

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.11.016

# 仙人掌果多糖保护胰岛 $\beta$ 细胞免受氧化应激诱导的凋亡机制研究

储芳馨, 陈寒青

(合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:**文章通过网络药理学预测仙人掌果多糖(OFPPs)保护胰岛 $\beta$ 细胞免受氧化应激损伤的可能机制,并在 $H_2O_2$ 诱导的大鼠胰岛素瘤(INS-1)细胞模型中进行验证。网络药理学预测的结果表明,凋亡相关信号通路在仙人掌果多糖保护胰岛 $\beta$ 细胞免受氧化应激损伤的机制中发挥重要作用;体外实验结果表明,其机制与调节B淋巴细胞瘤-2(Bcl-2)、Bcl-2相关X蛋白(Bax)、半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶3(Caspase3)的表达水平有关。仙人掌果多糖可以减轻氧化应激诱导的胰岛 $\beta$ 细胞凋亡,可能具有作为功能性食品改善糖尿病症状的潜力。

**关键词:**仙人掌果多糖(OFPPs);胰岛 $\beta$ 细胞;氧化应激;细胞凋亡;网络药理学

**中图分类号:**TS201.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)11-1536-06

## Mechanism of *Opuntia dillenii* Haw. fruits polysaccharides protecting pancreatic $\beta$ cells from oxidative stress-induced apoptosis

CHU Fangxin, CHEN Hanqing

(School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

**Abstract:** In this study, the possible mechanism of protection of pancreatic  $\beta$  cells from oxidative stress damage by *Opuntia dillenii* Haw. fruits polysaccharides(OFPPs) was predicted by network pharmacology and validated using an  $H_2O_2$ -induced oxidative stress cell model in INS-1 cells. The results predicted by network pharmacology indicated that apoptosis-related signaling pathway played an important role in the mechanism of protection of pancreatic  $\beta$ -cells from oxidative stress damage by OFPPs, and the *in vitro* experimental results also demonstrated that the mechanism was related to the regulation of Bax, Bcl-2 and Caspase3 expression levels. OFPPs can reduce oxidative stress-induced pancreatic  $\beta$ -cell apoptosis and may have potential as functional foods to improve diabetes symptoms.

**Key words:** *Opuntia dillenii* Haw. fruits polysaccharides (OFPPs); pancreatic  $\beta$  cells; oxidative stress; apoptosis; network pharmacology

糖尿病作为一种以高血糖为特征的慢性代谢综合症,严重影响患者的身心健康,是全人类共同面对的巨大威胁<sup>[1]</sup>。氧化应激是糖尿病发生发展的重要因素,长期的氧化应激状态会导致胰岛 $\beta$ 细胞凋亡和胰岛素分泌不足,从而无法正常调节血糖<sup>[2]</sup>。因此,通过减轻氧化应激状态下的胰岛 $\beta$ 细胞凋亡来改善糖尿病症状可能是一种有效的

策略。

植物多糖是植物细胞代谢产生的聚合度超过10的聚糖,广泛存在于植物中,通常具有高活性、低毒性的特点<sup>[3]</sup>。植物多糖已被证实具有抗氧化、抗疲劳、抗过敏、抗肿瘤、抗炎、免疫调节、降血糖等多种生理活性,有望在保健食品的研发领域发挥巨大优势<sup>[4-6]</sup>。

收稿日期:2023-05-12;修回日期:2023-06-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31972977)

作者简介:储芳馨(1998—),女,安徽岳西人,合肥工业大学硕士生;

陈寒青(1970—),男,安徽桐城人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: hanqchen@hfut.edu.cn.

仙人掌果(*Opuntia dillenii* Haw. fruit)是仙人掌属植物的果实,仙人掌果的果肉中含有丰富的微量元素、蛋白质、氨基酸、维生素、多糖类、黄酮类和果胶等物质,营养价值丰富<sup>[7]</sup>。从仙人掌果中分离纯化的多糖已被证实具有抗肿瘤、降血压、降血糖、抗氧化、抑制菌生长和调节免疫等多种生理活性<sup>[8-14]</sup>。然而目前对于仙人掌果多糖(OFPPs)抗胰岛  $\beta$  细胞凋亡的作用及其机制的研究很少。

