·特邀主编专栏—标准化赋能食品及相关产品高质量发展（客座主编：云振宇、史波林、兰韬、刘鹏、赵琳）·

客座主编寄语：在新一轮科技革命与产业变革的交汇点，标准化已成为驱动食品及相关产业跃升新质生产力的核心引擎。作为连接技术创新与产业落地的桥梁，标准不仅是质量安全的“守门员”，更是创新成果转化的“加速器”。当前，人工智能、区块链、生物技术等新兴技术正重塑食品产业格局，而标准化通过统一技术规范、贯通产业链条、衔接创新要素，推动行业从“经验驱动”向“系统创新”跨越。

王雪, 孟柯柯, 詹麒平, 等. 五种甘薯茎叶的营养功能特性分析及其降糖降脂压片糖果的开发 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 1−11. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100246

WANG Xue, MENG Keke, ZHAN Qiping, et al. Analysis of the Nutritional Functional Characteristics of Five Types of Sweet Potato Stems and Leaves and the Development of Hypoglycemic and Hypolipidemic Tablet Candies[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 1−11. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100246

五种甘薯茎叶的营养功能特性分析及其降糖降脂压片糖果的开发

王　雪, 孟柯柯, 詹麒平, 陈　潇, 赵立艳*

（南京农业大学食品科技学院, 江苏南京 211800）

摘　要: 本研究分析了五种甘薯茎和叶的营养组成与功能活性差异，开发了甘薯叶压片糖果并对其进行了体外糖脂代谢活性验证。结果表明，品种与部位对营养成分、功能活性的影响显著：相较于叶，不同品种的甘薯茎均表现出更高的膳食纤维和可溶性糖含量，其中宁菜 18-24 号茎中含量最高，分别达到 54.51 g/100 g 和 15.35 g/100 g；而甘薯叶中的蛋白质含量显著高于茎部位。此外，宁菜 18-24 号叶，宁菜 3 号叶和桂菜 12-557 号茎分别有最高的多酚，黄酮和花青素含量。进一步选择宁菜 18-24 号叶为原料，通过 D-最优混料设计优化压片糖果配方（甘薯叶粉 76.52%，淀粉 14.98%，麦芽糊精 4.89%，滑石粉 1.48%，木糖醇 0.92%，柠檬酸 1.20%），证实压片糖果具有优良的持水力、胆固醇吸附力和葡萄糖吸附力，并表现出良好的糖脂代谢调节能力（α-葡萄糖苷酶抑制 IC_{50} 为 0.25 mg/mL，胆固醇胶束形成抑制明显）。本研究为甘薯茎叶的高值化利用与功能性食品开发提供了实验依据和研究基础。

关键词: 甘薯茎, 甘薯叶, 营养特性, 体外功能活性, 配方优化, 压片糖果

中图分类号: TS201.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)15−0001−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100246

本文网刊:

Analysis of the Nutritional Functional Characteristics of Five Types of Sweet Potato Stems and Leaves and the Development of Hypoglycemic and Hypolipidemic Tablet Candies

WANG Xue, MENG Keke, ZHAN Qiping, CHEN Xiao, ZHAO Liyan*

（College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China）

Abstract: This study analyzed the differences in nutritional composition and functional activities of five types of sweet potato stems and leaves, developed sweet potato leaf tablet candies, and conducted *in vitro* verification of their glucose and lipid metabolic activities. The results indicated that the variety and part had significant effects on the nutritional components and functional activities: compared with the leaves, the stems of different sweet potato varieties all showed higher dietary fiber and soluble sugar contents, among which the stems of Ningcai 18-24 had the highest contents, reaching 54.51 g/

收稿日期: 2025−10−23

基金项目: 江苏省 2025 年研究生研究与实践创新计划（SJCX25_0284）；江苏现代农业（特粮特经）产业技术体系贮藏加工创新团队（JATS[2023]424）。

作者简介: 王雪（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与化学, E-mail: 2023808138@stu.njau.edu.cn。

*** 通信作者:** 赵立艳（1977−）（ORCID: 0000−0003−2363−3815）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品功能评价及功能产品开发、食品风味形成机理及风味产品开发, E-mail: zhlychen@njau.edu.cn。

100 g and 15.35 g/100 g respectively; while the protein level in sweet potato leaves was significantly higher than that in the stem parts. In addition, the leaves of Ningcai 18-24, the leaves of Ningcai 3 and the stems of Guicai 12-557 had the highest polyphenol, flavonoid and anthocyanin contents respectively. Further, Ningcai 18-24 leaves were selected as raw materials, and the formula of the tablet candy was optimized through D-optimal mixture design (sweet potato leaf powder 76.52%, starch 14.98%, maltodextrin 4.89%, talcum powder 1.48%, xylitol 0.92%, citric acid 1.20%). It was confirmed that the tablet candy had excellent water-holding capacity, cholesterol adsorption capacity and glucose adsorption capacity, along with significant regulatory effects on glucose and lipid metabolism (α-glucosidase inhibition IC_{50} was 0.25 mg/mL, and the inhibition of cholesterol micelle formation was obvious). This study provided experimental basis and research foundation for the high-value utilization of sweet potato stems and leaves and the development of functional foods.

Key words: sweet potato stems; sweet potato leaves; nutritional characteristics; *in vitro* functional activity; formula optimization; tablet candy

甘薯(*Ipomoea batatas* L.)是全球第七大重要粮食作物,广泛种植于世界各地。其块根已被广泛利用,但大量茎叶常被视为农业废弃物,不仅造成资源浪费,也加剧了环境压力[1]。此前的研究多集中于块根中的抗氧化成分(如花青素、类胡萝卜素),对地上部分(茎叶)的关注不足。随着对植物活性成分研究的日益重视,人们开始关注甘薯茎叶(SPL)的营养价值和功能活性[2]。实际上,SPL 每年可收获多次,营养丰富,其营养价值高于传统叶菜[3],且富含类胡萝卜素、黄酮类化合物等多种活性物质,具有抗氧化、降血糖、抗炎和免疫调节等功能[4]。这些特点使 SPL 成为功能性食品、天然添加剂和药物开发的重要原料,但其高价值利用仍缺乏系统研究。

不同品种和部位的 SPL 在营养成分和生物活性方面存在显著差异[5]。具体而言,甘薯叶的叶黄素含量远高于茎部[3];不同品种间,纯绿色叶片的 V_C 含量更高,而紫绿色叶片则富含花青素[6];此外,多酚与黄酮类物质的品种差异性也直接影响其生物学活性[7]。然而,现有研究多集中于单一品种或少数功能性成分的定性分析,而缺乏对品种和部位的系统比较[8]。这制约了产品的功能性和市场竞争力。因此,本研究旨在系统比较不同品种、部位 SPL 的营养成分、活性物质及体外功能活性的差异,以期为甘薯茎叶的高值化开发利用提供理论依据。

目前,全球罹患代谢综合征的人群持续增多,糖脂代谢紊乱引起的胰岛素抵抗和脂质谱异常已成为 2 型糖尿病和非酒精性脂肪肝等代谢性疾病的核心原因[9],这助力具有调节糖脂代谢功能的功能性食品需求日益增长,推动了该产业的蓬勃发展[10]。其中,甘薯叶中的多酚和膳食纤维等天然物质是关键的功能性成分[11],它们能够阻止脂肪细胞的氧化损伤以及由自由基引起的促炎因子的释放,靶向调节脂质代谢途径从而调节糖脂代谢。压片糖果在利用这些功能成分方面具有显著优势,其剂型便于精准定量、易于携带与服用,有利于保持活性成分的稳定性,并适合作为日常膳食补充,从而为代谢综合征人群提供方便、可控的功能性食品选择。

本研究对不同品种的 SPL 进行了系统比较,旨在探究其营养组成、功能成分、体外活性等方面差异。同时采用 D-最优混合设计结合模糊数学评估法优化甘薯叶基压片糖果的开发工艺,初步探究其在体外调节糖脂代谢的潜力。本研究有利于促进 SPL 的功能性产品开发,将茎和叶从“废弃物”转变为高附加值产品,促进产业创新发展。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

五种品种的 SPL:宁菜 3 号(S1)、福薯 18 号(S2)、福菜 7-8 号(S3)、宁菜 18-24 号(S4)和桂菜 12-557 号(S5) 均由江苏省丘陵地区的南京农业科学研究所(中国南京)提供;α-淀粉酶(5 U/mg)、α-葡萄糖苷酶(50 U/mg)、胰脂肪酶(30 U/mg)、胆固醇酯酶(150 U/mg)、胰蛋白酶(250 U/mg)、胃蛋白酶(USP 级,1∶30000)、麦芽糊精、淀粉、滑石粉、木糖醇、柠檬酸(均为食品级) 上海源叶生物科技有限公司;研究中所使用的所有化学试剂均为分析纯。

