

雪莲果成分及药理活性研究进展

李姿瑶, 丁小倩, 王艳, 王明阳, 袁晓艳*

(遵义医科大学药学院, 贵州遵义 563099)

[摘要] 雪莲果中主要含有酚酸、黄酮、倍半萜内酯、低聚果糖等化合物,在抗氧化、抗炎、降血糖、抑菌、抗癌等方面作用明显。雪莲果根茎及叶中含有大量的酚酸类化合物,主要为咖啡酸及其衍生物,该类物质使得雪莲果具有明显的抗氧化作用。同时,该类物质也可通过改善胰岛素敏感性而产生降低血糖的作用。低聚果糖在雪莲果块茎中含量丰富,可通过调节肠道菌群平衡而改善肠道功能。雪莲果叶表面的香毛簇中含有倍半萜内酯类化合物,该类物质可明显抑制癌细胞的增殖,其中 uvedafofin、enhydrofofin 活性较强,并且该类物质对革兰氏阳性菌具有明显的抑制作用。在结构上,环氧基团的数量差异,与抗癌、抑菌作用的强弱有一定关联。除此之外,雪莲果中还含有挥发油、脂肪酸、甾醇、二萜、对羟基苯乙酮衍生物以及辛酮糖酸衍生物等化合物,具有抗阿尔茨海默病、保护肾脏、降血脂等药理作用。然而,目前对雪莲果中化合物的分离鉴定等方面的研究还不完善,相关药理作用仍有待深入。因此通过查阅国内外相关报道,对雪莲果中的化学成分和药理作用进行归纳总结,以期对雪莲果的综合开发利用提供参考。

[关键词] 雪莲果; 化学成分; 药理活性; 研究进展

[中图分类号] R2-0;R22;R285.5;R284;R33 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-9903(2022)11-0217-10

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.20220907

[网络出版地址] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.R.20220303.1612.005.html>

[网络出版日期] 2022-03-07 7:17

Chemical Components and Pharmacological Activities of *Smallanthus sonchifolius* (Yacon): A Review

LI Zi-yao, DING Xiao-qian, WANG Yan, WANG Ming-yang, YUAN Xiao-yan*

(School of Pharmacy, Zunyi Medical University, Zunyi 563099, China)

[Abstract] *Smallanthus sonchifolius*, a plant resource with both medicinal and edible values, has been taken as fruit for a long history. Studies have proved that phenolic acids, flavonoids, sesquiterpene lactones, and fructooligosaccharides are the major compounds in *S. sonchifolius*. The extract of *S. sonchifolius* demonstrates noticeable antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial, and anti-cancer effects, as well as the activities of lowering blood glucose level, regulating intestinal function and so on. The rhizomes and leaves of *S. sonchifolius* contain abundant phenolic acids, mainly caffeic acid and its derivatives, which endow *S. sonchifolius* with remarkable antioxidant effect. Moreover, these substances can reduce blood glucose by improving insulin sensitivity. Fructooligosaccharides are abundant in the tuber of this plant, which can improve intestinal function by regulating intestinal flora. The sesquiterpene lactones in glandular trichomes on the leaf surface can inhibit the proliferation of cancer cells, among which uvedafofin and enhydrofofin have particularly strong activities. Furthermore, the sesquiterpene lactones have obvious inhibitory effect on Gram-positive bacteria. In terms of structure, the number of epoxy groups is linked to the strength of anticancer and antimicrobial effects. In addition, *S. sonchifolius* contains other compounds such as volatile oils, fatty acids, sterols, diterpenes,

[收稿日期] 2021-12-23

[基金项目] 国家自然科学基金项目(81960707)

[第一作者] 李姿瑶, 硕士, 从事药物活性成分分析研究, E-mail: lzy750985@163.com

[通信作者] *袁晓艳, 博士, 副教授, 从事药物活性成分分析研究, E-mail: yuanxiaoyan815@163.com

p-hydroxyacetophenone derivatives, and octulosonic acid derivatives, thereby exhibiting the pharmacological effects of treating Alzheimer's disease, protecting kidney, and lowering blood lipids. However, the isolation and identification of the main compounds in *S. sonchifolius* need further exploration, and the mechanism of action remains to be studied. Here we summarized the principal chemical components and pharmacological activities of *S. sonchifolius*, aiming to give a clue for the comprehensive development and utilization of this plant.

[Keywords] *Smallanthus sonchifolius*; chemical components; pharmacological activities; research progress

雪莲果(*Smallanthus sonchifolius*)又称雪莲薯、亚贡、菊薯、亚龙果等,原产于南美安第斯高原,为菊科多年生草本植物^[1-2]。雪莲果在我国多地均有种植,其地下块茎可作为水果食用,叶子可加工成茶,冲泡饮用具有降血糖的功效。雪莲果及其相关产品具有一定保健作用,因其根茎中含有大量的菊粉型果聚糖和低聚果糖,菊粉型果聚糖是膳食纤维的组成成分之一,雪莲果是该成分的主要来源之一^[3]。低聚果糖作为益生元的一种,促进肠道健康作用显著,并能间接调节血糖和胰岛素水平^[4-5]。但雪莲果叶仅在少部分地区和有所应用。

在我国雪莲果更多的是作为水果食用,其地上部分常作为动物饲料或农业废弃物,因此虽在我国成功引种多年,但由于相关研究的不完善而并未引起重视和广泛应用。研究表明,雪莲果的块茎和叶中主要含有的成分为酚酸、黄酮、倍半萜内酯类化合物,药理活性主要为抗氧化、抗炎、降血糖、抑菌、抗癌等。其中,从雪莲果根中分离出的咖啡酸酯类化合物 2,3,5-tricaffeoylalttracic acid 和 2,4,5-tricaffeoylalttracic acid 可用于降血糖,其制备方法已申请专利^[6]。近年来,对雪莲果块茎及叶子的相关研究逐渐增多,但对其中所含化学成分的分离鉴定及相关药理作用的研究尚不充分。

本文就雪莲果主要化学成分和药理作用作一综述,以期对雪莲果的进一步开发利用提供参考。

1 化学成分

目前从雪莲果中分离出的化学成分达 140 个,主要为酚酸、黄酮、倍半萜内酯、挥发油、低聚果糖、脂肪酸类等成分,此外还有甾醇、二萜、对羟基苯乙醇衍生物以及辛酮糖酸衍生物类等物质。

