

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2024)03-0268-10

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2024.03.010

马铃薯渣资源化及废渣生物碱降解

缪增辉^{1,2}, 刘晓风², 姜红^{1,3*}

(1. 烟台中科先进材料与绿色化工产业技术研究院, 山东 烟台 264000; 2. 兰州理工大学生命科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050;

3. 中国科学院兰州化学物理研究所, 天然药物与化学测量中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 马铃薯加工过程中形成大量马铃薯渣, 因其含有大量水分和多种营养成分, 极易腐烂变坏, 严重污染环境。目前, 马铃薯渣资源化利用主要包括以薯渣为原料进行有效成分的提取和相关资源化产品开发, 如高蛋白饲料和酵素化制品。但在薯渣的高值化利用过程中, 较高含量的糖苷生物碱具有造成动物中毒、损害消化和神经系统的危害, 通过微生物进行糖苷生物碱的降解可以降低或者消除这种风险。综述马铃薯渣相关资源化利用开发及其薯渣利用中的糖苷生物碱降解的相关研究, 为马铃薯高值化利用提供更多的思路 and 方向。

关键词: 马铃薯渣; 多元化利用; 成分分析; 营养价值; 糖苷生物碱

Resource Utilization and Alkaloid Degradation of Potato Residue

MIAO Zenghui^{1,2}, LIU Xiaofeng², JIANG Hong^{1,3*}

(1. Yantai Zhongke Research Institute of Advanced Materials and Green Chemical Engineering, Yantai, Shandong 264000, China;

2. School of Life Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 3. Natural Medicine and Chemical Measurement Center, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: A significant amount of potato residue is generated during potato processing. This potato residue contains a high-water content and a variety of nutrients, making it highly susceptible to rotting and deterioration, which can lead to serious environmental pollution. Currently, the resourceful use of potato residue primarily involves the extraction of active ingredients and the development of related products, such as high-protein animal feed and enzyme products, utilizing potato residue as a raw material. However, the high levels of glycoalkaloids present in potato residues pose a risk of animal poisoning and can adversely affect the digestive and nervous systems. Fortunately, the degradation of glycoalkaloids by microorganisms can mitigate or eliminate this risk. This review focuses on the development of resource utilization related to potato residues and highlights research on the degradation of glycoalkaloids, aiming to

收稿日期: 2024-03-23

基金项目: 农业农村部、财政部国家马铃薯产业技术体系(CARS-09-P29); 东西部科技协作专项(23CXNJ0013); 中央引导地方科技发展资金项目(YDZD2023029); 甘肃省产业支撑计划项目(2023CYZC-41-03)。

作者简介: 缪增辉(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事食品工程研究。

*通信作者(Corresponding author): 姜红, 博士, 助理研究员, 主要从事马铃薯贮藏与加工研究, E-mail: jianghong@licp.cas.cn。

provide new ideas and directions of the high-value use of potato.

Key Words: potato residue; diversified utilization; component analysis; nutritional value; glucoside alkaloids

马铃薯起源于南美洲, 别名洋芋或土豆, 为世界第四大粮食作物。马铃薯于十七世纪中期引入中国, 后因其丰富的营养成分以及较高的产业价值, 马铃薯产业成为许多国家的主导产业。马铃薯渣为马铃薯在二次加工过程中产生的一种副产品, 每生产 1 t 马铃薯淀粉约产生 6.5~7.5 t 湿薯渣^[1,2]。马铃薯渣中含有大量营养物质, 若将其进行资源化开发与利用, 既可以节约资源, 又可以减少环境污染, 保护生态环境, 增加马铃薯副产物附加值, 提高经济效益和社会效益。

然而, 马铃薯渣中除了大量的营养物质外, 还含有一定量的糖苷生物碱。糖苷生物碱是在茄科植物中发现的一种次级代谢物, 属于含氮糖苷, 是通过 3-OH 基团连接到亲脂性甾体糖苷配基(茄啶)的三糖分子^[3]。糖苷生物碱作为一种抗性代谢物, 可以保护马铃薯免受病毒、细菌和昆虫的侵害^[4], 但当其作为动物饲料时, 过量的生物碱会造成动物中毒甚至死亡。糖苷生物碱还抑制胆碱酯酶活性, 过量摄入会麻痹中枢神经系统和呼吸系统。微生物降解以其代谢多样性、降解产物对食品和环境无二次污染等优点成为去除糖苷生物碱的首选方法。探索马铃薯渣中的主要成分、薯渣多元化利用及其糖苷生物碱降解具有重要理论和实践意义。

1 马铃薯渣的成分

1.1 淀粉

马铃薯渣中的淀粉含量虽然较鲜薯低, 但仍然是薯渣的一个重要组成部分。 α -D-吡喃葡萄糖作为淀粉主要原料, 化学式可用 $(C_6H_{10}O_5)_n$ 描述, n 可衡量葡萄糖的聚合程度, 反映含碳量。当葡萄糖被完全吸收, 并利用糖甙键将其联系在一起时, 便会产生出具有相同特性的共价高分子淀粉。淀粉可以分成直链淀粉和支链淀粉两类, 直链淀粉由 D-六环葡萄糖利用 α -1, 4-糖苷键紧

密连接^[5], 呈螺旋状; 支链淀粉则由 α -1, 4-糖苷键连接成主链, 同时通过 α -1, 6-糖苷键连接成多个细小的支链。淀粉作为马铃薯渣的重要组成部分^[6], 不仅是植物体内重要的贮藏营养素, 也是家畜和家禽必需营养素。