AXLK1820-D 纯水仪 上海阿修罗科技有限公司;DHG-9123A 电热恒温鼓风干燥箱 上海精宏实验设备有限公司;PB 602-N 电子天平 上海梅特勒-托利多仪器有限公司;JYL-C022E 料理机 山东省九阳股份有限公司;YTLG-10A 真空冷冻干燥机 上海叶拓科技有限公司;HWS28 型电热恒温水浴锅 上海一恒科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 甘薯茎、叶基本组成 五种 SPL 经清洗、晾干、干燥处理后粉碎过 80 目筛备用。如图 1 所示,以甘薯叶和茎为原料进行营养组成测定。参考 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中第一法凯氏定氮法进行粗蛋白含量测定;参考

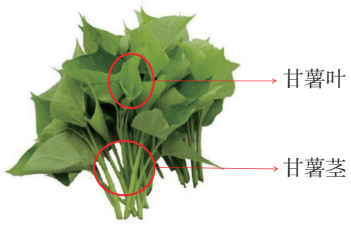


图 1 甘薯叶和茎示意图

Fig.1 Diagram of SPL

GB 5009.88-2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》进行膳食纤维含量的测定；参考 GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》550 ℃ 灼烧法进行灰分含量的测定；参考 SN/T 3926-2014《出口乳、蛋、豆类食品中蛋白质含量的测定》考马斯亮蓝法进行可溶性蛋白的测定；参考 NY/T 2742-2015《水果及制品可溶性糖的测定》3,5-二硝基水杨酸比色法进行可溶性糖的测定。

1.2.2　功能活性物质

1.2.2.1　甘薯茎、叶中多酚含量测定　参考余菲等[12]研究方法进行多酚含量测定，用没食子酸标准品制备标准曲线（0~30 mg/L，y=0.0154x+0.0097，R^2=0.9932）。甘薯叶、茎分别取 1 g 加入 30 mL 80% 的乙醇超声 40 min 提取多酚类物质。取 1.0 mL 提取液，加入 2.5 mL 福林酚，加入 2.5 mL 15% 的 Na_2CO_3 溶液，加水至 10 mL，40 ℃ 下保温 60 min 后测定溶液在 778 nm 处吸光度。根据标准曲线计算待测液体中总多酚的浓度。

$$X=\frac{C\times V\times n}{m\times 1000}$$　　式（1）

式中，X 表示 SPL 中的总多酚含量（mg/g）；C 表示标准曲线计算待测液体中的总多酚浓度（mg/L）；n 表示待测液体的稀释比例（10）；V 表示 SPL 提取液的体积（mL）；m 表示质量（g）。

1.2.2.2　甘薯茎、叶中黄酮含量测定　用芦丁标准品制备标准曲线（0~60 mg/L，y=0.0093x−0.015，R^2=0.9964）。分别将 1.0 mL 甘薯叶、茎的提取液、2 mL 乙醇溶液和 0.4 mL 亚硝酸钠溶液混合，加入 0.4 mL 硝酸铝溶液，摇匀，静置 6 min；加 4% 氢氧化钠溶液 4.0 mL，用乙醇溶液定容至刻度，摇匀，静置 15 min。以未加氢氧化钠试剂的溶液为空白。测定 510 nm 处吸光度，根据标准曲线计算待测样品溶液中总黄酮的浓度，具体方法参考陈芷华等[13]研究。

$$X=\frac{(c-c_0)\times 10\times V}{m\times(1-H)}$$　　式（2）

式中，X 表示样品中总黄酮含量（mg/g）；c 表示标准曲线得出待测样品溶液总黄酮浓度（mg/L）；c_0 表示空白溶液总黄酮浓度（mg/L）；10 表示待测液稀释倍数；m 表示样品质量（g）；V 表示样品提取液总体积（L）；H 表示甘薯茎、叶水分含量（%）。

1.2.2.3　甘薯茎、叶中花青素含量测定　参考 NY/T 2640-2014《植物源性食品中花青素的测定-高效液相色谱法》进行花青素含量测定。分别称取 0.1 g 甘薯叶、茎，用 10 mL 的盐酸-甲醇溶液（v/v=1%）进行研磨，于黑暗中保存 24 h 后分别在 525 nm 和 657 nm 的波长下测定过滤液的吸光度。

$$X=\frac{A_{525}-0.25\times A_{657}}{\varepsilon\times m}\times V\times DR\times M$$　　式（3）

式中，X 表示样品中花青素含量（mg/g）；DR 表示稀释比例；M 表示常数 449（Cy-3-Glu 相对分子质量）；ε 表示常数 29600（Glu 消光系数）；m 表示样品鲜质量（g）；V 表示提取液总体积（mL）。

1.2.3　吸附特性

1.2.3.1　甘薯茎、叶持水力、持油力　持水力（WHC）和持油力（OHC）测定方法参考 Huang 等[14]的研究。分别称取 0.1 g 甘薯叶、茎与 10 mL 蒸馏水/大豆油混合于离心管（质量记为 M），25 ℃ 下放置过夜。4000 r/min 离心 20 min，去除上清后称重。

$$WHC/OHC(g/g)=\frac{M_1-M}{m}$$　　式（4）

式中，m 表示样品质量（g）；M 表示离心管质量（g）；M_1 表示除上清后样品与离心管质量（g）。

1.2.3.2　甘薯茎、叶胆固醇吸附力　胆固醇吸附力（CAC）测定参考 Wu 等[15]方法，将 0.05 g 甘薯叶、茎分别与 8 mL 蛋黄乳液混合，25 ℃ 下搅拌 2 h，5000 r/min 离心 15 min。将稀释溶液（0.4 mL，上清液∶冰醋酸=1∶9）、邻苯二甲醛（0.2 mL，1 mg/mL）和混合酸（4 mL，冰醋酸和硫酸，v/v=1∶10）混合，静置 10 min，550 nm 处测定吸光度。将蛋黄乳液用作空白对照，同时用胆固醇标准品制备标准曲线（0~1.0 mg/mL，y=0.5568x+0.1041，R^2=0.9957）。空试管中分别加入胆固醇溶液 0、1、2、3、4、5 mL，依次加入冰乙酸 5、4、3、2、1、0 mL，每管加入 0.2 mL 邻苯二甲醛，4 mL 混合酸，混匀后室温静置 10 min 后测定吸光度。

$$CAC(mg/g)=\frac{(C_1-C_2)\times V}{M}$$　　式（5）

式中，C_1 表示溶液吸附前的胆固醇浓度（mg/mL）；C_2 表示溶液吸附后的胆固醇浓度（mg/mL）；V 表示溶液体积（mL）；M 表示样品质量（g）。

1.2.3.3　甘薯茎、叶葡萄糖吸附力　葡萄糖吸附力测定参考郭增旺等[16]的方法，称取 50 mg 甘薯叶、茎分别溶解于 8 mL 的蒸馏水和葡萄糖溶液中，37 ℃ 搅拌 4 h，5000 r/min 离心 20 min。用葡萄糖标准品制备标准曲线（0~1.0 mg/mL，y=1.8887x，R^2=0.9982），苯酚-硫酸法测定葡萄糖含量。

1.2.4　产品配方工艺优化

1.2.4.1　D-最优混料设计优化压片糖果配方　本研究采用 D-最优混料设计作为优化方法，按表 1 所示设计混料试验因素与水平，选择淀粉、滑石粉、麦芽糊精、木糖醇、柠檬酸和菜用甘薯粉添加量作为六个关键因素。

1.2.4.2　基于模糊数学建立压片糖果品质评判标准　基于模糊数学建立压片糖果品质评判标准，使用加权平均型 M(^, +)算子进行综合评价[17]。确定因素集 F 和评语集 E：以产品色泽（U1）、形态（U2）、组织（U3）、口感和风味（U4）为评价因素，因素集 U={U1, U2, U3, U4}；评价等级为优 V1（95）、良 V2（85）、中 V3（75）、差 V4（65），评价评语集 V={V1, V2, V3,

表 1 最优混料设计试验因素与水平

Table 1 Optimal mixture design experiment factors and levels

编码	试验因素	水平	
		0	1
A	淀粉添加量(%)	10	20
B	滑石粉添加量(%)	1.0	2.0
C	麦芽糊精添加量(%)	3	7
D	木糖醇添加量(%)	0.6	1.2
E	柠檬酸添加量(%)	0.6	1.2
F	菜用甘薯粉添加量(%)	68.6	84.8

V4}。参考李明泽等[18]研究,按照表 2 对甘薯叶压片糖果进行感官评价。

表 2 产品感官评价标准

Table 2 Product sensory evaluation criteria

项目	评价指标	等级
色泽	呈鲜绿色,色泽均匀一致	优
	呈绿色,色泽较均匀一致	良
	偏深绿色,色泽不均匀一致	中
	深绿色,色泽不均匀一致	差
形态	形态完整,大小(厚薄)一致,无缺角、裂缝,表面光滑,无花斑,无杂质	优
	形态完整,大小(厚薄)较一致,无缺角、裂缝,表面较光滑,稍有花斑,无杂质	良
	形态较完整,大小(厚薄)较一致,无缺角、稍有裂缝,表面较粗糙,稍有花斑,少量杂质	中
	形态不完整,大小(厚薄)不一致,有碎裂现象,表面粗糙,有花斑,有杂质	差
组织	坚实不松散,剖面紧密,不粘连	优
	较坚实,剖面较紧密,稍粘连	良
	较松散,剖面较紧密,轻微粘连	中
	组织松散,剖面不紧密,有粘连现象	差
口感和风味	酸甜适宜、无苦涩味,特殊风味适宜	优
	偏酸、偏甜、酸甜味淡、稍有苦涩味,特殊风味稍重或稍淡	良
	偏酸、偏甜、酸甜偏淡、苦涩味偏重,特殊风味偏重或偏淡	中
	过酸、过甜、不酸不甜、苦涩味重,特殊风味过重或过淡	差

