

莲的生物活性成分及生理功能研究进展

杨 惠, 裴娟娟

(武汉市蔡甸区公共检验检测中心, 湖北 武汉 430000)

摘要: 莲(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)是莲科莲属(*Nelumbo*)的多年水生双子叶草本植物,在中国湖北、江苏、安徽、江西、湖南、浙江等地区大量种植。研究表明,莲不同部位含有大量生物活性成分,包括多酚类、生物碱、多糖类、膳食纤维、维生素、氨基酸及多种微量元素。从莲中提取的生物活性成分具有多种生理功能,如抗炎、抗氧化、抗衰老、抗肿瘤、降血糖、降血脂、减肥、护肝、护肾、促进睡眠、免疫调节、治疗阿尔茨海默病、抗病毒、缓解抑郁症等。综述了近年来国内外对莲不同部位的生物活性成分及其生理功能的最新研究进展,旨在为深入挖掘莲药用价值提供理论参考。

关键词: 莲;生物活性成分;生理功能

中图分类号: Q599

文献标志码: A

文章编号: 2096-3491(2024)02-0112-14

Advances on bioactive compounds and physiological functions of *Nelumbo nucifera* Gaertn.

YANG Hui, PEI Juanjuan

(Wuhan Caidian District Public Inspection and Testing Center, Wuhan 430000, Hubei, China)

Abstract: *Nelumbo nucifera* Gaertn. is a perennial aquatic dicotyledonous plant of the genus *Nelumbo* in the family Nelumbonaceae, widely cultivated in Hubei, Jiangsu, Anhui, Jiangxi, Hunan, Zhejiang and other areas of China. Studies have shown that different parts of *Nelumbo nucifera* Gaertn. contain a large amount of bioactive components, including polyphenols, alkaloids, polysaccharides, dietary fiber, vitamins, amino acids, and various trace elements. The extracted bioactive components from lotus have multiple physiological functions, such as anti-inflammatory, antioxidant, anti-aging, anti-tumor, hypoglycemic, lipid-lowering, weight loss, liver and kidney protection, sleep promotion, immune regulation, treating Alzheimer's disease, antiviral and relieving depression. This paper reviews the recent research progress on the bioactive components of different parts of *Nelumbo nucifera* Gaertn. and their physiological functions, both domestically and internationally, aiming at providing theoretical reference for further exploring the medicinal value of *Nelumbo nucifera* Gaertn.

Key words: *Nelumbo nucifera* Gaertn.; bioactive compound; physiological function

0 引言

莲(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)是亚洲大陆的一种水生双子叶植物,属于被子植物门(Angiospermae),睡莲目(Nymphaeales),睡莲科(Nymphaeaceae),莲属(*Nelumbo*)。莲是地球上古老且种植广泛

的物种^[1]。莲是重要的水生植物,是重要的水生经济植物,是重要的观赏植物,同时也是重要的药用植物,具有极高的食用价值、观赏价值、药用价值和文化价值。莲在中国不仅种植历史悠久,且产量还令人瞩目,总产量居世界首位^[2]。近年来,中国莲藕产值稳定增长。根据有关研究报告显示,2023年全国

收稿日期: 2023-12-22 修回日期: 2024-01-28 接受日期: 2024-04-08

作者简介: 杨惠(1991-),女,工程师,硕士,主要从事食品质量安全检验检测。E-mail: 18696170639@163.com

引用格式: 杨惠,裴娟娟. 莲的生物活性成分及生理功能研究进展[J]. 生物资源, 2024, 46(2): 112-125.

Yang H, Pei J J. Advances on bioactive compounds and physiological functions of *Nelumbo nucifera* Gaertn. [J]. Biotic Resources, 2024, 46(2): 112-125.

莲藕种植产量超过千万吨,产业产值近千亿元^[3]。莲藕主要在中国长江中下游地区,湖北、江苏、安徽、江西、湖南、浙江等地大量种植^[4]。其中,湖北省是中国莲藕主要种植地区,莲藕种植面积及产量全国第一^[5]。据统计,2022年湖北省莲藕总产量320万吨,产业综合产值约255亿元^[6]。

莲的根、茎、叶、花、果等都对人类健康大有裨益。莲的根茎藕是主要的食用部分,是美味、营养的日常蔬菜之一。莲花可用于园林景观和水生生态系统的建设。莲叶和莲子均已被中国国家卫生健康委员会批准列入“既是食品又是药品”的名单之中,在中国有着悠久的食用历史和民间药用历史。据古籍记载,莲各部分均可入药。莲叶能解暑、治疗腹泻、凉血止血。莲花能清热解毒、止血。莲须能益肾、止血、解暑,可治疗梦遗滑泄和子宫出血。藕能生津止渴、健脾开胃、益血补心,藕节能止血散瘀。莲房具有清瘀、止血、去湿等功效,可治疗血崩、月经过多。莲子具有固精止带、补脾止泻、益肾养心等功效,可治疗心悸、虚烦失眠。莲子心具有清热、安神、止血、涩精等功效,可治疗心烦口渴、吐血、遗精、目赤肿痛。现代各类研究表明,莲叶、莲花、莲藕、莲子、莲房、莲须(雄蕊)、藕节、胚芽(莲子心)等不同部位的多种药用功效,是因其含有多种生物活性物质,主要是酚酸、黄酮类、单宁类、多糖和生物碱等^[7-10]。

多年来,国内外已有大量关于莲不同部位生物活性成分的生理功能及其作用机制研究。研究结果显示,莲花具有抗炎、抗氧化、抗衰老、抗肿瘤、治疗阿尔兹海默症、免疫调节等功能。莲子具有抗氧化、抗炎、降血糖、降血脂、抗肿瘤、治疗阿尔兹海默症、促进睡眠等作用。莲叶具有减肥减脂、降血脂、抗炎、抗氧化、抗肿瘤、促眠、免疫调节等功效。莲房和莲心具有抗氧化、抗炎、抗肿瘤、降血糖、护肝、护肾等作用^[11-13]。因此,莲在功能保健品和药物治疗等领域具有很好的应用潜力。基于以往的研究结果,系统地总结了莲不同部位的生物活性成分,以及其生理功能的最新研究进展,旨在为深入挖掘莲的价值,更好地开发利用其活性成分,促进其在医药、保健品、食品、化妆品等领域广泛应用,为莲产业的高质量发展提供理论依据和理论参考。

1 生物活性成分

1.1 多酚类

多酚类广泛存在于植物体内,是具有多个羟基酚类植物的总称,是植物体内重要的次生代谢产物,具有抗氧化、抗炎、抗癌、降血脂、降血压等多种功

效。莲中多酚主要存在于莲藕、莲叶和莲子中,主要包括黄酮类、酚酸类、单宁类、花色苷类、木脂素和二苯乙烯等。有研究者从莲子(胚和子叶)和莲藕(果皮、莲节和果肉)5个部分中共鉴定出86种酚类化合物,包括酚酸(20种)、黄酮类(51种)、木脂素(3种)、二苯乙烯类(2种)和其他多酚类(10种)。其中,莲子胚(59种)的酚类化合物(68%)最多。高效液相色谱(HPLC)定量分析,莲藕皮和莲子胚的多酚含量明显高于其他部分^[14]。

1.1.1 黄酮类

黄酮类化合物是两个具有酚羟基的苯环,通过中央三碳原子相互连接的化合物。黄酮类化合物主要存在于莲叶、胚芽和莲花中。莲中黄酮类化合物中黄酮醇亚类种类最多,主要是山柰酚(1)、槲皮素(2)、异鼠李素(3)及其衍生物等。有学者鉴定出莲叶含有黄芩素(4)、山柰酚(1)、山柰素(5)、槲皮素(2)、异鼠李素(3)、金丝桃苷(6)、山柰苷(7)和芦丁(8)等黄酮类化合物^[15],结构见图1。有研究者从莲花中分离鉴定出杨梅素(9)、木犀草素(10)、槲皮素(2)、柚皮素(11)、山柰酚(1)、异鼠李素(3)、花青素(12)、飞燕草色素(13)等黄酮类物质^[16],结构见图1。

1.1.2 酚酸类

酚酸类化合物是芳烃的含羟基衍生物,主要存在于莲藕、莲子和莲叶中。莲中酚酸类物质主要是表没食子儿茶素(9)、表儿茶素(10)、儿茶素(11~12)、咖啡酸(13)、阿魏酸(14)、香豆酸(15)、多巴(16~18)、绿原酸(15)和白芦醇(20)等^[17]。有学者从莲子中提取分离出5种酚类化合物,分别是羟基苯甲酸(21)、原儿茶酸(22)、*p*-香豆酸(23)、阿魏酸(14)、芥子苷B(24)^[18]。有研究者从莲藕中鉴定出单体酚,主要是香豆酸(15)、没食子儿茶素(9)、儿茶素(11~12)、表儿茶素(10)、焦性没食子酸(25)和天麻素(26)^[19],结构见图2。

1.1.3 单宁类

单宁类物质是鞣质类,是一类分子较大的复杂多元酚类化合物,能与蛋白质结合成不溶于水的沉淀物。莲中提取出的鞣质,主要是原花青素(27-31)、没食子酸(32)、没食子酸乙酯(33)、没食子酸甲酯(34),详见图3。

1.2 生物碱

生物碱是存在于植物中的碱性含氮化合物,主要存在于莲花、莲叶和莲子中。莲中生物碱主要成分是阿朴菲、苜基异喹啉和双苜基异喹啉等。研究者们从莲子胚中分离得到27种异喹啉生物碱(图4)^[20]。研究人员从莲花中提取分离出9种苜基异喹