1.1 酚酸类化合物 目前从雪莲果叶及块茎中分离鉴定的酚酸类化合物共有 26 个(1~26),见表 1。袁晓艳等^[7]从雪莲果叶的乙酸乙酯部分分离鉴定得到 2 个咖啡酸衍生物(1、2);PADILLA-GONZÁLEZ 等^[8]借助分子网络手段,从雪莲果不同部位的甲醇提取物中分离鉴定得到 12 个咖啡酸酯类化合物(3~

14);其中 6 个该类化合物是在雪莲果叶、花的提取物中分离得到的(15~20)^[9-10];TAKENAKA 等^[11]从雪莲果根的水提取物中分离鉴定得到 4 个咖啡酸衍生物(21~24);谢威等^[12]在雪莲果的 75% 乙醇提取物的三氯甲烷萃取部位分离鉴定得到 1 个酚酸类化合物(25);OLIVEIRA 等^[13]在雪莲果叶的极性提取物中分离鉴定得到 1 个酚酸类化合物(26)。

1.2 黄酮类化合物 现从雪莲果中分离鉴定出黄酮类化合物共 13 个(27~39),见表 2。在采用 iPBS 标记和代谢组学指纹图谱对不同产地雪莲果叶的基因和化学多样性进行分析时,不仅鉴定出酚酸类化合物还分离得到 1 个黄酮类化合物(27)^[14];袁晓艳等^[7]以核磁共振法在雪莲果叶的乙酸乙酯提取物中鉴定出 2 个黄酮类化合物(28、29);以高效液相法为鉴定方法,在雪莲果叶、花的水提取物中鉴定出 4 个黄酮类化合物(30~33)^[9];RUSSO 等^[10]证明雪莲果叶的乙醇提取物中富含黄酮类化合物,并以高效液相法在该提取物中鉴定出黄酮类化合物 4 个(34~37);OLIVEIRA 等^[13]在雪莲果叶的提取物中分离鉴定得到 2 个黄酮类化合物(38、39)。

1.3 倍半萜内酯类化合物 菊科植物中含有丰富的倍半萜内酯类物质,目前已从雪莲果中分离鉴定出 16 个该类化合物(40~55),见表 3。其中 6 个倍半萜内酯类化合物是通过 iPBS 标记和代谢组学指纹图谱对不同产地雪莲果叶的基因和化学多样性进行分析时得到的(40~45)^[14];在雪莲果叶的水提物、70% 甲醇提取物中分离鉴定得到 8 个该类化合物(46~53)^[15-17]。以 95% 乙醇为提取溶剂,经正相硅胶色谱柱分离纯化出 2 个倍半萜内酯类化合物(54~55)^[18]。

1.4 挥发油类化合物 通过水蒸汽蒸馏法、固相微萃取结合气相色谱-质谱联用技术在雪莲果中分离鉴定出 40 个挥发油类化合物(56~95)^[19-21]。见表 4。

1.5 脂肪酸类化合物 采用超临界 CO₂ 和乙醇流体萃取法从雪莲果中共分离鉴定得 19 个脂肪酸类物质(96~114),其中饱和脂肪酸 9 个(96~104),不饱

表1 雪莲果中酚酸类化合物

Table 1 Phenolic acid compounds in *Smilax sibirica*

化合物	中文名	英文名	参考文献
1	咖啡酸甲酯	methyl caffeate	[7]
2	咖啡酸乙酯	ethyl caffeate	[7]
3	-	4-O-caffeoyl-2,7-anhydro-d-glycero-β-d-galacto-oct-2-ulopyranosonic acid	[8]
4	-	5-O-caffeoyl-2,7-anhydro-d-glycero-β-d-galacto-oct-2-ulopyranosonic acid	[8]
5	-	4,5-di-O-caffeoyl-2,7-anhydro-d-glycero-β-d-galacto-oct-2-ulopyranosonic acid	[8]
6	5-O-(E)-咖啡酰奎宁酸	5-O-(E)-caffeoylquinic acid	[8]
7	-	2,3,5- or 2,4,5-tricaffeoyltraric acid	[8]
8	-	2- or 5-caffeoyltraric acid	[8]
9	-	3- or 4-caffeoyltraric acid	[8]
10	-	2,4- or 2,5-dicaffeoyltraric acid	[8]
11	-	2,3,5- or 2,4,5-tricaffeoyltraric acid methyl ester	[8]
12	3-O-(E)-咖啡酰奎宁酸	3-O-(E)-caffeoylquinic acid	[8]
13	3,5-二-O-(E)-咖啡酰奎宁酸	3,5-di-O-(E)-caffeoylquinic acid	[8]
14	1,5-二-O-(E)-咖啡酰奎宁酸	1,5-di-O-(E)-caffeoylquinic acid	[8]
15	没食子酸	gallic acid	[9]
16	咖啡酸	caffeic acid	[9]
17	对香豆酸	p-coumaric acid	[9]
18	阿魏酸	ferulic acid	[9]
19	迷迭香酸	rosmarinic acid	[10]
20	绿原酸	chlorogenic acid	[10]
21	-	2,5-dicaffeoyltraric acid	[11]
22	-	2,3,5- or 2,4,5- tricaffeoyltraric acid	[11]
23	-	2,4- or 3,5-dicaffeoyltraric acid	[11]
24	异绿原酸A	3,5-dicaffeoylquinic acid	[11]
25	香草酸	vanillic acid	[12]
26	香豆酸	Coumaric acid	[13]

注：“-”表示无中文名称(表3-表5、表7同)

表2 雪莲果中黄酮类化合物

Table 2 Flavonoid compounds in *Smilax sibirica*

化合物	中文名	英文名	参考文献
27	橙皮素	hesperetin	[14]
28	3,7-二甲氧基槲皮素	quercetin 3,7-dimethylether	[7]
29	高圣草酚	homoeriodictyol	[7]
30	槲皮素	quercetin	[9]
31	山奈酚	kaempferol	[9]
32	芦丁	rutin	[9]
33	杨梅素	myricetin	[9]
34	木犀草素	luteolina	[10]
35	芹菜素	apigenin	[10]
36	木犀草素-3',7-二-O-葡萄糖苷	luteolin-3',7-O-di glucoside	[10]
37	木犀草素-7-O-葡萄糖苷	luteolin-7-O-glucoside	[10]
38	3-邻甲基槲皮素	3-O-methylquercetin	[13]
39	3,4'-二邻甲基槲皮素	3,4'-di-O-methylquercetin	[13]

