

菊芋作为能源植物的研究进展

刘祖昕 谢光辉*

(中国农业大学 农学与生物技术学院/国家能源非粮生物质原料研发中心,北京 100193)

摘要 非粮能源植物是发展生物质能源的重要基础。菊芋适应性广,抗逆性强,生物质产量高,能源化利用方式多样,且环境友好,是我国有前景的非粮能源植物之一。笔者以原料生产和生物质转化利用为中心,对菊芋生物学、抗逆性和产量潜力、种质资源、遗传特性和良种选育、种植技术、化学组成和能源转化利用等方面的研究进展和存在问题进行了详细阐述,并展望了菊芋作为能源植物的研发前景。培育能源专用良种,建立适应能源生产的高效生产技术体系、获得高活力菊糖酶、高效发酵菌株和产油微生物,原料生产全生命周期评价及副产物综合开发利用是今后应着力研究的重点。

关键词 菊芋; 非粮能源植物; 种质资源; 菊糖; 生物乙醇

中图分类号 S 514.032

文章编号 1007-4333(2012)06-0122-11

文献标志码 A

An overview of researches on *Jerusalem artichoke* as a biofuel crop

LIU Zu-xin, XIE Guang-hui*

(College of Agronomy and Biotechnology/National Energy R&D Center for Non-food Biomass,
China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract Non-food biofuel crop is under the spotlight in the research field of bioenergy. *Jerusalem artichoke* is one of the most promising non-food biofuel crops, due to its wide adaptability, high resistance, high biomass productivity, multiple ways of utilization for bioenergy and environment friendly. This paper reviews the recent development and problems in research in biology characteristics, stress resistance and yield potential, germplasm evaluation, genetic characteristics and cultivar breeding, planting technology, chemical composition and energy conversion on the basis of feedstock production and biomass conversion utilization. It discusses the prospects of research and development of *Jerusalem artichoke* as an energy crop. Specific cultivar for bioenergy, efficient feedstock production system suited for bioenergy plants, searching for inulinase with high activity, efficient fermentation strains, oleaginous microorganisms, life cycle assessment of feedstock production, and comprehensive research and development of byproducts should be focused.

Key words *Helianthus tuberosus* L.; non-food biofuel crop; germplasm; inulin; bioethanol

随着中国经济、社会日益发展,能源需求和气候环境问题备受关注。生物质能源是可再生能源,具有可贮藏性及连续转化能源的特征,成为最有前景的替代能源^[1]。能源植物是指一年生和多年生植物,其种植目的是生产固体、液体、气体或其他形式的能源,是生物质能源的主要原料来源之一^[2],是化石能源补充、替代以及温室气体减排、生态环境改善

的重要领域。菊芋适应性很强,在我国分布广泛,具有很高的产量潜力和较强的耐旱耐寒能力^[3-4]。地下块茎富含菊糖,是食品和医药领域重要的原料,地上茎秆既可作为生物发电的燃料,也可作为造纸的原料。近年来侧重对块茎的精细加工,开发出菊糖、低聚果糖、高果糖浆等具有较高经济价值的生物基产品^[5-7]。也有多种能源利用方式^[8-11],被认为是发

收稿日期: 2012-06-30

基金项目: 国家能源局能源节约和科技装备司项目(科技司函[2012]32号)

第一作者: 刘祖昕,博士研究生,E-mail:liuZX_918@126.com

通讯作者: 谢光辉,教授,主要从事非粮生物质资源研究,E-mail:xiEGH@cau.edu.cn

展潜力很大的能源植物^[8,12-14]。基于能源利用在菊芋生物学特性、抗逆性和产量潜力、种质资源、遗传特性和良种选育、种植技术、化学组成和能源转化利用等方面综述了菊芋的研究进展,并分析存在问题,展望研发前景。

