

甘薯中主要生物活性成分研究进展

国 鸽, 张靖杰, 李鹏高*

(首都医科大学公共卫生学院, 北京 100069)

摘 要: 甘薯作为我国的一种重要粮食作物, 曾经在抵抗饥荒、保障粮食安全方面发挥过重要作用。近年来, 甘薯在我国食品利用方面的作用逐渐发生了改变, 许多以甘薯为原料的新型食品被开发了出来。与此同时, 对甘薯的营养和保健功效的研究也越来越多, 发现甘薯块根及茎叶中均含有许多具有特殊生物活性的物质, 如糖蛋白、胰蛋白酶抑制剂、凝集素、花青素、咖啡酰奎宁酸、香豆素、类胡萝卜素等。这些生物活性成分分别具有清除体内自由基及活性氧、抑制炎症、降血糖、降血脂、提高免疫力、减轻肝损伤、抑制肿瘤细胞增殖和浸润等多种生物学功能, 可在预防和辅助治疗疾病方面发挥重要作用。本文对甘薯中所含有的主要生物活性成分及其生物学活性的研究现状进行综述, 以更好地促进相关研究的开展。

关键词: 甘薯; 生物活性成分; 糖蛋白; 胰蛋白酶抑制剂; 凝集素; 花青素; 咖啡酰奎宁酸; 香豆素; 类胡萝卜素

Research progress of main bioactive components in sweet potato

GUO Ge, ZHANG Jing-Jie, LI Peng-Gao*

(School of Public Health, Capital Medical University, Beijing 100069, China)

ABSTRACT: As a kind of important food crop in China, sweet potato has played an important role in resisting famine and ensuring food security. In recent years, the role of sweet potato in China's food utilization has gradually changed, and many novel foods that use sweet potato as a raw material have been developed. At the same time, more and more researches on the nutrition and the health promotion effects of sweet potato have been carried out. It was found that the root, stem and leaves of sweet potato contained many kinds of special bioactive substances, such as glycoproteins, trypsin inhibitors, lectins, anthocyanins, caffeoylquinic acid, coumarins, carotenoids, *etc.* These bioactive components had been shown to be able to scavenge free radicals and reactive oxygen, inhibit inflammation, reduce blood sugar and lipid, improve immunity, reduce liver damage, and inhibit tumor cell proliferation and infiltration as well as many other biological functions, so they might possibly play important roles in the prevention and adjuvant treatment of many diseases. This paper reviewed the research status of the main bioactive components in sweet potato and their biological activities as well, so as to facilitate the development of related researches.

KEY WORDS: sweet potato; bioactive components; glycoproteins; trypsin inhibitors; lectins; anthocyanins; caffeoylquinic acid; coumarins; carotenoids

基金项目: 国家自然科学基金项目(81573128)、北京市教育委员会科技计划一般项目(KM201610025005)、首都医科大学中青年骨干教师交流培养项目(1160950107)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (81573128), Beijing Municipal Commission of Education Science and Technology Program (KM201610025005) and Capital Medical University Youth Backbone Teachers Exchange Training Project (1160950107)

*通讯作者: 李鹏高, 博士, 副教授, 主要研究方向为营养与食品卫生。E-mail: penggao@ccmu.edu.cn

*Corresponding author: LI Peng-Gao, Doctor, Associate Professor, School of Public Health, Capital Medical University, Beijing 100069, China. E-mail: penggao@ccmu.edu.cn

1 引言

甘薯(sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam])为一年生或多年生草本植物,在我国培植的历史已有400多年,根据其产地及颜色的不同,又被称为山芋、红苕、白薯、红薯、紫薯等。甘薯富含淀粉、膳食纤维及 β -胡萝卜素等营养素,在我国许多地区,除了块根之外,甘薯茎叶也被当作蔬菜食用,因此,它既可以当主食,也可以当副食食用,长期以来一直是我国居民膳食结构中的重要组成部分。除此之外,我国传统的中医药学还认为甘薯是一种非常好的滋补食品。据《本草纲目》记载,甘薯性平味甘,无毒,具有生津止渴、补脾益气、宽肠通便等功效。近年来的研究表明,甘薯中含有许多能促进人类健康的生物活性成分,包括糖蛋白、多酚类物质、类胡萝卜素等,具有抗癌^[1]、抗氧化^[2]、辅助降血脂^[3]、降血糖^[4]和增强免疫力^[5]等多种生物学功效,可在预防和辅助治疗多种疾病方面起到重要作用。本文对甘薯中所含有的主要生物活性成分及其功能做一综述,旨在为甘薯进一步的研究和利用提供参考。

2 甘薯蛋白及多肽类物质

2.1 甘薯糖蛋白(sweet potato glycoprotein, SPG)