和脂肪酸10个(105~114)^[22],见表5。

1.6 低聚果糖 雪莲果中含有丰富的低聚果糖,现从雪莲果中共分离鉴定12个糖类物质(115~126),见表6。连红玉^[23]采用水提醇沉法对雪莲果中的糖类物质进行提取,共分离鉴定得到8个糖类物质,其中单糖有4个(115~118),4个化合物为低聚果糖(119~122);郝婷等^[24]以优化后的水提醇沉法,通过Flash HILIC柱色谱法对雪莲果提取物进行分离,所得4个化合物经HPLC-ELSD鉴定为低聚果糖(123~126)。

1.7 其他化合物 除上述药理作用较为明显,提取分离鉴定较多的物质,在雪莲果中还分离鉴定出1个甾醇类物质(127)^[12];8个二萜类物质(128~135)^[14,25];3个对羟基苯乙酮衍生物(136~138)^[26];2个辛酮糖酸衍生物(139~140)^[27]。

表3 雪莲果中倍半萜内酯类化合物

Table 3 Sesquiterpene lactone compounds in *Smallanthus Sonchifolius*

化合物	中文名	英文名	参考文献
40	-	polymatin A	[14]
41	-	fluctuadin	[14]
42	-	uvedalin aldehyde	[14]
43	-	longipilin acetate	[14]
44	-	polymatin B aldehyde	[14]
45	-	(1Z,4E)-8 α -angeloyloxy-germacra-1(10), 4, 11(13)-trien-6 \acute{a} , 12-olide-14-oic acid	[14]
46	-	enhydrofolin	[15]
47	沼菊素	enhydrin	[16]
48	-	uvedalin	[16]
49	-	polymatin B	[16]
50	-	sonchifolin	[16]
51	-	8 β -tigloyloxymelampolid-14-oic acid methyl ester	[17]
52	-	8 β -methacryloyloxymelampolid-14-oic acid methyl ester	[17]
53	-	fluctuanin	[17]
54	-	8 β -angeloyloxy-13-methoxyl-11, 13-dihydro-melampolid-14-oic acid methyl ester	[18]
55	-	8 β -(3-methylbut-2-enoyl)oxy-13-methoxyl-11, 13-dihydro-melampolid-14-oic acid methyl ester	[18]

2 药理作用

雪莲果中所含有的酚酸、黄酮、倍半萜内酯、低聚果糖类化合物,使其在抗氧化、抗炎、降血糖、抑菌、抗肿瘤等方面具有较为明显的药理活性,除此之外在抗阿尔茨海默病、保护肾脏、降血脂和调节肠道功能等方面也具有一定作用。

2.1 抗氧化作用 自由基是人体代谢的产物,自由基过多会导致多种疾病,体内自由基的清除有利于维持机体细胞正常的结构和功能,防止细胞突变、衰变和延缓肿瘤生长等作用。酚酸、黄酮类物质已被证实为是有效的天然抗氧化剂,如绿原酸与丁基羟基甲苯(BHT)的抗氧化能力相当^[28],二咖啡酰奎宁酸类的物质可减少超氧阴离子的生成^[29],槲皮素具有抑制脂质氧化以及预防动脉硬化的作用^[30]。

雪莲果叶乙酸乙酯部位的提取物中含有较多的酚酸类化合物,清除1,1-二苯基-2-苦肼基(DPPH)、2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐(ABTS⁺)、羟基自由基的活性远高于常见人工合成抗氧化剂^[31]。雪莲果叶中总黄酮的浓度在

表4 雪莲果中挥发油类化合物

Table 4 Volatile oil compounds in *Smallanthus Sonchifolius*

化合物	中文名	英文名	参考文献
56	α -水芹烯	α -phellandrene	[19]
57	α -蒎烯	α -pinene	[19]
58	β -水芹烯	β -phellandrene	[19]
59	桉烯	sabinene	[19]
60	β -月桂烯	β -myrcene	[19]
61	苯甲醇	benzyl alcohol	[19]
62	对-聚伞花素	p-cymene	[19]
63	δ -松油烯	δ -terpinen	[19]
64	4-松油醇	terpinen-4-ol	[19]
65	δ -榄香烯	δ -elemene	[19]
66	α -衣兰油烯	α -muurolene	[19]
67	α -葎澄茄油烯	α -cubebene	[19]
68	β -波旁烯	β -bourbonene	[19]
69	表-双环倍半水芹烯	epi-bicyclosesquiphellandrene	[19]
70	β -石竹烯	β -caryophyllene	[19]
71	吉玛烯D	germacrene D	[19]
72	α -蛇麻烯	α -humulene	[19]
73	β -葎澄茄苦素	β -cubebene	[19]
74	δ -葎澄茄烯	δ -cadinene	[19]
75	-	β -vatiorene	[19]
76	-	7-tetracycloundecanol	[19]
77	4-甲基己醛	4-methylhexanal	[20]
78	β -对伞花烃	β -cymene	[20]
79	α -松油醇	α -terpineol	[20]
80	β -紫罗兰酮	β -ionone	[20]
81	β -石竹烯氧化物	β -caryophyllene oxide	[20]
82	α -侧柏烯	α -thujene	[20]
83	樟脑萜	camphene	[20]
84	α -松油烯	α -terpinene	[20]
85	柠檬烯	limonene	[20]
86	τ -松油烯	τ -terpinene	[20]
87	β -蒎烯	β -pinene	[20]
88	α -胡椒烯	α -copaene	[20]
89	丁香烯	caryophyllene	[20]
90	τ -衣兰油烯	τ -muurolene	[20]
91	β -葎澄茄烯	β -cadinene	[20]
92	α -紫穗槐烯	α -amorphenone	[20]
93	雪松烯	τ -himachalene	[20]

0.03~0.6 g·L⁻¹范围内,有明显的DPPH清除能力,半数抑制浓度(IC₅₀)为0.25 g·L⁻¹,其抗氧化能力具有

表5 雪莲果中脂肪酸类化合物

Table 5 Fatty acid compounds in *Smallanthus Sonchifolius*

化合物	中文名	英文名	参考文献
96	月桂酸	lauric acid	[22]
97	肉豆蔻酸	myristic acid	[22]
98	十五烷酸	pentadecanoic acid	[22]
99	棕榈酸	palmitic acid	[22]
100	十七烷酸	margaric acid	[22]
101	硬脂酸	stearic acid	[22]
102	花生酸	arachidic acid	[22]
103	二十一烷酸	heneicosanoic acid	[22]
104	二十二烷酸	behenic acid	[22]
105	棕榈油酸	palmitoleic acid	[22]
106	油酸	oleic acid	[22]
107	亚油酸	linoleic acid	[22]
108	γ -亚麻酸	γ -Linolenic acid	[22]
109	二十碳三烯酸	eicosatrienoic acid	[22]
110	-	di-homo-alpha-linolenic	[22]
111	二十碳五烯酸	eicosapentaenoic acid	[22]
112	二十碳二烯酸	eicosadienoic acid	[22]
113	二十二碳六烯酸	docosahexadienoic acid	[22]
114	神经酸	nerve acid	[22]