1.2 蛋白质

马铃薯蛋白主要包括糖蛋白、蛋白酶抑制剂和其他高分子量蛋白质。马铃薯蛋白的功能性质主要包括水合性质, 如持水力、溶解度, 蛋白质分子间的相互作用, 如沉淀作用、凝胶作用和表面性质, 如乳化性、起泡性。蛋白质良好的持水性可以改善产品的质地和口感; 高溶解度可以提高产品的营养价值和稳定性; 乳化性和起泡性在改善产品的质地和结构中发挥重要作用。此外, 马铃薯蛋白还具有抗氧化活性、抗肿瘤活性等性质^[7]。尽管马铃薯渣的蛋白质含量仅占干基含量的 4%, 但却具备丰富的蛋白质种类, 其中包括非特异性酯酰基水解酶, 以及胰蛋白酶抑制剂和胰凝乳蛋白酶抑制剂^[8], 使得其成为一种非常优秀的蛋白源。薯渣中蛋白质在高蛋白饲料生产中具有较大的应用潜力, 将其转化为高附加值的产品, 可实现资源的合理应用。

1.3 果胶

果胶由多个糖类构成, 结构与其他糖类相似, D-半乳糖醛酸是其重要组成部分。他们在植物生长过程中发挥重要作用, 例如果胶为植物细胞壁的重要组分, 尤其在初生细胞壁中含量丰富。果胶还参与植物的防御反应, 当植物受到病原体如细菌和真菌入侵时, 果胶被果胶降解酶降解, 产生去甲基酯化的果胶片段, 可作为激发子被植物体内的受体识别, 从而激活一系列防御反应, 保护植物免受病原体的侵害。在工业生产过程中, 如将马铃薯渣作为生产果胶的原料, 不仅增加马铃薯渣加工的附加值, 也可丰富果胶生产的原料来源^[9,10]。

1.4 纤维素

马铃薯渣中的纤维素为马铃薯加工中产生的副产物之一。马铃薯渣中纤维素含量相对较高, 为膳食纤维的良好来源。马铃薯渣中膳食纤维质量约占总质量的50%, 其中纤维素占膳食纤维的较大部分^[11,12]。纤维素为一种复杂的多糖, 以 β -1, 4-糖苷键连接, 是植物细胞壁重要组成部分。马铃薯渣纤维素呈白色或淡黄色粉末状, 具有良好的分散性和稳定性, 马铃薯渣颗粒大小、形状和分布对纤维素的理化性质和应用性具有重要影响。马铃薯渣纤维素具有良好的生物相容性和可降解性, 其化学性质稳定, 不易被酸碱等化学物质破坏。

1.5 脂肪及矿物质

马铃薯渣的干物料中粗脂肪含量较低, 大约占0.16%^[13], 马铃薯渣中的脂肪主要来源于马铃薯本身的油脂成分, 其在加工过程中被残留在渣滓中。除了脂肪以外, 马铃薯渣还含有丰富的磷、钠、氯、硫、镁、钙、铁及其他矿物质元素^[14]。

1.6 其他

马铃薯渣具有微生物特性, 研究表明, 马铃薯渣中的微生物包含28种细菌、5种霉菌和1种酵母菌^[15,16]。酵母菌可以利用马铃薯渣中的糖类有机物进行发酵, 产生酒精、二氧化碳等产物, 同时也有助于改善马铃薯渣的物理和化学性质。微生物通过分泌各种酶类, 如淀粉酶、纤维素酶, 降解马铃薯渣中的淀粉、纤维素等有机物, 将其转化为小分子物质, 便于后续的多元化利用。

2 马铃薯渣的多元化利用与开发

2.1 以马铃薯渣为原料提取有效成分

2.1.1 膳食纤维

膳食纤维是指一般不易被消化的食物营养素, 主要来自于植物细胞壁, 包含纤维素、木质素、半纤维素和果胶。纤维素能够吸水、防止形成溃疡和平衡血液中葡萄糖含量^[17]。当前, 国内对小麦、甜菜、甘蔗、木薯等作物废渣中膳食纤维的利用研究较为丰富, 而关于马铃薯的则相对较少。

马铃薯渣中膳食纤维占干重的19.65%, 具有较高的持水力和膨胀力。王宏勋等^[18]采用微生物发酵法处理马铃薯渣, 结果表明可溶性膳食纤维的生产力可达6.13 kg/L。袁惠君等^[19]研究多种霉菌和发酵方式处理马铃薯废渣, 结果显示一些发酵菌株均能够显著提升其膳食纤维的收获率, 其中, 最高收获率比不加霉菌对照组高出约1倍。

2.1.2 糖类

目前, 国外在利用马铃薯废渣生产糖类物质方面的研究比较丰富。Barnett等^[20]采用 α -淀粉酶和普鲁兰酶将马铃薯废渣转化为青麦芽糖水溶液, 然后接种出芽短梗霉(*Aureobasidium pullulans*)进行发酵生产普鲁兰糖。Yokoi等^[21]在马铃薯废渣和玉米浸泡水的基础上, 通过混合菌株连续发酵法成功生产氢气, 产量可达到7.2 mol H₂/mol-glucose。