糖蛋白(glycoprotein)是糖类与蛋白质的共价复合物,其中糖基可多达数百个,蛋白质肽链可在多个部位结合糖基连接而成的寡糖链或单个糖基。SPG分子质量为62 kDa左右,属O-糖肽键连接方式。李亚娜等^[6]从甘薯中分离得到SPG,成分分析发现其中蛋白质的含量约为11%~12%,糖含量约为78%~80%。但由于提取次数、加水量、酶制剂用量等提取条件的不同,提取的蛋白质及糖含量存在显著差异^[7]。程珂伟等^[8]对SPG的氨基酸和糖组成进行了测定,发现全部氨基酸组成中,天冬氨酸含量最高,占氨基酸总量的13.80%,能够构成O-糖肽键的丝氨酸和苏氨酸分别占氨基酸总量的6.05%和4.89%;其单糖成分主要为葡萄糖、阿拉伯糖及半乳糖,三者比例为12:1:1.14,并含有痕量鼠李糖、甘露糖及木糖。而李亚娜等^[6]通过气象色谱分析,认为糖链部分的主要单糖成分还包括岩藻糖和甘露糖。

近年来的许多研究表明SPG具有很强的抗氧化作用。罗秋水等^[9]研究发现,当质量浓度达到640 $\mu\text{g/mL}$ 时,紫甘薯SPG对邻苯三酚的自氧化反应中产生的超氧阴离子自由基的清除作用达到69.80%,对羟自由基的清除率为73.29%,对1,1-二苯基-2-苯肼自由基(DPPH \cdot)的清除率为53.6%。刘主等^[4]研究发现,SPG对 Fe^{2+} - H_2O_2 诱导的小鼠肝脏组织丙二醛的生成具有明显的抑制作用,能明显降低四氧嘧啶糖尿病模型小鼠血清、肝和脑中的MDA含量,表明SPG有非常显著的抗氧化活性。

SPG还具有降血糖及降血脂作用。刘主等^[4]研究表明,SPG对四氧嘧啶糖尿病模型小鼠血糖具有明显的降低作用。李亚娜等^[3]研究表明,高脂血症大鼠腹腔注射SPG能同时降低血清中胆固醇和甘油三酯的含量及胆固醇/甘油三酯比值,其降低血清胆固醇的效应主要体现在升高HDL-C及降低LDL-C含量。梁婧婧等^[10]研究发现,SPG可以降低高脂血症大鼠的肝脏/体重比值,且对肝脏、肾脏、心脏等器官无明显影响,降脂作用有一定的优越性和安全性。

SPG还具有增强免疫力的作用。阚健全等^[5]研究发现,当SPG达到一定浓度可促进人外周血液淋巴细胞转化,小鼠经腹腔注射80 mg/kg SPG可促进小鼠巨噬细胞的吞噬功能,光镜和电镜下观察小鼠脾脏及胸腺可发现随着SPG剂量的增高,脾脏淋巴小结明显增多扩大,胸腺T细胞线粒体数量增加,表明SPG有明显的提高免疫力的功能。

2.2 甘薯贮藏蛋白(sweet potato storage protein, SPSP)

SPSP是甘薯块根中特异表达的一类特殊贮藏蛋白,占甘薯块根可溶性蛋白质的60%~80%,而叶和叶柄等其他器官中则几乎没有。SPSP平均分子量为25 kD^[11],1985年Maeshima将其命名为Sporamin^[12,13]。SPSP是一类由多重基因家族编码产生的蛋白质,有两个亚基因家族,分别称为Sporamin A(31 kD)和Sporamin B(22 kD),它们的基因序列具有同源性^[12],这两个亚基因家族内的同源性在这94%~98%之间。SPSP含18种氨基酸,其中人体的8种必需氨基酸的含量高于许多其它植物蛋白,氨基酸组成模式符合WHO/FAO的推荐标准,Sporamin B的氨基酸评分为55%,Sporamin A的氨基酸评分为77%,SPSP的生物价(biological value, BV)为72,显著高于马铃薯(67),大豆(64)和花生(59)^[13],具有较高的营养价值。

SPSP是一种胰蛋白酶抑制剂(TI)。目前研究发现TI主要分为两种类型,Kunitz型和Bowman-birk型,SPSP属于前者。有研究者发现在台农57甘薯品种中TI占总可溶性蛋白的60%,他们将文献中TI和SPSP的性质相比较,推测甘薯块根中的TI就是Sporamin蛋白^[12]。Yeh等^[14]在后续的研究中通过对比大肠杆菌表达的Sporamin蛋白与从甘薯块根中提取的TI也证实了这一观点。