表6 雪莲果中糖类化合物

Table 6 Carbohydrate compounds in *Smallanthus Sonchifolius*

化合物	中文名	英文名	参考文献
115	阿拉伯糖	arabinose	[23]
116	木糖	xylose	[23]
117	甘露糖	mannitol	[23]
118	葡萄糖	glucose	[23]
119	果糖	fructopyranose	[23]
120	蔗糖	α -D-lactose monohydrate	[23]
121	蔗果三糖	1-kestose	[23]
122	蔗果四糖	nistose	[23]
123	蔗果五糖	1F-fructofuranosylnistose	[24]
124	蔗果六糖	1,1,1,1-kestohehexose	[24]
125	蔗果七糖	kructoheptasaccharide	[24]
126	蔗果八糖	1,1,1,1,1,1-kestoctaose	[24]

剂量依赖性,其总还原能力略低于维生素C,但抗氧化能力仍较为明显^[32]。皮尔森相关系数显示雪莲果叶的甲醇提取物中所含有的酚酸类化合物主要参与清除DPPH、超氧自由基、一氧化氮自由基,具有一定减少氧化与氮化的能力,同时证明黄酮类物质是抑制脂质过氧化的主要成分^[33]。雪莲果块根

的甲醇提取物具有较强的总抗氧化能力,0.1 g·mL⁻¹的该提取物对Fe²⁺的螯合能力相当于乙二胺四乙酸(EDTA)的77.61%,产生该作用的原因可能与其具有较强的金属螯合能力有关^[34]。雪莲果中菊粉型低聚果糖的浓度为0.5、1 g·L⁻¹时对H₂O₂(200 μ mol·L⁻¹)所致人神经母细胞瘤细胞(SH-SY5Y)的氧化应激损伤有明显的逆转作用,表明菊粉型低聚果糖具有一定的神经保护作用,对氧化所致的神经退行性疾病有一定作用^[35]。

氧化是导致多种疾病的主要原因,雪莲果中含有的酚酸、黄酮类化合物是其具有抗氧化能力的主要成分,若能明确使其具有该作用的单体化合物,并提高该物质的提取率,雪莲果将有一定潜力成为天然抗氧化剂的来源之一。

2.2 抗炎作用 以丙酮对雪莲果叶进行漂洗后制得的提取物,对巴豆油所致小鼠的耳水肿具有较好的局部抗炎效果,该提取物可抑制各炎性介质一氧化氮(NO)、肿瘤坏死因子- α (TNF- α)、前列腺素E₂(PGE₂)的表达,且作用呈剂量依赖性,经鉴定该提取物中富含倍半萜内酯类物质,说明富含该类化合物的雪莲果叶具有局部抗炎的潜力,有一定应用价值^[13]。NO在神经炎症和脑损伤中起关键作用,雪莲果叶乙醇提取物可显著降低以脂多糖刺激的小鼠小神经胶质细胞中的NO,也降低了诱导型一氧化氮合酶(iNOS)、环氧酶-2(COX-2)、白细胞介素-1 β (IL-1 β)、TNF- α 等4种炎症因子的mRNA表达水平,表明该提取物具有一定抗神经炎症的作用,并具有成为抗神经炎症药物的潜力^[36]。低聚果糖可通过降低 γ 干扰素(IFN- γ),增加杯状细胞数量,促进以2,4,6-三硝基苯磺酸(TNBS)致结肠炎小鼠的肠道黏膜愈合,对肠黏膜屏障受损相关的慢性炎症性疾病有积极作用^[37]。

2.3 降血糖作用 糖尿病是一种以高血糖为特征的代谢性疾病,长期患病会导致各种组织的慢性损伤和功能障碍。研究显示,酚酸类、黄酮类、萜类和香豆素类化合物具有潜在的降血糖作用。

以2%雪莲果叶水煎液代替水连续喂养糖尿病大鼠(以链脲佐菌素诱导)30 d后发现,糖尿病大鼠的血糖、血浆胰岛素水平、体质量和肾脏参数较对照组均有所改善,证明雪莲果叶水提物可使血浆胰岛素浓度增加从而降低血糖^[38]。雪莲果乙醇水提取物可降低高血糖新生大鼠的血糖水平,但对正常血糖大鼠和处于禁食状态大鼠的血糖无明显作用,且不影响动物的体质量增加,无肝损伤和死亡。经