网络药理学是基于网络的构建、分析和验证来揭示生物活性成分在分子水平上的作用机理,从整体角度研究活性成分与疾病的关系,突出活性成分、靶点和疾病相互作用的整体性和系统性。网络药理学的应用广泛,目前已经在药理学研究、复杂性疾病机制的揭示和药物的发现、中医药研究和新药创制上取得了显著进展。网络药理学与体内外实验相结合,对于验证活性成分的效果并分析其机制具有巨大的优势<sup>[15]</sup>。

因此,本文通过网络药理学预测仙人掌果多糖对胰岛  $\beta$  细胞氧化应激损伤的保护作用机制,分析凋亡在其中起到的作用,并通过体外实验进行验证,为仙人掌果多糖作为功能性食品应用于改善糖尿病症状提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

3 种 OFPPs 组分由本课题组前期提取分离并进行单糖组成分析;大鼠胰岛素瘤(INS-1)细胞购于中国医学科学院基础医学研究所;3%  $H_2O_2$  溶液、N-乙酰-L-半胱氨酸(NAC)购于美国 Sigma-Aldrich 公司;B 淋巴细胞瘤 2(Bcl-2)、Bcl-2 相关 X 蛋白(Bax)、半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶 3(Caspase3)引物均由北京擎科生物科技有限公司合成。

### 1.2 OFPPs 的分离纯化

仙人掌鲜果洗净、脱皮、去籽后,将果肉打浆,在常温下加入 0.1 mol/L NaOH 溶液,其与果浆的体积比为 4 : 1,并搅拌提取 3 h,将提取液过 100 目筛,3 500 r/min 离心 10 min 获得上清液。使用旋转蒸发器将上清液浓缩至原体积的 1/4 左右,边搅拌边加入无水乙醇并调节最终乙醇体积分数为 20%,4  $^{\circ}C$  静置过夜后 3 500 r/min 离心 10 min 获得 20%乙醇沉淀的粗多糖组分,然后向上清液中继续加入无水乙醇使其最终体积分数为 30%和 40%,重复静置、离心过程获得 30%乙醇和 40%乙醇沉淀的粗多糖组分。将 3 种粗多糖组

分经 AB-8 大孔吸附树脂脱色,再通过 Sevag 法脱蛋白、透析、冻干后,得到经过初步纯化的仙人掌果 3 种粗多糖组分,分别命名为 F1、F2、F3。

将 3 种粗多糖组分完全溶解于超纯水后,离心获得上清液,分别通过 DEAE-纤维素-52 离子交换色谱柱进行纯化,依次用蒸馏水和 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mol/L 的 NaCl 溶液梯度洗脱,收集洗脱液中的主要组分,浓缩、透析、冻干,再将其重新溶解和离心,上清液分别通过 Sephacryl S-400 HR 葡聚糖凝胶柱进一步纯化,使用超水洗脱,收集超水洗脱的主要多糖组分,浓缩、透析、冻干,得到分离纯化的 3 种均一的仙人掌果多糖组分,分别将其命名为 OFPP-1、OFPP-2、OFPP-3。将 3 种多糖组分分别溶于超纯水(质量浓度为 1 mg/mL)制备成多糖水溶液进行后续实验。

对分离纯化获得的 OFPPs 进行单糖组成分析,OFPP-1 由鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、木糖、葡萄糖组成,5 种单糖摩尔比为 2.42 : 1.00 : 1.08 : 0.26 : 0.39,分子量为 803.7 kDa;OFPP-2 和 OFPP-3 由鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖组成,3 种单糖的摩尔比分别为 11.73 : 1.00 : 2.35、1.09 : 1.00 : 0.30,分子量分别为 555.1、414.5 kDa。

### 1.3 OFPPs 的“成分靶点”网络分析

运用 Pubchem 数据库获得各单糖组分的简化分子线性输入系统表达式,并导入到结构相似度预测靶点数据库 SwissTargetPrediction 预测其有效靶点。根据生物活性成分,制作“network”和 Type 文件,并将其导入 Cytoscape 3.9.2 软件进行网络拓扑学分析,根据基因的连接数量(Degree 值)调整靶点的图形、颜色、透明度和大小,构造“成分-靶点”网络图。

### 1.4 氧化应激及糖尿病相关靶点预测

将关键词“Oxidative Stress”与“Diabetes”输入 GeneCards 数据库进行检索,出现疾病相关的基因,下载相关信息得到疾病对应的 Gene Symbol 信息,保留“Gene Symbol”“Description”和“Category”3 列数据进行初步筛选;再将关键词输入在线人类孟德尔遗传(Online Mendelian Inheritance in Man, OMIM)数据库进行再次检索和筛选,下载相关信息,并与初步筛选的基因进行归纳,提出重复基因,合并后即为本研究所研究的疾病靶点。