啉生物碱(图5)^[21]。有研究通过超高效液相色谱-三重四极杆串联质谱联用技术,测定了13个产地莲子心中的生物碱,生物碱主要有3种,分别是莲心碱、异莲心碱和甲基莲心碱(图6)^[22]。有学者从莲叶中分离并鉴定了5种生物碱,分别为异莲心碱、罗默碱、赖氨酸、莲心碱和N-甲基乌药碱(图7)^[23]。

1.3 多糖类

多糖是由单糖单元组成并通过糖苷键连接在一起的生物大分子,主要存在于莲子和莲藕中。有研究采用热水法联合 α -淀粉酶提取得到莲藕多糖,并利用不同体积分数乙醇沉淀得到4个级分的莲藕多糖LP30、LP45、LP60和LP75,多糖主要由不同成分单糖组成,主要单糖为葡萄糖、半乳糖、鼠李糖、阿拉伯糖组成^[24]。研究人员从莲子中分离出莲子寡糖(LOSs),对LOS结构进行表征,LOSs的单糖成分包括葡萄糖、甘露糖、果糖和半乳糖。分离得到的低聚糖聚合物LOS2、LOS3-1、LOS3-2和LOS4的成分分别为双糖、三糖、三糖和四糖^[25]。

1.4 挥发油类

挥发油,也称为精油、香气或挥发性成分,主要由脂肪烃、芳香化合物和萜类化合物组成,主要存在于莲叶、莲花和胚芽中。研究者们鉴定了中国11个地区鲜莲叶挥发油,发现其化学成分主要是L-(+)-抗坏血酸-2,6-二十六烷酸酯(0~33.5%)、反式叶黄素(5.1%~24.1%)、六氢法呢基丙酮(5.6%~15.3%)、丙烯酸癸酯(2.2%~12.4%)、香叶基丙酮(1.9%~8.0%)和 β -离子酮(0~8.0%)^[26]。有学者从莲叶中提取鉴定出了108种挥发油成分,占比为99.05%~99.95%,主要挥发性成分为植物醇、棕榈酸、 α -桉叶醇、榄香醇、芳樟醇、植酮、Beta-大马酮、亚麻酸甲酯、花生四烯酸、1-十六烯、十一烷、八氟环丁烷、2-甲基十九烷、4,7-二甲基十一烷^[27]。

1.5 其他成分

莲叶中还含有多种不挥发性有机酸,如没白桦脂酸、肉桂酸、酒石酸、苹果酸和茴香酸等^[7]。莲藕和莲子中还含有微量元素钾、钙、铜、铁、镁、锰、硒、

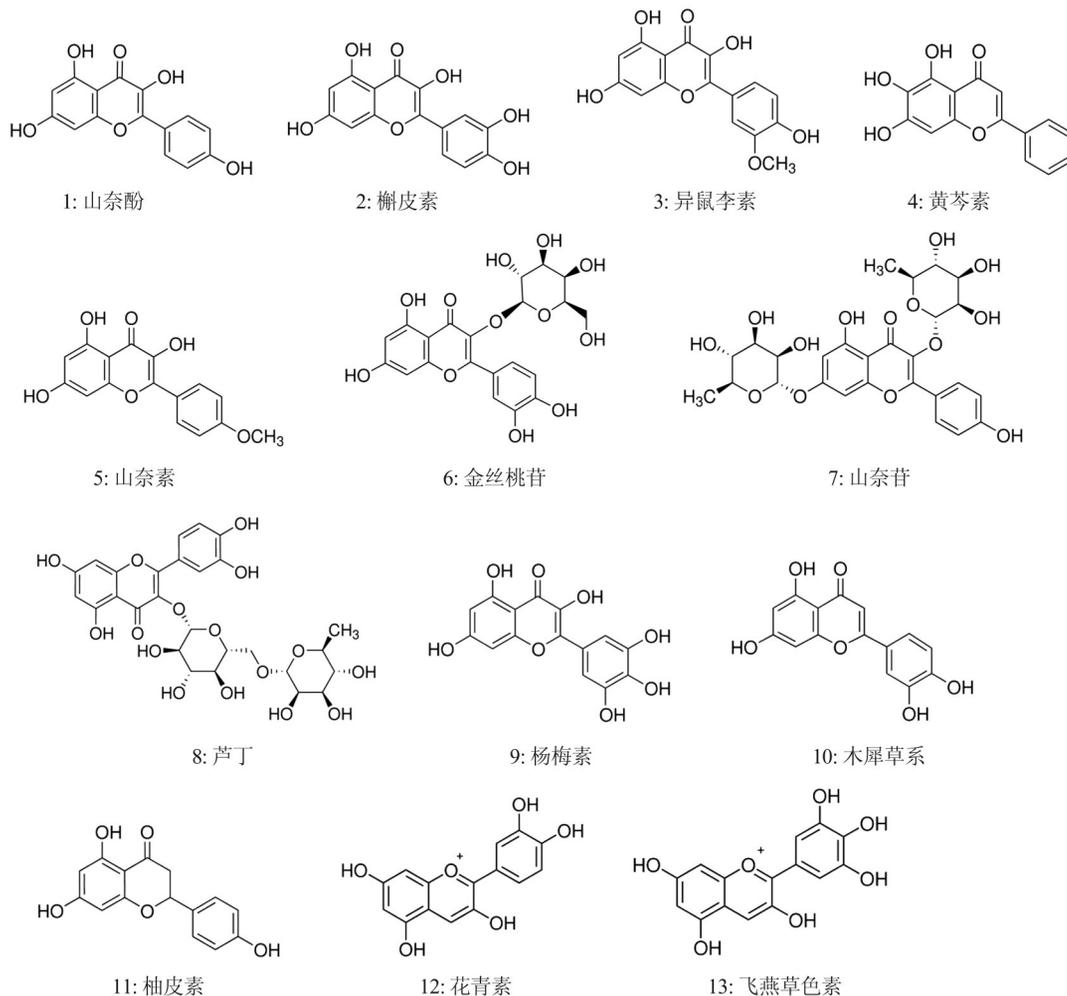


图1 莲中分离鉴定出的黄酮类

Fig. 1 Flavonoids isolated from *Nelumbo nucifera* Gaertn.

锌等。莲子中还含有必需和非必需氨基酸,苏氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、色氨酸等,以及多种维生素,如维生素B1、B2、B3、B6,维生素C和维生素E等^[11]。

2 生理功能

2.1 抗炎

药用植物是抗炎治疗非常有益的天然来源,可以极大地降低药物成本和风险。近年来,富含多种维生素和类黄酮的天然疗法在炎症治疗中大量应用。不少研究者调查了莲的抗炎作用,评估其药理学用途。有研究者研究了莲子乙醇提取物对角叉菜胶诱导雄性白鼠的抗炎活性,结果发现莲子乙醇提取物 400 mg/kg bw (bw:body weight)对雄性白鼠抗炎效果最好^[28]。有学者研究了莲叶黄酮提取物(lotus leaf flavonoid extract, LLFE)的抗炎活性,采用MTT法测定LLFE对受损 293T(H₂O₂, 0.3 mmol/L)细胞的影响,研究LLFE对D-Gal/LPS(30 mg/kg bw和3 μg/kg bw)诱导小鼠的抗炎作用。结果表

明,LLFE减轻了受伤小鼠的炎症,上调了抗炎细胞因子,白细胞介素-10(IL-10)和白细胞介素-12(IL-12),下调了促炎细胞因子,白细胞介素-6(IL-6)、白细胞介素-1β(IL-1β)、肿瘤细胞坏死因子(TNF-α)和干扰素-γ(IFN-γ)的水平^[15]。有学者采用角叉菜胶诱导足水肿法,评估了莲藕果实(*Nelumbo nucifera* fruit, NNF)的抗炎作用。结果发现,NNF提取物显著减轻了足部炎症,降低了角叉菜胶诱导的各剂量组大鼠水肿体积。其作用机制主要是通过NNF中黄酮类化合物、皂苷和鞣质协同作用达到抗炎效果,抑制花生四烯酸代谢、中性粒细胞脱粒和促进细胞增殖和调节补体系统的酶系统^[29]。有研究人员采用液质联用技术,系统研究了13个产地莲心中3种主要生物碱(莲心碱、异莲心碱和甲基莲心碱)的抗炎作用,并通过体外抗炎活性实验,证实3种生物碱都具有良好的抗炎活性^[22]。有研究发现,从莲藕藕节中提取分离出的含有没食子儿茶素四聚体的原花青素生物活性成分,可抑制过敏性大鼠的IL-9 mRNA上调,通过抑制活化T细胞核因子信号传导

