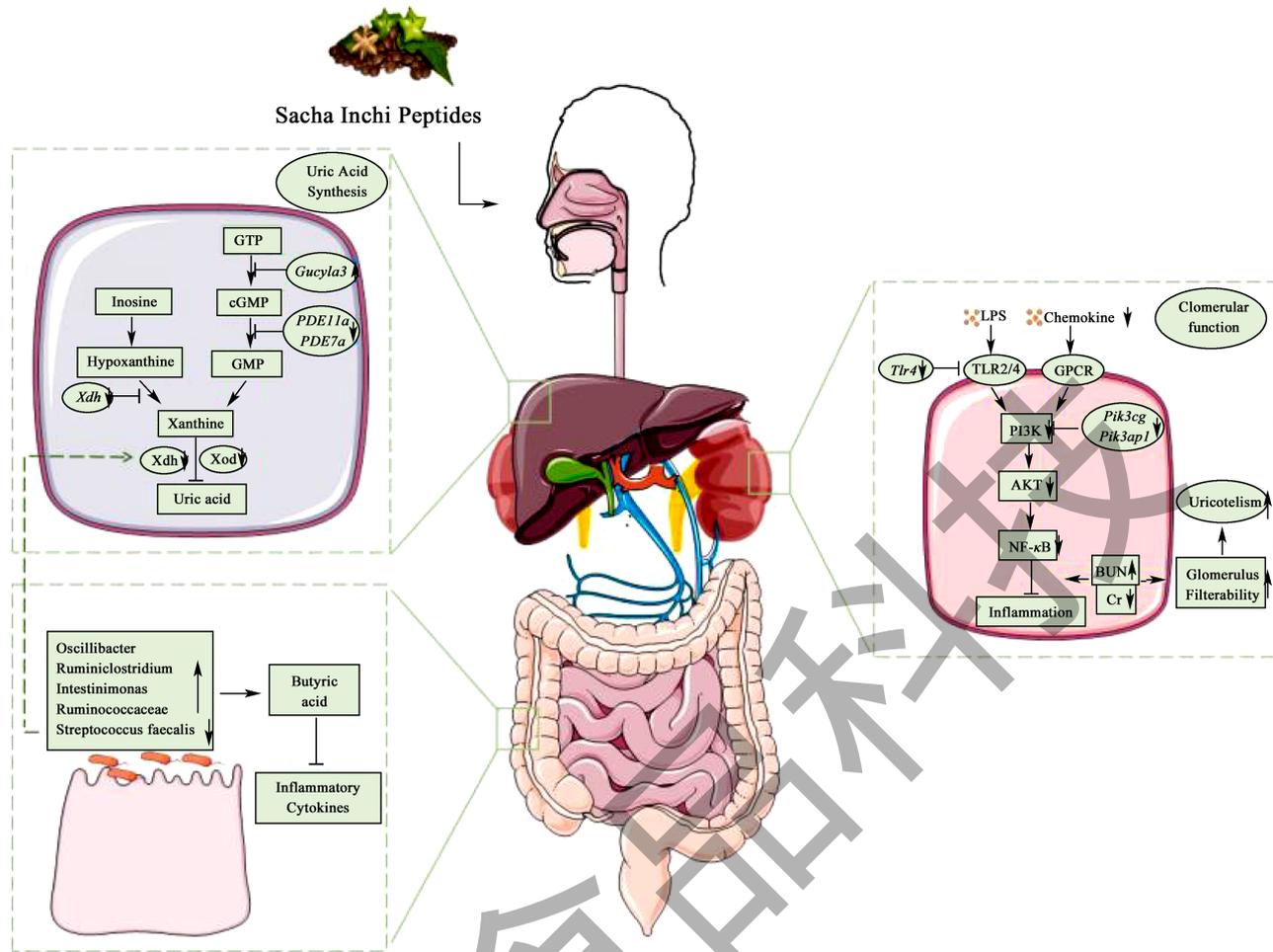


图4 美藤果肽降尿酸机制

Fig.4 Uric acid reducing mechanism of Sacha inchi peptides

### 3.3 美藤果肽降尿酸作用机制

尿酸血症是一种尿酸代谢紊乱引起的代谢异常综合征，除了引起痛风，长期高尿酸也会增加患慢性肾病和高血压、肥胖的风险<sup>[82]</sup>。肾脏和肠道是尿酸的主要代谢场所，美藤果粕蛋白水解物（Sacha Inchi Oil Press-Cake Protein Hydrolysates, SISH）可通过减轻肾脏损伤、抑制尿酸产生的基因表达和调节肠道菌群等途径，发挥降尿酸的作用<sup>[17]</sup>，如图4所示。