表 7 雪莲果中其他类化合物

Table 7 Other compounds in *Smilax chinensis*

化合物	中文名	英文名	参考文献
127	β -谷甾醇	β -sitosterol	[12]
128	-	smaditerpenic acid D	[14]
129	-	smaditerpenic acid E	[14]
130	-	smaditerpenic acid F	[14]
131	-	16, 17-epoxy-15- <i>O</i> -angeloxy-ent-kauran-18-oic acid	[14]
132	15- α -当归酰基氧基贝壳杉-19-酸-16-环氧化物	15- α -angeloyloxykauren-19-oic acid 16-epoxide	[25]
133	18-当归酰基-异贝壳杉烯酸	18-angeloyloxy-ent-kaur-16-en-19-oic acid	[25]
134	异贝壳杉烯酸	ent-kaur-16-en-19-oic acid	[25]
135	15- α -当归酰基-异贝壳杉烯酸	15- α -angeloyloxy-ent-kaur-16-en-19-oic acid	[25]
136	4'-羟基-3'-(3-甲基丁酰基)苯乙酮	4'-hydroxy-3'-(3-methylbutanoyl)acetophenone	[26]
137	4'-羟基-3'-(3-甲基-2-丁烯基)苯乙酮	4'-hydroxy-3'-(3-methyl-2-butenyl)acetophenone	[26]
138	5-乙酰基-2-(1-羟基-1-甲基乙基)苯并呋喃	5-acetyl-2-(1-hydroxy-1-methylethyl)benzofuran	[26]
139	(1 <i>R</i> , 2 <i>S</i> , 3 <i>S</i> , 4 <i>R</i> , 5 <i>S</i> , 7 <i>R</i>)-4-羟基-7-羟甲基-3-[3-(3,4-二羟基苯基)-1-氧代-2-丙烯氧基]-6,8-[3.2.1]-辛烷-5-羧酸(4- <i>O</i> -咖啡酰氧基-2,7-脱水- <i>D</i> -甘油-油- <i>D</i> -半乳糖-辛基-2- <i>ulopyranosonic</i> 酸)	(1 <i>R</i> , 2 <i>S</i> , 3 <i>S</i> , 4 <i>R</i> , 5 <i>S</i> , 7 <i>R</i>)-4-hydroxy-7-hydroxymethyl-3-[3-(3,4-dihydroxyphenyl)-1-oxo-2-propenyloxy]-6,8-[3.2.1]-octan-5-carboxylic acid (4- <i>O</i> -caffeoyl-2,7-anhydro- <i>D</i> -glycero- β - <i>D</i> -galacto-oct-2- <i>ulopyranosonic</i> acid)	[27]
140	(1 <i>R</i> , 2 <i>S</i> , 3 <i>R</i> , 4 <i>R</i> , 5 <i>S</i> , 7 <i>R</i>)-2,4-二羟基-7-羟甲基-2,3-2-[3-(3,4-二羟基苯基)-1-氧代-2-丙烯氧基]-6,8-二氧杂双环[3.2.1]辛烷-5-羧酸(4,5-2- <i>O</i> -咖啡酰氧基-2,7-脱水- <i>D</i> -甘油- <i>D</i> -半乳糖-辛基-2- <i>ulopyranosonic</i> 酸)	(1 <i>R</i> , 2 <i>S</i> , 3 <i>R</i> , 4 <i>R</i> , 5 <i>S</i> , 7 <i>R</i>)-2,4-dihydroxy-7-hydroxymethyl-2,3-bis[3-(3,4-dihydroxyphenyl)-1-oxo-2-propenyloxy]-6,8-dioxabicyclo[3.2.1]octan-5-carboxylic acid (4,5-di- <i>O</i> -caffeoyl-2,7-anhydro- <i>D</i> -glycero- β - <i>D</i> -galacto-oct-2- <i>ulopyranosonic</i> acid)	[27]

高效液相法鉴定,该提取物中含有绿原酸、阿魏酸、没食子酸、咖啡酸等酚酸类化合物,其作用机制可能为酚酸类化合物通过改善胰岛素的敏感性而产生降低血糖的作用^[39]。雪莲果叶甲醇、三氯甲烷、正丁醇、乙酸乙酯提取物及从中所分离出倍半萜内酯 enhydrin 的纯结晶,可通过升高血浆胰岛素水平产生降血糖作用,并能有效防止进食 90 min 后的血糖高峰。其中,正丁醇提取物有较好的作用,经高效液相法鉴定该提取物中主要含有咖啡酸、绿原酸和三种二咖啡酰奎宁酸等酚酸类物质。证明雪莲果叶中所含有的酚酸、倍半萜内酯类物质可能参与血糖控制的过程,对糖尿病具有一定改善作用^[40]。一实验对 10% 雪莲果叶水煎液和纯 enhydrin 的毒性进行了评价,虽然细胞活力呈浓度依赖性下降但对大鼠进行急、慢性研究时,未观察到死亡或毒性迹象,也没有引起血液、生化和组织学改变。因此,雪莲果叶用于降血糖相对安全^[41]。

2.4 抑菌作用 雪莲果叶中的倍半萜内酯是使其具有抑菌作用的主要物质,抑菌活性较强的成分为 fluctuanin、urvedalin、enhydrin。而雪莲果叶中所含有的 fluctuanin 和 β -methacryloyloxymelampolid-

14-oic acid methyl ester 分别对枯草芽孢杆菌以及稻瘟病孢子萌发的抑制作用最佳。在对其抑菌机制进行研究时发现,化合物结构差异与抑菌作用有一定关联,若 C-9 处具备乙酰甲氧基,C-4/C-5 处具备环氧基团,则该化合物具有较强抑菌效果^[17]。雪莲果叶、茎不同极性溶剂的提取物对 3 种受试菌株茄腐镰刀菌、玉米枯纹病菌、小麦赤霉菌的抑制作用随提取物的浓度和提取溶剂极性的升高而增大,表明雪莲果叶、茎中对 3 种植物病原菌具有抑制作用或抑制作用较强的成分大多分布在高极性溶剂中。在同一浓度下,叶提取物对三种植物病原菌的抑菌率高于茎提取物^[42]。雪莲果叶中酚酸类物质对金黄色葡萄球菌、大肠埃希菌、枯草芽孢杆菌均有较好的抑制作用,呈现了明显的量效关系,尤其对金黄色葡萄球菌的抑制作用最强,最小抑菌浓度为 $1.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[43]。在雪莲果的二氯甲烷提取物中分离出的 ent-kaurenoic acid,在最低质量浓度 ($1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 时对革兰氏阳性菌(金黄色葡萄球菌、表皮葡萄球菌、枯草芽孢杆菌)有明显的抑制作用,在最高质量浓度 ($10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 时对革兰氏阴性菌(大肠埃希菌、产气肠杆菌、肺炎杆菌、铜绿假单胞菌)及真菌(白色念