TI广泛存在于动植物界,已有研究表明,部分植物中的TI对肿瘤的浸润和转移有明显的抑制作用^[1,12],而Sporamin蛋白作为天然植物源性TI,也被发现有一定程度的肿瘤抑制作用。Li等^[15]研究表明甘薯Sporamin蛋白能明显抑制人结肠癌SW480细胞的增殖和浸润,并可以抑制皮下接种的Lewis肺癌细胞向C57小鼠肺部的自发性转移。Huang等^[16]发现,甘薯块根中的TI可通过抑制细胞生长及抑制半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶-3及半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶-8耦联通路的活性,诱导急性早幼粒细胞白血病细

胞(NB4)凋亡,从而起到抑制 NB4 早幼粒白血病细胞增殖的作用。Yao 等^[17]研究表明甘薯 Sporamin 蛋白能通过下调 Akt/GSK-3 通路的信号传导诱导人类舌癌细胞凋亡。除了抗癌作用之外, Huang 等^[18]还发现甘薯 TI 及其酶解肽段在体外实验中具有血管紧张素转换酶(ACE)抑制剂活性,可以在高血压的防治方面发挥有益的作用。

2.3 甘薯凝集素(sweet potato lectin, SPL)

凝集素是一类能够凝集细胞、沉淀单糖及多糖复合物的非免疫来源的非酶蛋白质,广泛存在于自然界中的植物体内,在免疫反应及植物防御等信号传导过程中均起重要作用,同时具有细胞凝集、抗真菌、抗病毒以及诱导细胞凋亡自噬等能力。目前,已从植物中分离得到近百种凝集素,但有关 SPL 的研究报道还比较少。林晓红等^[19]从甘薯叶组织中分离纯化得到一种凝集素 (*Ipomoea batatas* lectin, IBL), 纯化后的 IBL 电泳显示一条蛋白带,含有 16 种氨基酸,亚基相对分子量为 4.7 kD,中性糖含量可达 5.07%,其凝血活性可被 D-果糖明显抑制;IBL 对碱敏感,对热不稳定,70 °C 下活性完全丧失。余萍等^[20]从抗蔓割病甘薯金山 1255 的叶组织中分离到单一蛋白 SPL,测定其为一种酸性糖蛋白,对蔓割病菌有抑制作用,相对分子量为 6.3 kD,中性糖含量 6.21%,SPL 没有血型专一性及被测动物红细胞专一性,同时对不同动物红细胞有不同程度的凝集活性,其中对鸽红细胞的凝集作用最强,可被 N-乙酰葡萄糖胺或岩藻糖所抑制,在 75 °C 下加热 10 min 即丧失活性。研究同时发现,SPL 对小鼠肉瘤 S₁₈ 细胞、肝癌 H₂₂ 腹水细胞及脾细胞具有不同程度的凝集作用,而对小鼠胸腺细胞无凝集活性。目前已有研究发现,一些植物中提取的凝集素可应用于癌症的治疗中,因此 SPL 对肿瘤细胞的作用可能具有潜在的研究价值。

3 多酚类化合物

3.1 花青素(anthocyanidin)

花青素是一类具有苯并吡喃结构的类黄酮化合物,也是分布最广泛、最重要的一种天然水溶性色素之一,因其具有天然、安全无毒、抗氧化、保护心脑血管等优点,已成为当前的一个研究热点^[21,22]。紫薯中的 IbMYB1 及 IbMYB2 基因可被激发生成使薯肉显紫色的花青素^[23],紫薯中的花青素主要为芍药花素和矢车菊素两种^[24]。

紫甘薯花青素有非常强的抗氧化作用。Kubow 等^[25]研究表明微生物可以通过生物转化增加紫甘薯花青素及其代谢产物的生物利用度,使其在体外消化道模型中的抗氧化能力增强。程璋等^[2]研究发现当花青素浓度达到 0.23 mg/mL 以上时,其清除超氧阴离子能力明显高于抗坏血酸,在低浓度情况下,花青素清除羟自由基的能力显著高于抗坏血酸,同时还具有很强的清除 DPPH·自由基的能力。

紫甘薯花青素还具有抗炎及抗肿瘤作用。Sugata^[26]等发现富含花青素的 TNG 73 紫甘薯提取物抑制了巨噬细胞中氮氧化物及许多促炎因子,例如 NFκ-B, TNF-α 及 IL-6 的生成,而且并未表现出对巨噬细胞的细胞毒性。同时,该提取物对乳腺癌细胞(MCF-7)、胃癌细胞(SNU-1)及结肠癌细胞(WiDr)均有抑制生长的作用。