尿酸在肾脏进行代谢，当尿酸浓度超过肾脏的代谢能力后，尿酸就会在肾脏中形成晶体，造成肾小管损伤和炎症<sup>[83]</sup>。SISH 干预可降低高尿酸血症大鼠的血尿素氮（Blood Urea Nitrogen, BUN）和肌酐（Creatinine, Cr）水平，减轻肾小球的萎缩和炎症浸润，减缓肾脏的损伤。尿酸代谢与 *Xdh*、*Gucy1a3*、*Nme7* 等基因有关，*Xdh* 参与编码黄嘌呤脱氢酶（Xanthine Dehydrogenase, XDH），XDH 可将黄嘌呤

和此黄嘌呤转化为尿酸，引起尿酸水平升高。SISH 可通过降低 *Xdh*、*Gucy1a3*、*Gucy1β3* 等基因的表达，降低血清和肝脏中黄嘌呤氧化酶（Xanthine Oxidase, XOD）的活性，降低尿酸的产生，同时减少对细胞和组织造成的氧化损伤<sup>[84]</sup>。嘌呤是一种核苷酸，与氨基酸代谢和嘌呤代谢之间存在紧密联系<sup>[85]</sup>，SISH 可恢复氨基酸代谢和脂质代谢的代谢物水平。SISH 可上调 *Nme7* 基因的表达，促进嘌呤的再循环，减少尿酸的积累<sup>[86]</sup>。过高的尿酸水平损伤肾脏细胞，激活 Toll 样受体 4（Toll-Like Receptor 4, TLR4），进而激活 PI3K/Akt 通路，PI3K/Akt 的激活，通过促使 IKK 的磷酸化，上调 NF-κB 的表达，诱导促炎因子的释放，损伤组织细胞<sup>[87]</sup>。SISH 可下调与炎症信号通路相关的基因，如 *Pik3cg*、*Pik3ap1*、*Tlr4*、*Map3k8*、*Ikbke* 和 *Nlrp3* 等，涉及 PI3K/Akt 信号通路、Toll 样受体信号通路、趋化因子信号通路、Jak-STAT 信号通路等<sup>[88]</sup>。

SISH 还可逆转高嘌呤诱导的肠道菌群失调, 提高 *Oscillibacter*、*Ruminiclostridium* 和 *Intestinimonas* 等丁酸产生菌的丰度。丁酸参与免疫调节<sup>[89]</sup>, 可通过降低炎症因子的水平来抑制高尿酸血症的形成。*Streptococcus faecalis* 会引起尿酸的升高<sup>[90]</sup>, SISH 干预可降低高尿酸血症大鼠肠道中链球菌的丰度, 从而抑制尿酸的产生。此外, SISH 可增加 *Ruminococcaceae* 的丰度, 促进尿酸的代谢。

综上, SISH 可通过调节尿酸的产生和排泄相关基因的表达、改善由高嘌呤诱导的肠道菌群紊乱和减轻肾脏损伤等途径调节尿酸水平。

### 3.4 其它活性成分主要功效机制

美藤果叶提取物具有调节血糖的作用<sup>[36]</sup>。美藤果叶水提物中含有多酚、皂苷、多糖等活性成分, 可降低糖尿病小鼠的血糖水平、减轻小鼠的高血糖应激, 通过保护链脲佐菌素诱导 I 型糖尿病小鼠的胰岛细胞、使其免受损伤, 改善胰岛素抵抗, 降低糖尿病小鼠中厚壁菌门与拟杆菌门的比例、增加 *Akkermansia*、*Parabacteroides* 的丰度, 进而改善链脲佐菌素诱导 I 型糖尿病小鼠的肠道微生物紊乱, 缓解小鼠的高血糖症状。

