

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.60102

# 两种诺尼果多糖的组成结构及体外降糖、降脂活性比较

李泓杭 吴小勇 梁 键 王志江

(广东药科大学食品科学学院, 广东 中山 528453)

**摘要:** [目的] 对源于诺尼果的两个多糖组分的组成结构进行表征, 并比较其体外降糖、降脂活性。[方法] 采用水提醇沉法从诺尼果中提取分离出 NFP-30 和 NFP-80 两个多糖组分, 通过理化分析、光谱分析、扫描电镜分析等手段对两种多糖进行表征, 并通过  $\alpha$ -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶抑制率评估其体外降糖、降脂活性。[结果] NFP-30、NFP-80 组分中中性糖含量分别为  $(50.73 \pm 1.32)\%$ 、 $(42.30 \pm 1.11)\%$ , 糖醛酸含量分别为  $(61.48 \pm 0.40)\%$ 、 $(27.05 \pm 0.28)\%$ , 说明两者均为酸性多糖。在通过 DEAE-52 层析柱时, 两种多糖均在 NaCl 浓度为 0.9 mol/L 时出现一个主峰, 说明两者的组分较为集中。从对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的最大抑制率来看, NFP-30 的为 58.45%, NFP-80 的为 0.21%; 从对胰脂肪酶的最大抑制率来看, NFP-30 的为 34.63%, NFP-80 的为 9.77%, NFP-80 对两种酶活性的抑制率均明显低于 NFP-30。[结论] NFP-30 的中性糖含量和糖醛酸含量均高于 NFP-80 的, 其体外降糖、降脂活性也优于 NFP-80。

**关键词:** 诺尼果; 多糖; 结构表征; 降糖; 降脂

## Composition, structure and comparison of *in vitro* hypoglycaemic and hypolipidemic activities of two polysaccharides extracted from Noni fruit

LI Honghang WU Xiaoyong LIANG Jian WANG Zhijiang

(School of Food Science, Guangdong Pharmaceutical University, Zhongshan, Guangdong 528453, China)

**Abstract:** [Objective] This paper aims to characterize the composition and structure of two polysaccharides extracted from Noni fruit and compare their *in vitro* hypoglycaemic and hypolipidemic activities. [Methods] Two polysaccharides, NFP-30 and NFP-80, were extracted and isolated from Noni fruit by water extraction and ethanol precipitation method. They were then characterized by means of physicochemical analyses, spectral analyses, and scanning electron microscopy observations, and their *in vitro* hypoglycaemic and hypolipidemic activities were evaluated by the determination of the inhibition rates of  $\alpha$ -glucosidase and pancreatic lipase. [Results] The neutral sugar contents of NFP-30 and NFP-80 were  $(50.73 \pm 1.32)\%$  and  $(42.30 \pm 1.11)\%$ , respectively, and the glucuronic acid contents were  $(61.48 \pm 0.40)\%$  and  $(27.05 \pm 0.28)\%$ , respectively, which indicated that both of them were acidic polysaccharides. When passing through the DEAE-52 chromatographic column, both polysaccharides had a main peak at the NaCl concentration of 0.9 mol/L, indicating that the components of both polysaccharides were relatively concentrated. In terms of the maximum inhibition rate of  $\alpha$ -glucosidase, NFP-30 reached 58.45%, while NFP-80 only had 0.21%. In terms of the maximum inhibition rate of pancreatic lipase, NFP-30 reached 34.63%, while NFP-80 only had 9.77%, and the inhibition rate of NFP-80 on the activities of the two enzymes was significantly lower than that of NFP-30. [Conclusion] The neutral sugar content and glucuronic acid content of NFP-30 are higher than those of NFP-80, and its *in vitro* hypoglycaemic and hypolipidemic activities are better than those of NFP-80.

**Keywords:** Noni fruit; polysaccharide; structural characterization; hypoglycaemic; hypolipidemic

长期的高脂膳食会导致肥胖、高血脂、高血糖、心血管疾病、非酒精性脂肪肝等多种慢性代谢疾病的发生<sup>[1]</sup>。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(编号:2023YFC3606200); 广东省教育厅项目(编号:2023KTSCX055); 广东省中医药管理局项目(编号:20232089)

