

# 菊芋饲料的营养价值、生物活性及其对动物生理功能的调控作用

汪悦<sup>1</sup> 薛夫光<sup>1</sup> 蒋林树<sup>2</sup> 熊本海<sup>1\*</sup>

(1.中国农业科学院北京畜牧兽医研究所,北京 100193;2.北京农学院动物科学技术学院,北京 102206)

**摘要:** 菊芋是一种多年生草本植物,属菊科向日葵属,起源于北美。菊芋地上部分(茎叶)和地下部分(块茎)均可作为优质的动物饲料原料及饲料添加剂。作为饲用牧草,新鲜菊芋茎叶粗蛋白质(CP)和钙(Ca)含量在出苗后11~14周达到峰值,且含量与苜蓿草粉相近。菊芋茎叶青贮饲料的CP与Ca含量均高于玉米青贮饲料,与燕麦、大麦和豆科牧草青贮饲料等相近,可作为部分替代饲料。此外,菊芋中的营养成分以及某些代谢产物在生长发育过程中通过多种分子信号传导途径发生变化,在生物合成和生物降解中具有潜在的重要作用。作为功能性寡糖,菊芋块茎中的菊糖不经过单胃动物的消化酶降解而直接传递到大肠,在胃肠道中主要充当益生元,改善肠道内环境,同时对血糖、脂质代谢和蛋白质代谢均有调控作用;作为生物活性物质,菊芋茎、叶、花中的黄酮类、酚酸类、萜类以及少量的甾醇类、氨基酸和多糖等化合物经大量动物临床试验表明,具有抗氧化、抗炎杀菌以及对多种肿瘤细胞具有一定的毒性作用,医疗价值较高。本综述总结了菊芋的营养特性及发育过程中代谢物的动态变化,概述了菊芋青贮的发酵特性及饲喂价值,重点阐述了菊芋块茎和茎叶中生物活性物质(主要是菊糖、黄酮类、酚酸类和倍半萜类)对动物生理功能的调控作用,目的是为了详细阐述菊芋资源的开发潜能及其对动物健康水平的改善作用。

**关键词:** 菊芋;营养成分;饲料添加剂;生物活性物质;作用

中图分类号:S816

文献标识码:A

文章编号:1006-267X(2020)02-0497-11

菊芋又称球状向日葵,最初由印度人耕种,在土豆等粮食作物短缺时作为其营养源<sup>[1]</sup>,后在世界范围内均有种植,有50多个品种<sup>[2]</sup>。与其他作物相比,菊芋的优势主要包括:1)茎叶再生能力强,每年可刈割3~4次<sup>[3]</sup>;2)生物产量高,全株新鲜和风干最高产量分别在108~134 t/hm<sup>2</sup>和42~73 t/hm<sup>2</sup><sup>[4]</sup>;3)粗蛋白质(CP)和钙(Ca)含量丰富,现蕾期(出苗后11~14周)最高分别可达到14.11%~15.22%和0.57%~0.76%,与苜蓿草粉相近(15%~20%和1.2%~1.5%)<sup>[5-6]</sup>。Papi等<sup>[7]</sup>用风干菊芋茎叶代替部分苜蓿干草(高达30%干物

质)对绵羊的消化率和代谢能没有不利影响。因此,菊芋可作为部分替代饲料。由于大多数植物风干秸秆适口性较差,因此,青贮是长期保存新鲜菊芋茎叶的首选方式<sup>[8]</sup>。菊芋块茎是动物饲料添加剂的良好来源,块茎中的功能性寡糖——菊糖作为一种可溶性膳食纤维,在单胃及幼龄反刍动物胃肠道中为双歧杆菌等益生菌的生长提供能源物质,双歧杆菌发酵菊糖产生短链脂肪酸(乙酸、丁酸和丙酸)及乳酸,降低肠道的pH,抑制病原微生物如大肠杆菌、沙门氏菌及艰难梭菌等增殖<sup>[9]</sup>。此外,作为一种非消化性碳水化合物,菊糖有助于

收稿日期:2019-07-24

基金项目:国家自然科学基金项目(31572435,31402107);“十三五”国家重点研发计划(2016YFD0700205,2016YFDO700201)

作者简介:汪悦(1993—),女,青海西宁人,博士研究生,从事动物营养与饲料科学的研究。E-mail: wangyue9313@163.com

\*通信作者:熊本海,教授,博士生导师,E-mail: xiongbenhai@caas.cn

降低血糖及血液和肝脏中的甘油三酯浓度<sup>[10]</sup>。菊芋茎叶及花中含有大量生物活性物质(酚酸类、黄酮类、倍半萜类等),研究表明,菊芋茎叶的多种提取物对结肠癌细胞系 HT29 和 HCT116 具有抗增殖活性;对 MCF-7 人乳腺癌细胞和以非洲绿猴肾细胞(Vero 细胞)为载体培养的狂犬病毒具有细胞毒性;对屎肠球菌 ATCC 51559、铜绿假单胞菌 PAO1、肺炎克雷伯菌 ATCC 700603 和结核分枝杆菌 H37Ra 具有抗微生物活性<sup>[11-12]</sup>。因此,本文对菊芋的营养成分及影响因素、菊芋青贮饲料的发酵特性及饲用价值,以及菊芋中的生物活性物质对动物生理功能的调控作用等方面进行了归纳总结,旨在为今后的研究提供一定的参考信息。

## 1 菊芋的营养成分及其代谢物的动态变化

### 1.1 营养成分

菊芋的地下部分为多瘤状的块茎,通常包含约 80%的水、15%的碳水化合物和 1%~2%的 CP,几乎不含淀粉,在少量存在的脂肪中,仅有微量的单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸,但没有饱和脂肪酸<sup>[1-2]</sup>。与块茎相比,地上部分(茎叶)的 CP、Ca 以及木质素含量较为丰富。

菊芋中主要的碳水化合物储存形式是菊糖(区别于大多数以淀粉作为碳水化合物储存形式的作物),块茎中菊糖含量占块茎干重的 70%~80%,因此菊芋块茎是可溶性膳食纤维的良好来源<sup>[1]</sup>。菊糖聚合度(degree of polymerization, dp)为 2~60<sup>[2]</sup>。在对 11 个菊芋品种菊糖 dp 的研究中发现,dp>4 的菊糖占块茎总碳水化合物的 55.8%~77.3%(平均值为 65.8%),dp=3 的菊糖占 9.7%~16.5%(平均值为 13.2%)和 dp=2 的菊糖占 8.2%~18.3%(平均值为 13.8%)<sup>[13]</sup>。dp 与植物多糖益生活性密切相关,除二聚糖外,dp 与益生活性基本遵循“低 dp 高活性”的规律<sup>[14]</sup>。

在块茎发育期间,蛋白质和氮(N)水平保持相对恒定,块茎蛋白质含有理想比例的必需氨基酸<sup>[1]</sup>。Cieřlik 等<sup>[15]</sup>研究表明,在平均 CP 含量为 5.9%DM 的块茎中,主要氨基酸成分为天冬氨酸(14.6%)、谷氨酸(14.0%)、精氨酸(11.1%)、赖氨酸(5.2%)、苏氨酸(3.4%)、苯丙氨酸(3.9%)、半胱氨酸(1.0%)和甲硫氨酸(1.0%),且风干菊芋块茎中必需氨基酸与总氨基酸的比值(EAA/TAA)为 42.38%,必需氨基酸与非必需氨基酸的比值