2.1.3 果胶

以马铃薯渣作为原材料, 通过酸法、碱法和酶法等多种技术, 可以获得多种质量优异的果胶^[22]。果胶有增稠、乳化、稳定和凝胶作用, 广泛应用于食品工业, 可作为包装膜、增稠剂、凝胶剂、乳化剂、稳定剂、悬浮剂等。以马铃薯渣为原料, 用经诱变的酵母为菌种, 发酵法提取马铃薯渣果胶, 当接种量为10%、发酵温度35℃、发酵时间36 h和pH为5.0时, 马铃薯渣果胶的提取效果最佳^[23]。洪雁和顾正彪^[24]采用水法、酸法、酸法结合微波法提取马铃薯渣果胶, 结果表明, 酸法及酸法与微波结合法提取得到低酯果胶, 而水法提取得到高酯果胶。王文霞等^[25]以马铃薯渣为原料, 采用低温短时稀碱法提取马铃薯果胶, 果胶得率为10.92%, 且不含甲酯化部分。通过酶法将薯渣脱除淀粉和蛋白质后, 再分别采用盐酸法、柠檬酸法、碱性磷酸盐法和复合盐法4种方式从中获得果胶, 共取得了4种马铃薯果胶多糖, 其中复合盐法和碱性磷酸盐法提取果胶多糖得率较高, 分别为21.01%和29.89%, 盐酸法和柠檬酸法得率分别为12.55%和16.86%。杨希娟和党斌^[26]通过酶法萃取马铃薯渣获得的果胶纯度好、得率大、无铝残, 且大分子碳水化合物浓度低。

2.2 马铃薯渣资源化产品的开发

2.2.1 高蛋白饲料

将马铃薯鲜渣和干渣进行微生物发酵,可提升其蛋白质和粗纤维含量。马铃薯废渣中含有大量蛋白质,吕佩玉^[27]研究发现,配有50%马铃薯废渣的日粮最适合于阉牛,可提高其采食量和增重率。但这种马铃薯饲料湿度高,易变质,需即时喂食。赵萍和张珍^[28]研究发现,通过微生物发酵可获得高质量蛋白饲料,薯渣经过微生物发酵处理后,干重由4.62%增至57.49%。Gélinas和Barrette^[29]发现利用酵母菌发酵法可提高马铃薯渣中蛋白质含量,发酵后干基中蛋白质含量升至11%~12%。此外,王君^[30]研究指出,经过发酵处理的薯渣作为饲料使用,可提高动物的日均增重,降低生产成本。张世仙等^[31]采用碱解法从薯渣中提取水溶性蛋白,可得到含量为40%的粗蛋白产品。

利用菌种发酵高蛋白饲料的过程中,用于饲料发酵的菌种必须具备以下几个特点:首先,可以有效地利用碳源和氮源、菌种繁殖速度快、菌体蛋白含量高;其次,菌种本身无毒无害、无致病性,在发酵过程中不会产生有毒物质;再次,菌种特征稳定,表达稳定,不易突变和衰退。马铃薯渣饲料化一般分为单菌发酵和混菌发酵^[32]。Aziz和Mohsen^[33]发现,将马铃薯渣经单菌发酵、混菌发酵、镰刀菌属和酵母菌发酵,能有效获得富含营养的马铃薯薯渣微生物饲料。此外,通过接种镰刀菌属和酵母菌来生产微生物蛋白饲料,在发酵过程中用酸和伽马射线处理后,能显著增加马铃薯渣的蛋白质含量。孙展英等^[34]研究表明,通过将枯草芽孢杆菌、产朊假丝酵母、曲霉和植物乳球菌以2:3:3:2的比例混合在一起,可有效改善马铃薯渣的真蛋白质质量,降低粗纤维比例。分析发酵马铃薯渣的消化代谢发现,相比于未经处理的马铃薯,其中的真蛋白质、粗纤维、粗脂肪以及氨基酸的表观消化率都有显著改善。而Lee等^[35]在此基础上,进一步改进了马铃薯渣的营养成分,将其转变为富含多糖、蛋白质、有机物的饲料。通过在固态发酵过程中增加氮元素,可以在2~5 d内制造出15.0%~32.4%的高蛋白

质饲料。

2.2.2 薯渣酵素化制品

将果蔬中的有机废弃物通过厌氧发酵制作具有高附加值的环保酵素(生态酶素),是处理有机废弃物的良好解决方案^[36];环保酵素在修复重金属和有机物污染土壤,改善土壤结构功能等土壤环境治理领域均具有较好的效果,并且环保酵素中含有大量的营养物质和有益微生物,可用于农业种植,从而有效降低农业生产中化肥和农药的施用,从源头上防止农业污染的发生,保护农田生态环境^[36]。将马铃薯渣与辅料混合后,通过特定的发酵技术进行处理,利用微生物的代谢作用,将马铃薯渣中的有机物质转化为酵素原液,通过提取和浓缩,去除多余水分和杂质,得到高浓度酵素液体。此外,通过喷雾干燥、真空干燥等技术,可有效将酵素液体转变成细小的固体粉末或颗粒。采用马铃薯渣作为酵素化制品的主料,同时结合多种辅料,所生产的酵素具有丰富的维生素C、氨基酸、多糖等营养成分^[37]。

2.2.3 土壤改良剂

粉煤灰是煤粉燃烧后排放的粉状灰粒,来源于火力发电厂、冶炼厂、化工厂等用煤企业。农业利用粉煤灰方式有填坑造地、贮灰厂纯灰种植和用做土壤改良剂、肥料等^[38]。马铃薯渣含水量较高,难保存,易腐烂。马铃薯渣与粉煤灰结合后可调试废渣干湿比^[39]。粉煤灰中含有碱性金属,可与土壤中的物质发生碱性反应,因此可通过调配比例用于改良相应的酸性或碱性土壤^[40]。粉煤灰中含有丰富的磷钾元素,与马铃薯废渣结合后作为土壤改良剂,可弥补废渣中钾元素的不足,进而为土壤提供充足的磷钾元素^[41]。两者结合后,马铃薯废渣对粉煤灰有促进释钾的作用。粉煤灰较大的比表面积和碱性有助于重金属的沉淀,可固化废渣中含有的重金属,作为土壤改良剂可以促进植物对土壤中重金属的吸收^[39]。