### 1.5 交集靶点的获取

通过 Venny 软件获取活性成分作用的靶点与疾病的交集靶点,作为仙人掌果多糖减轻氧化

应激、改善糖尿病症状的潜在关键靶点。

### 1.6 蛋白相互作用网络构建及网络拓扑分析

通过 String 平台导入交集基因,设置对象为 homo sapiens、取最高置信度 0.900,隐藏游离基因节点,得到蛋白互作关系;结果导入 Cytoscape 3.9.2 软件中,选择“network analyzer”,得到网络拓扑学参数;然后把下载的 TSV 文件导入 Cytoscape 软件绘制蛋白相互作用图,根据 Degree 值筛选前十的核心靶点。

### 1.7 GO 和 KEGG 富集分析

利用生物信息学开源软件 Bioconductor 在 R 软件内安装运行 clusterProfiler、Stringin 和 Pathview 程序包,对其进行生物学过程的基因本体(Gene Ontology,GO)、京都基因与基因组百科全书(Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes, KEGG)功能富集分析,并通过微生信平台进行可视化显示。GO 分析从生物过程探究针对疾病的作用靶蛋白在基因功能中的作用;KEGG 分析主要为通路分析,目的为阐明活性成分针对疾病的主要信号通路。

### 1.8 实时荧光定量 PCR

将传代后重悬的 INS-1 细胞接种到 6 孔板中培养 3 d,分别使用含有 12.5、25.0、50.0  $\mu\text{g}/\text{mL}$  OFPPs(分别定义为 L、M、H 组)与 50  $\mu\text{g}/\text{mL}$

NAC 的完全培养基培养细胞 24 h,弃上清液,添加完全培养基稀释的 500  $\mu\text{mol}/\text{L}$   $\text{H}_2\text{O}_2$ ,在培养箱中孵育 1 h。使用 Trizol 法提取细胞 RNA。使用 RNA 浓度检测仪测定浓度,并根据所需体系计算出反转 cDNA 需要的上样量,通过聚合酶链式反应(polymerase chain reaction,PCR)仪进行逆转录。反应结束后各管加入 50  $\mu\text{L}$  的无菌蒸馏水,涡旋混匀得到 cDNA 溶液。构建反应体系放入实时荧光定量 PCR 仪中进行扩增,检测 Bcl-2、Bax、Caspase3 的 mRNA 表达水平。

### 1.9 数据分析

实验数据采用 GraphPad Prism 9.0 软件进行统计分析,并以(平均值 $\pm$ 标准差)的形式表示,组间差异比较采用单因素方差分析。与对照组相比,#表示  $P < 0.05$ ,##表示  $P < 0.01$ ;与  $\text{H}_2\text{O}_2$  组相比,\*表示  $P < 0.05$ ,\*\*表示  $P < 0.01$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 活性成分与作用靶点的预测结果

在本课题组前期实验中,对 OFPPs 的单糖组成进行了分析,其中的主要活性成分为鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、木糖和葡萄糖。根据 SwissTargetPrediction 的预测结果,有效靶点为 82 个,具体如图 1 所示。