(EAA/NEAA)为 73.55%,这与联合国粮农组织/世界卫生组织(FAO/WHO)提出的 EAA/TAA≈40%、EAA/NEAA>60%<sup>[16]</sup>的参考蛋白质模式相近,说明风干菊芋块茎中的蛋白质属于优质蛋白质。

Somda 等<sup>[17]</sup>研究了希腊菊芋(sunchoke)从种植到收获的矿物元素分配。在快速生长阶段,块茎中的碳和韧皮部的矿物元素水平显著增加。到收获时,在成熟的块茎中发现了高水平的钾(K, 42.0~65.7 mg/kg DM)、Ca(7.071~11.364 mg/kg DM)和磷(P, 2.795~3.854 mg/kg DM),而钠(Na)含量(0.402~0.857 mg/kg DM)相对较少。Seiler 等<sup>[18]</sup>对德克萨斯州的 9 个野生菊芋种群在 2 年开花期间茎叶中的 N、P、Ca、镁(Mg)、K 和 Ca/P 进行了评估,结果表明,用于反刍动物饲料的开花期菊芋的 N、Ca、Mg 和 K 充足,P 不足,Ca/P 过高,为(4.3~14.3):1;如果使用菊芋作为主要饲料,必须添加 P 补充剂或添加一些高浓度 P 的其他饲料,以帮助降低代谢紊乱的风险<sup>[19]</sup>。9 个种群的 N、K、P、Ca、Mg 和 Ca/P 均存在基因型差异,表明通过杂交和选择改善的可能性;P 和 Mg 的群体差异很小,通过选择难以改善这些差异<sup>[18]</sup>。

### 1.2 动态变化

在菊芋生长发育过程中,蛋白酶将蛋白质转化为氨基酸, $\alpha$ -淀粉酶将淀粉转化为糖,因此蛋白质和淀粉的水解伴随着游离氨基酸和单糖的增加<sup>[20]</sup>。Erbař 等<sup>[21]</sup>研究了 2 个不同品种的菊芋,从出苗到采收期 CP 含量分别从 48.1%和 40.9%降低到 35.5%和 28.4%,而游离氨基酸含量分别从 0.59%和 0.28%增加到 5.07%和 5.62%;总可溶性糖从 7.3 mg/g 增加到 28.6 mg/g,还原糖含量从 1.8 mg/g 增加到 6.4 mg/g。抑制蛋白质消化的一些抗营养成分在发芽后减少,例如  $\alpha$ -半乳糖苷、胰蛋白酶、凝集素和胰凝乳蛋白酶抑制剂等<sup>[22]</sup>。此外,块茎中会积累一些次生代谢产物,如维生素 E 和多酚。出苗后 11~14 周总酚含量增加,主要化合物是没食子酸、原儿茶酸、咖啡酸和芥子酸以及槲皮素<sup>[12]</sup>。内源酶活化及一些复杂的生化代谢途径可能导致菊芋发育过程中酚类成分的变化。涉及酚类化合物的合成和转化的分子信号传导途径包括:氧化戊糖磷酸酯、乙酸酯/丙二酸酯及莽草酸等途径、水解单宁途径以及糖醇解途径等<sup>[23]</sup>。

## 2 菊芋茎叶青贮饲料的发酵特性及其饲喂价值

### 2.1 发酵特性

利用菊芋茎叶做青贮饲料时,应在成熟期前(现蕾期)进行刈割,此时的茎秆 CP 含量较高(10.52%~15.22%),木质素含量低,有利于提高饲草营养价值。闫琦等<sup>[24]</sup>利用袋装法将菊芋茎叶青贮 60 d 后,测得酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量显著下降,相对饲用价值(RFV)增加,这有利于增加动物采食量和提高消化率。菊芋青贮前干物质含量为 297 g/kg<sup>[25]</sup>,与 McDonald 等<sup>[26]</sup>所测几种专用于青贮的作物含量(250~300 g/kg)相符,且青贮 50 d 后,干物质含量为 275 g/kg<sup>[25]</sup>。根据 Keady 等<sup>[27]</sup>推荐的干物质含量(280±5) g/kg,亦可表明其为优质饲料。菊芋青贮在发酵 50 d 后的乳酸含量(20.1 g/kg DM)<sup>[25]</sup>占总有机酸含量的 57.9%DM,此数值符合优等青贮饲料中乳酸含量范围(占总酸的 33%~50% DM 以上);然而,菊芋青贮 pH>4.6,因此需要额外添加乳酸菌或者与含糖分较高的饲料(如玉米)混贮<sup>[8]</sup>;周正等<sup>[28]</sup>将菊芋秸秆与玉米秸秆按 10:0、9:1、8:2、0:10 共 4 个比例进行混贮处理,50 d 后测定结果表明:随着玉米秸秆比例增大,混贮料的 pH 和纤维素、半纤维素含量显著降低,非纤维性碳水化合物(NFC)、干物质和 NDF 含量及 RFV 呈上升趋势。试验证明,适量添加玉米秸秆,具有提高菊芋秸秆青贮品质的效果。菊芋青贮的木质素含量从 9.8%(青贮前)下降至 6.8%,略高于玉米青贮饲料(5.7%)、燕麦青贮饲料(5.5%)和小麦青贮饲料(5.8%)<sup>[5]</sup>;CP 含量(10.3%)<sup>[8]</sup>高于玉米青贮饲料(8.8%),与燕麦青贮饲料(12.9%)和大麦青贮饲料(12%)相近<sup>[5]</sup>;Ca 含量(1.4%)<sup>[8]</sup>与豆科牧草青贮饲料相近(1.34%),显著高于玉米(0.28%)等其他青贮饲料<sup>[5]</sup>;Rinne 等<sup>[29]</sup>提出氮含量超出 7 g/kg,表明青贮饲料质量较差。Megías 等<sup>[30]</sup>试验表明菊芋青贮的氮含量低于 7 g/kg,变化范围为 0.2~0.8 g/kg DM,因蛋白质降解较少,表明此时青贮料品质较好。

### 2.2 饲喂价值

菊芋块茎对泌乳奶牛的产奶净能(7.79 kJ/kg)<sup>[31]</sup>高于马铃薯(7.74 kJ/kg)和甜菜(6.15 kJ/kg)<sup>[32]</sup>。在英国进行的一项研究中发

现,饲喂公羊 1 kg 菊芋块茎能够提供 4.15 MJ 的消化能和 11.9 g 可消化蛋白质<sup>[6]</sup>。菊芋青贮对于泌乳奶牛的消化能(11.89 kJ/kg)和代谢能(9.21 kJ/kg)<sup>[33]</sup>仅次于玉米青贮饲料(12.52 和 9.75 kJ/kg)<sup>[5]</sup>。Razmkhah 等<sup>[8]</sup>研究表明,菊芋青贮饲料替代 540 g/kg DM 玉米青贮饲料,对奶牛干物质采食量、消化率、瘤胃发酵和血液参数没有不利影响。