El-Naggar等^[42]以膨润土和粉煤灰为处理添加剂,将马铃薯淀粉加工的废水和废渣分别制成土壤改良剂A和土壤改良剂B;在膨润土与土壤改

良剂A混合后,膨润土迅速固定了废水中的氨氮(NH_3),形成铵根离子(NH_4^+),以植物可吸收的铵态氮形式储存在膨润土内,降低废水中的氨氮浓度。莫钊宇^[43]将土壤改良剂A与膨润土结合,发现随着膨润土的增加,土壤改良剂A中的有效钾含量出现明显下降,证明膨润土可控制钾元素的缓释。此外,潘炎烽等^[44]通过将土壤改良剂A与膨润土结合,发现随膨润土的添加量增多有效磷含量显著下降,证明可通过控制膨润土比例控制有效磷的释放。王长垒^[45]将土壤改良剂B与膨润土结合,随着粉煤灰量的增加,其有效钾含量并未增加,证明粉煤灰中虽然有较丰富的钾元素,但有效钾含量低,推测马铃薯渣对于钾离子释放有一定的调节作用。

2.2.4 酒精

马铃薯渣因含有纤维素、半纤维素、淀粉等成分,还可以用来生产酒精。乙醇是燃油的增氧剂,使汽油增加内氧,充分燃烧,既节能又环保。乙醇还可经济有效降低芳烃、烯烃含量,降低炼油厂的改造费用,达到新汽油标准,优势明显^[46]。当前国内燃料酒精发展以“不与人争粮和争地”为基本原则,提倡以红薯、木薯、甜高粱、秸秆等非粮作物为原料及原料多元化生产酒精^[47]。以马铃薯渣为原料生产酒精的研究较少,且未形成产业化,其作为原材料,亦可节约资源,保护环境^[48]。

2.2.5 黏合剂

马铃薯渣所含的果胶具有黏接性,淀粉糊化后也具有黏接性,因此马铃薯渣具有改性制备为胶黏剂的潜质。将马铃薯渣制备为黏合剂必须充分破坏薯渣的细胞壁结构和大分子纤维素,使具有黏接作用的有效成分释放出来,同时减小体系中的颗粒粒径,并改善体系的均匀性和流动性。使用马铃薯渣作为原料,创造出一种全新的吸附性能和黏合性能的物质,可高效捕获 Pb^{2+} 和 Hg^{2+} ,并在短时间内完成净化。程力等^[49]研究表明,由于加工过程中薯渣结构的变化,导致细胞壁和纤维素损失,并且经过一系列的氧化反应,使其流动性有所提升,将其作为一种新型粘合剂,可广

泛适用于瓦楞纸等特种材料的制备。

2.2.6 沼 气

随着沼气厌氧原料的日益丰富,马铃薯渣可以作为沼气发酵的原料。马铃薯渣的主要成分是残余淀粉和纤维素,含有细菌产生醇和酸所需的各种营养素。这些成分在发酵性细菌的作用下,可逐渐分解生成简单的糖类,进一步转化为有机酸和醇类,最终被兼性厌氧菌分解产生甲烷和二氧化碳^[50]。

综上,马铃薯渣的多元化利用不仅实现了废弃物的有效利用(图1),还减轻了环境治理成本,增加了马铃薯副产物的附加值,提高经济效益和社会效益。

3 薯渣饲料化过程中糖苷生物碱降解

3.1 薯渣中的糖苷生物碱

糖苷生物碱是植物生长过程中产生的有毒次生代谢物。虽然茎叶中的糖苷生物碱对马铃薯病虫有一定的驱拒性,但是糖苷生物碱也具有损害哺乳动物消化系统和神经系统的特点,表现出致畸和胚胎毒性。动物中毒可引起一系列症状,包括呕吐、腹泻、胃肠功能障碍、意识丧失、抽搐、休克,甚至死亡^[51]。马铃薯渣中含有大量糖苷生物碱。马铃薯糖苷生物碱衍生自茄碱糖苷配基,并包括碳水化合物侧链。马铃薯渣中的糖苷生物碱主要由 α -卡茄碱和 α -茄碱组成,两者之和约占马铃薯渣中糖苷生物碱的95%。 α -卡茄碱的CAS编号为20562-03-2,化学式为 $\text{C}_{45}\text{H}_{73}\text{NO}_{14}$,分子量为852.06, α -卡茄碱分子由1个茄啶与1个D-葡萄糖分子相连,D-葡萄糖分子的 C_2 和 C_4 上再分别接上2个L-鼠李糖分子。 α -卡茄碱发生水解时脱除1个L-鼠李糖分子,生成 β_1 -卡茄碱和 β_2 -卡茄碱, β_1 -卡茄碱和 β_2 -卡茄碱再分别脱除另1个L-鼠李糖生成 γ -卡茄碱, γ -卡茄碱在水解脱除D-葡萄糖分子即生成茄啶。 α -茄碱的CAS编号为20562-02-1,化学式为 $\text{C}_{45}\text{H}_{73}\text{NO}_{15}$,分子量为868.06, α -茄碱分子由1个茄啶与1个D-半乳糖分子相连,D-半乳糖分子的 C_2 和 C_3 上再分别接上1个L-鼠李糖分子和1个D-葡萄糖分子。 α -茄碱发生水