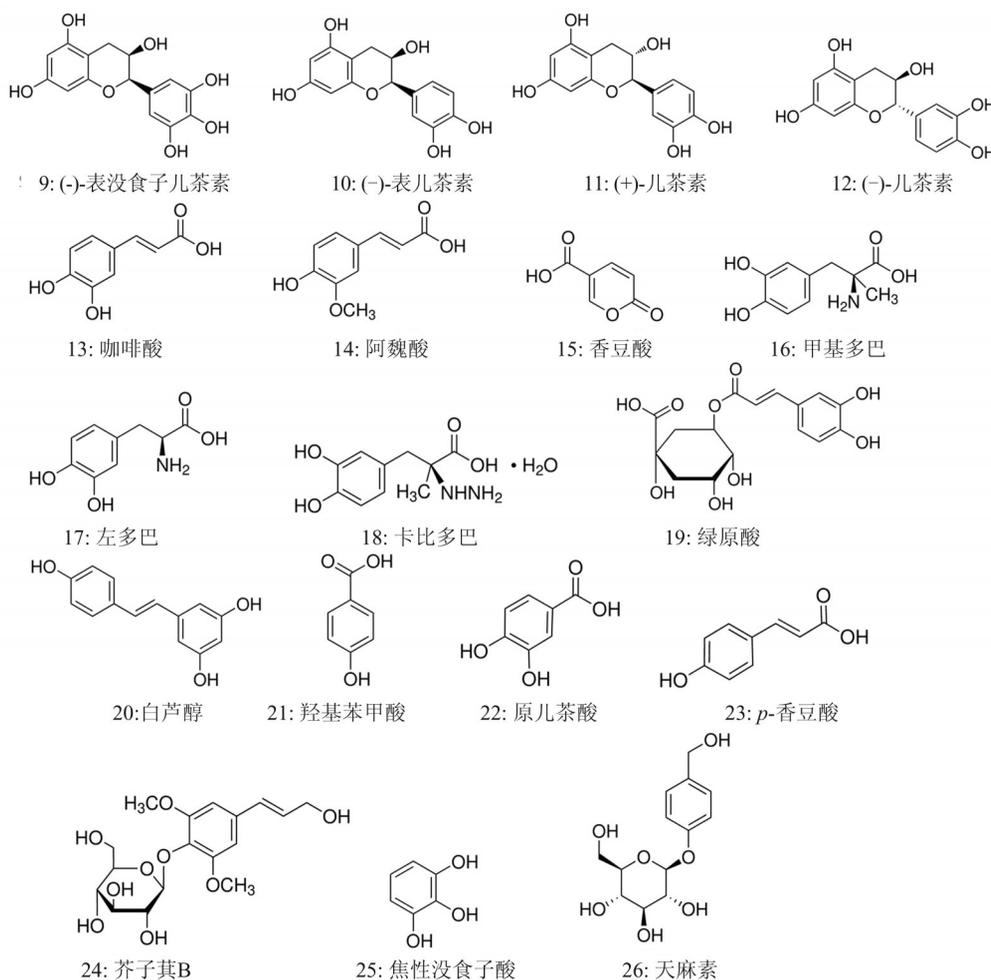


图2 莲中分离鉴定出的酚酸类

Fig. 2 Phenolic acids isolated from *Nelumbo nucifera* Gaertn.

(过敏性鼻炎发病机制的额外信号传导)来减轻鼻炎症状,其或可与抗组胺药联合治疗过敏性鼻炎^[30]。研究者们发现从莲心中分离得到的莲心碱,对右旋糖酐硫酸钠(DSS)诱导的小鼠急性溃疡性结肠炎和慢性溃疡性结肠炎均具有保护作用^[31,32]。综上,莲的不同部位(莲子、莲花、莲叶、莲心)均表现出良好的抗炎作用,将来或可作为抗炎剂用于治疗多种炎症,缓解炎症反应以及缓解因炎症引起的疼痛。

2.2 抗氧化

莲中的黄酮类、酚酸类、多糖类化合物能够有效清除自由基,具有良好的抗氧化特性。有研究评估了莲藕(皮、节和果肉)和莲子(胚和子叶)的酚类含量和抗氧化能力,发现莲副产品和莲藕加工废弃物中含有丰富的酚类化合物,具有突出的抗氧化作用,可作为天然抗氧化剂。如表1所示,莲子胚的总酚含量(10.77 ± 0.66 mg GAE/g_{t.w.})最高,其次是藕节,其总酚含量显著高于其他部位。莲子胚的总黄酮含量(1.61 ± 0.03 mg QE/g_{t.w.})最高,其次是莲子叶,其总黄酮含量也明显高于其他部位。而总单宁含量最高的是藕节(1.77 ± 0.04 mg CE/g_{t.w.}),其次是藕皮,其余部位单宁含量均较低。2,2-二苯基-1-吡啶酰肼(2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH)清除活性最高的是莲子胚(9.66 ± 0.10 mg AAE/g_{t.w.}),藕节次之,藕皮次之。

2,2-叠氮基-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(2,2-azino-bis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid, ABTS)清除活性最高的是莲子胚(14.35 ± 0.20 mg AAE/g_{t.w.}),其次分别是藕节和藕皮。铁离子还原抗氧化能力(ferric ion reducing antioxidant power, FRAP)最高的是藕节(2.30 ± 0.13 mg AAE/g_{t.w.}),其次藕皮略低于藕节,再是莲子胚。莲子胚总抗氧化能力(6.46 ± 0.30 mg AAE/g_{t.w.})也最强,其次是藕节、藕皮^[14]。

一项关于莲花不同部位(花茎、雄蕊、花瓣、老叶、叶柄、种子胚)抗氧化活性的研究发现,莲花各部位均具有抗氧化能力,其DPPH自由基清除能力范围为0.43~1.21 μmol TE/100 g DW(TE: Trolox equivalent; DW: dry weight),FRAP活性范围为15.39~281.46 μmol TE/g DW,氧自由基吸收能力(oxygen radical absorbance capacity, ORAC)活性范围为119.94~1 001.12 μmol TE/g DW。其中,老叶的DPPH自由基清除能力和ORAC活性最高,其他部位大小依次是雄蕊、花瓣、种子胚、花茎、叶柄。而雄蕊的FRAP活性最高,老叶次之、种子胚次之、花瓣次之、花茎次之、叶柄次之。因此,雄蕊、老叶和花瓣是莲花整体抗氧化活性最高的部位^[16]。研究红色和白色莲花花瓣的水提取(aqueous of *N. nu-*

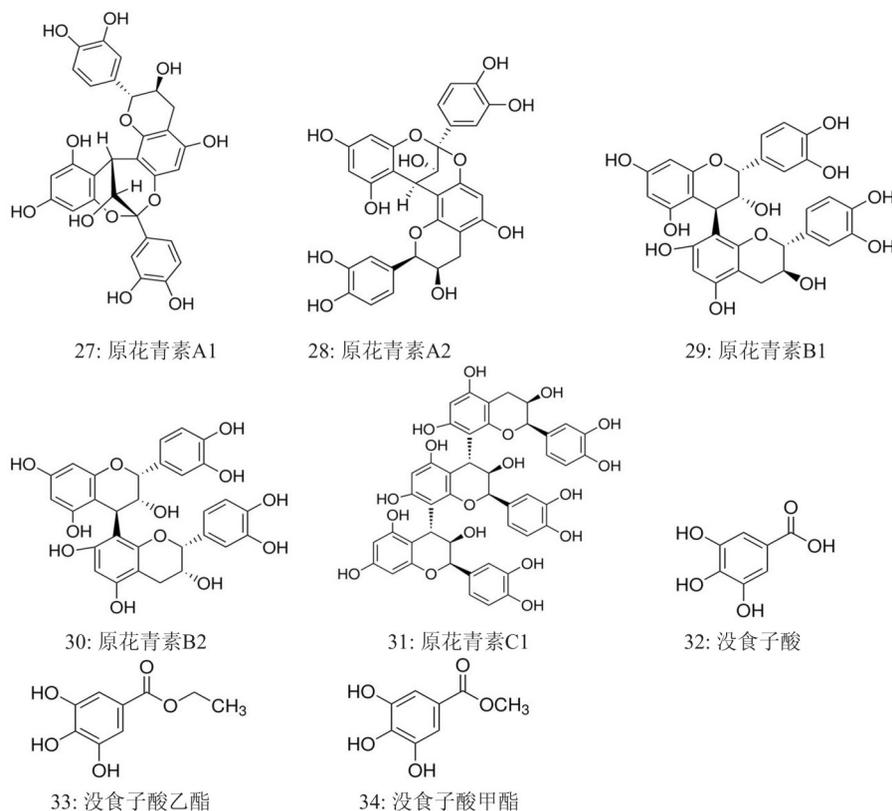


图3 莲中分离鉴定出的单宁类

Fig. 3 Tannins isolated from *Nelumbo nucifera* Gaertn.