## 3 菊芋的生物活性物质及其功能

### 3.1 块茎中菊糖的化学结构及其功能

菊糖主要是由线性果糖基单元  $\beta$ -(1,2)糖苷键连接的果糖链与还原性末端吡喃葡萄糖单元组合成的果寡糖,部分菊糖通过  $\beta$ -(2,6)糖苷键连接,支化程度局限。此外,一部分菊糖分子末端不含吡喃葡萄糖单元,而是以果糖苷单元的形式存在<sup>[9-10]</sup>。就数量而言,菊芋和菊苣是目前菊糖储量最大的 2 个物种<sup>[11]</sup>。

#### 3.1.1 益生元特性

Roberfroid<sup>[34]</sup>报道,菊糖的益生元活性是由于菊糖中的果糖单体中异头碳(环化单糖分子中氧化数最高的半缩醛碳原子 C2)构型的存在,使得菊糖对动物消化道内消化酶( $\alpha$ -葡糖苷酶、麦芽糖酶、异麦芽糖酶和蔗糖酶)的水解具有抗性,因此菊糖不经过胃肠道上部消化而是直接进入结肠。这已经通过大鼠和人的体内回肠造口模型研究得到证实,该模型通常用于量化营养物,特别是碳水化合物在小肠消化吸收<sup>[35]</sup>。该研究从回肠造口流出物中回收了 86%~88%的菊糖,这一结果支持了小肠中菊糖几乎不可消化的观点<sup>[35]</sup>。根据对乳酸和短链脂肪酸(添加菊糖后回肠造口流出物中碳水化合物厌氧发酵的最终产物)含量的估计,菊糖通过小肠期间 12%~14%的微小损失可能是由于回肠定植的微生物群体的发酵<sup>[36]</sup>。

菊糖的益生元特性还体现在通过选择性地刺激结肠中 1 种或几种有益菌的生长或活性,进而与病原菌竞争肠道上皮细胞底物或黏附位点,以及对免疫系统的刺激。此外,双歧杆菌发酵菊糖产生有机酸,降低肠道 pH,从而抑制有害细菌增殖<sup>[9]</sup>。Delcenserie 等<sup>[36]</sup>研究表明,补充菊糖增加了山羊粪便中双歧杆菌的数量及其对病原菌的抗性。Sekine 等<sup>[37]</sup>进一步证明双歧杆菌的水溶性细胞片段具有抗肿瘤作用,是动物肠道中重要的免

疫调节剂。与对照饮食相比,菊糖型饮食的摄入显著抑制了结肠的异常隐窝病灶(ACF)总数。结肠变性隐窝(ACP)是结肠癌的初期病变,菊糖通过促进益生菌的增殖,激活 Toll 样受体 2(TLR2)的表达,同时抑制了革兰氏阴性菌及 Toll 样受体 4(TLR4)-核转录因子- $\kappa$ B(NF- $\kappa$ B)信号通路,进而抑制结肠肿瘤前病变。

### 3.1.2 对肠道形态及微生物的影响

菊糖在结肠发酵产生短链脂肪酸(乙酸、丁酸和丙酸)、乳酸和气体作为消化产物。菊糖产生的高达 95%的有机酸都在升结肠被吸收<sup>[38]</sup>。对 9~12 周龄生长猪的试验表明,菊糖型饮食降低了盲肠 pH 并增加了短链脂肪酸浓度,主要是丁酸,其次是乙酸和丙酸。这些短链脂肪酸浓度的提高与菊糖对肠道组织形态的影响有关,无论是在小肠还是在盲肠,菊糖摄入导致肠黏膜增生和肠壁厚度增加都伴随着血流量的增加,进而使吸收进入血液的短链脂肪酸含量增加,为肠细胞增殖提供大量的能源物质<sup>[39]</sup>。菊糖补充还会导致肠绒毛形态的改变,并且这种改变与肠组织细胞周转有关<sup>[40]</sup>。Valdovska 等<sup>[40]</sup>在饲喂菊糖型饮食的仔猪肠道中发现空肠绒毛顶端表面分枝以及空肠细胞有丝分裂。菊糖为肠细胞有丝分裂提供能量,进而使肠绒毛的功能被激活<sup>[41]</sup>。此外,在空肠中发现中等数量的结肠炎性细胞和部分浆细胞的凋亡和迁移。细胞的凋亡和迁移过程是由于菊糖摄入导致空肠中大量肠道微生物种群结构发生变化引起的<sup>[40]</sup>。菊糖在瘤胃中不会抑制纤维蛋白酶活性,但对产琥珀酸丝状杆菌(*Fibrobacter succinogenes*)和黄色瘤胃球菌(*Ruminococcus flavefaciens*)的生长具有一些负面影响,可能的原因是产琥珀酸丝状杆菌和黄色瘤胃球菌能够利用葡萄糖和纤维二糖但不以果糖作为生长底物<sup>[41]</sup>。胡丹丹等<sup>[42]</sup>利用 16S rDNA 高通量测序技术发现菊糖显著提高了奶牛瘤胃中假单胞菌属(*Pseudomonas*)、瘤胃拟杆菌(*Bacteroides ruminicola*)以及瘤胃纤维降解菌的丰度。与细菌相比,原生动物的利用显示出更大的活性,Ziolecki 等<sup>[43]</sup>报道,菊糖的摄入有助于瘤胃纤毛虫改善细菌纤维素分解活性。

### 3.1.3 对血糖的影响

现有研究表明菊糖对血糖的影响可能取决于生理(禁食与餐后状态)或疾病(糖尿病)状况<sup>[10]</sup>。

在链脲佐菌素处理的大鼠(糖尿病)中,将 10 g 菊糖加入到 50 g 小麦淀粉饲喂健康大鼠时,尽管菊糖对淀粉吸收没有明显的干扰,但血糖反应降低<sup>[44]</sup>。与其他膳食纤维一样,菊糖通过延迟胃排空速度或缩短通过小肠时间来影响常量营养素,尤其是碳水化合物的吸收。长期摄入含有 20% 菊糖的饮食(20 g/d,持续 2 个月),降低了肝糖原累积量<sup>[45]</sup>。因菊糖摄入导致的肝脏糖异生减少通常是由菊糖发酵产生的短链脂肪酸,尤其是丙酸介导<sup>[46]</sup>。Ash 等<sup>[46]</sup>在大鼠饮食中加入 25% 的丙酸盐,4 周后显著降低了空腹血糖。丙酸还可抑制分离的肝细胞中的糖异生<sup>[45]</sup>。丙酸对血糖的控制途径主要包括:1)丙酸代谢转化为甲基丙二酰辅酶 A(CoA)和琥珀酰 CoA,两者都是丙酮酸羧化酶的特异性抑制剂<sup>[46]</sup>;2)丙酸盐通过消耗肝脏柠檬酸(一种磷酸果糖激酶的变构抑制剂)来增强葡萄糖利用<sup>[47]</sup>;3)丙酸通过降低血浆脂肪酸浓度间接影响肝脏葡萄糖代谢,而血浆脂肪酸浓度是已知与糖异生密切相关的因子<sup>[48]</sup>。