**通信作者:** 吴小勇(1972—), 男, 广东药科大学副教授, 博士。E-mail: perryfe@163.com

**收稿日期:** 2024-06-22 **改回日期:** 2024-12-30

目前较为有效且常见的降脂药物主要为他汀类药物,但其可能引起认知功能障碍<sup>[2]</sup>。格列本脲、曲格列酮、二甲双胍等是目前临床上常用的降糖药物,这些药物会引起低血糖、肝损伤等<sup>[3]</sup>。有研究发现,从植物中提取的生物碱、多酚和多糖等天然活性物质具有一定的降糖、降脂作用<sup>[4]</sup>,而多糖还具有高效低毒的特点<sup>[5]</sup>。 $\alpha$ -葡萄糖苷酶能够将糊精、麦芽糖等淀粉的分解产物转化为葡萄糖,胰脂肪酶能够水解胃肠道中的甘油三酯,两者都是糖脂代谢过程中重要的消化酶。 $\alpha$ -葡萄糖苷酶、胰脂肪酶的活性会被多糖所抑制,从而减少了淀粉和脂肪的消化,表明多糖具有一定的降糖、降脂作用<sup>[6-7]</sup>。因此,可通过体外测定某种物质对这两种酶的抑制能力来评价其降糖、降脂活性<sup>[8]</sup>。

诺尼(Noni)是一种热带亚热带果树,学名为海巴戟天(*Morinda citrifolia* L.)。其成熟果实为诺尼果,内部含有多种生物活性物质,如多糖、多酚类、环烯醚萜类化合物等<sup>[9-10]</sup>,在太平洋岛国的某些地区通常会被用作食品和药物<sup>[11]</sup>。多糖是诺尼果的主要生物活性成分之一,含量较为丰富,具有抗氧化<sup>[12]</sup>、抗炎<sup>[13]</sup>、降血脂<sup>[14]</sup>等功效,且不同的醇沉浓度可以获得不同组成结构的多糖<sup>[15]</sup>。课题组<sup>[12-13]</sup>前期对采用 30% 醇沉获得的诺尼果多糖(NFP)的组成结构和功能特性进行了研究,但有关诺尼果中另一部分多糖(经 30% 醇沉后剩余的多糖)的组成结构和功能特性的研究尚未见报道。研究拟采用分级醇沉方法从诺尼果水提液中获得两种不同醇沉浓度(质量分数 30%, 80%)的诺尼果多糖(分别命名为 NFP-30 和 NFP-80),并对两者的理化特性进行表征,分析比较其体外降糖、降脂活性,初步探讨不同诺尼果多糖之间结构与体外降糖、降脂活性的差异及可能存在的构效关系,为寻找安全高效的降糖、降脂功效成分提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

干片状诺尼果:海口市西沙诺丽生物科技有限公司;  
NKA-9 型大孔吸附树脂:天津市浩聚树脂有限公司;  
DEAE cellulose-52 阴离子交换纤维素填料:英国 Whatman 公司;

中低压玻璃层析柱: $\Phi$  2.6 cm $\times$ 60 cm, $\Phi$  2.6 cm $\times$ 90 cm,上海市厦美生化科技发展有限公司;

氢氧化钠、36% 盐酸、磷酸氢二钠、硫酸、氯化钠、磷酸二氢钾、碳酸钠、无水乙醇:分析纯,广州市化学试剂厂;

苯酚:分析纯,天津市永大化学试剂有限公司;

咪唑、三水合乙酸钠:分析纯,上海润捷化学试剂厂;

D-(+)-葡萄糖(纯度 $\geq$ 99.5%)、D-半乳糖醛酸、月桂

酸-4-硝基苯酯、胰脂肪酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶:美国 Sigma-Aldrich 公司;

四硼酸钠:分析纯,天津市百世化工有限公司;

对硝基苯- $\alpha$ -D-葡萄糖苷:纯度 99%,上海麦克林生化科技股份有限公司;

PBS 粉剂:AR0030,武汉市博士德生物工程有限公司。

### 1.2 仪器与设备

实时在线原位红外检测仪:Nicolet iS10 型,赛默飞世尔科技公司;

超高分辨热场发射扫描电子显微镜:JSM-7610FPlus 型,日本电子株式会社;

紫外-可见分光光度计:721n 型,上海仪电分析仪器有限公司;

pH 计:PHS-3C 型,上海仪电科学仪器股份有限公司;

X 射线衍射仪:D8 ADVANCE 型,德国布鲁克公司;

纳米粒度电位仪:Zetasizer Nano ZS90 型,英国马尔文帕纳科公司;

多功能提取浓缩机组:TS-NS-10 型,上海顺仪实验设备有限公司;

电子分析天平:BSA224S-CW 型,北京赛多利斯科学仪器有限公司;

恒温培养摇床:THZ-3 型,上海一恒科学仪器有限公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 多糖的提取和分离 准确称取 300 g 诺尼果干,按料液比( $m_{\text{诺尼果干}}:V_{\text{蒸馏水}}$ )1:20 (g/mL)加入蒸馏水,95 $^{\circ}$ C 浸提 90 min,浓缩。取一定体积的浓缩液,加入适量无水乙醇至体系中乙醇质量分数达到 30%。然后将样品放置在 4 $^{\circ}$ C 下醇沉 12 h 以上,离心,得沉淀和上清液。用适量体积的蒸馏水溶解沉淀后进行二次醇沉,离心获取沉淀,用适量蒸馏水充分溶解,得 NFP-30 多糖溶液;上清液中加入一定体积的无水乙醇至体系中乙醇质量分数达到 80%,根据 NFP-30 多糖溶液的制备方法,得到 NFP-80 多糖溶液。分别用活化好的 NKA-9 大孔树脂层析柱( $\Phi$  2.6 mm $\times$ 90 cm)进行脱色除杂,浓缩、冷冻干燥,得到 NFP-30、NFP-80 多糖冻干粉。