解时脱除 1 个 D-葡萄糖分子或 L-鼠李糖分子, 生成 β_1 -茄碱和 β_2 -茄碱, β_1 -茄碱和 β_2 -茄碱再分别脱除

1 个 L-鼠李糖或 D-葡萄糖分子生成 γ -卡茄碱, γ -卡茄碱再水解脱除 D-半乳糖分子即生成茄啶^[52]。

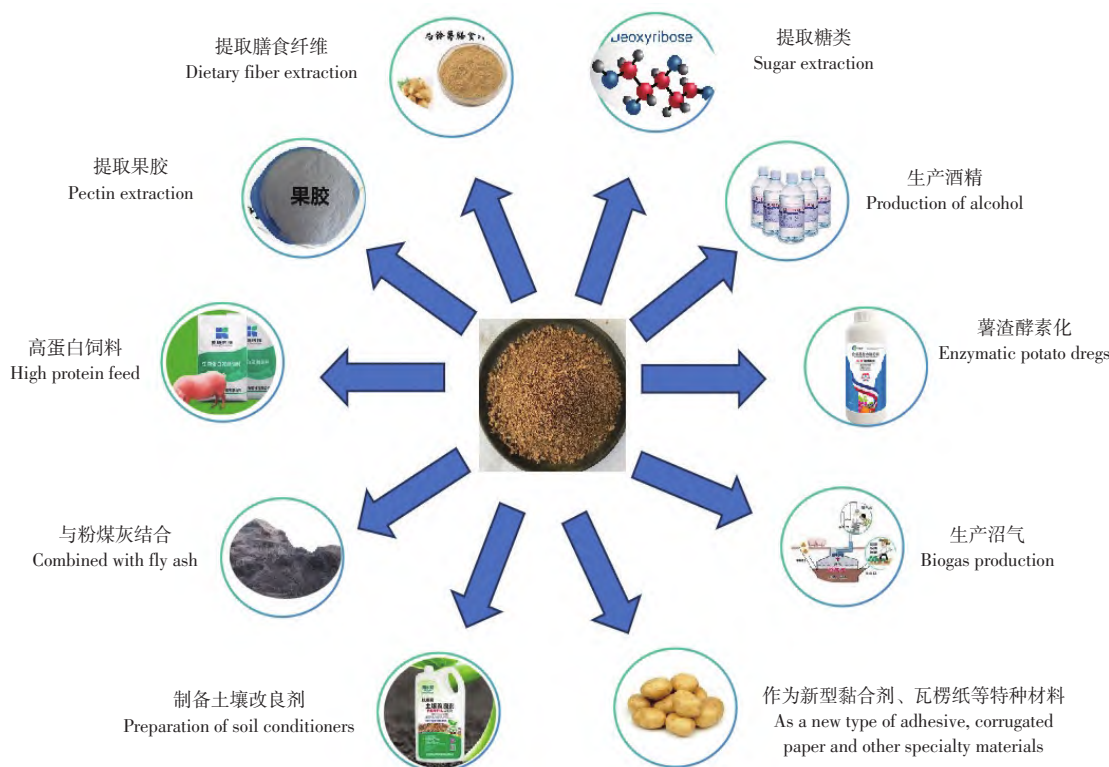


图 1 马铃薯渣综合利用示意图

Figure 1 Schematic diagram of comprehensive utilization of potato residue

3.2 薯渣糖苷生物碱的降解

糖苷生物碱表现出杀真菌剂和杀虫剂活性, 有助于防御马铃薯病虫害。而高含量糖苷生物碱既可以影响块茎品质, 又可引起潜在的安全问题^[53]。可通过物理、化学和微生物等方法来降解马铃薯渣中的糖苷生物碱。在这 3 种方法中微生物降解方法具有环保、可持续等优点。利用微生物对薯渣进行发酵处理, 可以分解部分糖苷生物碱, 降低其毒性。同时, 发酵还可以提高薯渣的营养成分和适口性。对微生物降解糖苷生物碱的研究表明, α -鼠李糖苷酶、 β -葡萄糖苷酶和 β -半乳糖苷酶可用于糖苷生物碱的脱毒。Hennessy 等^[54]研究表明, 在节杆菌 (*Arthrobacter* sp.) 中存在与糖苷生物碱脱糖有关的基因簇, 节杆菌 S41 能够以

α -卡茄碱和 α -茄碱为唯一碳源生长, 表明该菌株能够降解这两种化合物。该基因簇包括 β -D-半乳糖苷酶、 β -D-葡萄糖苷酶和 α -L-鼠李糖苷酶, 将其克隆到 pET15b 载体上, 在大肠杆菌 TOP10 细胞中进行异源表达, 再通过薄层色谱分离技术进行分离, 发现该基因簇可降解 α -茄碱和 α -卡茄碱, 释放茄碱。Wang 等^[55]表明盐生谷氨酸杆菌 (*Glutamicibacter halophytocola* S2) 具有 β -D-半乳糖苷酶、 β -D-葡萄糖苷酶和 α -L-鼠李糖苷酶等基因簇, 可高效降解 α -茄碱和 α -卡茄碱。同时, 鉴定了 β -半乳糖苷酶、 β -葡萄糖苷酶和 α -鼠李糖苷酶 3 种去糖基化酶降解 α -茄碱和 α -卡茄碱的具体步骤, 这些发现有助于理解昆虫肠道微生物的解毒机制。这 3 种多功能酶均具有较高的糖苷水解