### 3.1.4 对粪氮及尿氮代谢的影响

在正常和肾切除大鼠的饲料中补充 10% 菊糖 6 周后,尿素氮水平均降低<sup>[49]</sup>。肠道微生物生长过程中需要大量氮源来进行菌体蛋白的合成,而当可消化碳水化合物的摄入量高时,维持后肠道细菌最大生长所需的氮的量可能会不足,这时血尿素成为盲肠细菌蛋白质合成的现成来源<sup>[10]</sup>。由于菊糖对消化道酶的抗性,可直接到达后肠段充当肠道细菌的能量来源,有效地增强了大鼠的粪氮排泄,减少了尿氮排泄<sup>[10]</sup>。然而,菊糖对小肠中的蛋白质消化率不产生显著影响<sup>[50]</sup>。此外,丙酸盐是菊糖的细菌发酵的重要终产物,在氨和氨基酸存在下也可抑制肝脏中的尿素生成。但是,由于消化道结构和结肠微生物区系的差异,这种结果(尿氮减少和粪氮增加)是否适用于反刍动物有待进一步研究。在单胃动物中,除了增加总氮向结肠的转移外,更重要的是限制氨的形成和蛋白质分解代谢的各种终产物,这 2 种因素已成为结肠癌发生的致病因素<sup>[51]</sup>。De Preter 等<sup>[51]</sup>研究表明,菊芋块茎提取物可有效抑制黄嘌呤氧化酶(参与嘌呤合成尿酸的酶),因此可减少尿酸盐在关节和肾脏的沉积。

### 3.1.5 对脂质代谢的影响

在大鼠高脂肪或无纤维饮食中添加菊糖显著

降低了血液和肝脏的甘油三酯含量<sup>[10]</sup>。Weitkunat 等<sup>[52]</sup>提出,在富含碳水化合物的饮食中添加菊糖减少了肝脏脂肪酸的从头合成。由于脂肪酸合成酶是通过修饰脂肪生成基因进行表达的,菊糖的摄入使脂肪生成酶和脂肪酸合酶 mRNA 的活性降低,通过减少肝脏中极低密度脂蛋白-甘油三酯的分泌,进而降低了菊糖的甘油三酯效应<sup>[53]</sup>。菊糖饲喂的大鼠肝脏中甘油-3-磷酸浓度显著高于对照组,这种相对增加可能是由于菊糖降低了脂肪酸的酯化能力<sup>[54]</sup>。有研究表明,菊糖的摄入显著地降低了肝细胞将<sup>[14C]</sup>棕榈酸酯化成甘油三酯的能力<sup>[54]</sup>。葡萄糖依赖性促胰岛素肽(GIP)和胰高血糖素样肽(GLP-1)对脂质代谢具有直接的胰岛素样作用<sup>[55]</sup>。与对照组相比,菊糖饲喂大鼠的血清 GIP 浓度更高,且盲肠中 GLP-1 的含量也增加了 2 倍。后者的增加是盲肠肥大的结果,可能与盲肠中菊糖发酵产生的短链脂肪酸的营养作用有关<sup>[55-56]</sup>。GLP-1 通过向控制食物摄入的下丘脑

发送神经冲动,进而抑制食物摄入,延迟胃排空速度,刺激胰岛素分泌和胰腺  $\beta$  细胞(也称胰岛 B 细胞,可分泌胰岛素)增殖来抑制肥胖<sup>[55]</sup>。Daubioul 等<sup>[57]</sup>报道,利用菊糖进行膳食纤维富集可以减少肥胖大鼠脂肪量增加和肝脏脂肪变性。菊糖还能使肝脏中苹果酸酶活性显著降低,进而减少其催化苹果酸脱羧过程中产生的用于脂肪酸合成的还原型辅酶(NADPH)<sup>[57]</sup>。

### 3.2 茎叶中生物活性物质及其功能

菊芋茎、叶及花中的主要生物活性物质有黄酮类、倍半萜类、倍半萜内酯类、酚酸类、氨基酸、多糖、甾醇类和挥发油等<sup>[11]</sup>,以萜类(17,18-二氢尿嘧啶 A、海葵素、海葵醇等);黄酮类(山奈酚、葛根素、芦丁等)和酚酸类(咖啡酸、绿原酸、没食子酸、儿茶素、水杨酸、阿魏酸等)居多(表 1),其中大部分活性成分均具有抗氧化、杀菌消炎以及肿瘤细胞毒性等多种药理作用,可对动物疾病的治疗产生积极作用<sup>[11-12]</sup>。

表 1 菊芋地上部分(茎、叶及花)生物活性物质类别与组成

Table 1 Types and compositions of bioactive substances in aerial part (stems, leaves and flowers) of Jerusalem artichoke

类别 Types	组成 Compositions
黄酮类 Flavonoid	去乙酰半泽兰素(desacetylupaserrin)、hymenoxin、石吊兰素(nevadensin)、山萜酚葡萄糖酸盐(kaempferol gluconate)、山奈酚-3-O-葡萄糖苷(kaempferol-3-O-glucoside)、山奈酚(kaempferol)、芦丁(rutin)、穿心莲(andrographin)、川陈皮素(nobiletin)、水飞蓟素(silymarin)、葛根素(puerarin)、甲基鼠李素(rhamnazin)
酚酸类 Phenolic acid	3,4-二咖啡酰奎宁酸(3,4-dicaffeoylquinic acid)、3-阿魏酰奎尼酸(3-feruloyl-quinic acid)、绿原酸(chlorogenic acid)、1,5-二咖啡酰奎宁酸(1,5-dicaffeoylquinic acid)、儿茶素(catechin)、水杨酸(salicylic acid)、表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate)、对香豆酰基-奎尼酸( <i>p</i> -coumaroyl-quinic acid)
倍半萜类 Sesquiterpenoids	17,18-二氢尿嘧啶 A(17,18-dihydrobudlein A)、海葵醇 A,H(heliannol A,H)、海葵素 B(niveusin B)、绢毛向日葵素 A,B(argophyllin A,B)、菊芋精(heliangine)、3-乙氧基海葵素 B15-羟基-3-去氧果酸(3-ethoxyniveusin B15-hydroxy-3-dehydrodesoxytifruticin)、睫毛向日葵酸(ciliaric acid)、甘草酸(angelylgrandifloric acid)
倍半萜内酯类 Sesquiterpene lactone	去乙酰硫代嘌呤(desacetylupaserrin)、氨甲酰菊酯(annuithrin)、绢毛向日葵素 A(argophyllin A)、菊芋精(heliangine)、3-hydroxy-8 $\beta$ -tigloyloxy-1,10-dehydroarigloxin、eupatoliade
氨基酸 Amino acid	酪氨酸(tyrosine)、异亮氨酸(isoleucine)、缬氨酸(valine)
多糖 Polysaccharide	向日葵多糖( <i>Helianthus annuus</i> polysaccharides)、阿拉伯糖(arabinose)
甾醇类 Sterols	$\Delta$ 7-豆甾醇( $\Delta$ 7-stigmastenol)、 $\Delta$ 7-菜油甾醇( $\Delta$ 7-campestenol)
挥发油 Essential oil	(E)-乙酸-2-己烯-1-醇酯[(E)-acetate-2-hexene-1-alcohol ester]、三环萜(tricyclene)、 $\alpha$ -侧柏烯( $\alpha$ -thujene)、(E)-罗勒烯[(E)-ocimene]、 $\gamma$ -萜品烯( $\gamma$ -terpinene)

数据由本实验室分析检测。Data were analyzed by our laboratory.