1.3.2 中性糖定量分析 采用苯酚-硫酸法。

1.3.3 糖醛酸定量分析 采用咪唑-硫酸法。

1.3.4 离子交换柱层析 参照文献[16]的方法。采用 DEAE-52 玻璃层析柱( $\Phi$  2.6 cm $\times$ 60 cm)对多糖进行离子交换层析分离,多糖上样质量浓度为 1 mg/mL,上样量为 20 mL,依次用蒸馏水及浓度为 0.5, 0.9, 1.3, 2.0 mol/L 的 4 种 NaCl 溶液对上样物质进行洗脱,流速 1.5 mL/min,每管收集时间 4 min,各收集 30 管,共 150 管,采用苯酚-硫酸

酸法追踪并检测洗脱情况,用Excel软件进行数据处理并绘制洗脱曲线。

1.3.5 扫描电子显微镜观察 参照文献[17]的方法,取适量干燥的多糖样品于不同放大倍数(300,500,1 000倍)下观察多糖表面微观形态。

1.3.6 红外光谱分析 参照文献[17]的方法。红外光谱扫描范围 $4\ 000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ 。

1.3.7 X射线衍射光谱分析 参照文献[17]的方法。取3 mg干燥多糖冻干粉末于测试样品台, $2\theta$ 为 $5^\circ\sim 90^\circ$ ,样品扫描速度 $10^\circ/\text{min}$ ,采样间隔 $0.02^\circ$ 。

1.3.8 多糖的粒径和Zeta电位分析 参照文献[17]的方法。测试温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,每个样品进行3次重复测定,取平均值。

1.3.9 多糖对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制率 参照何俊叶等<sup>[18]</sup>的方法并修改。配制质量浓度为0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,3.0,3.5,4.0 mg/mL的多糖溶液,取96孔板,按表1加入相应试剂,轻轻震荡均匀, $37\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温培养摇床孵育5 min,加入 $40\ \mu\text{L}$ PNPG溶液,轻轻震荡混匀, $37\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温培养摇床中孵育30 min,添加 $160\ \mu\text{L}$   $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液终止反应,用酶标仪测定405 nm下吸光度值,每组做3个复孔,按式(1)计算多糖对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制率。

$$I = \left(1 - \frac{A_3 - A_2}{A_1 - A_0}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

$I$ ——抑制率,%;

$A_3$ 、 $A_2$ 、 $A_1$ 、 $A_0$ ——样品组、背景组、阴性组、空白组在试验条件下的吸光度值。

1.3.10 多糖对胰脂肪酶的抑制试验 参照Chang等<sup>[19]</sup>的方法,按式(1)计算多糖对胰脂肪酶的抑制率。

#### 1.4 数据处理

各试验重复3次,采用Excel 2019、Origin 2022软件进行数据分析以及图表绘制。

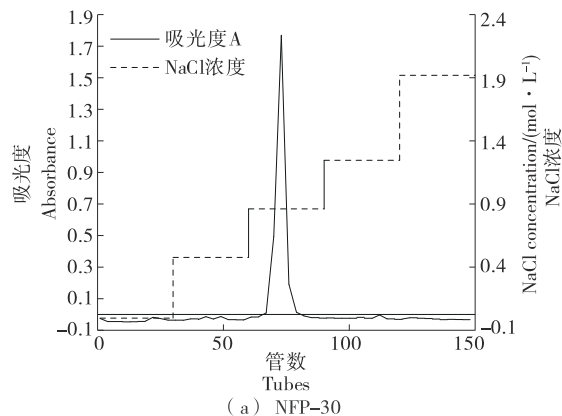


表1  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制率测定试验各组加样情况  
Table 1 Sample volume of each group in determination of inhibition rate of  $\alpha$ -glucosidase  $\mu\text{L}$

组别	多糖溶液	$\alpha$ -葡萄糖苷酶	PBS缓冲液
样品组	40	40	40
背景组	40	0	80
阴性组	0	40	80
空白组	0	0	120

## 2 结果与分析

### 2.1 两种多糖的糖组成

理化分析结果表明,NFP-30中中性糖和糖醛酸含量分别为50.73%,61.48%,NFP-80中中性糖和糖醛酸含量分别为42.30%,27.05%,两种多糖中均含一定量的糖醛酸,其中NFP-30的糖醛酸含量大于中性糖含量,说明其是一种典型的酸性多糖。NFP-30中中性糖含量和糖醛酸含量均大于NFP-80,说明NFP-30的纯度更高,而NFP-80可能是一种杂多糖。