珠菌、红色毛癣菌、絮状表皮菌)无明显抑制作用。说明该物质对革兰氏阳性菌的抑制作用优于革兰氏阴性菌和真菌^[44]。

2.5 抗癌作用 雪莲果叶中所含的3个倍半萜内酯 enhydrin、uvedalin 和 sonchifolin 在 0.22~10 μmol 剂量范围内,均可通过诱导细胞凋亡而抑制人宫颈癌细胞株(Hela细胞)的增殖,该效应呈浓度和时间依赖性,其中化合物 enhydrin 的细胞毒性最强。这一作用与增加 Caspase-3/7 的活化和抑制核转录因子- κB (NF- κB)结合蛋白的激活有关。并发现细胞毒性强弱、诱导细胞凋亡的速度与化合物中含有环氧化合物的数量及是否具有 α -亚甲基- γ -内酯基有关,该报道所提出的化合物结构特征也为筛选雪莲果叶抗肿瘤活性物质提供一定理论依据^[45]。雪莲果粉中含有的低聚果糖可促进结肠癌动物的肠道健康,减弱由大肠癌所引起的肠道变化^[46]。雪莲果叶中6个倍半萜内酯 uvedafolin、enhydrofolin、polymatin B、enhydrin、uvedalin、sonchifolin,对 HeLa、人早幼粒急性白血病细胞(HL-60)和小鼠黑色素瘤细胞(B16-F10)3种细胞系均有不同程度的细胞毒性。其中 uvedafolin、enhydrofolin 分别对 HeLa 细胞(IC_{50} 为 $1.69 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)、HL-60 细胞(IC_{50} 为 $0.51 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)毒性最大,除 Sonchifolin 外的5个化合物均对 B16-F10 有较高的细胞增殖抑制。6个受试化合物中 uvedafolin、enhydrofolin 表现出较好的活性,具有成为抗癌药物的潜力^[47]。雪莲果乙醇提取物可使 C6 胶质细胞瘤的增殖减少 40.7% 左右,质量浓度在 $300 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时该提取物能较好的抑制细胞迁移。其作用机制可能为下调细胞外信号调节激酶 1/2(ERK1/2)和基质金属蛋白酶-9(MMP-9)及上调基质金属蛋白酶抑制剂-1(TIMP-1)的表达水平^[48]。

黄酮类化合物可通过控制细胞周期、增加氧化应激、诱导细胞凋亡、激活 DNA 损伤反应途径、诱导细胞自噬、抑制血管生成、抑制蛋白激酶、抑制拓扑异构酶及抑制肿瘤细胞侵袭和转移而抑制肿瘤细胞增殖,具有广阔的应用前景^[49]。非依赖性丝氨酸-苏氨酸蛋白激酶(CK2)可增强癌细胞侵袭性和对化疗药物的耐药性,而在 7 和 4' 位置上有平面结构和羟基化的黄酮类物质,如芹菜素、木犀草素、山奈酚、槲皮素、杨梅素等化合物可抑制 CK2,从而抑制有关信号通路的表达,达到抑制肿瘤细胞生长的作用^[50]。槲皮素可抑制多种癌细胞增殖,主要通过调节细胞凋亡、细胞周期停滞、NF- κB 、丝裂原活化蛋

白激酶(MAPK)、磷脂酰肌醇 3-激酶(PI3K)/蛋白激酶 B(Akt)和哺乳动物雷帕霉素靶蛋白(mTOR)等6种细胞信号传导途径而产生抑制作用。其衍生物具有更好的水溶性、生物利用度,代谢更稳定、不良反应也较低,有更好的抑制癌细胞增殖的作用^[51]。

酚酸类物质中绿原酸、没食子酸抗肝癌细胞的作用机制分别为抑制肝癌细胞增殖和诱导肝癌细胞凋亡等,其中绿原酸具有较好的效果^[52-53]。

2.6 其他药理作用

2.6.1 抗阿尔茨海默病作用 阿尔茨海默病是一种以中枢胆碱能功能广泛丧失为特征的神经退行性疾病,目前有效的治疗方法是使用胆碱酯酶抑制剂增强胆碱能活性。雪莲果叶和根提取物对 β -淀粉样蛋白(A β)所诱导的大鼠神经毒性均具有保护作用,但仅有叶提取物可防止阿尔茨海默症所致的记忆缺陷^[54]。

2.6.2 保护肾脏作用 雪莲果叶水煎剂对糖尿病所致肾病、肾脏损伤具有一定程度的保护作用,该作用是通过介导转化生长因子- β (TGF- β)/Smads 信号而减轻糖尿病患者尿白蛋白排泄、肌酐清除率、肾脏肥大和基底膜增厚的变化,并降低糖尿病肾病分子标志物的表达^[55]。

2.6.3 降血脂 从雪莲果中提取到的纯多糖可显著降低小鼠血脂,肝脏的组织病理学显示,雪莲果纯多糖对肝脏代谢活动有显著影响,对因胆固醇所致的肝脏损伤有一定抑制作用^[23]。

2.6.4 调节肠道功能 低聚果糖可作为微生物发酵的底物,从而减少病原体的黏附,而起到保护肠道屏障的作用,并可促进肠道中双歧杆菌的增殖^[56-58]。雪莲果粉可有效调节小鼠肠道菌群状态,维持菌群平衡和肠道健康^[59]。雪莲果粉的可溶性提取物有效改善了鸡的肠道菌群分布、消化吸收能力、肠道形态和刷状缘功能,从而可以增加肠道中有益菌群的数量,改善对膳食中矿物质的摄取^[60]。雪莲果提取物可改善大鼠胃肠功能紊乱和便秘^[61]。

3 结论

雪莲果的块茎食用历史悠久,而雪莲果叶常作为农业废弃物或动物饲料,仅在部分地区有所应用。雪莲果的叶中含有较多的咖啡酸类物质,该类物质是雪莲果叶具有降血糖作用的主要成分,然而,该类物质提取分离鉴定方面的研究尚不完善,有关该类物质分离制备方面的研究仍有不足,导致在药理活性的验证上仍以粗提物为主,故无法说明单体化合物与该种作用之间的具体关系,更无法说

明具体作用机制。除酚酸类化合物外,其所含有的黄酮和倍半萜内酯类化合物也具有广泛的药理作用,但相关研究仍有待深入。因此若想进一步挖掘雪莲果的药用价值,首先要利用更加先进的技术对其化学成分进行更精准的定性鉴别,并通过药理作用的研究对活性成分进行筛选,再以单体化合物对相关作用机制做更深入的研究,为雪莲果的综合开发利用提供理论依据。

[参考文献]