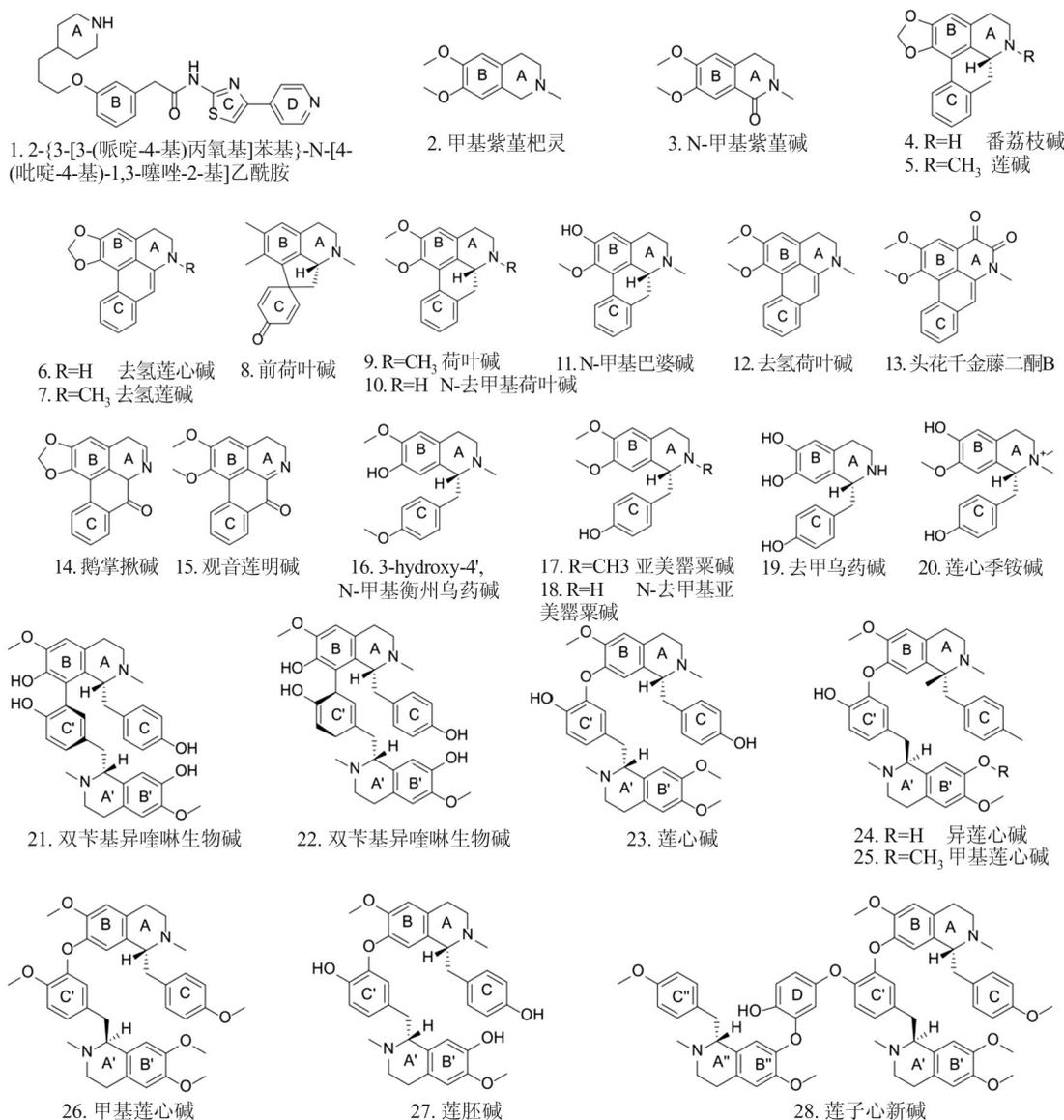


图4 莲子胚中分离鉴定出的27种生物碱^[20]

Fig. 4 Twenty-seven alkaloids isolated from *Nelumbo nucifera* Gaertn. seed embryos

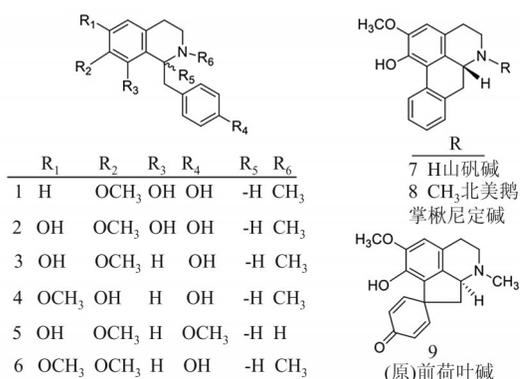


图5 莲花中分离鉴定出的9种生物碱^[21]

Fig. 5 Nine alkaloids isolated from *Nelumbo nucifera* Gaertn. petals



图6 莲花中分离鉴定出的3种生物碱^[22]

Fig. 6 Three alkaloids isolated from *Nelumbo nucifera* Gaertn. petals

cifera petals, NAE) 和乙醇提取物 (ethanolic extracts of *N. nucifera* petals, NEE) 的植物化学成分含量、抗

氧化活性,结果发现白色NAE的总酚含量、总单宁含量和抗氧化活性最高^[33]。研究发现,莲叶黄酮提取物(LLFE)具有抗氧化活性,LLFE降低了受损的

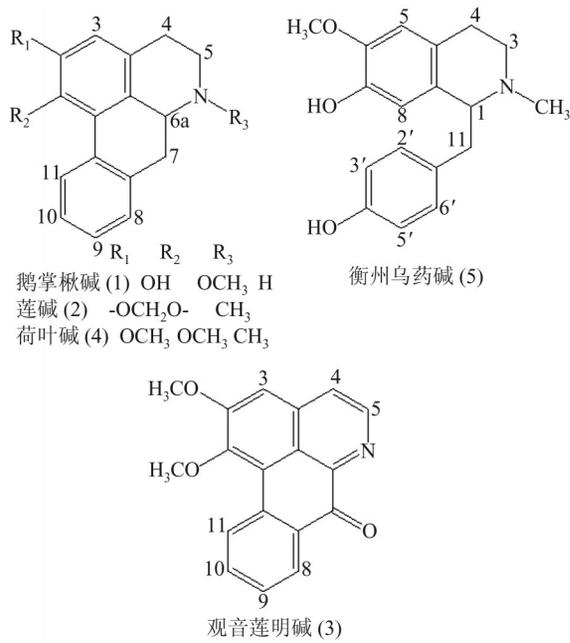


图7 莲叶中分离鉴定出的5种生物碱^[23]

Fig. 7 Five alkaloids isolated from *Nelumbo nucifera* Gaertn. leaves

293T 细胞的氧化损伤,增加了抗氧化酶(SOD、CAT、GSH 和 GSH-Px)的水平,降低了丙二醛(MDA)的水平^[15]。研究发现乙酸乙酯和乙醇莲花花瓣提取物均具有很高的抗氧化能力^[34]。研究通过 DPPH 自由基清除试验测定莲花和睡莲(*Nymphaea lotus*)提取物的抗氧化性能,发现莲花及其各组分对 DPPH 自由基的 IC₅₀ 值范围为 (33.46±0.6) ~ (3.52±0.09) μg/mL, 而睡莲的 IC₅₀ 值范围为

(14.30±0.43)~(1.43±0.08) μg/mL, 结果证明,莲花的抗氧化性能明显强于睡莲^[35]。有学者使用酵母模型验证莲花雄蕊中黄酮类化合物的抗氧化能力,发现雄蕊提取物的黄酮类化合物含量高于其他花成分,雄蕊乙醇提取物活性氧/氮的保护作用最强^[36]。

因此,莲中的黄酮类和酚酸类物质具有优异的抗氧化活性,而目前产业价值低的莲副产品和莲藕加工废弃物,抗氧化能力更好。这为今后更好地开发利用低成本莲副产品和加工废弃物提供了新思路,其生物活性成分可作为高附加值的功能性食品、保健品和药物等产品的新原料。

2.3 抗衰老

人们对抗衰老的追求日益增长,抗衰老不仅仅是外貌的追求,更是一种健康、活力和长寿的追求。近年有研究发现,莲的生物活性化合物具有抗衰老的功能。有研究评估了莲花雄蕊中黄酮类化合物对皮肤抗衰老的功效,发现雄蕊提取物的抑制酪氨酸酶和胶原酶(衰老相关关键酶)含量比莲花整花高,说明雄蕊提取物对皮肤的抗衰老效果更好^[36]。一项实验通过体外和体内两种实验方法,证实了莲叶中黄酮类化合物的抗衰老能力。莲叶中的7种黄酮类化合物,山奈酚-3-O-洋槐糖苷(Kae-3-Rob)对3种皮肤衰老相关酶(胶原酶、弹性蛋白酶和酪氨酸酶)的抑制效果最好。Kae-3-Rob能够较好地抑制胶原酶(58.24% ± 8.27%)、弹性蛋白酶(26.29% ± 7.16%)和酪氨酸酶(69.84% ± 6.07%)。进行

表1 莲藕和莲子不同部位多酚含量及抗氧化活性^[14]

Table 1 Polyphenol content and antioxidant activity in different parts of *Nelumbo nucifera* Gaertn. root and seed

抗氧化试验	莲藕果肉(LR)	莲藕皮(LRP)	莲藕节(LRK)	莲子胚(LSE)	莲子叶(LSC)
TPC (mg GAE/g _{t.w.})	0.34 ± 0.01 ^c	3.44 ± 0.07 ^b	3.49 ± 0.12 ^b	10.77 ± 0.66 ^a	1.11 ± 0.08 ^c
TFC (mg QE/g _{t.w.})	0.01 ± 0.01 ^c	0.31 ± 0.02 ^c	0.24 ± 0.02 ^d	1.61 ± 0.03 ^a	0.61 ± 0.03 ^b
TTC (mg CE/g _{t.w.})	0.02 ± 0.01 ^d	0.83 ± 0.01 ^b	1.77 ± 0.04 ^a	0.27 ± 0.02 ^c	0.32 ± 0.01 ^c
DPPH (mg AAE /g _{t.w.})	0.60 ± 0.04 ^c	3.70 ± 0.17 ^c	4.36 ± 0.36 ^b	9.66 ± 0.10 ^a	1.82 ± 0.10 ^d
ABTS (mg AAE /g _{t.w.})	0.58 ± 0.04 ^c	7.81 ± 0.15 ^c	8.85 ± 0.68 ^b	14.35 ± 0.20 ^a	2.09 ± 0.15 ^d
FRAP (mg AAE /g _{t.w.})	0.11 ± 0.01 ^c	2.24 ± 0.13 ^a	2.30 ± 0.13 ^a	1.72 ± 0.02 ^b	0.22 ± 0.01 ^c
TAC (mg AAE/g _{t.w.})	0.34 ± 0.01 ^c	1.83 ± 0.07 ^c	2.41 ± 0.09 ^b	6.46 ± 0.30 ^a	1.05 ± 0.04 ^d

注:a 数据以均值±标准差(n=3)表示;a, b表示使用单因素方差分析(ANOVA)和图奇检验(Tukey's test)的显著差异(P<0.05)行中的均值;TPC,总酚含量;TFC,总黄酮含量;TTC,总单宁含量;DPPH,2,2-二苯基-1-吡啶酰肼测定;FRAP,铁还原抗氧化能力测定;ABTS,2,2-叠氮基-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸测定;TAC,总抗氧化能力;GAE,没食子酸当量;QE,槲皮素当量;CE,儿茶素当量;AAE,抗坏血酸当量

Note: a the data are shown as mean ± standard deviation (n=3); a, b indicate the means in a row with significant difference (P < 0.05) using a one-way analysis of variance (ANOVA) and Tukey's test; TPC, total phenolic content; TFC, total flavonoid content; TTC, total tannin content; DPPH, 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl assay; FRAP, ferric reducing antioxidant power assay; ABTS, 2, 2-azino-bis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid assay; TAC, total antioxidant capacity; GAE, gallic acid equivalents; QE, quercetin equivalents; CE, catechin equivalents; AAE, ascorbic acid equivalents