活性和确定的基因序列信息,在马铃薯渣去除糖苷生物碱中具有一定应用价值。Song等^[56]首次在克劳氏碱盐芽孢杆菌(*Alkalihalobacillus clausii*) PA21中表达和纯化了能够降解糖苷生物碱的酶,并利用降解酶蛋白探索了糖苷生物碱的降解途径。其研究表明,降解酶从非还原末端开始,向还原末端进发,依次移除糖基化单位。此外,从糖苷生物碱中裂解的糖基化单元可以用作克劳氏碱盐芽孢杆菌PA21生长的碳源。菌株PA21具有糖苷水解酶,可有效降解 α -茄碱和 α -卡茄碱,同时对糖苷生物碱积累相关的内生细菌有调控作用。宋菲等^[57]从发芽绿化的马铃薯块茎中分离内生菌,采用以糖苷生物碱为唯一碳源的无机培养基进行培养筛选,筛选出一株可以高效降解糖苷生物碱的贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*) C11,其在细胞内可能通过脱糖基化去除三糖侧链,生成茄啶,后者可能代谢为胆固醇,再被微

生物代谢利用,从而达到解毒的效果。且菌株C11为芽孢杆菌,形成的孢子能够在各种土壤环境和植物表面繁殖并长时间存活,从而获得更为持久的糖苷生物碱降解能力。C11可用于制作菌剂,且不含质粒,不存在耐药分子转移的风险。同时C11不具有溶血性,不产生有害代谢物质,对多种病原菌均具有良好的抑制作用,可用于采后马铃薯表面以降低在贮藏期间马铃薯中糖苷生物碱的含量。鉴于糖苷生物碱的复杂性,还需要结合多种方法和手段,如通过转录组测序技术结合蛋白质表达和功能性研究,继续研究并揭示微生物菌株降解糖苷生物碱的相关分子机制,从而为开发高效降解糖苷生物碱的菌株提供基础。

综上,微生物降解是有效去除马铃薯糖苷生物碱的首选方法(表1),因微生物资源丰富,且对环境和薯渣没有二次污染,在糖苷生物碱降解中受到较多研究者的关注。

表1 马铃薯渣糖苷生物碱的降解

Table 1 Degradation of glucoside alkaloids in potato residue

菌株 Strain	降解效果 Degradating effect	参考文献 Reference
节杆菌 S41 <i>Arthrobacter</i> sp. S41	以 α -卡茄碱和 α -茄碱为唯一碳源生长,用 α -茄碱和 α -卡茄碱孵育大肠杆菌细胞裂解产物茄尼定,通过薄层色谱分离技术分析表明,该基因簇可降解 α -茄碱和 α -卡茄碱,释放茄碱	[54]
盐生谷氨酸杆菌 S2 <i>G. halophytocola</i> S2	具有多功能性,可高效降解 α -茄碱和 α -卡茄碱,有助于理解昆虫肠道微生物的解毒机制	[55]
克劳氏碱盐芽孢杆菌 PA21 <i>A. clausii</i> PA21	具有糖苷水解酶,可有效降解 α -茄碱和 α -卡茄碱,对糖苷生物碱积累相关的内生细菌有调控作用	[56]
克劳氏碱盐芽孢杆菌 PA21 <i>A. clausii</i> PA21	通过将糖苷生物碱酶与糖苷生物碱一起孵育分析降解产物,结果表明 α -茄碱被 β -葡萄糖苷酶、 α -鼠李糖苷酶和 β -半乳糖苷酶降解为 β -龙葵碱、 β -龙葵碱、 γ -龙葵碱。同时, α -卡茄碱被 β -葡萄糖苷酶、 α -鼠李糖苷酶和 β -半乳糖苷酶降解为 β -卡茄碱、 β -卡茄碱、 γ -卡茄碱和茄碱	[56]
贝莱斯芽孢杆菌 C11 <i>B. velezensis</i> C11	以糖苷生物碱为唯一碳源,在细胞内可能通过脱糖基化去除三糖侧链,生成茄啶,后者可能代谢为胆固醇,再被微生物代谢利用,从而达到解毒的效果	[57]

4 展 望

中国作为马铃薯生产大国,近年来,因马铃薯产业带来的较高经济和社会效益使得马铃薯加工业蓬勃发展,也在加工过程中形成了大量马铃薯渣。因此,将马铃薯渣资源化可实现马铃薯的

高效利用,如有效成分的提取利用和以其为原料进行产品开发。马铃薯渣具有丰富的蛋白质、果胶、膳食纤维等,固态发酵马铃薯渣生产高蛋白饲料,结合作物秸秆、植株秧蔓等生产配合饲料,可提高农业废弃物利用率,促进相关系列饲料产品开发是马铃薯渣处理最具发展潜力的方