- [1] 曲晓萌,杨革,张泽浩,等. 纳滤法制备高纯度雪莲果低聚果糖及其结构表征[J]. 生物质化学工程, 2020, 54(5):37-44.
- [2] 田文静,赵东瑞. 雪莲果及其产品研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(7):4-7.
- [3] SALINAS J G, ALVARADO J A, BERGENSTÅHL B, et al. The influence of convection drying on the physicochemical properties of yacón (*Smallanthus sonchifolius*) [J]. Heat Mass Transfer, 2018, 54(10): 2951-2961.
- [4] REIS F R, MARQUES C, MORAES A C S DE, et al. Effect of processing methods on yacon roots health-promoting compounds and related properties [J]. Trends Food Sci Technol, 2021, 113:346-354.
- [5] DE FÁTIMA LAUREANO MARTINS J, SOUZA-SILVA DE T G, PAULA H A DE A, et al. Yacon-based product improves intestinal hypertrophy and modulates the production of glucagon-like peptide-1 in postmenopausal experimental model [J]. Life Sci, 2022, 291:120245.
- [6] TERADA S J, ITOH K J, NOGUCHI N J, et al. α -glucosidase inhibitor for blood glucose level elevation and functional food containing tricaffeoylaldaric acid and method for producing tricaffeoylaldaric acid: JP, US2009209649(A1)[P]. 2009-08-20. Espacenet.
- [7] 袁晓艳,陈晓兰,廖羽,等. 雪莲果叶乙酸乙酯部位化学成分研究[J]. 遵义医学院学报, 2017, 40(6): 609-612.
- [8] PADILLA-GONZÁLEZ G F, SADGROVE N J, CCANA-CCAPATINTA G V, et al. Feature-based molecular networking to target the isolation of new caffeic acid esters from yacon (*Smallanthus sonchifolius*, Asteraceae) [J]. Metabolites, 2020, 10(10):407.
- [9] ERIEL F D A, ROBERTA D S L, LUCIANA N E, et al. Phenolic profile and antioxidant activity of extracts of leaves and flowers of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) [J]. Ind Crops Prod, 2014, 62:499-506.
- [10] RUSSO D, MALAFRONTI N, FRESCURA D, et al. Antioxidant activities and quali-quantitative analysis of different *Smallanthus sonchifolius* [(Poepp. and Endl.) H. Robinson] landrace extracts [J]. Nat Prod Res, 2015, 29(17):1673-1677.
- [11] TAKENAKA M, YAN X, ONO H, et al. Caffeic acid derivatives in the roots of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) [J]. J Agric Food Chem, 2003, 51(3): 793-796
- [12] 谢威,李俊,李红梅. 雪莲果化学成分的研究[J]. 中药材, 2008, 31(10):1510-1512.
- [13] OLIVEIRA R B, CHAGAS-PAULA D A, SECATTO A, et al. Topical anti-inflammatory activity of yacon leaf extracts [J]. Rev Bra Farmacogn, 2013, 23(3): 497-505.
- [14] ŽIAROVSKÁ J, PADILLA-GONZÁLEZ G F, VIEHMANNOVÁ I, et al. Genetic and chemical diversity among yacon [*Smallanthus sonchifolius* (Poepp. et Endl.) H. Robinson] accessions based on iPBS markers and metabolomic fingerprinting [J]. Plant Physiol Biochem, 2019, 141:183-192.
- [15] MOREIRA SZOKALO R A, REDKO F, ULLOA J, et al. Toxicogenetic evaluation of *Smallanthus sonchifolius* (yacon) as a herbal medicine [J]. J Ethnopharmacol, 2020, 257:112854.
- [16] ATSUSHI I, SHIGERU T, HIDEKI K, et al. Antifungal melampolides from leaf extracts of *Smallanthus sonchifolius* [J]. Phytochemistry, 1995, 39(4):845-848.
- [17] LIN F, HASEGAWA M, KODAMA O. Purification and identification of antimicrobial sesquiterpene lactones from yacon (*Smallanthus sonchifolius*) leaves [J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2003, 67(10): 2154-2159.
- [18] RAN X K, WIN AUNG K K, BAI J, et al. Two new sesquiterpene lactones from leaves of yacon, *Smallanthus sonchifolius* [J]. J Asian Nat Prod Res, 2018, 20(6):538-544.
- [19] LI J, LIU J, LAN H, et al. GC-MS analysis of the chemical constituents of the essential oil from the leaves of yacon (*Smallanthus sonchifolia*) [J]. Front Agric China, 2009, 3(1):40-42.
- [20] 李静威. 雪莲果叶片挥发油动态变化及不同部位营养成分分析[D]. 雅安:四川农业大学, 2008.
- [21] ADAM M, JUKLOVÁ M, BAJER T, et al. Comparison of three different solid-phase microextraction fibres for analysis of essential oils in