200 ns 分子动力学模拟,发现计算结果与体外实验中观察到的 Kae-3-Rob 抑制胶原酶和酪氨酸酶的结果一致^[37]。有学者进行体外研究发现,莲花不同部位(莲叶、莲花、莲子)对4种在皮肤衰老关键作用酶(弹性蛋白酶、胶原酶、透明质酸酶和酪氨酸酶)有很好的抑制作用。其中,花朵的抗胶原酶活性更高,抗衰老活性更高^[38]。因而,莲花及雄蕊、莲叶和莲子中的黄酮类化合物对皮肤抗衰老具有突出的抑制作用,其未来在药妆和植物药物方面具有重要的应用潜力。

2.4 抗肿瘤

癌症是一种高发率和高死亡率的恶性肿瘤,是全球主要的死亡原因之一。莲作为潜在天然抗癌药物,在中医药肿瘤治疗中有着巨大的应用前景。不同研究发现莲提取物对多种癌症具有抑制作用。比如,有研究发现,莲房提取物(lotus seedpod extract, LSPE)在单位非小细胞肺癌(Non-small-cell lung cancer, NSCLC)细胞中具有抗癌活性。Ax1(一种受体酪氨酸激酶)是LSPE抑制非小细胞肺癌细胞增殖和促进细胞凋亡的新治疗靶点。LSPE可以通过过表达或RNA干扰Ax1表达,抑制NSCLC细胞增殖,诱导细胞凋亡,实现肿瘤抑制作用^[39]。研究者们发现,莲花花瓣乙醇提取物对HeLa人宫颈癌细胞系具有细胞毒性活性,选择性细胞毒性值(PC₅₀)为10.4 μg/mL。在营养缺乏时,活性提取物(一)利林啉可诱导HeLa细胞形态发生显著变化,比如细胞收缩和血浆起泡,10 h内细胞完全死亡。(一)利林啉可抑制Akt/mTOR信号通路,促进半胱天冬酶-3活化和抑制B淋巴细胞瘤-2(Bcl-2)表达,诱导细胞凋亡,抑制肿瘤生长^[21]。有研究证实,莲子提取物甲基莲心碱可抑制宫颈癌HeLa细胞增殖。当甲基莲心碱处理HeLa细胞后,其细胞活性降低($P < 0.05$),细胞凋亡率和Bax、cleaved caspase-3蛋白表达升高($P < 0.05$, $P < 0.01$),而Bcl-2、p-PI3K、p-Akt蛋白表达降低($P < 0.05$, $P < 0.01$),并呈现时间和剂量依赖性^[40]。有学者研究发现,莲叶提取物具有诱导骨肉瘤细胞系细胞毒性的潜力,可能用于治疗骨肉瘤。当用莲叶提取物处理Saos-2细胞(人骨肉瘤细胞系)24 h后,进行MTT分析、形态分析和DAPI染色,发现莲叶提取物对Saos-2细胞系有细胞毒性作用,并显著降低活细胞数量,抑制细胞增殖,诱导Saos-2细胞形态学变化^[41]。因此,莲房、莲花、莲叶、莲子等部位提取物具有肿瘤抑制作用,在肿瘤药物治疗方面具有良好的应用前景。

2.5 降血糖

糖尿病是一种慢性代谢紊乱疾病,而目前治疗糖尿病的药物有严重的副作用。而天然多糖在预防2型糖尿病,改善胰岛素抵抗和降血糖等方面能发挥重要作用。莲藕中含有丰富的多糖,可作为治疗糖尿病的天然替代药物或补充药物。有研究验证了莲子芽中纯化多糖组分(NNP-2)的益生元活性和降血糖调节作用。在体外使用乳杆菌和双歧杆菌验证NNP-2益生元活性,发现NNP-2对 α -葡萄糖苷酶(抑制 α -葡萄糖苷酶是降低餐后血糖的有效方法)具有良好的生物活性(IC₅₀ = 97.32 μg/mL)。高葡萄糖诱导的胰岛素抵抗HepG2细胞研究NNP-2对葡萄糖消耗的影响,RT-qPCR研究胰岛素转导途径的分子机制,发现NNP2通过调节胰岛素抵抗HepG2细胞中的IRS1/PI3K/Akt信号通路来改善胰岛素抵抗^[42]。以PNPG为底物,进行体外 α -葡萄糖苷酶抑制实验,研究莲花和睡莲的抗糖尿病特性。结果发现,莲花提取物及其各组分的IC₅₀值范围为(349.86 ± 2.91)~(29.06 ± 0.24) μg/mL,而睡莲IC₅₀值的范围为(224.4 ± 6.85)~(5.29 ± 0.39) μg/mL,均可在体外抑制 α -葡萄糖苷酶来治疗糖尿病^[35]。研究发现,莲房的原花青素提取物(lotus pro-cyanidin extract, LPE)对糖尿病相关酶具有明显抑制作用。LPE可显著抑制糖尿病相关酶, α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶和蛋白酪氨酸磷酸酶1B,IC₅₀值分别为5.5、1.0和0.33 μg/mL,其抑制作用随着聚合度和没食子酰基或表没食子儿茶素单元的存在而增加^[43]。相关研究发现,从莲子中提取得到的生物碱和去甲乌药碱能显著降低糖尿病大鼠血糖($P < 0.05$),恢复其体重,并显著恢复诱导糖尿病期间降低的抗氧化酶(SOD、CAT、GPx和GSH)。结果表明,生物碱、去甲乌药碱对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶具有有效抑制作用,IC₅₀分别为19.06 ± 0.03、(15.03 ± 0.09) μmol/L和(24.07 ± 0.05)、(18.04 ± 0.021) μmol/L^[44]。莲子和莲房中提取的多糖和生物碱类物质具有良好的降血糖作用,能够有效抑制糖尿病相关酶,将来可开发莲中多糖和生物碱为保健品或药物,用于预防管理以及治疗糖尿病。

2.6 降血脂

高脂血症是一种慢性代谢紊乱疾病,而莲叶和莲子具有降血脂作用。有研究发现莲子生物碱中的O-去甲荷叶碱和荷叶生物碱能有效治疗高血脂。研究者进一步研究阐明其治疗潜在机制,评价活性成分对油酸钠诱导HepG2细胞的降血脂活性。富集分析结果表明,富集分析表明,降脂作用是通过调节

参与胆汁分泌、甘油酯和鞘脂代谢、PPAR信号通路的众多关键基因的表达来调节的^[45]。动脉粥样硬化是心脑血管疾病的主要原因,莲叶能有效降低血脂,从而改善动脉粥样硬化。有研究采用网络药理学和分子对接方法探索并研究了莲叶治疗动脉粥样硬化的潜在机制。首先,在数据库中获得莲叶活性成分及其潜在靶点,并获取其与动脉粥样硬化药物的共同靶点,构建蛋白质-蛋白质相互作用(pretein-protein interactions, PPI)网络,从PPI网络中获得了11个核心靶点。通过富集分析,将活性成分与其核心靶点分子对接,测试结合活性。结果发现莲叶中共有16种主要活性成分和219个潜在靶点。分子对接结果表明,核心靶点与主要活性成分的结合活性更强。对小鼠进行动物实验,验证了莲叶可以通过降低血脂和炎性因子水平有效改善动脉粥样硬化^[46]。莲子和莲叶能够有效降低血脂,预防和治疗心血管疾病,可开发利用其有效活性成分,作为降血脂药物新来源。

2.7 减肥

肥胖是一种复杂的代谢性疾病,肥胖还会增加2型糖尿病、高脂血症、高血压和动脉粥样硬化等疾病的患病风险,严重威胁人类身体健康。莲叶是具有减肥作用的典型药食同源植物,莲叶提取物具有作为天然减肥药物的潜力。有研究发现,莲叶提取物主要成分为槲皮素-3-O- β -葡萄糖苷酸(Q3GA)和槲皮素具有防止甘油三酯积聚和促进脂肪分解的减肥能力。体外实验证实,在脂肪代谢中,NnEx通过抑制cAMP促进甘油三酯降解。体内实验表明,NnEx抑制小鼠中性脂肪的积聚,并使2型糖尿病KK-Ay小鼠的肝细胞脱离糖原化^[47]。在研究中,WEHI01肠球菌的发酵的莲叶上清液(fermented lotus leaf supernatant, FLLS)(FLLS-WEHI01),能很好地抑制高脂饮食诱导的肥胖大鼠3T3-L1细胞的脂肪生成和脂质积累(抑制率高达56.17%)(WEHI01-L, $P = 0.008$, WEHI01-H, $P < 0.001$)。另外,口服低、高剂量的FLLS-WEHI01均能降低大鼠体重($P < 0.001$)、附睾脂肪质量、脂肪细胞大小、LDL-C水平($P = 0.89$, $P = 0.02$)、肝脏TC水平($P < 0.001$, $p = 0.01$)、TG水平($P = 0.2137$, $P = 0.0464$)、空腹血糖($P = 0.1585$, $P = 0.0009$)和改善胰岛素抵抗($P = 0.33$, $P = 0.01$)^[48]。有学者研究了莲叶提取物对高脂肪饮食肥胖白鼠的抗肥胖特性。通过喂食雌性白鼠标准食物40d诱导肥胖后,不同治疗组每天给予不同剂量的莲叶提取物(100、200和400 mg/kg,口服给药),在第39天和第