构建隶属度矩阵 R:确定压片糖果评价权重集,对每一个因素建立从 U 到 V 的模糊关系,即 R=(r_{ij}),通过对不同配方压片糖果不同指标做出的评价进行处理,得到评价矩阵 R。

压片糖果隶属度矩阵 $R=\begin{pmatrix}0.4 & 0.2 & 0.3 & 0.1\\ 0.2 & 0.6 & 0.1 & 0.1\\ 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0\\ 0.5 & 0.2 & 0.2 & 0.1\end{pmatrix}$

确定因素集的权重向量 WF={X1, X2, X3, X4};评语集的权重向量 WE={0.15, 0.20, 0.25, 0.40}。

1.2.5 压片糖果微生物及营养成分测定

1.2.5.1 菌落总数和大肠菌落测定 分别参考 GB 4789.2-2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》和 GB 4789.3-2025《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数》测定菌落总数和大肠菌落数量。

1.2.5.2 压片糖果的营养成分测定 营养成分测定具体方法参考 1.2.1。脂肪的测定参照 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》第一法索氏抽提法进行。采用 ICP-MS 测定压片糖果中钠、镁、钾元素含量,具体方法参考 Agbede 等[19]的研究。碳水化合物、能量、NRV(营养素参考值)计算参考 GB 28050-2011《食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则》。

1.2.6 压片糖果吸附力 具体方法见 1.2.3。测定压片糖果的持水力、持油力、胆固醇吸附力、葡萄糖吸附力。

1.2.7 体外抗氧化活性测定 称取 0.5 g 压片糖果,按照料液比 1∶20 在 60% 乙醇溶液中超声提取 30 min,过滤,取上清液进行体外抗氧化活性测定,DPPH 自由基清除率、超氧阴离子自由基清除率和羟基自由基清除率根据公式(6)计算。

称取 5 mg DPPH 自由基粉末,配成 25 μg/mL 的标准溶液。取不同浓度的压片糖果提取液 0.1 mL,加入 3 mL DPPH 自由基标准溶液,30 ℃ 避光反应 1 h,517 nm 波长处测吸光度,具体测定方法参考朱磊等[20]的研究。

参照赵圆圆[21]的研究方法,将 2.5 mL Tris-HCl(0.05 mol, pH8.3)置于试管中,加入 0.2 mL 抗坏血酸棕榈酸酯(10 μmol/L)和 0.2 mL 邻苯三酚(0.05 mol/L)封膜反应 10 min,加入 2 mL 不同浓度的压片糖果提取液,反应 20 min。加入 0.1 mL 10 mol/L 的 HCl 终止反应,320 nm 下检测吸光度。

羟基自由基清除率测定方法参考 Li 等[22]的研究,依次加入配制好的 $FeSO_4$ 溶液 0.6 mL(6.0 mmol/L)、水杨酸-乙醇溶液 0.6 mL(6.0 mmol/L)、待测压片糖果提取液 0.2 mL,最后加入 0.6 mL 0.01% 的 H_2O_2 溶液启动反应,30 min 后 510 nm 处测定其吸光度。

$$R(\%)=\frac{A_0-(A_1-A_s)}{A_0}\times 100 \qquad 式(6)$$

式中,R 表示自由基清除率;A_0 表示自由基本身的吸光度;A_1 表示压片糖果与自由基反应后的吸光度;As 表示压片糖果本身的吸光度。

1.2.8 体外降血糖活性测定

1.2.8.1 α-淀粉酶抑制率 α-淀粉酶抑制率测定方法参考许梦粤等[23]的研究,用 0.1 mol/L pH6.8 的磷酸盐缓冲液(PBS)配制压片糖果溶液,加入 0.4 mL 的 α-淀粉酶溶液(0.8 mg/mL)混合(TC 组),阿卡波糖为阳性对照组(PC 组)。37 ℃ 下反应 10 min,加入 0.3 mL 的淀粉溶液(2%)混合,37 ℃ 反应 30 min,最后加入 2.0 mL 的 DNS 试剂终止实验,样品浓度最终为 0.2~1.0 mg/mL。在 540 nm 波长处测吸光度。

$$\alpha\text{-淀粉酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_3-A_4}\right)\times 100 \quad \text{式（7）}$$

式中，A_1 表示酶溶液+压片糖果溶液+淀粉溶液+DNS 试剂；A_2 表示压片糖果溶液+淀粉溶液+DNS 试剂；A_3 表示酶溶液+淀粉溶液+DNS 试剂；A_4 表示酶溶液+压片糖果溶液+DNS 试剂。

1.2.8.2　α-葡萄糖苷酶抑制率　参照吴文静[24]研究，用 0.1 mol/L pH6.8 的磷酸盐缓冲液（PBS）配制压片糖果溶液，加入 0.25 mg/mL 的 α-葡萄糖苷酶溶液，阿卡波糖为阳性对照组（PC 组）。37 ℃ 水浴恒温 10 min，然后加入 10 mmol/L PNPG 溶液 20 μL，37 ℃ 孵化 10 min，加入 30 μL Na_2CO_3 终止液，样品最终浓度为 0.2~1.2 mg/mL，405 nm 处测吸光度。

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_3-A_4}\right)\times 100 \quad \text{式（8）}$$

式中，A_1 表示酶溶液+压片糖果溶液+PNPG 溶液；A_2 表示压片糖果溶液+PNPG 溶液；A_3 表示酶溶液+PNPG 溶液；A_4 表示酶溶液+压片糖果溶液。

1.2.8.3　葡萄糖扩散和透析延滞指数　参考厉芝等[25]研究方法，压片糖果用无水乙醇洗涤，除去小分子糖，置于 45 ℃ 恒温干燥箱中至乙醇挥发完全。称取 50 mg 压片糖果，加入 10 mL 浓度为 150 mmol/L 葡萄糖溶液，搅拌 4 h，并置于装有 37 ℃ 的 200 mL 蒸馏水的烧杯中透析（截留分子量小于 3500 Da）150 min。在不同时间点取 0.4 mL 透析液，通过苯酚-硫酸法测定葡萄糖浓度。

$$\text{葡萄糖扩散和透析迟缓指数}(\%)=\left(1-\frac{A_1}{A_0}\right)\times 100 \quad \text{式（9）}$$

式中，A_1 为样品组吸光度，A_0 为对照组（未添加压片糖果的溶液）吸光度。

1.2.9　体外降血脂活性

1.2.9.1　胰脂肪酶抑制率　胰脂肪酶用蒸馏水溶解配成 10 mg/mL，4 ℃，13000 r/min，离心 8 min。取 50 mmol/L 棕榈酸对硝基苯酯溶解在 DMSO 中，配制浓度为 5 mg/L 的底物溶液。以奥利司他为阳性对照（PC 组）。压片糖果提取液中加入 0.2 mL 酶液，1.4 mL Tris 缓冲液（pH7.4），0.4 mL 底物溶液，37 ℃ 孵育 20 min，于 405 nm 处测定吸光度，具体方法参照朱玲等[26]的研究。

$$\text{胰脂肪酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_3-A_4}\right)\times 100 \quad \text{式（10）}$$

式中，A_1 表示酶溶液+压片糖果溶液+缓冲液+底物溶液；A_2 表示压片糖果溶液+缓冲液+底物溶液；A_3 表示酶溶液+缓冲液+底物溶液；A_4 表示酶溶液+压片糖果溶液+缓冲液。

1.2.9.2　胆固醇酯酶抑制率　胆固醇酯酶抑制率测定参照王亮亮[27]的研究方法，胆固醇酯酶用蒸馏水溶解为 0.72 U/mL，4-硝基苯基丁酸酯（PNPB）用乙腈溶解为 21.7 mmol/L，反应在 0.1 mol/L pH7.0 磷酸盐缓冲液（含 0.1 mol/L NaCl、5.16 mmol/L 牛磺胆酸钠）中进行。将 1 mL pH7.0 的磷酸盐缓冲液、50 μL 胆固醇酯酶、25 μL 不同浓度压片糖果溶液混匀，以奥利司他为阳性对照（PC 组）。37 ℃ 水浴 15 min 后加入 10 μL PNPB 启动反应，37 ℃ 水浴 30 min 后于 405 nm 处测定吸光度。抑制率按下式计算。

$$\text{胆固醇酯酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_3-A_4}\right)\times 100 \quad \text{式（11）}$$