### 2.2 两种多糖的均一性

由图1可知,在 $0.9\text{ mol/L}$ 的NaCl溶液中洗脱时,NFP-30和NFP-80中均出现明显的多糖峰,而在其他洗脱浓度下均未出现多糖峰,说明两种多糖的组成比较均一。采用凝胶渗透色谱法测得NFP-30、NFP-80的相对分子量分别为456,341。

### 2.3 扫描电镜分析

由图2可知,NFP-30呈致密光滑的片状,NFP-80呈大小不一的块状。糖醛酸含量越高,多糖分子间的作用力越大,从而使多糖形成光滑致密的片状<sup>[20]</sup>。因此,NFP-30的糖醛酸含量大于NFP-80,与多糖的理化分析结果一致。

### 2.4 红外光谱分析

由图3可知,—OH和C—H的伸缩振动分别出现在

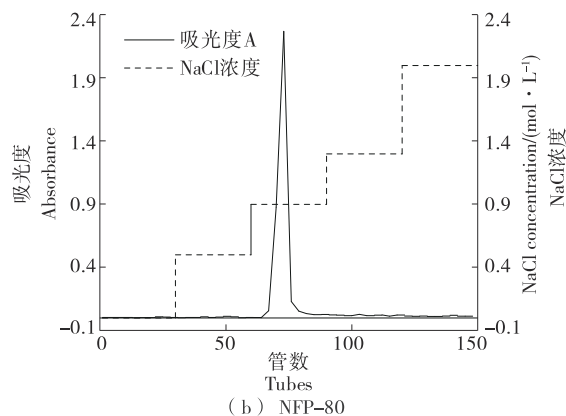
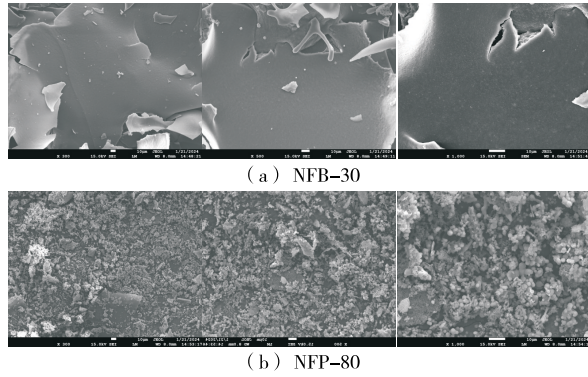


图1 NFP-30、NFP-80的DEAE-52洗脱曲线

Figure 1 Elution curve of NFP-30 and NFP-80 on DEAE-52



(a) NFP-30  
(b) NFP-80  
从左到右分别为放大 300, 500, 1 000 倍  
图 2 NFP-30、NFP-80 的扫描电镜图

Figure 2 Scanning electron microscopy images of NFP-30 and NFP-80

3 291, 2 933  $\text{cm}^{-1}$ , 为典型的多糖特征吸收峰<sup>[21-22]</sup>; 1 738  $\text{cm}^{-1}$  处的强吸收是由于羧基甲酯化的振动所引起的, 而羧基的不对称伸缩振动使得 1 604  $\text{cm}^{-1}$  处产生强吸收峰<sup>[23]</sup>, 说明了糖醛酸的存在<sup>[24-25]</sup>; 1 412  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰源自 C—H 的变形振动<sup>[26]</sup>; 1 227~1 011  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰为 C—O—H 或 C—O—C 的伸缩振动, 是多糖特有的一种吸收特征<sup>[27]</sup>; 吡喃糖环上 C—O—C 的伸缩振动在 1 143, 1 010  $\text{cm}^{-1}$  处产生了较强的吸收, 表明存在吡喃糖环<sup>[25, 28]</sup>, 说明两种多糖中均含有吡喃糖环; 此外,  $\beta$ -型糖苷键在 890  $\text{cm}^{-1}$  处出现吸收峰, 显示多糖内部存在这种糖苷键<sup>[29]</sup>; 819  $\text{cm}^{-1}$  处出现较明显的吸收, 显示多糖内部存在  $\alpha$ -型糖苷键<sup>[30]</sup>; NFP-30 在两处均有强吸收, 而 NFP-80 只在 890  $\text{cm}^{-1}$  处出现强吸收, 表明 NFP-30 中具备  $\alpha$ -型和  $\beta$ -型糖苷键, NFP-80 中只有  $\beta$ -型糖苷键。根据吸收峰的强弱程度, 1 738  $\text{cm}^{-1}$  处 NFP-30 比 NFP-80 有着更大的吸收峰值, 此外, 1 603  $\text{cm}^{-1}$  处 NFP-30 的峰形更加聚拢, 说明 NFP-30 的糖醛酸含量高于 NFP-80, 与多糖的理化分析