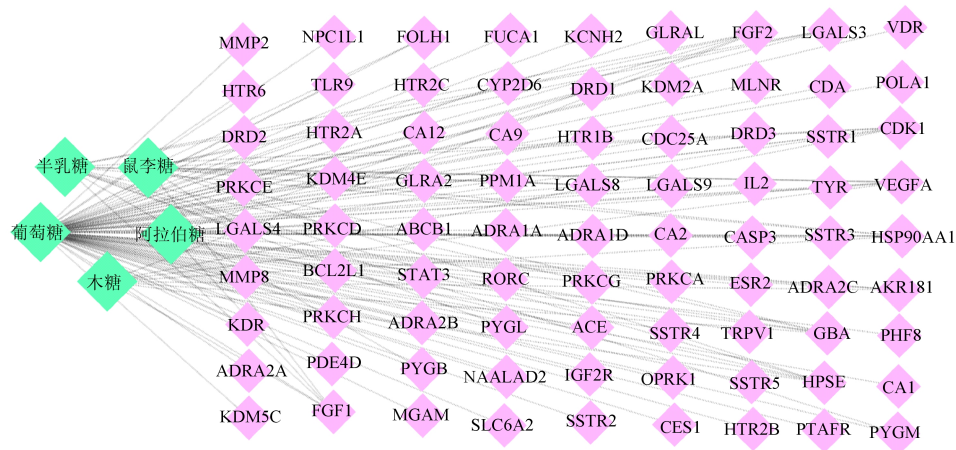


图 1 仙人掌果多糖活性成分靶点预测

### 2.2 氧化应激及糖尿病潜在靶点的筛选结果

通过关键词“Oxidative Stress”和“Diabetes”在 GeneCards 和 OMIM 筛选疾病 Score 较高的靶点,搜寻到“氧化应激”相关的靶点 10 051 个,“糖尿病”相关的靶点 14 895 个,剔除掉重复靶点并合并疾病的交集靶点后,共有 6 623 个潜在靶点。

### 2.3 靶蛋白与交集蛋白的筛选

利用 Venny 在线网站,将 OFPPs 活性成分的作用靶点与氧化应激、糖尿病的相关靶点进行归纳与筛选,如图 2 所示,OFPPs 和氧化应激、糖尿病共有 70 个相关作用靶点,约占总集合的 1.1%。

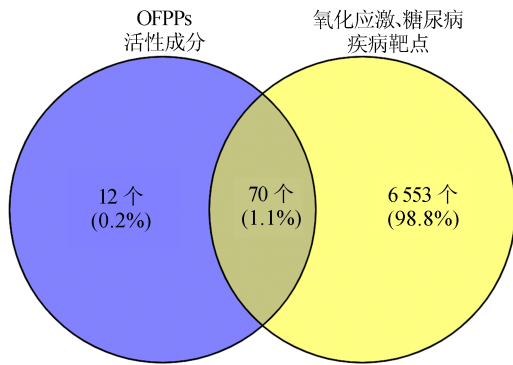


图 2 OFPPs 与氧化应激、糖尿病的共同靶点韦恩图

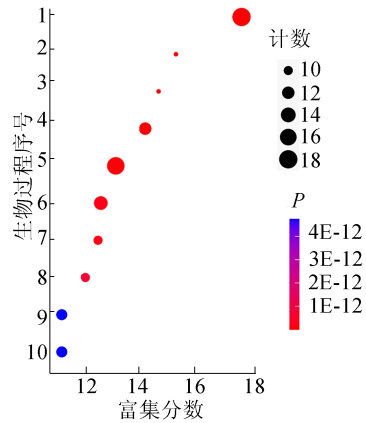


图 4 交集蛋白的 GO 功能富集分析

### 2.4 核心靶点的蛋白相互作用网络构建

将 OFPPs 和氧化应激、糖尿病交集蛋白导入 String 数据库并导入 Cytoscape 软件,得到蛋白相互作用网络图,如图 3 所示。

图 3 中最中心的圆就是筛选出的核心基因,其中前十的核心靶点分别为 CASP3、VEGFA、STAT3、IL2、HSP90AA1、SLC6A2、KDR、BCL2L1、PRKCA 和 FGF2,其中 CASP3 在细胞凋亡中发挥了重要作用。

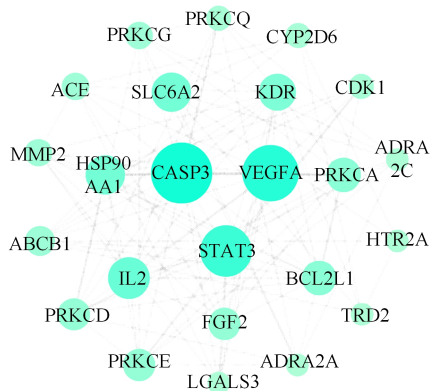


图 3 潜在作用靶点的蛋白相互作用网络关系

### 2.5 GO 富集分析和 KEGG 通路分析

将 70 个交集蛋白导入 Bioconductor 软件进行 GO 富集和 KEGG 通路分析。GO 功能富集分析的结果如图 4 所示。

其中 OFPPs 参与减轻糖尿病中的氧化应激所涉及到的 1~10 号生物过程分别为 G 蛋白偶联受体信号通路、腺苷酸环化酶激活肾上腺素能受体信号通路、肾上腺素能受体信号通路、平滑肌收缩、药物反应、循环系统中的血管过程、血管收缩、血管直径负调节、管径调节、调节血管直径等生物过程。