式中，A_1 表示酶溶液+压片糖果溶液+缓冲液+PNPB；A_2 表示压片糖果溶液+缓冲液+PNPB；A_3 表示酶溶液+缓冲液+PNPB；A_4 表示酶溶液+压片糖果溶液+缓冲液。

1.2.9.3　胆固醇胶束形成抑制率　参考冯丹丹等[28]研究方法，将 10 mmol/L 牛磺胆酸钠，1 mmol/L 胆固醇，5 mmol/L 油酸和 132 mmol/L 的 NaCl 混匀，超声 40 min，37 ℃ 静置。分别加入压片糖果（TC 组）和依折麦布（PC 组），37 ℃ 振荡 2 h，5000 r/min 离心 15 min，取 1 mL 上清液用冰醋酸将其稀释至 10 mL，再从中取稀释液 0.4 mL，加入 0.2 mL 的邻苯二甲醛及 4 mL 混合酸（冰乙酸和硫酸，v/v=1∶10）静置 10 min，于 550 nm 测定吸光度。

1.2.10　模拟体外消化　通过胃肠道模拟消化液，测定压片糖果在消化道内的葡萄糖吸收能力、脂肪吸收能力及胆酸盐结合指数，具体测定方法参考 Dong 等[29]的研究。

将 0.5 g 压片糖果与模拟唾液（SSF）混合，对照组不加压片糖果（PC 组），37 ℃，pH7 条件下搅拌 2 min。与模拟胃液（SGF）混合后加入猪胃蛋白酶溶液（2000 U/mL），37 ℃，pH3 条件下搅拌 2 h，使用 1 mol/L NaOH 将混合物 pH 调至 7.0 以终止胃阶段反应。将胃期消化的混合物与含有胰酶（100 U/mL）的模拟肠液（SIF）于 37 ℃，pH7 条件下搅拌 2 h 以模拟肠道消化。最后沸水浴 5 min，离心（6000 r/min，5 min）后，收集各相的上清液，储存在−20 ℃ 备用。

模拟肠消化阶段，消化液中加入 0.5 g 食用油，每隔 30 min 取 5 mL 消化液，沸水浴灭酶，测定消化过程中各上清液脂肪含量。同样，在消化液中加入 2 g 葡萄糖，相同操作下测定消化过程中各上清液葡萄糖含量。空白组不加食用油/葡萄糖（BG 组），并计算压片糖果的葡萄糖吸收能力、脂肪吸收能力。葡萄糖测定方法参考 1.2.3.3，脂肪测定方法参考 1.2.5.2。

胆酸盐结合力测定参考 Zheng 等[30]的研究方法，用牛磺胆酸钠标准品制备标准曲线（0.05~0.3 mmol/L，y=0.3016x+0.015，R^2=0.9976）。取一定

体积(V_1)压片糖果消化液(0.1~0.5 mL),并用蒸馏水定容至 3 mL,分别加入 10 mg/mL 胃蛋白酶溶液 3 mL 和 0.01 mol/L 的盐酸溶液 1 mL,在 37 ℃ 下振荡消化 1 h。随后用 0.1 mol/L 的氢氧化钠溶液调节 pH 至 6.3,加入 10 mg/mL 胰蛋白酶溶液 4 mL,在 37 ℃ 下恒温水浴振荡消化 1 h。每个压片糖果中加入 0.5 mmol/L 牛磺胆酸盐 4 mL(V_2),恒温水浴振荡 1 h,4000 r/min 离心 20 min,取上清液,于 387 nm 处测定吸光度,按照标准曲线计算上清中牛磺胆酸盐的含量(M)。

1.3 数据处理

数据分析使用 SPSS 22 软件。数据以均值±标准差(SD)的形式呈现。对于连续变量,采用单因素方差分析进行多组之间的统计比较。经过 Duncan's 多范围检验后,P 值小于 0.05 被认为具有统计学意义,P 值小于 0.01 被认为具有极显著差异,样本量 n≥3。

2 结果与分析

2.1 不同品种甘薯茎、叶的基本组成差异分析

对甘薯叶、茎营养成分对比分析,结果如表 3 所示,不同品种与部位营养成分、功能活性差异显著。相较于叶,甘薯茎表现出更高的膳食纤维和可溶性糖含量。具体来说,S4 在茎和叶中均显示出膳食纤维含量的优势(叶为 40.12 g/100 g,茎为 54.51 g/100 g),这提示 S4 是膳食纤维强化食品的理想来源。S5 叶中(5.70 g/100 g)和茎中(15.36 g/100 g)的可溶性糖含量最高,这揭示了其在天然甜味剂开发方面的潜力。此外,甘薯茎-S2 蛋白质含量最高,达 8.02 g/100 g。总之,这些营养分布差异为 SPL 品种和部位的开发利用提供了依据。

SPL 中的多酚、黄酮类化合物和花青素已被证实具有多种促进健康的生物活性,包括抗氧化、抗肿瘤、抗炎和抗糖尿病等作用[31]。不同品种的 SPL 中功能性成分的含量存在显著差异。如图 2 所示,甘薯叶-S4,甘薯叶-S1 和甘薯茎-S5 分别有最高的多酚,黄酮和花青素含量,达到 36.87、11.28 和 6.32 mg/g,表明其具有潜在的抗氧化活性,可作为抗氧化和降血糖等功能性产品研究与开发的原料。

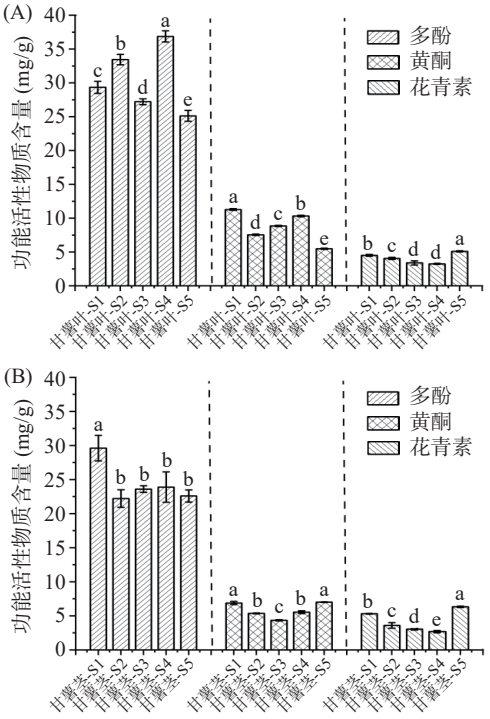


图 2 不同品种甘薯茎、叶活性物质差异

Fig.2 Differences in active substances in stems and leaves of different varieties of sweet potatoes

注:茎和叶显著性各自独立计算,不同字母表示差异显著(P<0.05),图 3、图 8 同。

2.2 不同品种甘薯茎、叶的吸附力差异分析

实验结果如图 3 所示,多数甘薯茎的保水能力高于甘薯叶,这可能是因为甘薯茎中的木质素含量更高,有助于储存和运输水分[32],而甘薯叶有更多气孔,保水能力通常更低。但甘薯叶-S4 持水力高于甘薯茎-S4,这可能是因为甘薯叶-S4 可溶性膳食纤维含量高,含有更多亲水基团。SPL 的吸油能力能够有效地吸附并保留食物中的脂肪,从而增加食物的饱腹感,并有助于减少总体能量摄入[33]。甘薯叶吸油力强于甘薯茎,这可能是因为甘薯叶含有更多的多酚等极性物质,它们分子中的酚羟基等基团也能与油脂分子

表 3 不同品种甘薯叶和茎营养物质差异(g/100 g)

Table 3 Nutrient differences in leaves and stems of different varieties of sweet potatoes (g/100 g)

组别	膳食纤维	蛋白质	灰分	可溶性蛋白	可溶性糖
甘薯叶-S1	34.43±2.00^{bc}	37.72±1.06^{a}	1.67±0.11^{a}	1.41±0.02^{b}	3.63±0.85^{b}
甘薯叶-S2	22.06±1.53^{d}	36.66±1.58^{b}	1.78±0.16^{a}	2.05±0.05^{a}	3.06±0.62^{bc}
甘薯叶-S3	32.15±2.08^{c}	35.33±0.37^{c}	1.96±0.33^{a}	2.00±0.06^{a}	3.68±0.32^{b}
甘薯叶-S4	40.12±1.53^{a}	36.20±0.88^{b}	1.69±0.25^{a}	2.07±0.05^{a}	2.51±0.44^{c}
甘薯叶-S5	35.98±2.08^{b}	33.82±0.30^{d}	2.06±0.01^{a}	2.06±0.05^{a}	5.70±0.57^{a}
甘薯茎-S1	49.29±0.58^{b}	5.15±0.16^{d}	1.00±0.06^{a}	0.22±0.02^{d}	4.92±0.27^{c}
甘薯茎-S2	47.48±1.53^{bc}	8.02±0.26^{a}	1.08±0.06^{a}	1.43±0.04^{a}	15.36±1.42^{a}
甘薯茎-S3	45.35±1.15^{c}	7.98±0.37^{a}	1.26±0.23^{a}	0.58±0.04^{c}	7.66±0.61^{b}
甘薯茎-S4	54.51±3.61^{a}	7.39±0.31^{b}	1.16±0.24^{a}	0.64±0.04^{c}	15.35±1.88^{a}
甘薯茎-S5	45.55±1.53^{c}	5.47±0.18^{c}	1.18±0.08^{a}	0.93±0.03^{b}	15.36±1.17^{a}