美藤果壳提取物具有调节血压的作用<sup>[91]</sup>。美藤果壳中含有没食子酸、芦丁、儿茶素、单宁和异槲皮素等多酚类物质, 多酚是一种有效的血管扩张剂, 可抑制基质金属蛋白酶和血管紧张素转化酶的活性<sup>[92]</sup>。血压的升高与体内的钙稳态有关<sup>[93]</sup>, 美藤果壳提取物可通过降低 *Cacna1s* 亚基、*Cacna1s* 电压传感器和 LTCC 共调节器 *Camk2y* 的表达来调节  $Ca^{2+}$  信号通路和调节高血压大鼠的肠道菌群、减轻氧化损伤、恢复血浆  $Ca^{2+}$  稳态, 降低心肌肥厚, 进而降低自发性高血压大鼠和高盐饮食大鼠的血压。

## 4 结论与展望

本文介绍了美藤果不同部位的主要活性成分, 重点阐述了其在降血脂、降血糖及降尿酸等方面的功效机制。自 2008 年引入美藤果种源后, 国内关于美藤果的研究和应用逐渐增加, 2013 年, 美藤果油被列入国家新资源食品, 随之, 美藤果蛋白也被允许作为普通食品生产和经营。这进一步拓宽了美藤果在新资源食品研发等领域的应用。目前, 国内外关于美藤果研究主要侧重于种仁中活性肽和油脂的成分分析以及对应的功效, 比如, 美藤果油主要

聚焦在降血脂和抗炎等活性机制上。未来, 仍需深入挖掘美藤果油、美藤果蛋白/肽新功能, 从多角度、多维度系统揭示其作用机制。另外, 美藤果其它部位的生物活性成分和功效机制研究较少。尽管有相关研究表明美藤果壳和美藤果叶的提取物具有一定的降血压、降血糖功效, 但具体的活性成分和其功效机制仍需深入研究。未来可在传统的分离纯化技术方面进行创新和完善, 同时对美藤果中活性成分的功效机制进行多维度的分析。这将有助于识别美藤果不同部位中具体的活性成分和构效关系, 为美藤果产业资源的开发提供科学数据支撑和参考依据, 推动美藤果产业的持续发展。

### 参考文献

- [1] 李镇灏, 谢蓝华, 陈佳, 等. 不同产地美藤果籽的物性比较[J]. 中国油脂, 2022, 47(5): 73-77.
- [2] GUTIÉRREZ F L, ROSADA M L, JIMÉNEZ Á. Chemical composition of Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) seeds and characteristics of their lipid fraction [J]. Grasas y Aceites, 2011, 62: 76-83.
- [3] 林锦铭, 谢蓝华, 李俊健, 等. 美藤果加工与综合利用研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(5): 335-341.
- [4] GOYAL A, TANWAR B, SIHAG K M, et al. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.): An emerging source of nutrients, omega-3 fatty acid and phytochemicals [J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131459-131459.
- [5] 司茹, 郑梦思, 邹莉波. 美藤果油辅助改善小鼠记忆的功效[J]. 食品科学, 2017, 38(9): 202-206.
- [6] 王景霞, 王林元, 王淳, 等. 美藤果油对非酒精性脂肪性肝炎大鼠的保护作用[J]. 华南预防医学, 2015, 41(4): 342-346.
- [7] 刘媛, 张群华, 袁文波, 等. 乳液静电纺丝美藤果油/聚乙烯醇纳米纤维膜的制备及性能[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 233-240.
- [8] 谢蓝华, 陈佳, 林茂森, 等. 美藤果油护肤霜研制工艺优化及功效评价[J]. 日用化学品科学, 2016, 39(2): 45-50.
- [9] 蔡欣, 马晓伟, 黎攀, 等. 美藤果壳提取物降血压功效的研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(23): 87-92.
- [10] WANG S, ZHU F, KAKUDA Y. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.): Nutritional composition, biological activity, and uses [J]. Food Chemistry, 2018, 265: 316-328.
- [11] TIAN W N, XIAO N, YANG Y Y, et al. Structure, antioxidant and immunomodulatory activity of a polysaccharide extracted from Sacha inchi seeds [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 162: 116-126.
- [12] 赵文俊, 陆思名, 彭东, 等. 美藤果粕可溶性膳食纤维的抗