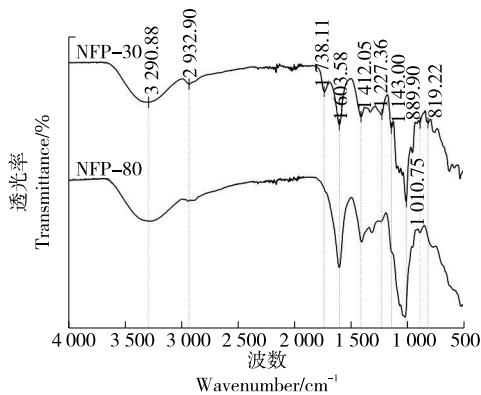


图 3 两种诺尼果多糖的红外光谱图

Figure 3 Infrared spectrogram of two polysaccharides extracted from Noni fruit

结果一致。

### 2.5 多糖的 X 射线衍射分析

由图 4 可知, 两种多糖在  $2\theta$  为  $5^\circ\sim 60^\circ$  处均没有明显的强吸收峰, 说明两种多糖冻干粉均为无定型结构, 没有晶体形成。

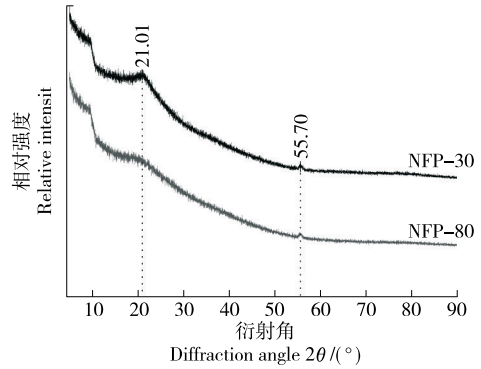


图 4 两种诺尼果多糖的 XRD 结果

Figure 4 XRD results of two polysaccharides extracted from Noni fruit

### 2.6 多糖的粒径和 Zeta 电位分析

由图 5 可知, NFP-30 的粒径在 pH 12 时有一个较为明显的增大, 是由于强碱环境下多糖中的酸性基团电离, 电负性增大, 分子间的静电排斥力增加, 因此粒径变大; 在其他 pH 条件下只出现轻微波动, 表明 NFP-30 在强酸、强碱条件下能够较好地保持稳定的分子结构。NFP-80 的粒径随着 pH 值的升高不断下降, 在 pH 10 时最小, 可能是由于多糖分子之间的连接方式遭到了强碱的破坏, 导致多糖内部发生解聚, 因此粒径变小。随着 pH 值的升高, NFP-30 和 NFP-80 的电位绝对值逐渐增大, 是由于多糖分子内部羧基不断去质子化<sup>[31]</sup>。Zeta 电位能够反映出多糖溶液的稳定性, 根据电位的变化趋势可知, pH 对两种多糖溶液稳定性的影响基本一样, 且在 pH 12 时两种多糖溶液的稳定性相近<sup>[32]</sup>。

### 2.7 两种多糖的体外降糖活性

由图 6 可知, NFP-30 对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制率在低浓度时呈正相关关系, 2  $\text{mg/mL}$  的多糖溶液表现出最佳的抑制效果, 抑制率高达 58.45%。当多糖质量浓度继续升高时, 抑制率逐渐趋于平缓; NFP-80 对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶几乎无抑制活性。Long 等<sup>[33]</sup>研究表明, 多糖的粒径与  $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性存在一定的负相关性, 其对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性的抑制作用会随着粒径的变小而变得更好。此外, Fu 等<sup>[34]</sup>研究表明, 糖醛酸含量较高的多糖对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的活性抑制效果更显著。NFP-30 的糖醛酸含量明显高于 NFP-80, 可能是 NFP-30 对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制率远高于 NFP-80 的原因之一。