注:茎和叶显著性各自独立计算,同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。

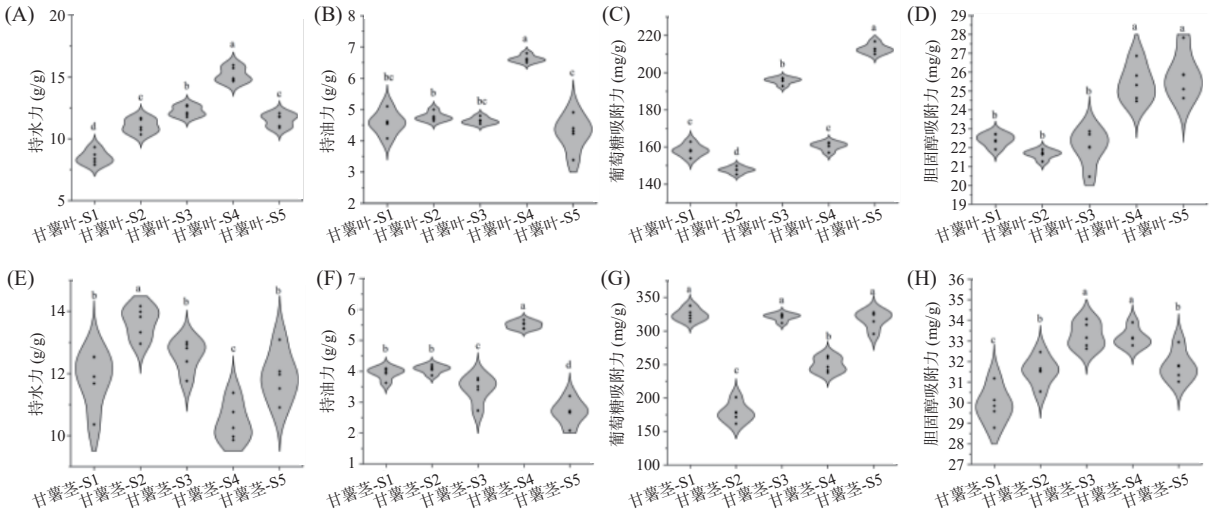


图 3　不同品种甘薯茎、叶吸附力差异

Fig.3　Differences in adhesion forces of stems and leaves of different varieties of sweet potatoes

相互作用，增强化学吸附。甘薯茎的葡萄糖吸附力更强，可能是因为甘薯茎中含有更高比例的不溶性膳食纤维，其多孔网状结构提供了更大的比表面积和更多的物理吸附位点。此外，胆固醇吸附力可用于评估控制体内胆固醇水平、预防动脉硬化和心血管疾病方面的作用[34]。研究结果表明，甘薯叶对胆固醇的吸附能力普遍高于甘薯茎。这可能是因为甘薯叶中含有更多的黄酮等生物活性成分，这些成分能够与胆固醇形成复合物，从而提高了其吸附能力[35]。

由于较高的多酚和膳食纤维含量及良好的吸附特性，后续实验选择甘薯叶-S4 开发兼具降血糖和降血脂功能的压片糖果。

2.3　基于模糊数学评价进行甘薯叶压片糖果配方优化

使用加权平均型 M(^, +)算子，综合评定向量(综合隶属的向量)S=WFR，经归一化得到综合评定值，如表 4 所示，其中第 23 组的得分最高(83.727)。利用 Design-Expert，以综合得分为响应值进行回归分析，结果显示二项式模型具有显著统计学意义(P< 0.0001)。二项式拟合方程为：Y=70.16A−1171.16B+37.67C−2952.40D−2263.01E+76.50F+1251.77AB+79.31AC+3188.03AD+2584.15AE+15.83AF+1433.62BC+5369.51BD+4055.91BE+1332.01BF+3135.56CD+2237.54CE+54.71CF+5007.80DE+3137.08DF+2505.29EF，模型决定系数 R^2=0.9662(校正后 R^2_{Adj}=0.8986)，表明 96.62% 的变异可由因素解释。

通过分析 3D 曲面图及等高线图(图 4)发现，各成分交互作用显著(等高线呈椭圆形)，综合得分存在极大值。基于 D-最优混料设计优化得到最佳配方为：淀粉 14.98%、滑石粉 1.49%、麦芽糊精 4.89%、木糖醇 0.92%、柠檬酸 1.20%、甘薯叶粉 76.52%。

表 4　D-最优混料设计及综合评价分值

Table 4　D-optimal mixture design and comprehensive evaluation score

试验号	A	B	C	D	E	F	综合得分
1	18.71	1.64	3.32	1.20	1.04	74.08	81.39
2	16.38	2.00	7.00	1.20	0.60	72.82	79.60
3	10.00	1.00	6.35	0.60	1.20	80.85	77.76
4	20.00	1.65	5.37	0.89	0.76	71.33	79.94
5	10.32	1.54	7.00	0.88	0.91	79.35	80.82
6	18.19	1.75	5.18	0.89	1.20	72.79	82.54
7	20.00	2.00	3.00	0.60	1.20	73.20	77.36
8	16.76	1.65	4.94	1.20	0.60	74.85	80.08
9	16.84	1.68	3.00	0.60	0.60	77.28	77.33
10	13.91	1.00	5.41	1.20	0.92	77.56	79.60
11	14.43	1.43	7.00	1.20	1.20	74.75	79.91
12	11.83	2.00	7.00	1.20	1.20	76.77	79.74
13	10.00	2.00	5.32	0.60	0.60	81.48	78.20
14	10.00	1.65	3.00	0.60	1.06	83.69	80.79
15	20.00	1.00	3.00	1.20	0.60	74.20	76.85
16	10.00	1.00	3.00	1.20	1.20	83.60	78.00
17	17.81	2.00	7.00	0.60	1.12	71.47	78.47
18	10.00	1.53	3.41	1.20	0.60	83.26	79.17
19	20.00	1.00	7.00	1.20	1.20	69.60	78.54
20	10.32	1.54	7.00	0.88	0.91	79.35	80.83
21	13.91	1.00	5.41	1.20	0.92	77.56	80.07
22	12.92	2.00	3.00	0.91	0.92	80.26	81.04
23	14.98	1.48	4.89	0.92	1.20	76.52	83.73
24	12.33	1.00	5.40	0.60	0.60	80.06	78.90
25	10.00	1.00	3.00	0.68	0.61	84.71	76.90
26	14.98	1.48	4.89	0.92	1.20	76.52	82.78
27	17.33	1.00	7.00	0.60	0.60	73.47	79.18
28	19.35	1.00	3.80	0.60	1.13	74.12	80.93
29	12.92	2.00	3.00	0.91	0.92	80.26	81.61
30	20.00	1.65	5.37	0.89	0.76	71.33	81.12
31	10.00	2.00	5.87	1.20	1.20	79.73	79.62

2.4　甘薯叶压片糖果产品评价

2.4.1　总菌落及大肠杆菌菌落数　总菌落在稀释 10 倍的样液中检测出两个菌落(30 CFU/mL)，大肠杆菌在稀释 10 倍、10^2 倍及 10^3 倍的样液中均未检出(<1 CFU/mL)，符合国家标准，表明产品未受粪便污染或致病菌污染，原料和生产过程卫生控制合格。