- 氧化及免疫活性评价[J].食品科学,2022,43(13):131-139.
- [13] CHIRINOS R, ZULOETA G, PEDRESCHI R, et al. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis*): A seed source of polyunsaturated fatty acids, tocopherols, phytosterols, phenolic compounds and antioxidant capacity [J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 1732-1739.
- [14] FANALI C, DUGO L, CACCIOLA F, et al. Chemical characterization of Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) oil [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(24): 13043-9.
- [15] LI P, WEN J M, MA X W, et al. Structural, functional properties and immunomodulatory activity of isolated Inca peanut (*Plukenetia volubilis* L.) seed albumin fraction [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 118: 1931-1941.
- [16] HE Z L, LIN J M, PENG D, et al. Peptide fractions from Sacha inchi induced apoptosis in HepG2 cells via P53 activation and a mitochondria-mediated pathway [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103: 7621-7630.
- [17] WANG K, WU S S, LI P, et al. Sacha inchi oil press-cake protein hydrolysates exhibit anti-hyperuricemic activity via attenuating renal damage and regulating gut microbiota [J]. Foods, 2022, 11: 16.
- [18] CHIRINOS R, VELAZCO N O, PEDRESCHI R, et al. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) shell: an alternative source of phenolic compounds and antioxidants [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2016, 51: 986-993.
- [19] 林锦铭,蔡尤林,李俊健,等.美藤果壳多酚物质的提纯及其抗氧化性[J].食品研究与开发,2021,42(5):106-112.
- [20] KITTIBUNCHAKUL S, HUDTHAGOSOL C, SANPORKHA P, et al. Effects of maturity and thermal treatment on phenolic profiles and *in vitro* health-related properties of Sacha inchi leaves [J]. Plants, 2022, 11: 1515.
- [21] 李彦力,苏艺,袁晚晴,等.黄精主要活性成分、功能及其作用机制研究进展[J].现代食品科技,2023,39(12):354-363.
- [22] 王彦武.美藤果油功效与毒理学研究进展[J].毒理学杂志,2019,33(6):496-499.
- [23] FOLLEGATTI-ROMERO LA, PIANTINO R C, GRIMALDI R, et al. Supercritical CO<sub>2</sub> extraction of omega-3 rich oil from Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) seeds [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2009, 49(3): 323-329.
- [24] LI P, DENG J W, XIAO N, et al. Identification of polyunsaturated triacylglycerols and CC location isomers in Sacha inchi oil by photochemical reaction mass spectrometry combined with nuclear magnetic resonance spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2020, 307: 125568.
- [25] PAUCAR-MENACHO L M, SALVADOR-REYES R, GUILLÉN-SÁNCHEZ J, et al. Estudio comparativo de las características físico-químicas del aceite de Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.), aceite de oliva (*Olea europaea*) y aceite crudo de pescado [J]. Scientia Agropecuaria, 2015, 6(4): 279-290.
- [26] 燕志,朱江煜,魏继燕,等.n-3/n-6多不饱和脂肪酸的生理功能与膳食平衡研究[J].江苏调味副食品,2022,3:1-3,44.
- [27] 汪雪芳,杨瑞楠,薛莉,等.28种功能性食用油脂脂肪酸组成研究[J].食品安全质量检测学报,2017,8(11):4336-4343.
- [28] 王性炎,王姝清.神经酸新资源——元宝枫油[J].中国油脂,2005,30(9):62-64.
- [29] 陈侨侨.翅果油树籽油提取及其脂肪酸组成和易挥发成分的研究[D].太原:山西大学,2016.
- [30] 杨耿,张勋,陈亦豪,等.乳木果油的超声波辅助提取工艺优化及脂肪酸组成分析[J].中国油脂,2018,43(11):89-93.
- [31] ZHENG J L, ZHU T R, YANG G H, et al. The isocaloric substitution of plant-based and animal-based protein in relation to aging-related health outcomes: A systematic review [J]. Nutrients, 2022, 14(2): 272.
- [32] 陈佳,杨勇福,林茂森,等.美藤果蛋白加工及应用研究进展[J].食品工业,2022,43(9):182-186.
- [33] SANCHEZ-REINOSO Z, MORA-ADAMES W I, FUENMAYOR C A, et al. Microwave-assisted extraction of phenolic compounds from Sacha inchi shell: Optimization, physicochemical properties and evaluation of their antioxidant activity [J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2020, 153: 107922.
- [34] NASCIMENTO A K, MELO-SILVEIRA R F, DANTAS-SANTOS N, et al. Antioxidant and antiproliferative activities of leaf extracts from *Plukenetia volubilis* Linneo (Euphorbiaceae) [J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2013, 10: 950272.
- [35] TRAN P-N, TRAN T T N. Evaluation of acute and subchronic toxicity induced by the crude ethanol extract of *Plukenetia volubilis* Linneo leaves in Swiss albino mice [J]. BioMed Research International, 2021, 13: 1-13.
- [36] LIN J M, WEN J M, XIAO N, et al. Anti-diabetic and gut microbiota modulation effects of Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) leaf extract in streptozotocin-induced type 1 diabetic mice [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(10): 4304-4312.
- [37] 欧丽娜,高晶,陈绍红,等.美藤果油对高脂血症大鼠血脂及Apo AI、ApoB的影响[J].现代预防医学,2015,42(20): 3766-3769.
- [38] 环飞,王玉邦,孙杰,等.美藤果油对小鼠免疫功能的调节作用[J].畜牧与兽医,2016,48(12):79-82.
- [39] 黄剑钊.美藤果油改善高脂饮食大鼠肠道菌群失调及脂质代谢紊乱的机制研究[D].广州:华南农业大学,2023.
- [40] ALAYÓN A N, ORTEGA ÁVILA J G, ECHEVERRI JIMÉNEZ I. Metabolic status is related to the effects of adding