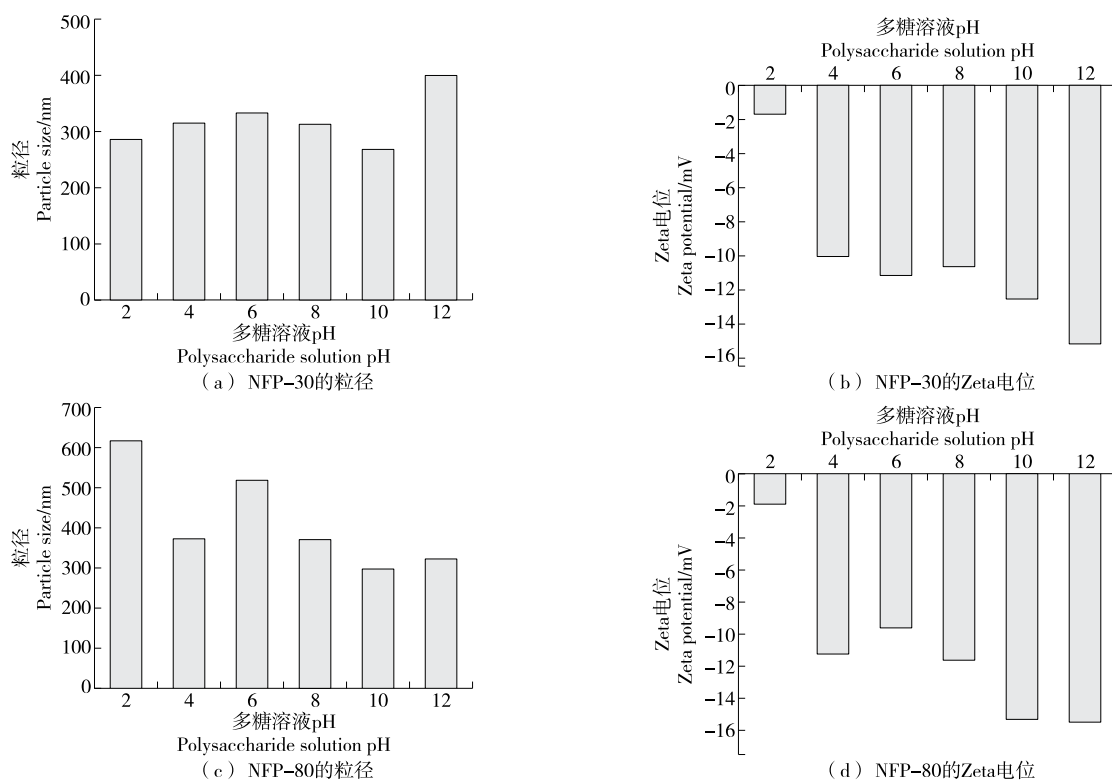


图5 两种诺尼果多糖的粒径和Zeta电位

Figure 5 Particle size and Zeta potential of two polysaccharides extracted from Noni fruit

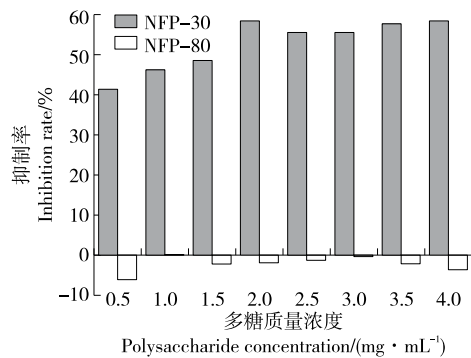
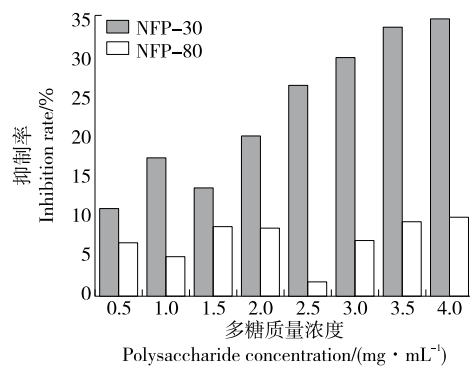
图6 两种诺尼果多糖的 $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制率Figure 6 Inhibition rate of two polysaccharides extracted from Noni fruit on  $\alpha$ -glucosidase

图7 两种诺尼果多糖的胰脂肪酶抑制率

Figure 7 Inhibition rate of two polysaccharides extracted from Noni fruit on pancreatic lipase

### 2.8 两种多糖的体外降脂活性

由图7可知,随着样品质量浓度的升高,NFP-30对胰脂肪酶的抑制活性逐渐增强,整体上呈一定的正相关关系,当抑制率最大(34.63%)时,其质量浓度也最大。NFP-80对胰脂肪酶的抑制率与其质量浓度之间无显著相关性,整体抑制效果较差,当样品质量浓度为4 mg/mL时,抑制率也仅有9.77%。王雨等<sup>[35-36]</sup>研究认为,多糖的杂质含量越少(糖含量越高),糖醛酸含量越高,胰脂肪酶的抑制活性越好。NFP-80的中性糖和糖醛酸含量均较

低,可能是NFP-80的胰脂肪酶抑制活性远低于NFP-30的主要原因。

## 3 结论

以诺尼果为原料,通过水提、分级醇沉、大孔吸附树脂脱色除杂和冷冻干燥等操作,制得两种诺尼果多糖NFP-30和NFP-80冻干粉。结果表明,NFP-30和NFP-80均为酸性多糖,NFP-30的中性糖和糖醛酸含量均明显高于NFP-80,且NFP-30的体外降糖、降脂活性也明显优于