KEGG 通路分析结果如图 5 所示。

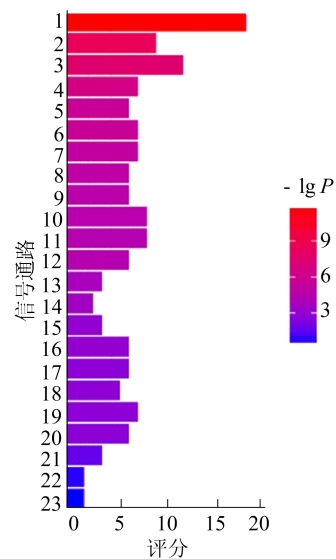


图 5 交集蛋白的 KEGG 通路分析

图 5 中,获取的评分较高的 1~23 号信号通路分别为神经活性配体-受体相互作用、TRP 通道的炎症介质调节、钙信号通路、细胞间隙连接、EGFR 酪氨酸激酶抑制剂耐药性、含血清素的神经突触、血管平滑肌收缩、糖尿病并发症中的 AGE-RAGE 信号通路、胰岛素抵抗和癌症中的蛋白聚糖、化学致癌受体激活、生长激素的合成分泌及作用、淀粉和蔗糖代谢、氮代谢、VEGF 信号通路、Rap1 信号通路、cAMP 信号通路、cGMP-PKG 信号通路、MAPK 信号通路、Ras 信号通路、流体剪切应力和动脉粥样硬化、NF-κB 信号通路、细胞凋亡相关通路。

### 2.6 OFPPs 对信号通路的影响

通过实时荧光定量 PCR 检测 Bcl-2、Bax、Caspase3 的 mRNA 表达水平,结果如图 6 所示。由图 6 可知,在 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的诱导下,INS-1 细胞内 Bcl-2、Caspase3 的 mRNA 表达水平显著提高,而 Bax 的 mRNA 表达水平显著下降,证明氧化应激

状态促进了胰岛  $\beta$  细胞的凋亡,影响了机体对血糖的调节。但在 NAC 和 OFPPs 的处理下,Bcl-2、Caspase3 的 mRNA 表达水平不同程度地降低,而 Bax 的 mRNA 表达水平不同程度地提高,证明了 OFPPs 可以抑制氧化应激状态下胰岛  $\beta$  细胞的凋亡。

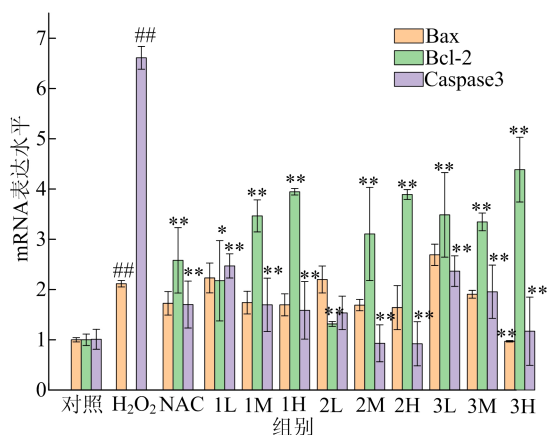


图 6 OFPPs 对 INS-1 细胞凋亡相关因子 mRNA 表达的影响

氧化应激与多种凋亡信号通路有关,氧化应激状态下产生的活性氧可以激活细胞凋亡信号从而促进胰岛  $\beta$  细胞的凋亡,其中 Caspase 家族和 Bcl-2 家族是最常见的调控因子<sup>[16-17]</sup>。Bcl-2 家族由抗凋亡和促凋亡成员组成,调节线粒体凋亡途径,其中 Bcl-2 是一种抗凋亡的线粒体膜蛋白,而 Bax 是一种促凋亡蛋白,Bcl-2 与 Bax 蛋白表达比率的降低驱动凋亡因子释放到细胞质基质中,促进 Caspase3 的激活,从而启动线粒体凋亡<sup>[18]</sup>。一些研究<sup>[19-20]</sup>表明,下调细胞内 Bax/Bcl-2 及 Caspase3 的水平可以有效抑制细胞凋亡。