此外,Wang 等^[27]研究发现,紫甘薯花青素对慢性肝损伤有一定程度的减弱作用。Hwang 等^[28]发现,紫甘薯花青素对叔丁基过氧化氢在大鼠肝脏及 HepG2 细胞系中产生的肝毒性均有一定程度的抑制作用。Zhang 等^[29]研究发现紫甘薯花青素能有效调节高尿酸血症小鼠的血尿素氮和肌苷酸至正常水平,并能降低小鼠肾小管中炎症细胞涌入。Dong 等^[23]研究发现,紫甘薯花青素可能通过促进生成短链脂肪酸而具有益生元作用,并可以调解人类肠道菌群。

3.2 咖啡酰奎宁酸(caffeoylquinic acid)

咖啡酰奎宁酸是一种由奎宁酸和咖啡酸以酯键连接形成的天然酚类化合物。甘薯茎中含四种咖啡酰奎宁酸,分别为异绿原酸 A(3,5-二咖啡酰奎宁酸)、异绿原酸 B(3,4-二咖啡酰奎宁酸)、异绿原酸 C(4,5-二咖啡酰奎宁酸)及 3,4,5-三咖啡酰奎宁酸^[30]。Xi 等^[31]发现以 AB-8 大孔树脂纯化甘薯叶乙醇溶液提取物所得的 8 种酚类化合物中,3 种二咖啡酰奎宁酸的含量远高于其他化合物。Sasaki 等^[32]研究发现在数次收割甘薯茎叶的情况下,咖啡酰奎宁酸在第一次收获的甘薯叶中的含量要远高于后期收割的甘薯叶中的含量。

咖啡酰奎宁酸具有抗氧化、抗炎、免疫调节、抗癌及抗 HIV 等生物活性作用^[33]。Xia 等^[34]研究表明,咖啡酰奎宁酸表现出很强的清除 DPPH 自由基活性,异绿原酸 A 则具有抗 HIV-1 病毒活性,而 3,4,5-三咖啡酰奎宁酸在所有咖啡酰奎宁酸中具有最强的抗 HIV 活性^[35,36]。

3.3 香豆素

香豆素类化合物是广泛存在于自然界中的一类芳香族化合物,分布于许多植物和香料中,是一种重要的香味增强剂。研究表明,香豆素类化合物具有多种生物学活性^[37],但在高剂量应用时也存在一些毒性反应^[38]。

甘薯块根中含有东莨菪内酯、香豆素七叶内酯、伞形花内酯等具有抗凝、抗氧化作用的香豆素类生物活性成分^[39]。近年对于其他植物中东莨菪内酯的研究表明,东莨菪内酯可以通过调节铁离子与活性氧(ROS)的螯合作用减少及清除体内的 ROS,起到抗氧化作用。Hornick 等^[40]研究表明,东莨菪碱在老年痴呆模型小鼠中,可通过抑制乙酰胆碱酯酶活性促进乙酰胆碱的释放,从而提高模型动物的记忆及学习能力,起到增强记忆活性的效果。同时东莨菪内酯也是甘薯中重要的植物抗毒素之一,对小菜蛾幼虫有

明显的生长抑制作用^[41]。

3.4 槲皮素

槲皮素是一种广泛存在于植物花、叶中的多羟基黄酮类物质,在一百多种中草药中均发现有槲皮素的存在。近年在对其他植物的研究中发现,槲皮素具有抗肿瘤、抗氧化、抗炎、抗菌及保护皮肤等作用^[42-45]。

谭桂山等^[46]研究证实,巴西甘薯茎叶中含有槲皮素。邹耀洪等^[47]对国产甘薯叶中的黄酮成分进行的研究中,分离得到槲皮素等4种黄酮类成分。Chao等^[48]发现紫甘薯叶提取物中的矢车菊素和槲皮素能通过NF- κ -B/MAPK信号通路来有效抑制炎症作用。

4 类胡萝卜素

β -胡萝卜素是维生素A前体,分子式为 $C_{40}H_{56}$,相对分子质量536.88,在生物学上具有抗氧化和促进细胞间隙连接通讯等作用^[49]。 β -胡萝卜素及其衍生物是甘薯中主要的类胡萝卜素,含量约占甘薯总胡萝卜素的90%。黄肉色或红肉色甘薯中含有较丰富的胡萝卜素,每100g鲜薯中胡萝卜素含量最高可达20.81mg,其中含 β -胡萝卜素可达1.31mg^[50]。对受试品种的 β -胡萝卜素含量进行分析可知,桔红色甘薯 β -胡萝卜素平均含量6.44mg/hg要远远高于黄色品种(1.55mg/hg)和紫色品种(2.30mg/hg)^[51]。Park等^[52]研究发现,IbOr-Ins基因过表达可使胡萝卜素在紫心甘薯中的含量增加,并使与 β -胡萝卜素生物合成有关的大多数基因表达均不同程度的上调。Trancosoreyes等^[53]对甘薯胡萝卜素的生物利用度进行了研究,发现以蒸汽前处理法从甘薯面粉中提取的胡萝卜素体内生物利用度明显增加。胡萝卜素作为维生素A的前体,可以在预防维生素A缺乏症方面发挥举足轻重的作用,除此之外,类胡萝卜素本身还具有抗氧化、增强免疫力、抗癌等功效^[54,55]。