NFP-80; 印证了多糖的纯度, 特别是糖醛酸含量与其体外降糖、降脂活性具有较强的正相关关系。该研究对多糖的生物活性及其构效关系进行了有意义的探究, 但目前还处于体外研究阶段, 今后可通过动物试验和人体试食进行更深入的探究。

### 参考文献

- [1] TANG C, WANG Y X, XU Z Y, et al. The relationships between high-fat diet and metabolic syndrome: potential mechanisms[J]. Food Bioscience, 2024, 59: 104261.
- [2] EVANS M A, GOLOMB B A. Statin-associated adverse cognitive effects: survey results from 171 patients[J]. Pharmacotherapy, 2009, 29(7): 800-811.
- [3] LIU D, GAO H, TANG W, et al. Plant non-starch polysaccharides that inhibit key enzymes linked to type 2 diabetes mellitus[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2017, 1401(1): 28-36.
- [4] KE Y, LIN L Z, ZHAO M M. Rhamnogalacturonan I-enriched pectin, flavonoids, and alkaloids from lotus leaf infusion in regulating glycolipid absorption and metabolism: isolation, in vitro bioactivity verification, and structural characterization[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(23): 8969-8980.
- [5] SHI R Y, DAN B, LÜ L J. Bioactive effects advances of natural polysaccharides[J]. Journal of Future Foods, 2023, 3(3): 234-239.
- [6] 蒋忠桂, 李迪, 李开凤, 等. 高降糖活性柠檬皮多糖制备工艺优化及结构表征[J]. 食品与机械, 2024, 40(4): 187-195.
- JIANG Z G, LI D, LI K F, et al. Optimization of preparation process and preliminary structure characterization of polysaccharides from lemon peel with high hypoglycemic activity[J]. Food & Machinery, 2024, 40(4): 187-195.
- [7] KUMAR A, CHAUHAN S. Pancreatic lipase inhibitors: the road voyaged and successes[J]. Life Sciences, 2021, 271: 119115.
- [8] XU L J, PAN X, LI D J, et al. Structural characterization, rheological characterization, hypoglycemic and hypolipidemic activities of polysaccharides from *Morchella importuna* using acidic and alkaline deep eutectic solvents[J]. LWT, 2024, 193: 115742.
- [9] ZHANG Q Y, ZHAO Y L, LI Y H, et al. Dietary polysaccharide-rich extract from Noni (*Morinda citrifolia* L.) fruit modified ruminal fermentation, ruminal bacterial community and nutrient digestion in cashmere goats[J]. Animals, 2023, 13(2): 221.
- [10] WANG R M, WANG L, ZHANG L, et al. Solvents effect on phenolics, iridoids, antioxidant activity, antibacterial activity, and pancreatic lipase inhibition activity of Noni (*Morinda citrifolia* L.) fruit extract[J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131989.
- [11] MOTSHAKERI M, GHAZALI H M. Nutritional, phytochemical and commercial quality of Noni fruit: a multi-beneficial gift from nature[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 45(1): 118-129.
- [12] YANG X B, LIN C R, CAI S, et al. Therapeutic effects of Noni fruit water extract and polysaccharide on oxidative stress and inflammation in mice under high-fat diet[J]. Food & Function, 2020, 11(1): 1133-1145.
- [13] JIN M Y, WU X Y, LI M Y, et al. Noni (*Morinda citrifolia* L.) fruit polysaccharides regulated IBD mice via targeting gut microbiota: association of JNK/ERK/NF- $\kappa$ B signaling pathways[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(35): 10151-10162.
- [14] 李文青, 祝孙婷, 李圣洁, 等. 羊栖菜多糖及辅助超声降解对高脂斑马鱼的降血脂作用[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(5): 156-163.
- LI W Q, ZHU S T, LI S J, et al. Hypolipidemic effect of sargassum fusiforme polysaccharide and ultrasonic-assisted degradation on hyperlipidemic zebrafish[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(5): 156-163.
- [15] 陈冰洁, 乔勇进, 王晓, 等. 金瓜多糖不同分级组分的抗氧化和降血糖活性[J]. 食品与机械, 2023, 39(7): 165-171.
- CHEN B J, QIAO Y J, WANG X, et al. Antioxidant and hypoglycemic activities of different graded fractions of polysaccharide from goldenmelon[J]. Food & Machinery, 2023, 39(7): 165-171.
- [16] HU Z Y, ZHOU H L, LI Y P, et al. Optimized purification process of polysaccharides from *Carex meyeriana* Kunth by macroporous resin, its characterization and immunomodulatory activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132: 76-86.
- [17] 林润, 江雪儿, 傅嘉懿, 等. 两种单丛茶多糖的表征及体外抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(14): 234-241.
- LIN R, JIANG X R, FU J Y, et al. Characterization and in vitro antioxidant activity study of two polysaccharides from Dancong tea[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(14): 234-241.
- [18] 何俊叶, 刘成, 于宠洋, 等. 黄皮不同部位多糖的结构特性及体外降血糖活性[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 156-164.
- HE J Y, LIU C, YU C Y, et al. Structural characteristics and hypoglycemic activity of polysaccharides from different parts of wampee[J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 156-164.
- [19] CHANG S S, LEI X, XIE Q, et al. In vitro study on antioxidant and lipid-lowering activities of tobacco polysaccharides[J]. Bioresources and Bioprocessing, 2024, 11(1): 15.