2.4.2　营养成分与理化性质评价　压片糖果营养成分含量如表 5 所示，根据食品营养标签通则，膳食纤

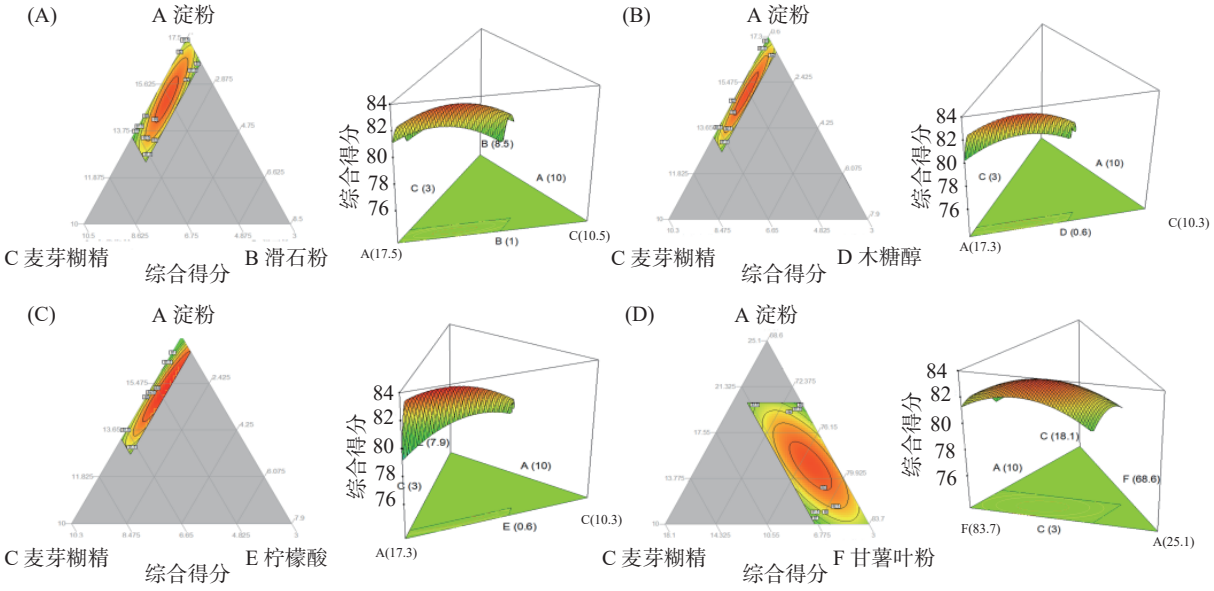


图 4　各因素等高线和 3D 曲面

Fig.4　Contour lines of each factor and 3D surfaces

维≥6 g/100 g 可以称为高或富含膳食纤维或良好来源，脂肪含量≤3 g/100 g 为低脂肪产品。产品中膳食纤维含量为 26.36 g/100 g，脂肪含量为 2.60 g/100 g，是富含膳食纤维且低脂的健康产品。

甘薯叶压片糖果通过其多重吸附特性在调节能量代谢方面展现出显著潜力。表 6 结果显示，产品持水力为 4.59±0.16 g/g，表明其膳食纤维能在胃肠道中吸水膨胀，通过物理扩张产生饱腹信号，有助于控制进食量[36]。同时，2.21±0.50 g/g 的持油力使其能有效吸附膳食脂肪，形成不易吸收的复合物，直接减少脂肪消化吸收。该产品还表现出吸附功能，对胆固醇的吸附力为 955.51±3.25 mg/g，有助于降低胆固醇吸收并促进其代谢转化；对葡萄糖的吸附力为 174.87±3.92 mg/g，可延缓糖分吸收，平缓餐后血糖波动。这些吸附特性共同构成了该产品在代谢调节方面的物质基础。

2.4.3　体外抗氧化活性　实验数据显示(图 5)，甘薯叶压片糖果具有优异的自由基清除能力。DPPH 自由基的清除率随浓度(0.5~2.5 mg/mL)从 15.28% 升至 92.55%，接近 V_C 效果。对超氧阴离子自由基的清除率也在 1.0~5.0 mg/mL 浓度范围内增加至 68.53%。在羟基自由基清除方面，0.2~1.0 g/mL 时清除率为 45.77%~97.71%，最高浓度下接近 V_C 水平。结果表明，该产品对三类自由基均具显著清除作用，尤其对 DPPH 和羟基自由基的清除效率与 V_C 相当，展现出良好的天然抗氧化剂开发价值。

2.4.4　体外降血糖功效　实验结果表明，甘薯叶压片糖果能显著抑制 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶活性(图 6)。在浓度为 0.4 mg/mL 时，α-淀粉酶抑制率达 51.43%；在 0.20~1.20 mg/mL 浓度范围内，α-葡萄糖苷酶抑制率超 40%，显示出良好的降糖潜力。葡萄糖扩散和透析迟缓指数实验进一步证实，压片糖果能够有效延缓葡萄糖的跨膜扩散，这可能是因为膳食纤维的葡萄糖吸附能力能够减少酶反应中的底物量，而多酚可能会通过抑制肠道刷状缘酶的活性进一步延迟葡萄糖释放[37]。此外，膳食纤维形成的黏性胶体能够在消化过程中物理性地阻碍葡萄糖的扩散，减缓其吸收速率，从而降低血糖峰值的波动[38]。

2.4.5　体外降血脂功效　体外实验表明(图 7)，甘薯叶压片糖果(TC)在 0.2~1.2 mg/mL 浓度范围内，对胰脂肪酶的抑制率随浓度增加显著升高，说明其可通过抑制甘油三酯和胆固醇分解减少游离脂肪酸吸收。机制可能涉及甘薯叶成分竞争性结合胰脂肪酶疏水中心或干扰酶-底物复合物形成。同时 TC 组对

表 5　压片糖果营养成分

Table 5　Nutritional components of tablet candy

项目	能量(J/100 g)	蛋白质(g/100 g)	脂肪(g/100 g)	碳水化合物(g/100 g)	膳食纤维(g/100 g)	钠(mg/100 g)	镁(mg/100 g)	钾(mg/100 g)
含量	1341.02	29.34	2.60	31.48	26.36	195.10	156.24	2560.27
NRV(%)	15.96	48.90	4.33	10.50	105.44	9.76	52.08	128.01

表 6　甘薯叶压片糖果的吸附力

Table 6　Adsorption capacity of sweet potato leaf pressed candy

持水力(g/g)	持油力(g/g)	胆固醇吸附力(mg/g)	葡萄糖吸附力(mg/g)
4.59±0.16	2.21±0.50	955.51±3.25	174.87±3.92

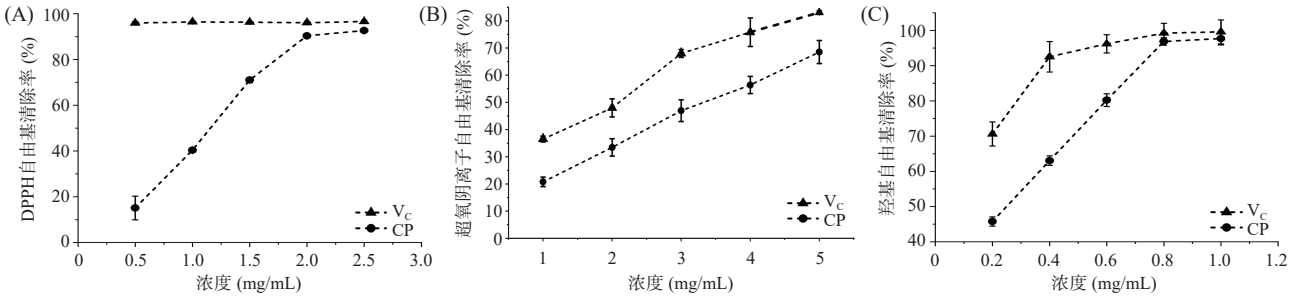


图 5　压片糖果体外抗氧化活性

Fig.5　Antioxidant activity of tablet candies *in vitro*

注：CP 为甘薯叶压片糖果组。

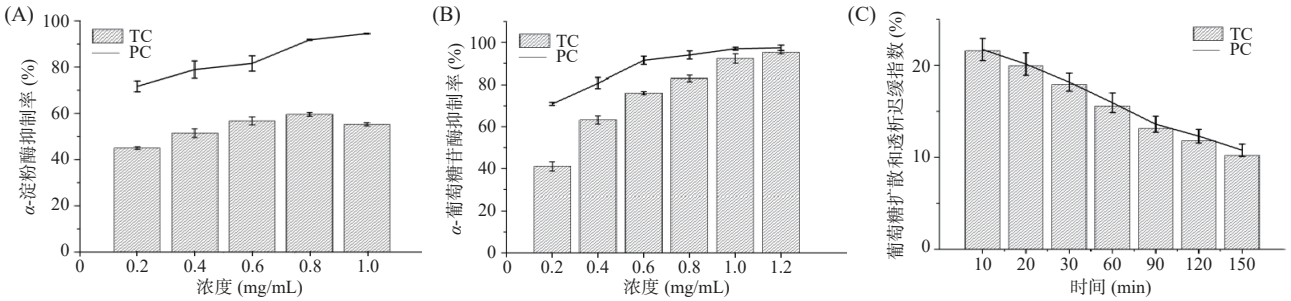


图 6　压片糖果体外降血糖活性

Fig.6　Hypoglycemic activity of tablet candies *in vitro*

注：TC 为甘薯叶压片糖果组，PC 为对照组，图 7 同。

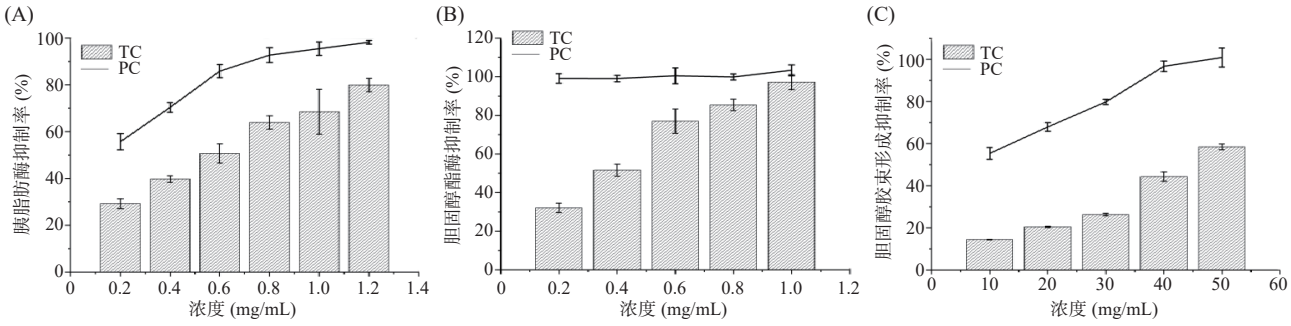


图 7　压片糖果体外降血脂活性

Fig.7　Lipid-lowering activity of tablet candies *in vitro*

胆固醇酯酶及胆固醇微粒形成的抑制均有剂量依赖性：前者可能源于活性成分的累积结合效应，后者可能与膳食纤维的物理吸附及植物固醇竞争性结合胆酸有关。这些结果表明，甘薯叶压片糖果可通过多途径抑制胆固醇溶解与吸收，为开发降脂功能食品提供依据[39]。