- of Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) oil on postprandial inflammation and lipid profile: Randomized, crossover clinical trial [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2019,43(2):12703.
- [41] ZENG J Y, AN M Q, TIAN W N, et al. Sacha inchi albumin delays skin-aging by alleviating inflammation, oxidative stress and regulating gut microbiota in d-galactose induced-aging mice [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(9): 4470-4480.
- [42] 罗旭璐,袁雨川,贺鹏,等.美藤果籽粕多酚的提取及其抗氧化活性测定[J].林业科技开发,2015,29(1): 75-78.
- [43] 马晓伟.美藤果壳提取物降血压功效评价及干预高血压大鼠肠道菌群的研究[D].广州:华南农业大学,2020.
- [44] JANG M, YOU S, KIM G-H. Evaluation of antibacterial and antioxidant activities of Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) leaf from Myanmar [J]. *Korean Journal of Food Preservation*, 2020, 27(6): 781-790.
- [45] YI Y, LAMIKANRA O, SUN J, et al. Activity diversity structure-activity relationship of polysaccharides from lotus root varieties [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 190: 67-76.
- [46] 杨玉洁,刘静宜,谭艳,等.多糖降血糖活性构效关系及作用机制研究进展[J].食品科学,2021,42(23):355-363.
- [47] HUANG S Q, DING S D, FAN L P. Antioxidant activities of five polysaccharides from *Inonotus obliquus* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2012, 50(5): 1183-1187.
- [48] BOHN J A, BEMILLER J N. (1→3)- $\beta$ -d-Glucans as biological response modifiers: A review of structure-functional activity relationships [J]. *Carbohydrate Polymers*, 1995, 28(1): 3-14.
- [49] MENG Y, LYU F Z, XU X J, et al. Recent advances in chain conformation and bioactivities of triple-helix polysaccharides [J]. *Biomacromolecules*, 2020, 21(5): 1653-1677.
- [50] 郑秋甫.Omega-3多不饱和脂肪酸的研究进展[J].中华保健医学杂志,2011,13(5):357-360.
- [51] PAROLINI C. Marine n-3 polyunsaturated fatty acids: Efficacy on inflammatory-based disorders [J]. *Life Sciences*, 2020, 263: 118591.
- [52] 罗娜,孙志宏.Omega-3多不饱和脂肪酸在高脂血症中的作用机制研究进展[J].中国油脂,2020,45(7):97-101.
- [53] 金慧敏,严成,肖腾飞,等.高n-3多不饱和脂肪酸鱼油饮食对小鼠肠道菌群的影响[J].营养学报,2017,39(4):366-369.
- [54] WANG M, MA L J, YANG Y, et al. N-3 polyunsaturated fatty acids for the management of alcoholic liver disease: A critical review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59: S116-S129.
- [55] WONGMANEE N, ROJANAVERAWONG W, BOONSONG T, et al. Antihyperglycemic effect of extra virgin Sacha inchi oil in type 2 diabetic rats: Mechanisms involved in pancreatic  $\beta$ -cell function and apoptosis [J]. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 2023, 8: 2225-4110.
- [56] CHEN J, LIU Y L, HUANG Y, et al. Schizochytrium oil and its mixture with fish oil and Sacha inchi oil ameliorate gut microbiota composition and lipid metabolism via the fatty acid synthetase/3-hydroxy-3-methyl glutaryl coenzyme a reductase/sterol regulatory element binding protein signaling pathway [J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2022, 124(4): 2100108.
- [57] 曾文燊,刘冰,张桓,等.美藤果油对 $A\beta_{25-35}$ 诱导的SH-SY5Y阿尔兹海默症细胞的保护作用[L].现代食品科技,2024,40(6):12-19.
- [58] 陈佳,杨勇福,林茂森,等.一种植物源功能性化妆品原料——美藤果油[J].香料香精化妆品,2021,4:103-107.
- [59] CHEN L B, MUSA A E. Boosting immune system against cancer by resveratrol [J]. *Phytotherapy Research*, 2021, 35(10): 5514-5526.
- [60] KOLECKAR V, KUBIKOVA K, REHAKOVA Z, et al. Condensed and hydrolysable tannins as antioxidants influencing the health [J]. *Mini Reviews in Medicinal Chemistry*, 2008, 8(5): 436-447.
- [61] 赖玉萍,陈颖仪,魏婉婷,等.美藤果叶醇提取物对延缓秀丽隐杆线虫衰老的影响[J].食品工业科技,2023,44(21):1-10.
- [62] ALAYÓN A N, ORTEGA ÁVILA J G, ECHEVERRI JIMÉNEZ I. Metabolic status is related to the effects of adding of Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) oil on postprandial inflammation and lipid profile: randomized, crossover clinical trial [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2019, 43(2): 12703.
- [63] SU J H, MA C Y, LIU C X, et al. Hypolipidemic activity of peony seed oil rich in  $\alpha$ -linolenic, is mediated through inhibition of lipogenesis and upregulation of fatty acid  $\beta$ -oxidation [J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(4): 1001-1009.
- [64] LIN H, AN Y P, TANG H R, et al. Alterations of bile acids and gut microbiota in obesity induced by high fat diet in rat model [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(13): 3624-3632.
- [65] 高小强,左石,贾晓东,等.钠牛磺胆酸共转运多肽在肝胆疾病中的研究进展[J].临床肝胆病杂志,2022,38(5):1179-1182.
- [66] WAHLSTRÖM A, SAYIN S I, MARSCHALL H U, et al. Intestinal crosstalk between bile acids and microbiota and its impact on host metabolism [J]. *Cell Metabolism*, 2016, 24(1): 41-50.
- [67] ZHU Y, LIU H X, ZHANG M, et al. Fatty liver diseases, bile acids, and FXR [J]. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 2016, 6(5): 409-412.
- [68] PERRET B, MABILE L, MARTINEZ L, et al. Hepatic lipase:

- structure/function relationship, synthesis, and regulation [J]. *Journal of Lipid Research*, 2002, 43(8): 1163-1169.
- [69] OLIVECRONA G. Role of lipoprotein lipase in lipid metabolism [J]. *Current Opinion in Lipidology*, 2016, 27(3): 233-241.
- [70] VALENTINE W J, SHIMIZU T, SHINDOU H. Lysophospholipid acyltransferases orchestrate the compositional diversity of phospholipids [J]. *Biochimie*, 2023, 215: 24-33.
- [71] LI P, HUANG J Z, XIAO N, et al. Sacha inchi oil alleviates gut microbiota dysbiosis and improves hepatic lipid dysmetabolism in high-fat diet-fed rats [J]. *Food & Function*, 2020, 11(7): 5827-5841.
- [72] GENTILE C L, WEIR T L. The gut microbiota at the intersection of diet and human health [J]. *Science*, 2018, 362(6416): 776-780.
- [73] ZHANG Z H, FAN S T, HUANG D F, et al. Polysaccharides from fermented *Asparagus officinalis* with *Lactobacillus plantarum* NCU116 alleviated liver injury via modulation of glutathione homeostasis, bile acid metabolism, and SCFA production [J]. *Food & Function*, 2020, 11(9): 7681-7695.
- [74] KIMURA I, ICHIMURA A, OHUE-KITANO R, et al. Free fatty acid receptors in health and disease [J]. *Physiological Reviews*, 2020, 100(1): 171-210.
- [75] LI H S, FANG Q Y, NIE Q X, et al. Hypoglycemic and hypolipidemic mechanism of tea polysaccharides on type 2 diabetic rats via gut microbiota and metabolism alteration [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(37): 10015-10028.
- [76] OH D Y, TALUKDAR S, BAE E J, et al. GPR120 is an omega-3 fatty acid receptor mediating potent anti-inflammatory and insulin-sensitizing effects [J]. *Cell*, 2010, 142(5): 687-698.
- [77] FORTUNATO M, YAN Z H, SHYR Z A, et al. Beta-cell glucotoxicity in KATP-induced diabetes is alleviated by genetic reduction of glucose metabolism [J]. *Diabetes*, 2018, 67: 327.
- [78] LIU T, ZHANG L Y, JOO D, et al. NF- $\kappa$ B signaling in inflammation [J]. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 2017, 2(1): 1-9.
- [79] CZABOTAR P E, GARCIA-SAEZ A J. Mechanisms of BCL-2 family proteins in mitochondrial apoptosis [J]. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2023, 24(10): 732-748.
- [80] ALAYÓN A N, ORTEGA-AVILA J G, ECHEVERRI-JIMÉNEZ I. Carbohydrate metabolism and gene expression of sirtuin 1 in healthy subjects after Sacha inchi oil supplementation: a randomized trial [J]. *Food & Function*, 2018, 9(3): 1570-1577.
- [81] SINGH V, UBAID S. Role of silent information regulator 1 (SIRT1) in regulating oxidative stress and inflammation [J]. *Inflammation*, 2020, 43: 1589-1598.