实验结果表明,3 种 OFPPs 组分均可以不同程度地减轻氧化应激状态下胰岛  $\beta$  细胞的凋亡,其效果的差异可能与多糖不同的结构(如分子量、糖残基和链构象等)有关,需要进一步研究<sup>[21]</sup>。

### 3 结 论

本文通过网络药理学预测 OFPPs 减轻糖尿病中氧化应激的潜在可能与机制,对 OFPPs 及“糖尿病氧化应激”的作用靶点进行整合,其中部分核心蛋白与凋亡相关,且其机制同样涉及到细胞凋亡信号通路。通过细胞实验证明,OFPPs 可以降低 Bcl-2、Caspase3 的 mRNA 表达水平,提高 Bax 的 mRNA 表达水平,抑制凋亡通路的激活。因此,OFPPs 具有通过减轻胰岛  $\beta$  细胞凋亡从而改善糖尿病症状的潜力,但其作用仍需进一步体

内外实验验证。

### [参 考 文 献]

- [1] BHUTTA Z A, SALAM R A, GOMBER A, et al. A century past the discovery of insulin: global progress and challenges for type 1 diabetes among children and adolescents in low-income and middle-income countries [J]. *Lancet*, 2021, 398(10313):1837-1850.
- [2] SHEN G X. Oxidative stress and diabetic cardiovascular disorders: roles of mitochondria and NADPH oxidase [J]. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 2010, 88(3):241-248.
- [3] 刘思扬, 陆雅琦, 海日汉, 等. 功能性植物多糖及其应用研究进展 [J]. *食品工业科技*, 2022, 43(21):444-453.
- [4] 吕青青, 陈寒青. 小麦麸皮硒化多糖的肝保护活性研究 [J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 45(5):694-699.
- [5] 汪彬慧, 陈寒青. 莲雾果多糖的结构及抗氧化活性测定 [J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(6):849-854.
- [6] YU W, ZENG D, XIONG Y, et al. Health benefits of functional plant polysaccharides in metabolic syndrome: an overview [J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 95:105154.
- [7] MOUSSA-AYOUB T E, EL-SAMAHY S K, KROH L W, et al. Identification and quantification of flavonol aglycons in cactus pear (*Opuntia ficus indica*) fruit using a commercial pectinase and cellulase preparation [J]. *Food Chemistry*, 2011, 124(3):1177-1184.
- [8] 曹俊涛. 仙人掌果抗高血脂作用实验研究 [D]. 南宁: 广西医科大学, 2008.
- [9] 梁蓓蓓, 刘华钢, 曹俊涛. 仙人掌果多糖对 S180 荷瘤小鼠抑瘤作用的实验研究 [J]. *癌症*, 2008, 27(6):580-584.
- [10] 梁秋云, 黄慧学, 曹俊涛, 等. 仙人掌果多糖提取物对自发性高血压大鼠血管内皮功能的保护作用 [J]. *中药材*, 2011, 34(7):1104-1107.
- [11] 梁秋云, 刘华钢, 黄慧学, 等. 仙人掌果多糖对自发性高血压大鼠血压的调节及机制 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2010, 16(6):167-170.
- [12] 邓海云, 夏陈, 李燕君, 等. 不同品系甘孜州梨果仙人掌果多糖的含量及初步生物活性研究 [J]. *中国食物与营养*, 2019, 25(2):59-63.
- [13] 梁秋云, 蒙华琳, 刘华钢, 等. 仙人掌果多糖降血糖作用及其机制 [J]. *中国新药杂志*, 2010, 19(14):1252-1254, 1259.
- [14] GAO J, HAN Y L, JIN Z Y, et al. Protective effect of polysaccharides from *Opuntia dillenii* Haw. fruits on streptozotocin-induced diabetic rats [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 124:25-34.
- [15] 周文霞. 网络药理学的研究进展和发展前景 [J]. *中国药理学与毒理学杂志*, 2015, 29(5):760-762.
- [16] FINKEL T, HOLBROOK N J. Oxidants, oxidative stress and the biology of ageing [J]. *Nature*, 2000, 408(6809):239-247.
- [17] LIAO Z Z, ZHANG J Y, WANG J Y, et al. The anti-ne-