### 3.2.1 抗氧化

抗氧化剂具有抗细胞损伤并降低慢性疾病风险的功能。天然抗氧化剂以酶[超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽还原酶(GR)和愈创木酚过氧化物酶(GPX)]、肽(还原型谷胱甘肽)、类胡萝卜素和酚类化合物(生育酚、类固醇和酚酸)等形式存在<sup>[58]</sup>。菊芋中的抗氧化剂主要是黄酮类和酚酸类化合物,其抗氧化活性受多种因素的影响<sup>[59-61]</sup>。菊芋叶片吸收的紫外线-B(UV-B)辐射可能影响抗氧化防御机制<sup>[59]</sup>。Costa等<sup>[59]</sup>研究表明菊芋叶片中的还原型谷胱甘肽和抗氧化酶(CAT、GR和GPX)的活性在15 kJ/m<sup>2</sup> UV-B照射下分别增加32.0 nmol/g、0.36 pmol/mg、4.6 U/mg和18.7 U/mg。生长于盐碱地或在盐水灌溉条件下的菊芋块茎中谷胱甘肽-S-转移酶(GST)、GPX和SOD活性与叶片相比增加,相同条件下菊芋叶片表现出比块茎更高的活性GR和CAT活性<sup>[60]</sup>。从块茎形成到膨大期间,1,1-二苯基-2-苦肟基(DPPH)自由基清除活性的增加可能是由于总酚和总异黄酮含量增加,即菊芋块茎的总酚含量从1.06 mg/g增加到3.60 mg/g;总异黄酮含量从5.34 mg/g增加到6.17 mg/g<sup>[61]</sup>。菊芋异黄酮还可充当低密度脂蛋白(LDL)氧化的抑制剂<sup>[61]</sup>。菊芋所含酚酸类化合物中一种重要的抗氧化活性物质——绿原酸(CQA),具有广泛的协同抗氧化能力,尤其是其主要成分3-咖啡奎宁酸(3-CQA)与槲皮素等黄酮类化合物以及 $\alpha$ -生育酚、芦丁等抗氧化剂混合时,可将机体对DPPH和2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS)等自由基的清除能力提高3%~45%。CQA分子的再生机制和多种抗氧化剂分子之间的相互作用是CQA协同抗氧化现象的主要原因<sup>[62]</sup>。

### 3.2.2 抗炎

菊芋叶片中发挥抗炎作用的物质主要是倍半萜类化合物<sup>[11]</sup>。Hernández等<sup>[63]</sup>研究表明, $\alpha$ -亚甲基- $\gamma$ -内酯是倍半萜内酯发挥抗炎作用的必需基团,其抗炎作用主要涉及对炎症因子和炎症信号通路的影响。例如,通过抑制巨噬细胞NF- $\kappa$ B的活化以及信号传导及转录激活蛋白(STAT)的磷酸化等,从而降低炎症性细胞因子如白细胞介素-6(IL-6)、白细胞介素-8(IL-8)、肿瘤坏死因子- $\alpha$ (TNF- $\alpha$ )和肠黏膜丁酸等的水平。Lyb

等<sup>[64]</sup>从菊芋叶片中分离得到倍半萜内酯——堆心菊内酯(helenalin)可以选择性的抑制NF- $\kappa$ B与DNA结合活性并抑制NF- $\kappa$ B相关基因的表达。此外,该化合物可以改变核因子 $\kappa$ B抑制蛋白(I $\kappa$ B)/NF- $\kappa$ B复合物,干扰I $\kappa$ B激酶的释放,进而抑制其启动相关炎症基因的转录。Pan等<sup>[65]</sup>研究发现菊芋花中的倍半萜内酯(4,15-异三萜内酯和4,15-异三糖内酯甲基丙烯酸酯)发挥抗炎作用的机制是通过抑制TNF- $\alpha$ 和干扰素- $\gamma$ (IFN- $\gamma$ )诱导的非洲绿猴肾细胞ATCC CCL-81中STAT1的磷酸化,从而减少T细胞分泌因子——受激活调节正常T细胞表达和分泌因子(RANTES)和IL-8的生成。此外,菊芋的抗炎作用还与肠道相关淋巴组织(GALT)的作用有关<sup>[66]</sup>。Watzl等<sup>[66]</sup>从菊芋花中分离出9种倍半萜类化合物可激活大鼠派尔集合淋巴结(肠黏膜免疫系统的重要组成部分)中的免疫细胞,刺激产生白细胞介素-10(IL-10)和自然杀伤细胞,并加强的免疫球蛋白A的分泌,其在对病原体 and 肿瘤细胞的保护性屏障的形成中起重要作用。

### 3.2.3 抗肿瘤

菊芋地上部分中分离出的黄酮类、二萜类、倍半萜内酯、倍半萜烯等化合物能够减小甚至消除一些化学致癌物的毒性,抑制肿瘤细胞增长<sup>[11]</sup>。抗肿瘤试验表明,菊芋花中的2种黄酮类物质[5,8-二羟基-6,7,4'-三甲氧基黄酮和5,8-二羟基-2-(4-羟基苯基)-6,7-二甲氧基]对HeLa细胞系(宫颈癌细胞)具有细胞毒性<sup>[67]</sup>。Yuan等<sup>[68]</sup>从菊芋叶片中分离得到了3种倍半萜类化合物,对B16细胞(小鼠黑素瘤细胞)增殖产生抑制作用。Pan等<sup>[65]</sup>从菊芋茎叶中分离出8种化合物(包括3个二萜类、2个吉马烷型倍半萜内酯、木脂素、诺异戊二烯和苯甲醛衍生物)对于MCF-7细胞(人乳腺癌细胞系)具有不同程度的细胞毒性,其中吉马烷型倍半萜内酯的细胞毒性作用最强。除了生物活性物质外,菊芋中的某些特异性蛋白也能够起到抗肿瘤作用。Griffaut等<sup>[69]</sup>通过双重应激——切割和干燥处理得到了菊芋叶片中特异性抗肿瘤细胞的蛋白质复合物,该复合物对多种肿瘤细胞(MDA-MB-231乳腺癌细胞,Caco2和DLD1结肠癌细胞,PA1和SKOV3卵巢癌细胞,A549非小细胞肺癌细胞)具有较强的毒性作用。研究显示该蛋白复合物含有2种特殊多肽,即18 ku多肽和

28 ku多肽。18 ku多肽与铜-锌过氧化物歧化酶(Cu,Zn-SOD)相关,向该蛋白复合物中加入水杨酸导致其对MDA-MB-231乳腺癌细胞显著的分裂抑制。而28 ku分子与碱性磷酸酶相关,其与萌发素类蛋白(germin-like protein, GLP)或过氧化物歧化酶等相互作用可导致肿瘤细胞死亡。