40天,评估体重、器官和身体脂肪重量、总胆固醇、甘油三酯的葡萄糖水平以及体温和运动活动等参数。结果发现高剂量(400 mg/kg)莲叶提取物治疗后的白鼠体重、总胆固醇、甘油三酯水平和葡萄糖水平都显著降低,还表现出体温升高,其运动活动也增加了^[49]。由上可知,莲叶能够有效抑制肥胖,具有很好的减肥作用,莲叶提取物可作为预防和治疗肥胖和糖尿病的功能性食品成分。

2.8 护肝

对乙酰氨基酚(acetaminophen, APAP)是一种常用的镇痛退热药,而过量服用APAP会导致肝脏药物中毒。有研究发现莲房提取物(lotus seedpod extract, LSE)可作为因过量服用APAP而肝中毒的解毒剂。通过评估LSE对APAP诱导的细胞毒性、ROS水平、凋亡率和分子机制的影响,结果发现,LSE通过预防外源性、内源性和JNK介导的途径保护APAP诱导的凋亡。因此,LSE可以作为APAP过量解毒剂的新型治疗选择^[50]。有研究者从莲藕中提取鉴定出443种化合物,其中萜类44种,生物碱72种,单宁4种,木脂素43种,黄酮类138种,酚酸98种,并研究了莲藕提取物对急性酒精肝中毒的治疗作用。结果发现莲藕甲醇提取物对乙醇脱氢酶的体外激活率最高(18.87%),其可能是通过调节信号通路(如神经活性配体-受体相互作用)及生物过程(如分泌调节、离子转运调节、对脂多糖的反应和对酒精的反应)来治疗急性酒精肝中毒。动物实验证实了莲藕通过激活酒精分解代谢酶、减少氧化应激和保护肝功能等机制对急性酒精肝中毒的治疗作用。因此,莲藕提取物可用于治疗急性酒精肝中毒^[51]。

2.9 护肾

顺铂作为治疗恶性肿瘤的化疗药物,其副作用之一是肾毒性,因此改善顺铂诱导的肾毒性至关重要。有研究探讨了LSE主要成分槲皮素-3-葡萄糖苷对顺铂诱导肾毒性的保护作用及其机制。结果显示,LSE通过减少氧化应激和凋亡来预防顺铂诱导的肾毒性。LSE与顺铂联合治疗可提高大鼠肾小管上皮NRK-52E细胞的存活率,降低氧化应激和细胞凋亡。LSE降低了Bax、Bad、t-Bid和半胱天冬酶等凋亡因子的表达。在体内研究中,LSE改善了顺铂诱导的肾功能、肾小球萎缩和肾脏凋亡程度的血清标志物水平。因此,LSE可能是未来顺铂化疗的新型天然保护剂^[52]。有学者研究发现,从莲心中提取的莲心碱能抑制高血压所致的肾脏组织纤维化,减轻肾脏胶原沉积^[53]。

2.10 治疗阿尔茨海默病

阿尔茨海默病(Alzheimer's disease, AD),是发生于老年的中枢神经退行性病变,主要表现为进行性认知功能障碍和行为损害,严重影响患者的日常生活和行为。研究人员发现,莲花提取物可能用于治疗AD。乙酰胆碱酯酶(acetylcholine esterase, AChE)、丁酰胆碱酯酶(butyrylcholine esterase, BChE)和 β -分泌酶1(BACE-1)是生物神经传导的关键酶,抑制这些关键酶的活性,对于治疗AD至关重要,酚类物质已被证明可抑制AD相关的关键酶。莲花中的酚酸类和黄酮类物质具有良好的抗AChE、抗BChE、抗BACE-1活性,莲花的雄蕊、老叶、花瓣、花茎、叶茎的水提取物可减轻阿尔茨海默病的症状。酚类物质对AD相关关键酶的抑制作用与其含量有关,雄蕊、老叶和花瓣的抗AChE和抗BChE作用强,其中雄蕊作用最强,而花茎、叶茎的抗BACE-1活性最高^[16]。有研究探讨了莲子胚中总生物碱(total alkaloids from the seed embryo of *Nelumbo nucifera* Gaertn., TASENN)对AD小鼠和淀粉样 β 蛋白(A β)损伤PC12细胞的作用及机制。TASENN(纯度为95.6%)主要含有莲心碱、异莲心碱和莲心碱(纯度分别为23.01%、28.02%和44.57%)。体内实验表明,连续28d喂服TASENN(50 mg/kg/d)可改善APP/PS1转基因小鼠的学习记忆功能,改善皮质和海马神经元的组织病理学变化,抑制神经元凋亡。体外实验中,TASENN可抑制A β_{25-35} 诱导的PC12细胞凋亡,提高细胞存活率,降低A β_{25-35} 诱导的细胞内游离Ca²⁺水平升高和CaM、p-CaMKII和p-Tau的高表达,这表明,TASENN对AD小鼠具有潜在治疗作用,对PC12细胞具有保护作用,其抗AD活性可能与其负向调控CaM通路密切相关^[54]。莲花中提取的多酚类物质和莲子中提取的生物碱类活性物质可作为治疗阿尔茨海默病的植物源性药物。

2.11 促进睡眠

失眠是影响当代人身体健康的重要因素,工业合成药物长期治疗失眠存在多种副作用,而莲提取物可作为无副作用的天然药物来促进睡眠。有研究采用戊巴比妥诱导的睡眠测试和脑电图分析,测量睡眠潜伏时间、持续时间和睡眠结构,评估莲叶提取物的促睡眠活性和机制作用。结果发现,高剂量(300 mg/kg)乙醇莲叶提取物使睡眠持续时间($P < 0.01$)增加了。低剂量(150 mg/kg)和高剂量(300 mg/kg)提取物提高了睡眠质量($P < 0.05$)。服用莲叶提取物恢复了咖啡因诱导的睡眠中断

($P < 0.001$),睡眠质量与正常组相似。配体结合测定显示,莲叶提取物中的槲皮素-3-O-葡萄糖苷酸(77.27 μ g/mg)与GABA_A受体结合增强了睡眠质量^[57]。有研究评估小鼠服用莲藕水提取物(lotus rhizome, LE)(80~150 mg/kg)后的睡眠恢复效果。结果发现LE通过增加 θ 和 δ 功率来增加非快速眼动(nonrapid eye movement, NREM)睡眠,口服150 mg/kg LE可使睡眠持续时间增加24%。在失眠模型中,LE通过增加NREM睡眠来增加睡眠时间^[56]。有学者探讨莲子提取物对大鼠睡眠的增强作用及其内在机制。结果发现,高剂量乙醇莲子提取物缩短了睡眠潜伏期,增加了睡眠持续时间($P < 0.05$)。高剂量给药后,大鼠的总睡眠时间和非快速眼动时间增加了,醒来时间和快速眼动时间减少了。而在咖啡因诱导的唤醒模型中,莲子提取物给药的大鼠,醒来时间减少了,睡眠时间增加了^[57]。以上结果表明,莲叶、莲藕和莲子提取物均可促进睡眠,提高睡眠质量,可作为天然无副作用药品用于治疗失眠。

2.12 免疫调节

免疫系统疾病可导致多种疾病,如感染性疾病、自身免疫疾病甚至癌症。确定增强免疫反应的疗法对免疫功能低下的人至关重要。有研究者采用人单核细胞衍生的巨噬细胞被脂多糖刺激,模拟细菌诱导炎症,研究乙酸乙酯和乙醇莲花花瓣提取物的免疫调节活性,结果发现莲花花瓣提取物中3种主要的多酚,阿魏酸、香豆素和绿原酸可用于治疗免疫功能下降。其通过抑制诱发核因子(NF- κ B)依赖的炎症反应,抑制炎症诱导的人巨噬细胞分泌TNF- α ,实现免疫调节作用^[34]。有研究评估了刺楸树皮和莲叶提取物,在环磷酰胺(cyclophosphamide, Cy)诱导免疫抑制大鼠模型中联合治疗的免疫增强作用。结果表明,KPNN显著增强巨噬细胞中磷酸化NF- κ B和磷酸化细胞外调节蛋白激酶(ERK)蛋白水平,提高了细胞活力。在Cy诱导的免疫抑制大鼠模型中,经KPNN处理的大鼠体重和组织重量明显高于Cy处理的大鼠。KPNN治疗使血液中免疫相关因子,如白细胞总数、淋巴细胞和中间细胞含量恢复到血液中的正常水平,血液细胞因子(TNF- α 和IL-6)增加,减轻脾组织损伤,达到免疫增强效果^[58]。莲花和莲叶提取物具有免疫增强作用,能够治疗免疫力低下,具有作为免疫刺激剂和功能性食品的潜力。

2.13 其他生理功能

莲的生物活性成分还具有缓解抑郁症、抗病毒、提高生育活性等多种生理功能。在当今快节奏和高压环境下,焦虑和抑郁症发展迅猛,患者数量逐步攀

升,已然成为困扰现代人健康的重要问题。莲生物活性成分被证实可以缓解焦虑症,研究者选取了20名中度至重度焦虑的成年人,评估莲叶提取物对焦虑症患者的缓解作用。参与者连续28 d,每天口服两次500 mg的莲叶提取物,从开始至第28 d,GAD-7($n=18$)(广泛性焦虑自评量表)和GHQ-28(一般心理健康问卷)评分显著下降,分别为 $(13.9\pm 3.4)\sim(9.0\pm 5.6)$, $P<0.01$ 和 $(30.8\pm 10.3)\sim(20.7\pm 11.6)$, $P<0.01$ 。第28天,72%的受试者的GAD-7严重程度降低了一个等级,67%的受试者GAD-7评分下降 ≥ 5 分。因此,莲叶提取物能够有效改善焦虑症状,将来可能作为临床药物用于治疗缓解焦虑症^[59]。有学者证明,莲叶水提取物(the water extract of lotus leaf, WLL)能够通过抑制神经氨酸酶和血凝素(hemagglutinin, HA)有效抑制甲型流感病毒感染。当用绿色荧光蛋白标记甲型流感病毒/PR/8/34后, WLL明显抑制了病毒感染,且呈剂量依赖性^[60]。有研究者发现,红色和白色莲花花瓣的水提取物(NAE)和乙醇提取物(NEE)有益于提高精子活力。体外模型证实红色和白色NAE在0.22至1.76 mg/mL范围内均能提高大鼠的精子活力^[34]。代森锰锌(Mancozeb, MZ)是常用于瓜果蔬菜的杀菌剂,会诱导氧化应激危害人类和动物精子质量和健康。研究者还发现白莲瓣水提取物能通过减少氧化应激,有效提高MZ诱导的牛精子质量^[61]。