2.4.6　体外消化　为探究甘薯叶压片糖果（TC 组）在消化过程中的吸附能力，本研究通过体外模拟消化实验分析其作用机制。图 8 的结果表明，TC 组的脂肪残留量始终低于对照组（PC 组），可能与甘薯叶多酚通过疏水作用结合游离脂肪酸，以及膳食纤维通过氢键包裹脂肪颗粒有关[40]。在糖代谢方面，TC 组消化

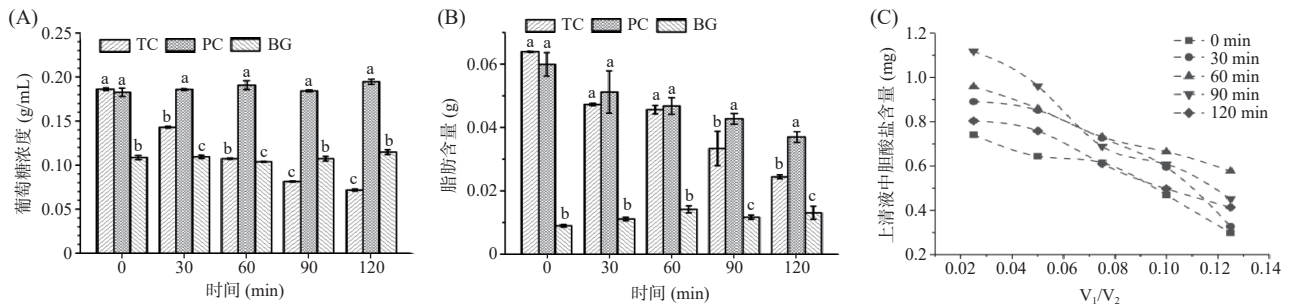


图 8　压片糖果体外消化模拟

Fig.8　Simulated *in vitro* digestion of tablet candies

注：TC 为甘薯叶压片糖果组，PC 为对照组，BG 为空白组，不同时间组间显著性独立计算。

液的葡萄糖含量显著降低，归因于膳食纤维形成的黏性凝胶延缓葡萄糖扩散，以及多酚抑制 α-葡萄糖苷酶活性。此外，随着压片糖果添加量增加，消化液中胆酸盐含量下降，其机制可能包括膳食纤维对胆汁酸的物理吸附以及多酚对胆汁酸结构的修饰，这共同导致了脂肪乳化效率的降低，进而抑制了脂质吸收[41]。综上，甘薯叶压片糖果可通过协同作用抑制脂肪与葡萄糖吸收，减少能量摄入，为其功能食品的开发提供依据。

3 结论

本研究证实了不同品种甘薯叶、茎间的营养成分和功能活性差异显著。相较于茎，甘薯叶具有更好的加工适应性，其中，甘薯叶-S4（膳食纤维：40.12 g/100 g；多酚含量：36.87 mg/g）和甘薯叶-S5（可溶性糖：5.70 g/100 g；花青素：5.10 mg/g）是开发降糖、抗氧化功能性食品的理想原料。通过配方优化制备甘薯叶-S4 基的压片糖果，甘薯叶粉添加量为 76.52%，产品评价揭示其良好的理化性质，在体外实验中表现出良好抗氧化（DPPH：IC_{50}=1.04 mg/mL）、降血糖（α-葡萄糖苷酶：IC_{50}=0.25 mg/mL）、降血脂（胰脂肪酶：IC_{50}=0.83 mg/mL）等活性。本研究促进甘薯茎叶从农业副产物转化为高附加值功能性食品，为产品开发提供了参考方向与理论支持。但仍存在一定局限，如样本规模相对有限，体外实验结论尚需通过动物或临床研究进一步验证，后续可进一步扩大品种筛选范围，深入解析其活性成分的构效关系与作用机制。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 廖启华. 甘薯加工产业废弃物资源化利用技术研究进展[J]. 现代农业科技，2025(17)：94−100,112. [LIAO Qihua. Research progress on resource utilization technology of waste in sweet potato processing industry[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2025(17): 94−100,112.]

[2] JIA Ruixue, TANG Chaochen, CHEN Jingyi, et al. Total phenolics and anthocyanins contents and antioxidant activity in four different aerial parts of leafy sweet potato (*Ipomoea batatas* L.)[J]. Molecules, 2022, 27(10): 3117.

[3] LI M S, JANG G Y, LEE S H, et al. Comparison of functional components in various sweet potato leaves and stalks[J]. Food Science and Biotechnology, 2017, 26(1): 97−103.

[4] 吕海华, 黄陈辰, 唐秋燕, 等. 甘薯叶毒理学评价及药理作用研究进展[J]. 药学前沿，2025, 29(5)：816−831. [LÜ Haihua, HUANG Chenchen, TANG Qiuyan, et al. Research progress on toxicological evaluation and pharmacological effects of sweet potato (*Ipomaea batatas* L.) leaves[J]. Frontiers in Pharmaceutical Sciences, 2025, 29(5): 816−831.]

[5] HAPKE K L, AZAD M A K, SULTANA T, et al. Comparison of antioxidant, β-carotene, and phenolic levels between roots and leaves across three popular sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) varieties[J]. Agriculture & Food Security, 2025, 13(1): 62.

[6] CHEN S P, WANG S Y, HUANG M Y, et al. Physiological and molecular analyses of chlorophyllase in sweet potatoes with different-colored leaves[J]. South African Journal of Botany, 2018, 114: 272−279.

[7] HOANG H T, MOON J Y, LEE Y C. Natural antioxidants from plant extracts in skincare cosmetics: Recent applications, challenges and perspectives[J]. Cosmetics, 2021, 8(4): 106.

[8] TANG C C, AMEEN A, FANG B P, et al. Nutritional composition and health benefits of leaf-vegetable sweet potato in South China[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 96: 103714.

[9] SLJIVIC S, GUSENOFF J A. The obesity epidemic and bariatric trends[J]. Clinics in Plastic Surgery, 2019, 46(1): 1−7.

[10] GONG Xue, LI Xue, XIA Ying, et al. Effects of phytochemicals from plant-based functional foods on hyperlipidemia and their underpinning mechanisms[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 103: 304−320.

[11] FARHA A K, GAN R Y, LI H B, et al. The anticancer potential of the dietary polyphenol rutin: Current status, challenges, and perspectives[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(3): 832−859.

[12] 余菲, 赵晓燕, 周昌艳, 等. 不同品种生菜的多酚、黄酮差异比较与抗氧化活性[J]. 食品科学，2024, 45(13)：17−25. [YU Fei, ZHAO Xiaoyan, ZHOU Changyan, et al. Comparison of polyphenols, flavonoids and antioxidant activities of different varieties of lettuce[J]. Food Science, 2024, 45(13): 17−25.]

[13] 陈芷华, 彭健, 肖更生, 等. 不同干燥方式及温度对桑葚渣粉体特性、功能活性物质和风味的影响[J]. 食品与发酵工业，2026, 52(3)：347−357. [CHEN Zhihua, PENG Jian, XIAO Gengsheng, et al. Effects of drying methods and temperatures on physicochemical properties, bioactive compound retention, and flavor profile of mulberry pomace powder[J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(3): 347−357.]

[14] HUANG Xiaopeng, LI Wuqiang, WANG Yongmei, et al. Drying characteristics and quality of *Stevia rebaudiana* leaves by far-infrared radiation[J]. LWT, 2021, 140: 110638.

[15] WU Weijie, HU Jie, GAO Haiyan, et al. The potential cholesterol-lowering and prebiotic effects of bamboo shoot dietary fibers and their structural characteristics[J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127372.