### 3.2.4 抗菌

脂质转移蛋白(LTP)属于大型植物蛋白家族,对多数真菌具有很强的抗菌活性<sup>[70]</sup>。菊芋叶片中的Ha-AP10是与许多植物LTP同源的10 ku碱性多肽,研究显示其对伤寒沙门氏菌(*Salmonella typhi*)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、霍乱弧菌(*Vibrio cholerae*)、白色念珠菌(*Candida albicans*)和尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)等有不同程度的抑制力<sup>[12]</sup>。Jantaharn等<sup>[11]</sup>通过色谱分离从菊芋花中得到23种化合物,主要是萜类化合物、类黄酮、香豆素和色酮,对屎肠球菌ATCC 51559、铜绿假单胞菌PAO1、肺炎克雷伯菌ATCC 700603和结核分枝杆菌H37Ra具有抗微生物活性。此外,菊芋中的单宁与富含脯氨酸的蛋白质形成不可逆的复合物,可抑制微生物细胞蛋白质合成。抗菌活性可能是由于黄酮类、生物碱、皂苷和单宁等化合物能够灭活细菌黏附因子、酶以及细胞包膜转运蛋白<sup>[71]</sup>。

## 4 小结与展望

菊芋丰富的营养成分、菊糖储量以及具有治疗潜力的生物活性物质使其成为是一种亟待开发和充分利用的新型饲料及饲料添加剂。然而,到目前为止,菊芋并未纳入我国饲料数据库,主要原因在于,菊芋的营养成分参数缺乏完整和系统性,且已有数据存在较大差异。为使菊芋发挥最大的饲用价值,需要进一步对比分析和深入研究,以确定其最大生物量和最佳采收时期。另外,菊芋在动物生产(特别是反刍动物)中的应用仍有较大的探索空间。例如,菊芋的有效能值(例如奶牛的产奶净能、维持净能,羊的消化能、代谢能);菊糖在瘤胃中的降解代谢及对微生物区系的作用机理以及在生产中最适添加量的确定等。

目前针对动物疾病的研究大都集中于利用抗生素、疫苗接种防疫等药物治疗手段或是通过选择抗性基因进行遗传改良。而从营养调控的角度

出发,通过饲喂含有抗炎杀菌类活性物质的饲料,提高动物机体的后天免疫力,增强其对疾病的抗性,是否有助于间接实现对炎症的缓解,也是值得研究的方向。菊芋茎叶及花中的生物活性物质对动物的抗氧化、抗炎,特别是对肿瘤细胞毒性等功效显著,但其在动物胃肠道的消化代谢过程及其作用机制等还需更多深入研究。

综上,尽管菊芋对农业、畜牧业甚至医学都表现出多种潜在利用价值,但仍需进一步研究以更全面地了解和利用这种多功能作物,为新型饲料资源的开发利用以及为动物的健康水平和生产提供一定的帮助。

### 参考文献:

- [1] KAYS S J, NOTTINGHAM S F. Biology and chemistry of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) [M]. [S.l.]: CRC Press, 2007.
- [2] KHUSENOV A S, RAKHMANBERDIEV G R, RAKHIMOV D A, et al. Physicochemical properties of inulin from muzhiz variety of Jerusalem artichoke [J]. Chemistry of Natural Compounds, 2016, 52(6): 1078-1080.
- [3] BACH V, KIDMOSE U, KJELDTSEN BJØRN G, et al. Effects of harvest time and variety on sensory quality and chemical composition of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*) tubers [J]. Food Chemistry, 2012, 133(1): 82-89.
- [4] 杨在宾, 杨立杰, 姜淑贞, 等. 菊芋生长后期生物产量及营养价值 [J]. 草业科学, 2018, 35(1): 140-145.
- [5] NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Nutrient requirements of dairy cattle: seventh revised edition, 2001 [M]. Washington, D. C.: The National Academies Press, 2001.
- [6] HAY R K M, OFFER N W. *Helianthus tuberosus* as an alternative forage crop for cool maritime regions: a preliminary study of the yield and nutritional quality of shoot tissues from perennial stands [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1992, 60(2): 213-221.
- [7] PAPI N, KAFILZADEH F, FAZAELI H. Use of Jerusalem artichoke aerial parts as forage in fat-tailed sheep diet [J]. Small Ruminant Research, 2019, 174(5): 1-6.
- [8] RAZMKHAH M, REZAEI J, FAZAELI H. Use of Jerusalem artichoke tops silage to replace corn silage in sheep diet [J]. Animal Feed Science and Technology,

- 2017, 228:168-177.
- [ 9 ] KAUFHOLD J, HAMMON H M, BLUM J W. Fructooligosaccharide supplementation; effects on metabolic, endocrine and hematological traits in veal calves [ J ]. Journal of Veterinary Medicine Series A, 2000, 47 ( 1 ): 17-29.
- [ 10 ] KUMAR S A, WARD L C, BROWN L. Inulin oligo-fructose attenuates metabolic syndrome in high-carbohydrate, high-fat diet-fed rats [ J ]. British Journal of Nutrition, 2016, 116 ( 9 ): 1502-1511.
- [ 11 ] JANTAHARN P, MONGKOLTHANARUK W, SENAWONG T, et al. Bioactive compounds from organic extracts of *Helianthus tuberosus* L. flowers [ J ]. Industrial Crops and Products, 2018, 119: 57-63.
- [ 12 ] 刘海伟, 刘兆普, 刘玲, 等. 菊芋叶片提取物抑菌活性与化学成分的研究 [ J ]. 天然产物研究与开发, 2007, 19 ( 3 ): 405-409.
- [ 13 ] WEI L Y, WANG J H, ZHENG X D, et al. Studies on the extracting technical conditions of inulin from Jerusalem artichoke tubers [ J ]. Journal of Food Engineering, 2007, 79 ( 3 ): 1087-1093.
- [ 14 ] LUO D L, LI Y, XU B C, et al. Effects of inulin with different degree of polymerization on gelatinization and retrogradation of wheat starch [ J ]. Food Chemistry, 2017, 229: 35-43.
- [ 15 ] CIEŚLIK E, GEBUSIA A, FLORKIEWICZ A, et al. The content of protein and of amino acids in Jerusalem artichoke tubers (*Helianthus tuberosus* L.) of red variety Rote Zonenkugel [ J ]. Acta Scientiarum Polonorum, Technologia Alimentaria, 2011, 10 ( 4 ): 433-441.
- [ 16 ] MANN J, CUMMINGS J H, ENGLYST H N, et al. FAO/WHO scientific update on carbohydrates in human nutrition; conclusions [ J ]. European Journal of Clinical Nutrition, 2007, 61 Suppl 1: S132-S137.
- [ 17 ] SOMDA Z C, MCLAURIN W J, KAYS S J. Jerusalem artichoke growth, development, and field storage. II. Carbon and nutrient element allocation and redistribution [ J ]. Journal of Plant Nutrition, 1999, 22 ( 8 ): 1315-1334.
- [ 18 ] SEILER G J, CAMPBELL L G. Genetic variability for mineral element concentrations of wild Jerusalem artichoke forage [ J ]. Crop Science, 2004, 44 ( 1 ): 289-292.
- [ 19 ] STREPKOV S M. Glucofructans of the stems of *Helianthus tuberosus* [ J ]. Doklady Akademii Nauk SSSR, 1959, 125: 216-218.
- [ 20 ] LAWRENCE D M, HALMER P, BOWLES D J. Mobilisation of storage reserves during germination and early seedling growth of sugar beet [ J ]. Physiologia Plantarum, 1990, 78 ( 3 ): 421-429.
- [ 21 ] ERBAŞ S, TONGUÇ M, ŞANLI A. Mobilization of seed reserves during germination and early seedling growth of two sunflower cultivars [ J ]. Journal of Applied Botany and Food Quality, 2016, 89: 217-222.
- [ 22 ] GUO S S, GE Y, NA JOM K. A review of phytochemistry, metabolite changes, and medicinal uses of the common sunflower seed and sprouts (*Helianthus annuus* L.) [ J ]. Chemistry Central Journal, 2017, 11 ( 1 ): 95.
- [ 23 ] HANSEN H B, ANDREASEN M, NIELSEN M, et al. Changes in dietary fibre, phenolic acids and activity of endogenous enzymes during rye bread-making [ J ]. European Food Research and Technology, 2002, 214 ( 1 ): 33-42.
- [ 24 ] 闫琦, 张世挺, 赵长明, 等. 高寒牧区不同菊芋品种茎叶青贮的饲用价值 [ J ]. 草业科学, 2018, 35 ( 6 ): 1568-1573.
- [ 25 ] MENESES M, MEGÍAS M D, MADRID J, et al. Evaluation of the phytosanitary, fermentative and nutritive characteristics of the silage made from crude artichoke (*Cynara scolymus* L.) by-product feeding for ruminants [ J ]. Small Ruminant Research, 2007, 70 ( 2/3 ): 292-296.
- [ 26 ] MCDONALD P, WATSON S J, WHITTENBURY R. The principles of ensilage [ J ]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 1966, 21 ( 1/2/3/4/5 ): 103-109.
- [ 27 ] KEADY T W J, MURPHY J J. The effects of ensiling and supplementation with sucrose and fish meal on forage intake and milk production of lactating dairy cows [ J ]. Animal Science, 1998, 66 ( 1 ): 9-20.
- [ 28 ] 周正, 曹海龙, 朱豫, 等. 菊芋替代玉米发酵生产乙醇的初步研究 [ J ]. 西北农业学报, 2008, 17 ( 4 ): 297-301, 305.
- [ 29 ] RINNE M, NOUSIAINEN J, HUHTANEN P. Effects of silage protein degradability and fermentation acids on metabolizable protein concentration; a meta-analysis of dairy cow production experiments [ J ]. Journal of Dairy Science, 2009, 92 ( 4 ): 1633-1642.
- [ 30 ] MEGÍAS M D, MENESES M, MADRID J, et al. Nutritive, fermentative and environmental characteristics of silage of two industrial broccolis (*Brassica oleracea* var. *Italica*) by-products for ruminant feed [ J ]. Inter-