向;果胶具有良好的增稠、乳化和凝胶作用,是优良的药物制剂基质,提高马铃薯渣果胶的生产工艺,生产优质果胶,可满足国内外市场的迫切需求;马铃薯渣中含有丰富的纤维素和半纤维素,纤维素酶可以将纤维质原料降解为D-葡萄糖,被酵母利用转化为酒精。随着化石燃料的枯竭及其对环境影响的日益严重,燃料酒精的发展已成必然,以马铃薯渣为原料生产燃料酒精,既能有效且大量地转化利用马铃薯渣,又能避免资源浪费及环境污染,属非粮化及多元化生产燃料酒精,是马铃薯渣利用的理想途径;利用马铃薯渣制作发酵培养基、生产各种有机物料是进行薯渣增值的重要研究方向。马铃薯加工副产物的资源化利用既可以避免资源浪费,又可以解决环境污染问题。此外,马铃薯渣中较高的生物碱含量是高品质动物饲料开发的困扰之一,近年来通过研究微生物降低薯渣中糖苷生物碱的含量,开发高品质动物饲料,保证饲用后正常的消化和代谢过程是降低饲用风险的必然选择。综上,马铃薯资源化利用前景广阔且充满机遇。推动马铃薯渣在多个领域综合利用,具有实现马铃薯渣资源化利用和保护环境的双重意义。

[参 考 文 献]

- [1] 鞠栋,木泰华,孙红男,等.不同工艺马铃薯粉物化特性及氨基酸组成比较[J].核农学报,2017,31(6):1100-1109.
- [2] 顾正彪,程力,洪雁,等.马铃薯淀粉生产过程中薯渣的有效利用技术[J].食品科学技术学报,2013,31(1):64-69.
- [3] Milner S E, Brunton N P, Jones P W, *et al.* Bioactivities of glycoalkaloids and the iraglycones from *Solanum* species [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(8): 3454-3484.
- [4] Sinden S L, Sanford L L, Osman S F. Glycoalkaloids and resistance to the Colorado potato beetle in *Solanum chacoense* Bitter [J]. American Journal of Potato Research, 1980, 57(7): 331-343.
- [5] Gujral H, Sinhmar A, Nehra M, *et al.* Synthesis, characterization, and utilization of potato starch nanoparticles as a filler in nanocomposite films [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 186: 155-162.
- [6] 韩文芳,林亲录,赵思明,等.直链淀粉和支链淀粉分子结构研究进展[J].食品科学,2020,41(13):267-275.
- [7] 吴登宇,王露晨,孙世奥,等.马铃薯蛋白生物活性肽的研究进展[J].粮食与油脂,2023,36(10):13-18.
- [8] Pots A M, Gruppen H, Diepenbeek R V, *et al.* The effect of storage of whole potatoes of three cultivars on the patatin and protease inhibitor content; a study using capillary electrophoresis and MALDI-TOF mass spectrometry [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1999, 79: 1557-1564.
- [9] 张学杰,郭科,苏艳玲.果胶研究新进展[J].中国食品学报,2010,10(1):167-174.
- [10] 王卓,顾正彪,洪雁.马铃薯渣的开发与利用[J].中国粮油学报,2007(2):133-136.
- [11] 李芳蓉,韩黎明,王英,等.马铃薯渣综合利用研究现状及发展趋势[J].中国马铃薯,2015,29(3):175-181.
- [12] 郑建仙.功能性膳食纤维[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [13] 何国菊,曹宇.复合菌混合发酵马铃薯薯渣与茎叶的工艺研究[J].河南农业科学,2016,45(9):158-162.
- [14] 曾凡逵,许丹,刘刚.马铃薯营养综述[J].中国马铃薯,2015,29(4):233-243.
- [15] 刘琳,赵宇慈,苏德花,等.马铃薯渣饲料化利用研究进展[J].中国马铃薯,2022,36(1):63-70.
- [16] Mayer F, Hillebrandt J O. Potato pulp: microbiological characterization, physical modification, and application of this agricultural waste product [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1997, 48(4): 435-440.
- [17] 曾凡逵,周添红,刘刚.马铃薯淀粉加工副产物——薯渣的综合利用[J].农业工程技术:农产品加工业,2014(12):27-31.
- [18] 王宏勋,吴疆鄂,张晓昱.发酵土豆渣制取膳食纤维的初步研究[J].河南工业大学学报:自然科学版,2005(2):79-81.
- [19] 袁惠君,赵萍,巩慧玲.微生物发酵对马铃薯渣膳食纤维得率及性质的影响[J].兰州理工大学学报,2005(5):75-77.
- [20] Barnett C, Smith A, Scanlon B, *et al.* Pullulan production by