3 总结和展望

莲是中国重要的水生植物,莲的不同部位(莲叶、莲花、莲藕、莲子、莲房、莲须、藕节、胚芽等)富含多种生物活性成分,如酚酸类、黄酮类、单宁类、生物碱、多糖等。其活性成分具有多种生理功能,主要有抗氧化、抗衰老、抗炎、抗肿瘤、降血糖、降血脂、护肝护肾、治疗阿尔茨海默病、减肥、促进睡眠、免疫调节作用等。相较于西药副作用大,莲活性成分作为天然药物来源,在药物治疗方面具有成本低、低毒性、高安全性的优势,可依据其活性成分不同功效开发相应的功能保健品和新型药物。因此,莲生物活性成分在临床实践中具有重要意义。然而,在莲产品的深加工过程中,大量的莲藕皮、藕节、莲房、莲叶、雄蕊等被当作废物丢弃,这不仅导致资源的严重浪费,还对环境造成了一定的污染。另一方面,莲生物活性成分的作用机制还不够明确,且现阶段有关莲的功能研究大多集中在体外实验阶段,其生物活性成分与其活性之间的相关性,不同化合物之间的协同机制,活性成分的药理作用机制等方面研究较少。

因此,迫切需要进一步研究莲生物活性成分药用用途的分子机制,并将莲产业加工过程的废弃物应用于高附加值的药品、营养保健品和化妆品等行业,以解决资源浪费和环境污染问题,进一步揭示活性成分的作用机制,并通过人体受试者的临床研究验证其作用效果,为未来开发利用莲生物活性成分应用于新产品或新配方,提供更多理论依据。

参考文献

- [1] Showkat Q A, Rather J A, Jabeen A, *et al.* Bioactive components, physicochemical and starch characteristics of different parts of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) plant: a review [J]. *Int J Food Sci Tech*, 2021, 56(5): 2205-2214.
- [2] Zheng X W, Wang T, Cheng T, *et al.* Genomic variation reveals demographic history and biological adaptation of the ancient relictual, lotus (*Nelumbo Adans*) [J]. *Hortic Res*, 2022, 9: uhac029.
- [3] 周迅. 2023莲藕产业种植现状 莲藕产业市场需求分析. 中研网[EB]. (2023-10-12). [2024-03-03]. <https://www.chinairn.com/hyzz/20231017/181706945.shtml>.
Zhou X. 2023 Lotus Root Industry Planting Status Analysis of Lotus Root Industry Market Demand chinairn.com [EB]. (2023-10-12). [2024-03-03]. <https://www.chinairn.com/hyzz/20231017/181706945.shtml>.
- [4] 杜永臣. 发展特色蔬菜产业助力乡村振兴:评《中国特色蔬菜主产区产业发展报告》[J]. *中国蔬菜*, 2020(5): 112.
Du Y C. Developing characteristic vegetable industry to promote rural revitalization: comment on "report on industrial development of main producing areas of characteristic vegetables in China" [J]. *China Veg*, 2020(5): 112.
- [5] 李峰,周雄祥,柯卫东,等. 湖北省莲产业发展调研报告[J]. *湖北农业科学*, 2020, 59(23): 101-106, 109.
Li F, Zhou X X, Ke W D, *et al.* Research report on lotus industry development in Hubei Province [J]. *Hubei Agric Sci*, 2020, 59(23): 101-106, 109.
- [6] 李芬,乐明凯. 湖北农产品借国际展会推介品牌. 中华人民共和国农业农村部门户网站[EB]. (2023-10-12). [2024-01-28]. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/202310/t20231012_6438036.htm.
Li F, Le M K. Hubei Agricultural Products Promotes Brands through International Exhibitions. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China [EB]. (2023-10-12). [2024-01-28]. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/202310/t20231012_6438036.htm.

- [7] Chen G L, Zhu M Z, Guo M Q. Research advances in traditional and modern use of *Nelumbo nucifera*: phytochemicals, health promoting activities and beyond [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2019, 59(sup1): S189-S209.
- [8] Wang Z Y, Cheng Y, Zeng M M, et al. Lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) leaf: a narrative review of its phytoconstituents, health benefits and food industry applications [J]. Trends Food Sci Technol, 2021, 112: 631-650.
- [9] 周春华, 陶俊, 李良俊, 等. 莲藕的化学成分与生物活性研究进展[J]. 氨基酸和生物资源, 2007, 29(4):63-69. Zhou C H, Tao J, Li L J, et al. Advances in studies on chemical components and biological activities of *Nelumbo nucifera* Gaertn. [J]. Amino Acids Biotic Resour, 2007, 29(4):63-69.
- [10] Paudel K R, Panth N. Phytochemical profile and biological activity of *Nelumbo nucifera* [J]. Evid Based Complement Alternat Med, 2015, 2015: 789124.
- [11] Punia Bangar S, Dunno K, Kumar M, et al. A comprehensive review on lotus seeds (*Nelumbo nucifera* Gaertn.): nutritional composition, health-related bioactive properties, and industrial applications [J]. J Funct Foods, 2022, 89: 104937.
- [12] Hu P, Ge X, Gao M T, et al. *Nelumbo nucifera* Gaertn.: an updated review of the antitumor activity and mechanisms of alkaloids [J]. Pharmacol Res Mod Chin Med, 2022, 5: 100167.
- [13] Zhao X, Zhao R, Yang X J, et al. Recent advances on bioactive compounds, biosynthesis mechanism, and physiological functions of *Nelumbo nucifera* [J]. Food Chem, 2023, 412: 135581.
- [14] 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.
- [15] Li C, He Y P, Yang Y, et al. Antioxidant and inflammatory effects of *Nelumbo nucifera* Gaertn. leaves [J]. Oxid Med Cell Longev, 2021, 2021: 8375961.
- [16] Temviriyankul P, Sritalahareuthai V, Promyos N, et al. The effect of sacred lotus (*Nelumbo nucifera*) and its mixtures on phenolic profiles, antioxidant activities, and inhibitions of the key enzymes relevant to Alzheimer's disease [J]. Molecules, 2020, 25(16): 3713.
- [17] 徐燕燕. 莲藕不同部位多酚组成及抗氧化活性研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2015. Xu Y Y. Study on the Composition and Antioxidant Activity of Phenolics from Different Parts of Lotus Root [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2015.
- [18] Rho T, Yoon K D. Chemical constituents of *Nelumbo nucifera* seeds [J]. Nat Prod Sci, 2017, 23(4):253.
- [19] 吴新平, 漆欣, 王丽梅, 等. 莲藕酚类物质组成分析及合成机制研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(9): 221-231. Wu X P, Qi X, Wang L M, et al. Analysis of phenolic composition and synthesis mechanism of *Nelumbo nucifera* [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(9): 221-231.
- [20] Liu J, Lu Y, Li G C, et al. Elucidation the binding mechanism of *Nelumbo nucifera*-derived isoquinoline alkaloids as Rho-kinase 1 inhibitors by molecular docking and dynamic simulation [J]. J Biomol Struct Dyn, 2021, 39(2): 379-394.
- [21] Maneenet J, Omar A M, Sun S J, et al. Benzylisoquinoline alkaloids from *Nelumbo nucifera* Gaertn. petals with antiausterity activities against the HeLa human cervical cancer cell line [J]. Z Naturforsch C J Biosci, 2021, 76(9/10): 401-406.
- [22] Xie J T, Sha T J, Tian W Y, et al. Anti-inflammatory activity of total alkaloids in *Nelumbo nucifera* and simultaneous determination of major bisbenzylisoquinolines [J]. Rev Bras De Farmacogn, 2023, 33(2): 353-363.
- [23] Lin H Y, Chung C P, Hsia S M, et al. Anti-inflammatory alkaloids from lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) leaves [J]. Eur Food Res Technol, 2023, 249(3): 739-748.
- [24] 张梦洁, 易阳, 闵婷, 等. 不同浓度醇沉级分的莲藕多糖成分分析与对RAW_{264.7}细胞免疫活性的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(8): 162-170. Zhang M J, Yi Y, Min T, et al. Composition analysis and *in vitro* evaluation of some activities of RAW_{264.7} of lotus root polysaccharide extracted by ethanol precipitation with different concentrations [J]. Food Sci Technol, 2021, 46(8): 162-170.
- [25] Lei Y, Zhang Y L, Wang Q, et al. Structural characterization and *in vitro* analysis of the prebiotic activity of oligosaccharides from lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seeds [J]. Food Chem, 2022, 388: 133045.
- [26] Huang B, Ban X Q, He J S, et al. Comparative analysis of essential oil components and antioxidant activity of extracts of *Nelumbo nucifera* from various areas of China [J]. J Agric Food Chem, 2010, 58(1): 441-448.
- [27] 魏坤. 花莲种资源中莲叶化学成分多样性研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2022. Wei K. Study on the Diversity of Chemical Components of Lotus Leaves in Flower Lotus Germplasm Resources [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2022.
- [28] Fitri K, Khairani T N, Sianturi K T, et al. Anti-inflam-