- national Journal of Agriculture & Biology, 2014, 16 (2):307-313.
- [31] 赵芳芳,郑琛,李发弟,等.菊芋粕对泌乳奶牛的营养价值评定[J].草业学报,2011,20(6):264-269.
- [32] FAO.FAO yearbook of production 2000[M].Rome:FAO,2000.
- [33] HINDRICHSEN I K, WETTSTEIN H R, MACHMÜLLER A, et al. Digestive and metabolic utilisation of dairy cows supplemented with concentrates characterised by different carbohydrates[J]. Animal Feed Science and Technology, 2006, 126(1/2):43-61.
- [34] ROBERFROID M B. Inulin-type fructans: functional food ingredients[J]. The Journal of Nutrition, 2007, 137(11):2493S-2502S.
- [35] GÜENAGA K F, LUSTOSA S A S, SAAD S S, et al. Ileostomy or colostomy for temporary decompression of colorectal anastomosis[J]. Cochrane Database of Systematic Reviews, 2007(1):CD004647, doi: 10.1002/14651858.CD004647.pub2.
- [36] DELCENSERIE V, LONCARIC D, BONAPARTE C, et al. Bifidobacteria as indicators of faecal contamination along a sheep meat production chain[J]. Journal of Applied Microbiology, 2008, 104(1):276-284.
- [37] SEKINE K, OHTA J, ONISHI M, et al. Analysis of antitumor properties of effector cells stimulated with a cell wall preparation (WPG) of Bifidobacterium infantis[J]. Biological and Pharmaceutical Bulletin, 1995, 18(1):148-153.
- [38] FALONY G, LAZIDOU K, VERSCHAEREN A, et al. In vitro kinetic analysis of fermentation of prebiotic inulin-type fructans by Bifidobacterium species reveals four different phenotypes[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2009, 75(2):454-461.
- [39] LOH G, EBERHARD M, BRUNNER R M, et al. Inulin alters the intestinal microbiota and short-chain fatty acid concentrations in growing pigs regardless of their basal diet[J]. The Journal of Nutrition, 2006, 136(5):1198-1202.
- [40] VALDOVSKA A, JEMELJANOVS A, PILMANE M, et al. Alternative for improving gut microbiota: use of Jerusalem artichoke and probiotics in diet of weaned piglets[J]. Polish Journal of Veterinary Sciences, 2014, 17(1):61-69.
- [41] GOKARN R R, EITEMAN M A, MARTIN S A, et al. Production of succinate from glucose, cellobiose, and various cellulosic materials by the ruminal anaerobic bacteria *Fibrobacter succinogenes* and *Ruminococcus flavefaciens*[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 1997, 68(1/2):69-80.
- [42] 胡丹丹,郭婷婷,金亚东,等.果寡糖对泌乳早期奶牛瘤胃发酵及生产性能的影响[J].中国乳品工业, 2017, 45(10):6-10.
- [43] ZIOLECKI A, GUCZYŃSKA W, WOJCIECHOWICZ M. Some rumen bacteria degrading fructan[J]. Letters in Applied Microbiology, 1992, 15(6):244-247.
- [44] 黄亮,肖开庆,郑菲.菊糖对小白鼠消化吸收免疫功能及血糖的影响评价[J].食品与机械, 2009, 25(1):90-92.
- [45] 马越,苑函,陈红梅.苦荞-菊粉降糖饼干配方的研究[J].食品科技, 2010, 35(10):192-194.
- [46] ASH R W, PENNINGTON R J, REID R S. The effect of short-chain fatty acids on blood glucose concentration in sheep[J]. Biochemical Journal, 1964, 90(2):353-360.
- [47] BAIRD G D, LOMAX M A, SYMONDS H W, et al. Net hepatic and splanchnic metabolism of lactate, pyruvate and propionate in dairy cows in vivo in relation to lactation and nutrient supply[J]. Biochemical Journal, 1980, 186(1):47-57.
- [48] LEE K U, PARK J Y, KIM C H, et al. Effect of decreasing plasma free fatty acids by acipimox on hepatic glucose metabolism in normal rats[J]. Metabolism, 1996, 45(11):1408-1414.
- [49] GEBOES K P, LUYPAERTS A, DE PRETER V, et al. Evaluation of short- and long-term effects of inulin on colonic urea-nitrogen-metabolism using  $^{15}\text{N}$ -lactose-ureide[J]. Gastroenterology, 2003, 124(4):A687.
- [50] LEVRAT M A, RÉMÉSY C, DEMIGNÉ C. Influence of inulin on urea and ammonia nitrogen fluxes in the rat cecum: consequences on nitrogen excretion[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 1993, 4(6):351-356.
- [51] DE PRETER V, VANHOUTTE T, HUYS G, et al. Effects of *Lactobacillus casei* Shirota, *Bifidobacterium breve*, and oligofructose-enriched inulin on colonic nitrogen-protein metabolism in healthy humans[J]. American Journal of Physiology: Gastrointestinal and Liver Physiology, 2007, 292(1):G358-G368.
- [52] WEITKUNAT K, SCHUMANN S, PETZKE K J, et al. Effects of dietary inulin on bacterial growth, short-chain fatty acid production and hepatic lipid metabolism in gnotobiotic mice[J]. The Journal of Nutritional