- Aureobasidium pullulans* growing on hydrolysed potato starch waste [J]. Carbohydrate Polymers, 1999, 38(3): 203–209.
- [21] Yokoi H, Maki R, Hirose J, *et al.* Microbial production of hydrogen from starch-manufacturing wastes [J]. Biomass and Bioenergy, 2002, 22(5): 389–395.
- [22] 李智广, 高金波, 姜海花, 等. 利用马铃薯薯渣提取果胶的方法 [P]. 中国: CN101891840A, 2010–11–24.
- [23] 王文霞, 张显斌, 张慧君, 等. 不同提取方法对马铃薯果胶多糖组成特性的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(12): 150–156.
- [24] 洪雁, 顾正彪. 不同提取工艺对马铃薯渣果胶性质的影响 [J]. 食品科学, 2009, 30(24): 202–205.
- [25] 王文霞, 刘博, 陈瑞国, 等. 马铃薯渣碱法提取果胶的组成和乳化特性 [J]. 中国马铃薯, 2022, 36(2): 147–154.
- [26] 杨希娟, 党斌. 马铃薯渣中提取果胶的工艺优化及产品成分分析 [J]. 食品科学, 2011, 32(4): 25–30.
- [27] 吕佩玉. 处理马铃薯废弃物做牛饲料 [J]. 饲料工业, 1991(10): 16–17.
- [28] 赵萍, 张珍. 马铃薯渣生料发酵饲料生产 [J]. 食品与发酵工业, 2001(3): 82–84.
- [29] Gélinas P, Barrette J. Protein enrichment of potato processing waste through yeast fermentation [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(5): 1138–1143.
- [30] 王君. 发酵马铃薯渣的制备及其在动物生产中的应用 [J]. 饲料研究, 2019, 42(8): 123–126.
- [31] 张世仙, 刘长益, 金茜. 马铃薯皮渣中水溶性蛋白质提取工艺研究 [J]. 南方园艺, 2018, 29(1): 5–8.
- [32] 曾凡逵, 周添红, 刘刚. 马铃薯淀粉加工副产物资源化利用研究进展 [J]. 农业工程技术: 农产品加工业, 2013(11): 33–37.
- [33] Aziz N H, Mohsen G I. Bioconversion of acid- and gamma-ray-treated sweet potato residue to microbial protein by mixed cultures [J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 2002, 29(5): 264–267.
- [34] 孙展英, 刘树栋, 安文亨, 等. 不同菌种固态发酵马铃薯渣对其营养价值影响研究 [J]. 饲料研究, 2014(11): 12–15.
- [35] Lee W S, Chen I C, Chang C H, *et al.* Bioethanol production from sweet potato by co-immobilization of saccharolytic molds and *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Renewable Energy, 2012, 39(1): 216–222.
- [36] Patel B S, Solanki B R, Mankad A U. Effect of eco-enzymes prepared from selected organic waste on domestic waste water treatment [J]. World Journal of Advanced Research and Reviews, 2021, 10(1): 323–333.
- [37] 李方志, 李丝丝, 王殷, 等. 环保酵素改良土壤有机质与磷素的探索性研究 [J]. 环境科学导刊, 2016, 35(5): 65–69.
- [38] 刘贤响, 毛丽秋, 尹笃林. 粉煤灰高值化应用的研究进展 [J]. 化工环保, 2009, 29(1): 43–46.
- [39] Qian G, Zhang H, Zhang X, *et al.* Modification of MSW fly ash by anionic chelating surfactant [J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 121(1): 251–258.
- [40] Wang P, Li R, Guo D, *et al.* The influences of fly ash on stabilization for Cd in contaminated soils [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(1): 43505–43513.
- [41] 冯跃华, 胡瑞芝, 张杨珠, 等. 几种粉煤灰对磷素吸附与解吸特性的研究 [J]. 应用生态学报, 2005(9): 1756–1760.
- [42] El-Naggar A, El-Naggar A H, Shaheen S M, *et al.* Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 241(7): 458–467.
- [43] 莫钊宇. 马铃薯淀粉加工废弃物的再利用研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- [44] 潘炎烽, 谢华丽, 周春晖, 等. 吸附性矿物膨润土对肥料的控释作用初探 [J]. 浙江工业大学学报, 2006(4): 393–397.
- [45] 王长奎. 粉煤灰场复垦土壤养分含量及其与土壤理化性质的响应研究 [J]. 安徽农业科学, 2019, 47(9): 64–67.
- [46] 贾树彪, 李盛贤, 吴国峰. 新编酒精工艺学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [47] 廖兴华, 夏延斌, 周传云, 等. 燃料酒精的发展现状和研究趋势 [J]. 中国酿造, 2008(10): 20–23.
- [48] 苏楠楠, 王慕华, 萧晋川, 等. 马铃薯渣发酵酒精的研究 [J]. 科学技术与工程, 2011, 11(23): 5714–5717.
- [49] 程力, 顾正彪, 王鹏, 等. 废弃马铃薯渣改性制备瓦楞纸粘合剂研究 [J]. 环境工程学报, 2010, 4(9): 2125–2130.

- [50] 王程, 霍冀川, 刘佳琪, 等. 高产单细胞蛋白酵母的诱变育种及培养条件优化 [J]. 现代农业科技, 2010(9): 16–21.
- [51] Langkilde S, Mandimika T, Schröder M, *et al.* A 28-day repeat dose toxicity study of steroidal glycoalkaloids, alpha-solanine and alpha-chaconine in the Syrian Golden hamster [J]. Food and Chemical Toxicology, 2009, 47(6): 1099–1108.
- [52] 曾凡逵. 马铃薯糖苷生物碱的结构特征、生物合成、毒性及加工对其含量的影响 [J]. 中国马铃薯, 2022, 36(2): 155–164.
- [53] Friedman. Potato glycoalkaloids and metabolites: Roles in the plant and in the diet [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(23): 8655–8681.
- [54] Hennessy R C, Nielsen S D, Greve-Poulsen M, *et al.* Discovery of a bacterial gene cluster for deglycosylation of the toxic potato steroidal glycoalkaloids α -chaconine and α -solanine [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(5): 1390–1396.
- [55] Wang W, Du G, Yang G, *et al.* A multifunctional enzyme portfolio for α -chaconine and α -solanine degradation in the *Phthorimaea*-*perculella* gut bacterium *Glutamicibacter halophytocola* S2 encoded in a trisaccharide utilization locus [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 1023698.
- [56] Song F, Li C, Zhang N, *et al.* *Alkalihalobacillus clausii* PA21 transcriptome profiling and functional analysis revealed the metabolic pathway involved in glycoalkaloids degradation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242(Pt): 124682.
- [57] 宋菲, 李晨, 闫子茹, 等. 一株高效降解马铃薯糖苷生物碱菌株的筛选鉴定及降解特性研究 [J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(1): 37–43.