- [82] SATO Y, FEIG D I, STACK A G, et al. The case for uric acid-lowering treatment in patients with hyperuricaemia and CKD [J]. *Nature Reviews Nephrology*, 2019, 15(12): 767-775.
- [83] BALAKUMAR P, ALQAHTANI A, KHAN N A, et al. Mechanistic insights into hyperuricemia-associated renal abnormalities with special emphasis on epithelial-to-mesenchymal transition: Pathologic implications and putative pharmacologic targets [J]. *Pharmacological Research*, 2020, 161: 105209.
- [84] WANG F Q, ZHAO X, SU X, et al. Isorhamnetin, the xanthine oxidase inhibitor from *Sophora japonica*, ameliorates uric acid levels and renal function in hyperuricemic mice [J]. *Food & Function*, 2021, 12(24): 12503-12512.
- [85] SHI Z Q, GE X L, ZHENG S N, et al. Mangiferin reduces uric acid via regulation of amino acid and lipid metabolism [J]. *Journal of Functional Foods*, 2023, 108: 105716.
- [86] ANSOLEAGA B, JOVÉ M, SCHLÜTER A, et al. Deregulation of purine metabolism in Alzheimer's disease [J]. *Neurobiology of Aging*, 2015, 36(1): 68-80.
- [87] ZHOU Y, FANG L, JIANG L, et al. Uric acid induces renal inflammation via activating tubular NF- $\kappa$ B signaling pathway [J]. *PloS One*, 2012, 7(6): 39738.
- [88] BI F F, CHEN F, LI Y N, et al. Klotho preservation by rhein promotes toll-like receptor 4 proteolysis and attenuates lipopolysaccharide-induced acute kidney injury [J]. *Journal of Molecular Medicine*, 2018, 96: 915-927.
- [89] LI M X, YUE H, WANG Y Q, et al. Intestinal microbes derived butyrate is related to the immunomodulatory activities of dendrobium officinale polysaccharide [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 149: 717-723.
- [90] GAO Y, SUN J, ZHANG Y, et al. Effect of a traditional Chinese medicine formula (CoTOL) on serum uric acid and intestinal flora in obese hyperuricemic mice inoculated with intestinal bacteria [J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2020, 2020: 8831937.
- [91] LI P, CAI X, XIAO N, et al. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) shell extract alleviates hypertension in association with the regulation of gut microbiota [J]. *Food & Function*, 2020, 11(9): 8051-8067.
- [92] HÜGEL H M, JACKSON N, MAY B, et al. Polyphenol protection and treatment of hypertension [J]. *Phytomedicine*, 2016, 23(2): 220-231.
- [93] XIAO H R, YAN Y L, GU Y P, et al. Strategy for sodium-salt substitution: on the relationship between hypertension and dietary intake of cations [J]. *Food Research International*, 2022, 156: 110822.