- Biochemistry, 2015, 26(9): 929–937.
- [53] KOK N, ROBERFROID M, ROBERT A, et al. Involvement of lipogenesis in the lower VLDL secretion induced by oligofructose in rats [J]. British Journal of Nutrition, 1996, 76(6): 881–890.
- [54] FIORDALISO M, KOK N, DESAGER J P, et al. Dietary oligofructose lowers triglycerides, phospholipids and cholesterol in serum and very low density lipoproteins of rats [J]. Lipids, 1995, 30(2): 163–167.
- [55] HOLST J J, WINDELØV J A, BOER G A, et al. Searching for the physiological role of glucose-dependent insulinotropic polypeptide [J]. Journal of Diabetes Investigation, 2016, 7(S1): 8–12.
- [56] ROBERFROID M. Dietary fiber, inulin, and oligofructose: a review comparing their physiological effects [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1993, 33(2): 103–148.
- [57] DAUBIOL C A, TAPER H S, DE WISPELAERE L D, et al. Dietary oligofructose lessens hepatic steatosis, but does not prevent hypertriglyceridemia in obese Zucker rats [J]. The Journal of Nutrition, 2000, 130(5): 1314–1319.
- [58] ADOM K K, LIU R H. Antioxidant activity of grains [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(21): 6182–6187.
- [59] COSTA H, GALLEGOS M, TOMARO M L. Effect of UV-B radiation on antioxidant defense system in sunflower cotyledons [J]. Plant Science, 2002, 162(6): 939–945.
- [60] RIOS-GONZALEZ K, ERDEI L, LIPS S H. The activity of antioxidant enzymes in maize and sunflower seedlings as affected by salinity and different nitrogen sources [J]. Plant Science, 2002, 162(6): 923–930.
- [61] CHO M H, NO H K, PRINYAWIWATKUL W. Chitosan treatments affect growth and selected quality of sunflower sprouts [J]. Journal of Food Science, 2008, 73(1): S70–S77.
- [62] 杨凯舟, 翟晓娜, 王佳良, 等. 绿原酸协同抗氧化机理的电化学和光谱-色谱学研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(8): 2405–2413.
- [63] HERNÁNDEZ V, DEL CARMEN RECIO M, MÁÑEZ S, et al. A mechanistic approach to the *in vivo* anti-inflammatory activity of sesquiterpenoid compounds isolated from *Inula viscosa* [J]. Planta Medica, 2001, 67(8): 726–731.
- [64] LYB G, KNORRE A, SCHMIDT T J, et al. The anti-inflammatory sesquiterpene lactone helenalin inhibits the transcription factor NF- $\kappa$ B by directly targeting p65 [J]. The Journal of Biological Chemistry, 1998, 273(50): 33508–33516.
- [65] PAN L, SINDEN M R, KENNEDY A H, et al. Bioactive constituents of *Helianthus tuberosus* (Jerusalem artichoke) [J]. Phytochemistry Letters, 2009, 2(1): 15–18.
- [66] WATZL B, GIRRBACH S, ROLLER M. Inulin, oligofructose and immunomodulation [J]. British Journal of Nutrition, 2005, 93(Suppl.1): S49–S55.
- [67] YUAN X Y, CHENG M C, GAO M Z, et al. Cytotoxic constituents from the leaves of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) and their structure-activity relationships [J]. Phytochemistry Letters, 2013, 6(1): 21–25.
- [68] YUAN X Y, GAO M Z, XIAO H B, et al. Free radical scavenging activities and bioactive substances of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) leaves [J]. Food Chemistry, 2012, 133(1): 10–14.
- [69] GRIFFAUT B, DEBITON E, MADELMONT J C, et al. Stressed Jerusalem artichoke tubers (*Helianthus tuberosus* L.) excrete a protein fraction with specific cytotoxicity on plant and animal tumour cell [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA): General Subjects, 2007, 1770(9): 1324–1330.
- [70] CAMMUE B P A, THEVISSSEN K, HENDRIKS M, et al. A potent antimicrobial protein from onion seeds showing sequence homology to plant lipid transfer proteins [J]. Plant Physiology, 1995, 109(2): 445–455.
- [71] KHOSRAVI N, DARVISHI S, DAVARI K. Antimicrobial activity of aqueous and alcoholic extracts of Kurdistan propolis on *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* and *Pseudomonas aeruginosa* [J]. Scientific Journal of Kurdistan University of Medical Sciences, 2016, 20(6): 97–106.

# Nutritional Value and Biological Activity of Jerusalem Artichoke Feed and Its Regulation Effects on Animal Physiological Function

WANG Yue<sup>1</sup> XUE Fuguang<sup>1</sup> JIANG Linshu<sup>2</sup> XIONG Benhai<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Animal Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. College of Animal Science and Technology, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The Jerusalem artichoke is a perennial herb of the genus *Helianthus* in the Asteraceae family, originating in North America. The aerial part (stem and leaf) and underground part (tuber) of Jerusalem artichoke can be used as high quality animal feed raw material and feed additive. As a kind of forage grass, the contents of crude protein (CP) and calcium (Ca) in stems and leaves of fresh Jerusalem artichoke at the bud stage (11 to 14 weeks after emergence) are the peak and comparable with alfalfa powder. Moreover, the CP and Ca contents of Jerusalem artichoke silage are higher than those in corn silage, similar to oats, barley and legume silage, thus can be used as a partial substitute feed. In addition, the nutrient composition and some metabolites of Jerusalem artichoke change through various molecular signal transduction pathways during growth and development, which have potential important roles in biosynthesis and biodegradation. As a functional oligosaccharide, the inulin in Jerusalem artichoke tubers is not degraded by digestive enzymes in single stomach animals, but is directly delivered to the large intestine. It mainly acts as a probiotic in the gastrointestinal tract, improves the intestinal environment, and regulates glucose, lipid metabolism and protein metabolism. As bioactive substances, flavonoids, phenolic acids, terpenoids and a small amount of sterols, amino acids, polysaccharides and other compounds in stems, leaves and flowers of Jerusalem artichoke have been proved by a large number of animal clinical trials to have antioxidant, anti-inflammatory and bactericidal effects as well as certain toxic effects on a variety of tumor cells, with high medical value. This paper reviewed the nutritional characteristics of Jerusalem artichoke and dynamic change of metabolites in the process of development, summarized the Jerusalem artichoke silage fermentation characteristics and feeding value, expounded the regulation function of bioactive substances (mainly inulin, flavonoids, phenolic acids and sesquiterpenoids) in Jerusalem artichoke tuber and stem leaf on animal physiology function, in order to elaborate the development potential of Jerusalem artichoke resource and its effects on the improvement of the animal health. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(2):497-507]

**Key words:** Jerusalem artichoke; nutrient composition; feed additive; bioactive substances; functions