5 甘薯呋喃二萜

1971年,Wilson等从腐皮镰刀菌感染的甘薯组织中分离出一组9-碳呋喃二萜(1-甘薯苦醇、4-甘薯苦醇、1,4-甘薯苦醇)^[56],其中4-甘薯苦醇作为一种细胞毒素代谢物,对多数物种尤其是哺乳动物的肺有毒性作用,但近年也有研究表明,4-甘薯苦醇有作为抗肺癌靶向药物的潜在可能性^[57]。

6 展望

甘薯是一种营养丰富的食品,并富含多种生物活性成分,具有独特的营养保健功能,在食品保健、甚至药物制造等方面都具有一定的开发潜力,因此在国内外掀起了前所未有的研究热潮。检索并分析现有文献发现,我国在甘薯生物活性成分的研究还处于起步阶段,绝大多数研究仍集中于实验室和分离、纯化、精制工艺的研究,对甘薯

活性成分生物学作用的研究还比较少。总的来说,急需加强下列方面的研究:甘薯生物活性成分的组分分析和结构解析,甘薯生物活性成分体内代谢途径、生化反应的研究,甘薯生物活性成分的毒理学研究和临床试验等,为甘薯生物活性成分的进一步开发利用提供更多的依据和新的思路。

参考文献

- [1] 杜惠芬,李克生,郭红云,等.胰蛋白酶抑制剂体外抑制肿瘤细胞降解细胞外基质的研究[J].中国预防医学杂志,2004,5(2):138-139.
Du HF, Li KS, Guo HY *et al.* Study on trypsin inhibitor inhibiting tumor cell degradating extracellular matrix *in vitro* [J]. Chin Prev Med, 2004, 5(2): 138-139.
- [2] 程琤,刘超,贺炜,等.紫甘薯花青素的稳定性及抗氧化性研究[J].营养学报,2011,33(3):291-296.
Cheng C, Liu C, He W *et al.* Study on the stability and antioxidation of anthocyanin from purple sweet potato [J]. Acta Nutr Sin, 2011, 33(3): 291-296.
- [3] 李亚娜, 阙建全, 陈宗道, 等. 甘薯糖蛋白的降血脂功能[J]. 营养学报, 2002, 24(4):433-434.
Li YN, Kan JQ, Chen ZD *et al.* Antilipidemic effect of glycoprotein from sweet potato [J]. Acta Nutr Sin, 2002, 24(4):433-434.
- [4] 刘主, 高建林, 朱必凤, 等. 甘薯糖蛋白的体外抗氧化作用研究[J]. 食品与生物技术学报, 2007, 26(2):38-42.
Liu Z, Gao JL, Zhu BF *et al.* Studies on antioxidant activity of sweet potato glycoprotein *in vitro* [J]. J Food Sci Biotech, 2007, 26(2): 38-42.
- [5] 阙建全, 阎磊. 甘薯糖蛋白的免疫调节作用研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2000, (3): 257-260.
Kan JQ, Yan L. Studies on Immunomodulation function of sweet potato glycoprotein [J]. J Southwest Agric Univ (Nat Sci Ed), 2000, (3): 257-260.
- [6] 李亚娜, 林永成, 余志刚. 甘薯糖蛋白的分离、纯化和结构分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2004, 32(9): 59-62.
Li YN, Lin YC, She ZG. Isolation, Purification and structure analysis of sweet potato glycoprotein [J]. J South China Univ Technol (Nat Sci Ed) 2004, 32(9): 59-62.
- [7] 黄伟光. 甘薯糖蛋白的分离纯化技术[J]. 龙岩学院学报, 2003, 21(6): 73-74.
Huang WG. Technology of isolation and purification of sweet potato glycoprotein [J]. J Longyan Univ, 2003, 21(6): 73-74.
- [8] 程珂伟, 许时婴, 王璋. 甘薯糖蛋白的分离纯化和组成[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(11):130-134.
Cheng KW, Xu SY, Wang. Isolation, purification and component of sweet potato glycoprotein [J]. Food Ferment Ind, 2004, 30(11):130-134.
- [9] 罗秋水, 上官新晨, 蒋艳, 等. 紫红薯糖蛋白体外抗氧化活性研究[J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(4):809-813.
Luo QS, Shanguan XC, Jiang Y *et al.* Antioxidant activity of glycoprotein from the purple sweet potato [J]. Acta Agric Univ Jiangxiensis, 2012, 34(4): 809-813.
- [10] 梁婧婧, 苏锡辉, 史铁嘉, 等. 甘薯糖蛋白对高血脂大鼠体重及脏器指数的影响[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(3): 9-11.
Liang JJ, Su XH, Shi TJ *et al.* The effect of spg on body weight and organ