- yacon (*Smallanthus sonchifolius*) leaves [J]. *J Chromatogr A*, 2005, 1084(1-2): 2-6.
- [22] CRUZ P N, FETZER D L, DO AMARAL W, et al. Antioxidant activity and fatty acid profile of yacon leaves extracts obtained by supercritical CO₂ ethanol solvent[J]. *J Supercrit Fluids*, 2019, 146: 55-64.
- [23] 连红玉. 雪莲果中糖类成分分离纯化及生物活性研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2012.
- [24] 郝婷, 李洪波, 赵红玲, 等. 雪莲果低聚果糖化学成分及其生物活性[J]. *中成药*, 2021, 43(5): 1375-1378.
- [25] HIDEO K, TAKUHIKO S, YASUYUKI H, et al. Entkaurenic acid and its related compounds from glandular trichome exudate and leaf extracts of *Polymnia sonchifolia* [J]. *Biosci, Biotech, Biochem*, 1992, 56(10): 1562-1564.
- [26] MITSUO T, TAKAHIRO M. Three 4'-hydroxyacetophenone-related phytoalexins from *Polymnia sonchifolia* [J]. *Phytochemistry*, 1996, 43(5): 1019-1021.
- [27] TAKENAKA M, ONO H. Novel octulosonic acid derivatives in the composite *Smallanthus sonchifolius* [J]. *Tetrahedron Lett*, 2003, 44(5): 999-1002.
- [28] 杜延兵, 裘爱泳. 绿原酸生物活性、资源及其提取纯化[J]. *现代食品科技*, 2006, 22(2): 250-252.
- [29] 张囡, 杜丽丽, 王冬, 等. 中药酚酸类成分的研究进展[J]. *中国现代中药*, 2006, 8(2): 25-28.
- [30] 李卓亚. 雪莲果化学成分及其药理作用的研究[J]. *食品与药品*, 2007, 9(6): 41-43.
- [31] 袁晓艳, 张峰. 雪莲果叶提取物的抗氧化活性研究[J]. *遵义医学院学报*, 2016, 39(5): 483-486.
- [32] 戢得蓉, 刘松奇, 熊坤艳, 等. 雪莲果叶总黄酮超声波辅助酶法提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. *食品与机械*, 2021, 37(2): 179-185.
- [33] RUSSO D, VALENTÃO P, ANDRADE P, et al. Evaluation of antioxidant, antidiabetic and anticholinesterase activities of *Smallanthus sonchifolius* landraces and correlation with their phytochemical profiles[J]. *Int J Mol Sci*, 2015, 16(8): 17696-17718.
- [34] 杨少辉, 宋英今, 王清华, 等. 雪莲果体外抗氧化和自由基清除能力[J]. *食品科学*, 2010, 31(17): 166-169.
- [35] 安磊, 王珂, 孙雨辰, 等. 雪莲果中菊淀粉型低聚果糖的神经保护作用[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(10): 34-39.
- [36] BAEK S, CHOI N H, LEE K P, et al. *Smallanthus sonchifolius* leaf attenuates neuroinflammation [J]. *J Exerc Nutrition Biochem*, 2018, 22(2): 31-35.
- [37] PUTRI UMIZAH L, WASITYASTUTI W, INDAH WIDASARI D, et al. Effects of yacon on colonic IFN-gamma and goblet cells of 2, 4, 6-trinitrobenzene sulfonic acid-induced colitis mouse model [J]. *Iran Biomed J*, 2020, 24(5): 281-287.
- [38] AYBAR M J, SÁNCHEZ RIERA A N, GRAU A, et al. Hypoglycemic effect of the water extract of *Smallanthus sonchifolius* (yacon) leaves in normal and diabetic rats [J]. *J Ethnopharmacol*, 2001, 74(2): 125-132.
- [39] BARONI S, DA ROCHA B A, OLIVEIRA DE MELO J, et al. Hydroethanolic extract of *Smallanthus sonchifolius* leaves improves hyperglycemia of streptozotocin induced neonatal diabetic rats [J]. *Asian Pac J Trop Med*, 2016, 9(5): 432-436.
- [40] GENTA S B, CABRERA W M, MERCADO M I, et al. Hypoglycemic activity of leaf organic extracts from *Smallanthus sonchifolius*: Constituents of the most active fractions [J]. *Chem Biol Interact*, 2010, 185(2): 143-152.
- [41] BARCELONA C S, CABRERA W M, HONORÉ S M, et al. Safety assessment of aqueous extract from leaf *Smallanthus sonchifolius* and its main active lactone, enhydrin [J]. *J Ethnopharmacol*, 2012, 144(2): 362-370.
- [42] 倪婧, 李彪, 施蕊, 等. 雪莲果茎叶萃取物抑菌活性研究[J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(4): 271-273.
- [43] 陈红惠, 彭光华. 雪莲果叶酚酸提取物抑菌活性研究[J]. *食品研究与开发*, 2011, 32(1): 1-4.
- [44] PADLA E P, SOLIS L T, RAGASA C Y. Antibacterial and antifungal properties of ent-kaurenic acid from *Smallanthus sonchifolius* [J]. *Chin J Nat Med*, 2012, 10(6): 408-414.
- [45] SIRIWAN D, NARUSE T, TAMURA H. Effect of epoxides and α -methylene- γ -lactone skeleton of sesquiterpenes from yacon (*Smallanthus sonchifolius*) leaves on caspase-dependent apoptosis and NF- κ B inhibition in human cervical cancer cells [J]. *Fitoterapia*, 2011, 82(7): 1093-1101.
- [46] GRANCIERI M, COSTA N M B, VAZ TOSTES M D G, et al. Yacon flour (*Smallanthus sonchifolius*) attenuates intestinal morbidity in rats with colon cancer [J]. *J Funct Foods*, 2017, 37: 666-675.
- [47] KITAI Y, HAYASHI K, OTSUKA M, et al. New sesquiterpene lactone dimer, uvedafolin, extracted from eight yacon leaf varieties (*Smallanthus sonchifolius*): Cytotoxicity in HeLa, HL-60, and murine B16-F10 melanoma cell lines [J]. *J Agric Food Chem*, 2015, 63(50): 10856-10861.
- [48] LEE K P, CHOI N H, KIM J T, et al. The effect of

- yacon (*Smallanthus sonchifolius*) ethanol extract on cell proliferation and migration of C6 glioma cells stimulated with fetal bovine serum[J]. *Nutr Res Pract*, 2015, 9(3):256-261.
- [49] KHAN A U, DAGUR HANUMAN S, KHAN M, et al. Therapeutic role of flavonoids and flavones in cancer prevention: Current trends and future perspectives[J]. *Eur J Med Chem Rep*, 2021, 3: 100010.
- [50] MCCARTY M F, ASSANGA S I, LUJAN L L. Flavones and flavonols may have clinical potential as CK2 inhibitors in cancer therapy[J]. *Med Hypotheses*, 2020, 141:109723.
- [51] 冯亚莉, 卢令攀, 翟广玉. 槲皮素衍生物抗肿瘤活性研究进展[J]. *中国中药杂志*, 2020, 45(15): 3565-3574.
- [52] 赵健, 张露滢, 李婉莹, 等. 酚酸类化合物抗肝细胞癌作用机制及应用的研究进展[J]. *中国药房*, 2020, 31(17):2163-2169.
- [53] 杨晓丽, 张君利, 王京峰, 等. 绿原酸抗肿瘤作用及机制研究进展[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2018, 24(19):229-234.
- [54] MARTINEZ-OLIVEIRA P, DE OLIVEIRA M F, ALVES N, et al. Yacon leaf extract supplementation demonstrates neuroprotective effect against memory deficit related to β -amyloid-induced neurotoxicity[J]. *J Funct Foods*, 2018, 48:665-675.
- [55] HONORÉ S M, CABRERA W M, GENTA S B, et al. Protective effect of yacon leaves decoction against early nephropathy in experimental diabetic rats [J]. *Food Chem Toxicol*, 2012, 50(5): 1704-1715.
- [56] 李瑶, 王国盼, 郝占西, 等. 低聚果糖对肥胖模型及肠道菌群的调节作用[J]. *食品科学*, 2021, doi: 10.7506/spkx1002-6630-20210703-023.
- [57] 谷佳玉. 低聚果糖显著性促进小鼠体内双歧杆菌增殖的机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018.
- [58] KUMAR J, RANI K, DATT C. Molecular link between dietary fibre, gut microbiota and health [J]. *Mol Biol Rep*, 2020, 47(8):6229-6237.
- [59] 吴三林, 刘芳, 罗小琴, 等. 灌服雪莲果粉对小鼠肠道菌群的影响[J]. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 37(2):42-45.
- [60] MARTINO H S D, KOLBA N, TAKO E. Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) flour soluble extract improve intestinal bacterial populations, brush border membrane functionality and morphology *in vivo* (*Gallus gallus*)[J]. *Food Res Int*, 2020, 137: 109705.
- [61] 杨玲, 康超, 王芳, 等. 雪莲果提取物对大鼠胃肠道功能的调节作用[J]. *贵州科学*, 2018, 36(5): 31-34.

[责任编辑 周冰冰]