- phritic activity of a polysaccharide from okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) via modulation of AMPK-Sirt1-PGC-1 $\alpha$  signaling axis mediated anti-oxidative in type 2 diabetes model mice [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 140:568-576.
- [18] PAN Y N, YUAN S L, TENG Y L, et al. Antioxidation of a proteoglycan from *Ganoderma lucidum* protects pancreatic beta-cells against oxidative stress-induced apoptosis *in vitro* and *in vivo* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 200:470-486.
- [19] 梁结斐,陈震尧,吴伟斌. 番石榴叶水提物对四氧嘧啶诱导体外胰岛 INS-1 细胞凋亡的保护作用及其机制[J]. *中国当代医药*, 2022, 29(31):5-10, 15.
- [20] YANG X D, BAI Z F, ZHANG Y, et al. Flavonoids-rich extract from *Bidens bipinnata* L. protects pancreatic  $\beta$ -cells against oxidative stress-induced apoptosis through intrinsic and extrinsic pathways[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2021, 275:114097.
- [21] 东韦正. 植物多糖降血糖作用及其机理研究进展[J]. *医学食疗与健康*, 2022, 20(12):145-148.

(责任编辑 闫杏丽)

## (上接第 1483 页)

- [6] FENG D, REN X, YANG Y. A gesture recognition system based on time domain features and linear discriminant analysis[J]. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 2021, 13(1):200-208.
- [7] HOU J, LI X Y, ZHU P, et al. Signspeaker: a real-time, high-precision smart watch-based sign language translator [C]//The 25th Annual International Conference. [S. l. : s. n. ], 2019:1-15.
- [8] OLIVEIRA M, SUTHERLAND A, FAROUK M. Two-stage PCA with interpolated data for hand shape recognition in sign language[C]//IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop. [S. l. ]; IEEE, 2016:1-4.
- [9] LEE J H, DELBRUCK T, PFEIFFER M. Training deep spiking neural networks using backpropagation[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2016, 10:508.
- [10] GUO D, ZHOU W, LI H, et al. Hierarchical LSTM for sign language translation[C]//AAAI Conference on Artificial Intelligence. [S. l. ]; AAAI, 2018:6845-6852.
- [11] WU D, PIGOUL, KINDERMANS P J, et al. Deep dynamic neural networks for multimodal gesture segmentation and recognition[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2016, 38(8):1583-1597.
- [12] YAN Z, ZHOU J, WONG W F. Energy efficient ECG classification with spiking neural network[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2021, 63:102170.
- [13] CHENG L, LIU Y, HOU Z G, et al. A rapid spiking neural network approach with an application on hand gesture recognition[J]. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 2019, 13(1):151-161.
- [14] CAO Y, CHEN Y, KHOSLA D. Spiking deep convolutional neural networks for energy-efficient object recognition [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2015, 113(1):54-66.
- [15] TAHERKHANI A, COSMA G, MCGINNITY T M. Optimization of output spike train encoding for a spiking neuron based on its spatiotemporal input pattern[J]. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 2020, 12(3):427-438.
- [16] TANG G, KUMAR N, YOO R, et al. Deep reinforcement learning with population-coded spiking neural network for continuous control [C]//Conference on Robot Learning (CoRL). [S. l. : s. n. ], 2020:2016-2029.
- [17] MAASS W. Noisy spiking neurons with temporal coding have more computational power than sigmoidal neurons [M]//Advances in Neural Information Processing Systems. [S. l. : s. n. ], 1997:211-217.
- [18] KE W, XING Y, CATERINA G D, et al. Deep convolutional spiking neural network based hand gesture recognition[C]//2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). [S. l. : s. n. ], 2020:1-7.
- [19] REZAABAD A L, VISHWANATH S. Long short-term memory spiking networks and their applications[C]//Proceedings of the International Conference on Neuromorphic Systems. [S. l. : s. n. ], 2020:1-9.
- [20] FANG W, CHEN Y Q, DING J H, et al. Spikingjelly[EB/OL]. [2022-04-18]. <https://github.com/fangwei123456/spikingjelly>.
- [21] SU Z, LIU H, QIAN J, et al. Hand gesture recognition based on sEMG signal and convolutional neural network [J]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2021, 35(11):2151012.
- [22] CONG L N, ZHOU S, HU S, et al. Hand gesture recognition based on sEMG signal and improved svm voting method[C]//2020 IEEE 3rd International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE). [S. l. ]; IEEE, 2020:605-608.
- [23] SAYIN F S, OZEN S, BASPINAR U. Hand gesture recognition by using sEMG signals for human machine interaction applications [C]//2018 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA). [S. l. : s. n. ], 2018:27-30.

(责任编辑 李 凯)