- index in hyperlipidemic rats [J]. *Food Res Dev*, 2013, 03: 9–11
- [11] 赵舒畅, 侯利霞, 相朝清. 甘薯蛋白的提取纯化及生物活性研究进展 [J]. *粮油加工*, 2010, (6): 100–103.
Zhao SC, Hou LX, Xiang CQ. Review of extraction, purification and bioactivity of sweet potato protein [J]. *Cereal Oil Process*, 2010, (6): 100–103.
- [12] Maeshima M, Sasaki T, Asahi T. Characterization of major proteins in sweet potato tuberous roots [J]. *Phytochem*, 1985, 24(9): 1899–1902.
- [13] 薛友林, 木泰华, 孙艳丽. 甘薯蛋白研究进展 [J]. *食品研究与开发*, 2005, 26(5): 180–184.
Xue YL, Mu TH, Sun YL. Progress of study on sweet potato protein [J]. *Food Res Dev*, 2005, 26(5): 180–184.
- [14] Yeh KW, Chen JC, Lin MI, *et al.* Functional activity of sporamin from sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.): a tuber storage protein with trypsin inhibitory activity [J]. *Plant Mol Biol*, 1997, 33(3): 565–70.
- [15] Li PG, Mu TH, Deng L. Anticancer effects of sweet potato protein on human colorectal cancer cells [J]. *World J Gastroenterol*, 2013, 19(21): 3300–3308.
- [16] Huang GJ, Sheu MJ, Chen HJ, *et al.* Growth inhibition and induction of apoptosis in NB4 promyelocytic leukemia cells by trypsin inhibitor from sweet potato storage roots [J]. *J Agric Food Chem*, 2007, 55(7): 2548–2553.
- [17] Yao J, Qian C. Sporamin induce apoptosis in human tongue carcinoma cells by down-regulating Akt/GSK-3 signaling [J]. *Fundam Clin Pharmacol*, 2011, 25(2): 229–36.
- [18] Huang GJ, Ho YL, Chen HJ, *et al.* Sweet potato storage root trypsin inhibitor and their peptic hydrolysates exhibited angiotensin converting enzyme inhibitory activity [J]. *Bot Stud*, 2008, 49(2): 101–108.
- [19] 林晓红, 余萍. 甘薯品种岩 8—6 凝集素的分离纯化及其性质 [J]. *福建师范大学学报: 自然科学版*, 2000, 16(4): 59–62.
Lin XH, Yu P. Purification and characterization of a lectin from variety of *Ipomoea batatas* [J]. *J Fujian Teach Univ (Nat Sci Ed)*, 2000, 16(4): 59–62.
- [20] 余萍, 林曦, 林玉满. 甘薯凝集素的提取及性质研究 [J]. *天然产物研究与开发*, 2001, 13(6): 25–29.
Yu P, Lin X, Lin YM. Purification and characterization of lectin from *Ipomoea batatas* [J]. *Nat Prod Res Dev*, 2001, 13(6): 25–29.
- [21] Jing P, Bomser JA, Schwartz SJ, *et al.* Structure–function relationships of anthocyanins from various anthocyanin-rich extracts on the inhibition of colon cancer cell growth [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(20): 9391–9398.
- [22] Da CC, Horton D, Margolis SA. Analysis of anthocyanins in foods by liquid chromatography, liquid chromatography–mass spectrometry and capillary electrophoresis [J]. *J Chromatogr A*, 2000, 881(1–2): 403–410.
- [23] Dong W, Niu L, Li H, *et al.* Isolation and analysis of the promoter of IbMYB1, gene from storage roots of purple-fleshed sweet potato [J]. *J Plant Biochem Biotechnol*, 2016(3): 1–7.
- [24] Zhang X, Yang Y, Wu Z, *et al.* The modulatory effect of anthocyanins from purple sweet potato on human intestinal microbiota *in vitro* [J]. *J Agric Food Chem*, 2016.
- [25] Kubow S, Iskandar MM, Sabally K, *et al.* Biotransformation of anthocyanins from two purple-fleshed sweet potato accessions in a dynamic gastrointestinal system [J]. *Food Chem*, 2016, 192: 171–177.
- [26] Sugata M, Lin CY, Shih YC. Anti-inflammatory and anticancer activities of taiwanese purple-fleshed sweet potatoes (*Ipomoea batatas* L. Lam) extracts [J]. *Biomed Res Int*, 2015, 2015(7).