- [20] 蒋茂婷, 冉艳红, 刘娜, 等. 蒜皮水溶性多糖的制备及结构表征[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 57-65.  
JIANG M T, RAN Y H, LIU N, et al. Preparation and structural characterization of water-soluble polysaccharide from garlic skin[J]. Food Science, 2022, 43(6): 57-65.
- [21] ZHANG Z, YANG B Y, ZHAO J Y, et al. Purification, structure and conformation characterization of a novel glucogalactan from *Anoectochilus roxburghii*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 178: 547-557.
- [22] TIAN R, ZHANG Y Z, CHENG X B, et al. Structural characterization, and in vitro hypoglycemic activity of a polysaccharide from the mushroom *Cantharellus yunnanensis* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127200.
- [23] MA X K, SHE X, PETERSON E C, et al. A newly characterized exopolysaccharide from *Sanghuangporus sanghuang*[J]. Journal of Microbiology, 2019, 57(9): 812-820.
- [24] TIAN Y T, ZHAO Y T, ZENG H L, et al. Structural characterization of a novel neutral polysaccharide from *Lentinus giganteus* and its antitumor activity through inducing apoptosis[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 154: 231-240.
- [25] WU H Q, MA Z L, ZHANG D X, et al. Sequential extraction, characterization, and analysis of pumpkin polysaccharides for their hypoglycemic activities and effects on gut microbiota in mice[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 769181.
- [26] 潘章超, 王勇, 吴莉, 等. 暗褐脉柄牛肝菌发酵液多糖的分离纯化与结构表征[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 12-16, 62.  
PAN Z C, WANG Y, WU L, et al. Isolation, purification and structure characterization of the polysaccharide from the fermentation broth of *Phlebopus portentosus*[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 12-16, 62.
- [27] LI X Y, WANG L, WANG Z Y. Structural characterization and antioxidant activity of polysaccharide from *Hohenbuehelia serotina*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 98: 59-66.
- [28] 刘艳秋, 王亚茹, 毛迪锐, 等. 轮叶党参多糖的分离纯化及结构研究[J]. 食品与机械, 2023, 39(9): 162-168, 240.  
LIU Y Q, WANG Y R, MAO D R, et al. Isolation, purification and structure analysis of polysaccharide from lance asiabell root[J]. Food & Machinery, 2023, 39(9): 162-168, 240.
- [29] WANG Y G, LI Y L, MA X Q, et al. Extraction, purification, and bioactivities analyses of polysaccharides from *Glycyrrhiza uralensis*[J]. Industrial Crops and Products, 2018, 122: 596-608.
- [30] HU H B, LIANG H P, LI H M, et al. Isolation, purification, characterization and antioxidant activity of polysaccharides from the stem barks of *Acanthopanax leucorrhizus*[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 196: 359-367.
- [31] WEI Y, CAI Z X, WU M, et al. Comparative studies on the stabilization of pea protein dispersions by using various polysaccharides[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105233.
- [32] ZHU Z B, WEN Y, YI J H, et al. Comparison of natural and synthetic surfactants at forming and stabilizing nanoemulsions: tea saponin, Quillaja saponin, and Tween 80 [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 536: 80-87.
- [33] LONG X S, HU X, XIANG H, et al. Structural characterization and hypolipidemic activity of *Gracilaria lemaneiformis* polysaccharide and its degradation products[J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100314.
- [34] FU Y, FENG K L, WEI S Y, et al. Comparison of structural characteristics and bioactivities of polysaccharides from loquat leaves prepared by different drying techniques[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 145: 611-619.
- [35] 王雨, 孙延平, 杨炳友, 等. 天然产物多糖对脂肪酶的抑制活性研究进展[J]. 化学工程师, 2022, 36(11): 62-65.  
WANG Y, SUN Y P, YANG B Y, et al. Research progress on the inhibitory activity of natural polysaccharides on lipase[J]. Chemical Engineer, 2022, 36(11): 62-65.
- [36] AHMADI S, YU C X, ZAEIM D, et al. Increasing RG-I content and lipase inhibitory activity of pectic polysaccharides extracted from Goji berry and raspberry by high-pressure processing[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 126: 107477.