- matory activity of ethanol extract of lotus (*Nelumbo nucifera* G.) seed against white male rats using paw edema method [J]. *J Drug Delivery Ther*, 2021, 11(4): 1-4.
- [29] Ali Rajput M, Zehra T, Ali F, *et al.* Evaluation of anti-inflammatory activity of ethanol extract of *Nelumbo nucifera* fruit [J]. *Turk J Pharm Sci*, 2021, 18(1): 56-60.
- [30] Wakugawa T, Nagamine K, Hiramatsu M, *et al.* Identification and characterisation of the anti-allergic compound from lotus root [J]. *Tradit Kampo Med*, 2020, 7(2): 85-95.
- [31] Min X J, Guo Y L, Zhou Y S, *et al.* Protection against dextran sulfate sodium-induced ulcerative colitis in mice by neferine, a natural product from *Nelumbo nucifera* Gaertn [J]. *Cell J*, 2021, 22(4): 523-531.
- [32] Min X J, Zhou Y L, Xiang S L, *et al.* Neferine, a natural alkaloid from *Nelumbo nucifera*, ameliorates experimental chronic ulcerative colitis in mice [J]. *Pharmacol Res Mod Chin Med*, 2021, 1: 100022.
- [33] Laoung-On J, Jaikang C, Saenphet K, *et al.* Phytochemical screening, antioxidant and sperm viability of *Nelumbo nucifera* petal extracts [J]. *Plants (Basel)*, 2021, 10(7): 1375.
- [34] Sranujit R P, Noysang C, Tippayawat P, *et al.* Phytochemicals and immunomodulatory effect of *Nelumbo nucifera* flower extracts on human macrophages [J]. *Plants (Basel)*, 2021, 10(10): 2007.
- [35] Pokhrel T, Shrestha D, Dhakal K, *et al.* Comparative Analysis of the Antioxidant and Antidiabetic Potential of *Nelumbo nucifera* Gaertn. and *Nymphaea lotus* L. var. *pubescens* (Willd.) [J]. *J Chem*, 2022, 2022: 4258124.
- [36] Tungmunnithum D, Drouet S, Hano C. Validation of a high-performance liquid chromatography with photodiode array detection method for the separation and quantification of antioxidant and skin anti-aging flavonoids from *Nelumbo nucifera* Gaertn. stamen extract [J]. *Molecules*, 2022, 27(3): 1102.
- [37] Nutho B, Tungmunnithum D. Exploring major flavonoid phytochemicals from *Nelumbo nucifera* Gaertn. as potential skin anti-aging agents: *in silico* and *in vitro* evaluations [J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(23): 16571.
- [38] Younis I Y, Farag M A, Elgamal A M, *et al.* Untargeted metabolites profiling of volatile and non-volatile components of Egyptian lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) using UHPLC/PDA/ESI-MS and solid-phase microextraction (SPME) GC/MS in relation to its anti-aging and anti-inflammatory effects [J]. *Ind Crops Prod*, 2023, 197: 116561.
- [39] Kim N Y, Yang I J, Kim S, *et al.* Lotus (*Nelumbo nucifera*) seedpod extract inhibits cell proliferation and induces apoptosis in non-small cell lung cancer cells via downregulation of Axl [J]. *J Food Biochem*, 2021, 45(2): e13601.
- [40] 樊思轩, 舒丽莎, 任美颖. 基于PI3K/Akt信号通路探讨甲基莲心碱对HeLa细胞的影响[J]. *中成药*, 2023, 45(7): 2185-2192.
- Fan S X, Shu L S, Ren M Y. Effects of neferine on HeLa cells via PI3K/Akt signaling pathway [J]. *Chin Tradit Pat Med*, 2023, 45(7): 2185-2192.
- [41] Britina G, Ezhilarasan D, Shree Harini K. *Nelumbo nucifera* leaf extract induces cytotoxicity in osteosarcoma saos-2 cells [J]. *Cureus*, 2023, 15(10): e47609.
- [42] Le B, Anh P T N, Yang S H. Polysaccharide derived from *Nelumbo nucifera* lotus plumule shows potential prebiotic activity and ameliorates insulin resistance in HepG2 cells [J]. *Polymers*, 2021, 13(11): 1780.
- [43] Xiang J, Raka R N, Zhang L C, *et al.* Inhibition of three diabetes-related enzymes by procyanidins from lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seedpods [J]. *Plant Foods Hum Nutr*, 2022, 77(3): 390-398.
- [44] Khan S, Khan H U, Ali Khan F, *et al.* Anti-alzheimer and antioxidant effects of *Nelumbo nucifera* L. alkaloids, nuciferine and norcoclaurine in alloxan-induced diabetic albino rats [J]. *Pharmaceuticals (Basel)*, 2022, 15(10): 1205.
- [45] Yang J Y, Zhang Y, Jiang L J, *et al.* A triple combination strategy of UHPLC-MS(n), hypolipidemic activity and transcriptome sequencing to unveil the hypolipidemic mechanism of *Nelumbo nucifera* alkaloids [J]. *J Ethnopharmacol*, 2022, 282: 114608.
- [46] Wang L H, Guan Z J, Li S D, *et al.* *Nelumbo nucifera* Gaertn. leaves: network pharmacology and molecular docking analysis of active ingredients and their mechanisms of action in treating atherosclerosis [J]. *Biotechnol Biotechnol Equip*, 2022, 36(1): 802-817.
- [47] Liu E N, Tsuboi H, Ikegami S, *et al.* Effects of *Nelumbo nucifera* leaf extract on obesity [J]. *Plant Foods Hum Nutr*, 2021, 76(3): 377-384.
- [48] He Y, Tao Y, Qiu L, *et al.* Lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) leaf-fermentation supernatant inhibits adipogenesis in 3T3-L1 preadipocytes and suppresses obesity in high-fat diet-induced obese rats [J]. *Nutrients*, 2022, 14(20): 43-48.
- [49] Krishna K V V S, Pinjari R M, Lodhi G N, *et al.* *Nelumbo Nucifera* leaves extract partially reduces high-fat diet induced obesity in experimental rats [J]. *J Popul Ther Clin Pharmacol*, 2023, 30(1): 423-434.
- [50] Lin H H, Hsu J Y, Tseng C Y, *et al.* Hepatoprotective activity of *Nelumbo nucifera* Gaertn. seedpod ex-

- tract attenuated acetaminophen-induced hepatotoxicity [J]. *Molecules*, 2022, 27(13): 4030.
- [51] Yang Z H, Gao Y, Wu W J, *et al.* The mitigative effect of lotus root (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) extract on acute alcoholism through activation of alcohol catabolic enzyme, reduction of oxidative stress, and protection of liver function [J]. *Front Nutr*, 2022, 9: 1111283.
- [52] Chen J Y, Tsai C L, Tseng C Y, *et al.* *In vitro* and *in vivo* nephroprotective effects of *Nelumbo nucifera* seed-pod extract against cisplatin-induced renal injury [J]. *Plants (Basel)*, 2022, 11(23): 3357.
- [53] 王美玲, 陈达鑫, 贾沛芝, 等. 基于 TGF- β 1/Smad2/3 信号通路研究莲心碱对高血压小鼠肾间质纤维化的保护作用[J]. *福建中医药*, 2023, 9(8): 50-53.
- Wang M L, Chen D X, Jia P Z, *et al.* Protective effect of liensinine on renal interstitial fibrosis in hypertensive mice based on TGF- β 1/Smad2/3 signaling pathway [J]. *Fujian J Tradit Chin Med*, 2023, 9(8): 50-53.
- [54] Meng X L, Xue J S, Su S J, *et al.* Total alkaloids from the seed embryo of *Nelumbo nucifera* Gaertn. improve cognitive impairment in APP/PS1 mice and protect A β -damaged PC12 cells [J]. *Nutr Neurosci*, 2023, 26(12): 1243-1257.
- [55] Kim S, Hong K B, Jo K, *et al.* Quercetin-3-O-glucuronide in the ethanol extract of lotus leaf (*Nelumbo nucifera*) enhances sleep quantity and quality in a rodent model via a GABAergic mechanism [J]. *Molecules*, 2021, 26(10): 3023.
- [56] Ahn Y, Kim S, Park C, *et al.* Sleep-promoting activity of lotus (*Nelumbo nucifera*) rhizome water extract via GABA(A) receptors [J]. *Pharm Biol*, 2022, 60(1): 1341-1348.
- [57] Jo K, Kim S, Hong K B, *et al.* *Nelumbo nucifera* promotes non-rapid eye movement sleep by regulating GABAergic receptors in rat model [J]. *J Ethnopharmacol*, 2021, 267: 113511.
- [58] Park Y M, Lee H Y, Shin D Y, *et al.* Immune-enhancing effects of co-treatment with *Kalopanax pictus* nakai bark and *Nelumbo nucifera* Gaertner. leaf extract in a cyclophosphamide-induced immunosuppressed rat model [J]. *Front Nutr*, 2022, 9: 898417.
- [59] Dimond C, Dovan K, Shah S A, *et al.* Effect of *Nelumbo nucifera* extract on anxiety symptoms in individuals with moderate to severe anxiety: an exploratory study [J]. *J Contemp Pharm Pract*, 2023, 70(2a): 15-20.
- [60] Cho W K, Yang H J, Ma J Y. *Lotus (Nelumbo nucifera* Gaertn.) leaf water extracts suppress influenza a viral infection via inhibition of neuraminidase and hemagglutinin [J]. *J Funct Foods*, 2022, 91: 105019.
- [61] Laoung-on J, Jaikang C, Saenphet K, *et al.* Effect of *Nelumbo nucifera* petals extract on antioxidant activity and sperm quality in Charolais cattle sperm induced by mancozeb [J]. *Plants*, 2022, 11(5): 637.

□

(编辑: 杨晓翠)