- [27] Wang W, Li J, Wang Z, *et al.* Oral hepatoprotective ability evaluation of purple sweet potato anthocyanins on acute and chronic chemical liver injuries [J]. *Cell Biochem Biophys*, 2014, 69(3): 539–548.
- [28] Yong PH, Choi JH, Choi JM, *et al.* Protective mechanisms of anthocyanins from purple sweet potato against tert-butyl hydroperoxide-induced hepatotoxicity [J]. *Food Chem Toxicol*, 2011, 49(9): 2081–2089.
- [29] Zhang ZC, Su GH, Luo CL, *et al.* Effects of anthocyanins from purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L. cultivar Eshu No. 8) on the serum uric acid level and xanthine oxidase activity in hyperuricemic mice [J]. *Food Funct*, 2015, 6(9): 141–147.
- [30] Sun H, Mu T, Xi L, *et al.* Effects of domestic cooking methods on polyphenols and antioxidant activity of sweet potato leaves [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(36): 8982–8989.
- [31] Xi LS, Mu TH, Sun HN. Preparative purification of polyphenols from sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves by AB-8 macroporous resins [J]. *Food Chem*, 2015, 172(172): 166–174.
- [32] Sasaki K, Oki T, Kai Y, *et al.* Effect of repeated harvesting on the content of caffeic acid and seven species of caffeoylquinic acids in sweet potato leaves [J]. *Agric Biol Chem*, 2015, 79(8): 1–7.
- [33] Mohanraj R, Sivasankar S. Sweet potato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam)—a valuable medicinal food: a review [J]. *J Med Food*, 2014, 17(7): 733–741.
- [34] Xia DZ, Shi JY, Gong JY, *et al.* Antioxidant activity of Chinese mei (*Prunus mume*) and its active phytochemicals [J]. *J Med Plant Res*, 2010, 4(12): 1156–1160.
- [35] Hu Z, Chen D, Dong L, *et al.* Prediction of the interaction of HIV-1 integrase and its dicaffeoylquinic acid inhibitor through molecular modeling approach [J]. *Ethn Dis*, 2010, 20(1 Suppl 1): 45–49.
- [36] Tamura H, Akioka T, Ueno K, *et al.* Anti-human immunodeficiency virus activity of 3,4,5-tricaffeoylquinic acid in cultured cells of lettuce leaves [J]. *Mol Nutr Food Res*, 2006, 50(4–5): 396–400.
- [37] Fylaktakidou KC, Ke HLD, Nicolaidis DN. Natural and synthetic coumarin derivatives with anti-inflammatory/antioxidant activities [J]. *Curr Pharm Des*, 2004, 10(30): 3813–3833.
- [38] Lake BG, Evans JG, Chapuis F, *et al.* Studies on the disposition, metabolism and hepatotoxicity of coumarin in the rat and Syrian hamster [J]. *Food Chem Toxicol*, 2002, 40(6): 809–823.
- [39] Cambie RC, Ferguson LR. Potential functional foods in the traditional Maori diet [J]. *Mutat Res Fundam Mol Mech Mutagen*, 2003, 524(3): 109–117.
- [40] Hornick A, Lieb A, Vo NP, *et al.* The coumarin scopoletin potentiates acetylcholine release from synaptosomes, amplifies hippocampal long-term potentiation and ameliorates anticholinergic- and age-impaired memory [J]. *Neurosci*, 2011, 197(1): 280–292.
- [41] Peterson JK, Harrison HF, Jackson DM, *et al.* Biological activities and contents of scopolin and scopoletin in sweetpotato clones [J]. *Hortsci*, 2003, 38(38): 1129–1133.
- [42] 梁晓芳, 洪承皎, 张保国. 槲皮素对人宫颈癌 HeLa 细胞辐射敏感性的影响 [J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2009, 27(4): 229–233.
Liang XF, Hong CJ, Zhang BG. Effect of quercetin on radiosensitivity of human uterine cervix cancer hela cells [J]. *J Radiat Res Radiat Process.*