[16] 郭增旺, 马萍, 刁静静, 等. 超微型大豆皮水不溶性膳食纤维理化及吸附特性[J]. 食品科学，2018, 39(5)：106−112. [GUO Zengwang, MA Ping, DIAO Jingjing, et al. Physicochemical and adsorption properties of ultramicro insoluble dietary fiber from soybean hull[J]. Food Science, 2018, 39(5): 106−112.]

[17] 闫超, 杨云帆. 基于模糊数学感官评价优化黑蒜香菇酱的制备工艺及品质评价研究[J]. 中国调味品，2025, 50(12)：179−184. [YAN Chao, YANG Yunfan. Research on optimization of preparation process and quality evaluation of black garlic mushroom sauce based on fuzzy mathematics sensory evaluation[J]. China Condiment, 2025, 50(12): 179−184.]

[18] 李明泽, 李国锋, 张霁红, 等. 基于模糊数学感官评价法优化黄芪苦荞复合咀嚼片制备工艺[J]. 浙江农业科学，2025, 66(9)：2235−2242. [LI Mingze, LI Guofeng, ZHANG Jihong, et al. Optimization of preparation process for *Astragalus membranaceus-Fagopyrum tataricum* composite chewable tablets based on fuzzy mathematics sensory evaluation method[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2025, 66(9): 2235−2242.]

[19] AGBEDE T M, OYEWUMI A. Effects of biochar, poultry manure and their mixture on essential nutrients of sweet potato leaves and storage roots in degraded tropical alfisols of southwest Nigeria[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2022, 53(15): 1903−1916.

[20] 朱磊, 刘云婷, 王媛媛, 等. 我国北方 3 种小浆果果皮酚类含

量、抗氧化活性和花色苷特征的比较分析[J]. 食品科学，2025，46(14)：238−247. ［ZHU Lei, LIU Yunting, WANG Yuanyuan, et al. Comparative analysis of phenolic contents, antioxidant activity and anthocyanin characteristics in the pericarps of three small berries in northern China[J]. Food Science, 2025, 46(14): 238−247.］
［21］ 赵圆圆. 杏鲍菇子实体多糖的提取纯化、结构表征及降脂活性研究[D]. 西安：陕西科技大学，2020. ［ZHAO Yuanyuan. Extraction, purification, structural characterization and lipid-lowering activity of polysaccharide from *Pleurotus eryngii* fruiting body[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2020.］
［22］ LI L, THAKUR K, LIAO B Y, et al. Antioxidant and antimicrobial potential of polysaccharides sequentially extracted from *Polygonatum cyrtonema* Hua[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 114: 317−323.
［23］ 许梦粤, 田鑫, 王君可, 等. 菜豆多糖与香菇多糖结构特征以及体外重要生物活性综合对比评价[J]. 食品科学，2024，45(23)：18−27. ［XU Mengyue, TIAN Xin, WANG Junke, et al. Comparative evaluation of structural characteristics and *in vitro* biological activities of polysaccharides from common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and those from shiitake mushroom(*Lentinus edodes*)[J]. Food Science, 2024, 45(23): 18−27.］
［24］ 吴文静. 人参多糖及其铁配合物特征和活性的研究[D]. 长春：长春师范大学，2025. ［WU Wenjing. Study on the characteristics and activity of ginseng polysaccharide and its iron complex[D]. Changchun: Changchun Normal University, 2025.］
［25］ 厉芝, 张婷, 孙杰, 等. 酶-酸协同法提取小麦麸皮可溶性膳食纤维及其高纤饮料的创制[J/OL]. 食品工业科技，1−13[2026-05-25]. doi:10.13386/j. issn1002-0306.2025050246. ［LI Zhi, ZHANG Ting, SUN Jie, et al. Extraction of soluble dietary fiber from wheat bran using enzyme-acid synergistic method and development of a high-fiber beverage[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1−13[2026-05-25]. doi:10.13386/j.issn1002-0306.2025050246.］
［26］ 朱玲, 王崑仑, 张馨笛, 等. 超声辅助双水相萃取老山芹黄酮和多糖及其微乳的制备与体外降血糖、降血脂活性分析[J/OL]. 食品工业科技，1−18[2026-05-25]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025090329. ［ZHU L, WANG K L, ZHANG X D, et al. Ultrasonic-assisted aqueous two-phase extraction of flavonoids and polysaccharides from *Sarcandra glabra* and preparation and *in vitro* hypoglycemic and hypolipidemic activity analysis of their microemulsions[J]. Science and Technology of Food Industry, 1−18[2026-05-25]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025090329.］
［27］ 王亮亮. 川芎茎叶可溶性多糖提取、结构表征及生物活性研究[D]. 成都：成都大学，2025. ［WANG Liangliang. Study on extraction, structure characterization and biological activity of soluble polysaccharides from stem and leaves of *Ligusticum chuanxiong* hort[D]. Chengdu: Chengdu University, 2025.］
［28］ 冯丹丹, 胡萍, 许浩翔, 等. 乳酸菌发酵刺梨汁体外降血糖、降血脂活性研究[J]. 食品与发酵工业，2022，48(8)：212−219. ［FENG Dandan, HU Ping, XU Haoxiang, et al. Hypoglycemic and hypolipidemic activities of *Rosa roxburghii* juice fermented by lactic acid bacteria *in vitro*[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(8): 212−219.］
［29］ DONG Xiaobo, QI Jing, XU Kang, et al. Effect of lactic acid fermentation and *in vitro* digestion on the bioactive compounds in Chinese wolfberry (*Lycium barbarum*) pulp[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102558.
［30］ ZHENG Yajun, XU Bufan, SHI Panqi, et al. The influences of acetylation, hydroxypropylation, enzymatic hydrolysis and crosslinking on improved adsorption capacities and *in vitro* hypoglycemic properties of millet bran dietary fibre[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130883.
［31］ MAKORI S I, MU T H, SUN H N. Functionalization of sweet potato leaf polyphenols by nanostructured composite *β*-lactoglobulin particles from molecular level complexations: A review[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131304.
［32］ GUO B H, ARNDT S K, MILLER R E, et al. Does succulence in woody plants delay desiccation, and is stored water used to maintain physiological function during drought conditions?[J]. Physiologia Plantarum, 2024, 176(6): e14616.
［33］ HUA Mei, LU Jiaxi, QU Di, et al. Structure, physicochemical properties and adsorption function of insoluble dietary fiber from ginseng residue: A potential functional ingredient[J]. Food Chemistry, 2019, 286: 522−529.
［34］ CHEN Ligen, LIU Junwei, GE Xiaodong, et al. Simulated digestion and fermentation *in vitro* by human gut microbiota of polysaccharides from *Helicteres angustifolia* L.[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 141: 1065−1071.
［35］ WANG Jia, ZHANG Xiaoyu, LI Shuqin, et al. Steam explosion-assisted grinding improves the functional properties and antioxidant activity of *Java* tea-leaf powders (*Clerodendranthus spicatus*)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(13): 7965−7976.
［36］ 游艳芝, 苏萃扬, 张亮, 等. 膳食纤维不同改性技术研究进展[J]. 食品科学，2025，46(13)：406−416. ［YOU Yanzhi, SU Cuiyang, ZHANG Liang, et al. A review of different modification technologies for dietary fiber[J]. Food Science, 2025, 46(13): 406−416.］
［37］ 何若彤, 李梦璐, 阳策瑶, 等. 低共熔溶剂提取金银花多酚的工艺优化及其活性分析[J]. 农业工程学报，2025，41(17)：339−348. ［HE Ruotong, LI Menglu, YANG Ceyao, et al. Process optimization of polyphenols extracted from *Lonicera japonica* Thunb. by deep eutectic solvents and analysis of biological activity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(17): 339−348.］
［38］ 松伟, 尹利端, 乔强, 等. 膳食纤维降血糖的作用机制研究进展[J]. 食品安全质量检测学报，2025，16(20)：282−287. ［SONG Wei, YIN Liduan, QIAO Qiang, et al. Research progress on the hypoglycemic mechanism of dietary fiber[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(20): 282−287.］
［39］ 张海琳, 闫思嘉, 贺永基, 等. 松木层孔菌总三萜的提取、纯化及体外降血脂功效[J]. 中国食品学报，2025，25(8)：147−159. ［ZHANG Hailin, YAN Sijia, HE Yongji, et al. Extraction, purification and evaluation of hypolipidemic efficacy *in vitro* of *Phellinus pini* total triterpenoids[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(8): 147−159.］
［40］ 张艳, 古丽努尔·买买提, 薛淑花, 等. 葡萄皮渣水溶性膳食纤维的改性制备及降脂活性研究[J]. 食品工业科技，2026，47(6)：200−211. ［ZHANG Y, MAMAT G N, XUE S H, et al. Modification preparation and hypolipidemic activity exploration of water-soluble dietary fiber from grape pomace[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 200−211.］
［41］ 白小涵. 亚麻籽饼可溶性膳食纤维提取及其功能特性与应用研究[D]. 郑州：河南工业大学，2025. ［BAI Xiaohan. Study on extraction, functional characteristics and application of soluble dietary fiber from flaxseed cake[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2025.］