- 2009, 27(4): 229–233.
- [43] 赵丽婷, 郭长江, 蔡东联, 等. 补充槲皮素对大鼠外周血抗氧化体系的影响[J]. 武警后勤学院学报医学版, 2009, 19(4):269–270.
Zhao LT, Guo CJ, Cai DL, *et al.* Effect of quercetin supplementation on the peripheral blood antioxidant system in rats [J]. Acta Acad Med CPAF, 2009, 19(4): 269–270.
- [44] Loke WM, Proudfoot JM, Stewart S, *et al.* Metabolic transformation has a profound effect on anti-inflammatory activity of flavonoids such as quercetin: Lack of association between antioxidant and lipoxygenase inhibitory activity [J]. Biochem Pharmacol, 2008, 75(5): 1045–1053.
- [45] 朱宇, 王晓蓉, 曲莉颖, 等. 中药槲皮素对皮肤增色作用的动物实验研究[J]. 中国皮肤性病学杂志, 2007, 21(4): 242–244.
Zhu Y, Wang XR, Qu LY, *et al.* Melanogenic effects of ethanol extracts obtained from quercetin on the skin of experimental [J]. Anim Chin J Derm Venereol, 2007, 21(4): 242–244.
- [46] 谭桂山, 徐平声, 戴智勇, 等. 引种巴西甘薯叶化学成分研究(I) [J]. 天然产物研究与开发, 1995, (4): 44–46.
Tan GS, Xu PS, Dai ZY, *et al.* Studies on the chemical compounds of *Ipomoea batatas* Lam [J]. Nat Prod Res Dev, 1995, (4): 44–46.
- [47] 邹耀洪. 国产甘薯叶黄酮类成分研究[J]. 分析测试学报, 1996, (1): 71–74.
Zou YH. Study on flavonoid in leaves of domestic *Ipomoea batatas* [J]. J Instrum Anal, 1996, (1): 71–74.
- [48] Chao PY, Huang YP, Hsieh WB. Inhibitive effect of purple sweet potato leaf extract and its components on cell adhesion and inflammatory response in human aortic endothelial cells [J]. Cell Adhes Mig, 2013, 7(7): 237–245.
- [49] 沈潘潘, 常丽新, 贾长虹. 植物抗氧化剂的研究现状与展望[J]. 河北联合大学学报(自然科学版), 2013, 35(1): 77–82.
Shen PP, Chang XL, Jia CH. The prospects and research status of natural antioxidant [J]. J Hebei U Unive (Nat Sci Ed), 2013, 35(1): 77–82 .
- [50] 赵秀玲. 甘薯的营养成分与保健作用[J]. 中国食物与营养, 2008, 29(10): 44–46.
Zhao XL. The nutrition and health function of *Ipomoea batatas* [J]. Food Nutr China, 2008, 29(10): 44–46.
- [51] 余华, 宋永康, 姚清华, 等. 不同肉色甘薯营养成分分析[J]. 福建农业学报, 2010, 25(4): 482–485.
Yu H, Song YK, Yao QH, *et al.* Nutrition composition of sweet potatoes of different colors [J]. Fujian J Agric Sci, 2010, 25(4): 482–485.
- [52] Park SC, Kim SH, Park S, *et al.* Enhanced accumulation of carotenoids in sweetpotato plants overexpressing IbOr-Ins gene in purple-fleshed sweetpotato cultivar.[J]. Plant Physiol Biochem, 2014, 86: 82–90.
- [53] Trancosoreyes N, Ochoamartínez L A, Bellopérez L A, *et al.* Effect of pre-treatment on physicochemical and structural properties, and the bioaccessibility of β -carotene in sweet potato flour [J]. Food Chem, 2016, 200: 199–205.
- [54] 周丹蓉, 方智振, 廖汝玉, 等. 李果皮花色苷、类黄酮和类胡萝卜素含量及抗氧化性研究[J]. 营养学报, 2013, 35(6): 571–576.
Zhou DR, Fang ZZ, Liao RY, *et al.* Contents of anthocyanin, flavonoids and carotenoids and antioxidant capacity of plum peels [J]. Acta Nutr Sin, 2013, 35(6): 571–576.
- [55] 任丹丹, 黄红霞, 彭光华, 等. 蒟蒻类胡萝卜素对小鼠肝癌H22的抑制作用及其对免疫功能的影响[J]. 食品科学, 2006, 27(3): 210–212.
Ren DD, Huang HX, Peng GH, *et al.* Study on antitumor effect and immune function of carotenoids extract from *Potamogeton crispus* L. [J]. Food Sci, 2006, 27(3): 210–212.
- [56] Wilson BJ, Boyd MR, Harris T M, *et al.* A lung oedema factor from mouldy sweet potatoes (*Ipomoea batatas*) [J]. Nature, 1971, 231(231): 52–3.
- [57] Baillie TA, Rettie AE. Role of biotransformation in drug-induced toxicity: influence of intra- and inter-species differences in drug metabolism [J]. Drug Metab Pharmacokinet, 2011, 26(1): 15–29.

(责任编辑: 杨翠娜)

作者简介



国 鹤, 硕士研究生, 主要研究方向为营养与食品卫生。
E-mail: 1561869566@qq.com



李鹏高, 博士, 副教授, 主要研究方向为营养与食品卫生。
E-mail: penggao@ccmu.edu.cn