1 生物学特性

20世纪60~80年代,Pas'ko、Tsvetoukhine和Swanton等人系统研究总结了菊芋形态学特征。菊芋生长势强,根系发达,分支多,入土深。成熟的植株有上百条0.5~2.0 m长的根^[15]。植株高大,株高和茎粗受群体密度和环境条件影响,Liu等报道^[16]在我国陇东黄土高原半干旱地区种植,株高可达206~343 cm,主茎基部直径为1.6~2.4 cm。通过研究株型和产量的关系,发现分枝数与地上部生物产量、块茎产量为显著正相关关系,认为菊芋育种应注重选择分枝多的类型^[17]。茎秆、叶片和叶柄密布茸毛,是一种由植株地上部表皮细胞发育而来的特化结构,有调节自身蒸腾、减缓炎热与干风伤害、防御动物啃食的功能^[5,13]。单株叶片数量受品种和生长条件影响,可达500~600片。研究表明,开花前,菊芋叶片数快速增长,在开花期达到高峰,开花后,叶片数逐渐减少^[18]。典型的无性系有10~20个舌叶,一般呈黄色,长6~10 cm,国内收集的59份菊芋品系的舌叶数为9~20个,块茎在根茎末端形成,形状有梨形、纺锤形、圆形和长条形等,表皮颜色有白色、红色、紫色、褐色^[16],内部颜色以白色为主。根茎呈白色索状,一般有2~3级分枝,长可达1.5 m以上。头状花序,单个或簇生,长在主茎或侧枝的顶端,黄色。花数因品种和生长条件而异。花盘的直径一般为1.3~2.9 cm^[16]。研究表明,野生无性系比栽培种有更强的形成种子的能力,前者每朵花的种子数为3~50个,而后者只有约0.08~0.66个^[19-20]。

菊芋是C3植物,通过磷酸戊糖途径固定同化CO₂,光合速率接近某些C4植物。多数菊芋无性系属短日照植物,开花临界日长在13~13.5 h之间。短日照能促进根茎形成和块茎膨大。最适叶面积指数为4~6^[13,21]。菊芋块茎有休眠特性,约80 d左右,需要经历≤5℃的低温打破休眠。未经历低温过程,种块不会萌发^[13]。研究认为块茎发芽需要的临界土壤温度是2~5℃^[22-23]。近年来,国内研究机构开展了不同浓度海水浇灌^[24]、不同浓度盐分^[25-26]、

碱胁迫^[27]、不同生境^[28]条件下菊芋幼苗光合特性及净光合速率、光合性能指标变化^[29-30],以及一般大田条件下块茎形成期光合特性^[31]等方面的研究。综合这些研究结果认为:较高的叶片光合能力是菊芋块茎高产的生理基础;净光合速率的高低与品种、叶绿素含量、生长环境有关。高产品种具有较高的CO₂同化速率;叶面积指数、光合势、净同化率与叶绿素含量在植株快速生长期和地上部干物质向块茎转移前均有高峰出现;菊芋在沙地净光合速率>农田>弃耕地>盐碱地,且主枝高于侧枝。随着海水浓度增加,幼苗叶片叶绿素含量、净光合速率显著降低;在NaCl(150 mmol/L)胁迫下,KNO₃有效提高幼苗叶片叶绿素含量,提高光合能力;高浓度的Na₂CO₃(37.5 mmol/L)会降低幼苗叶片叶绿素含量和净光合速率。

2 菊芋种质资源、遗传特性和良种选育

种质资源收集和评价是育种工作的基础。与同属的向日葵相比,菊芋种质资源评价的研究较少,特别是针对菊芋作为能源植物的种质研究需要系统深入的工作。国外菊芋种质资源的收集和评价主要集中在欧洲的若干研究机构。法国农业科学研究院(INRA)通过种质保存试验,描述了140个栽培种和26个野生品系的形态学、物候期、育性、抗病性、叶绿素等生理指标和块茎产量潜力^[32]。前南斯拉夫大田和蔬菜作物研究所Vasić等人比较了美国和黑山收集的79份菊芋品系的形态学特征,发现黑山部分品种与起源于美国的部分品种具有很强的相似性^[33]。俄罗斯瓦维洛夫植物研究所持有313份来自美洲和欧洲24个国家的菊芋种质,其中包括部分杂交种,Kiru和Nasenko等评估了其中来自11个国家的70份菊芋种质材料的产量和熟性,认为Kaluzhskii和杂交种“36/99 2M-22-29”具备良好的早熟性,Krasnodarskii 1, Krasnodarskii 2, Peterburgskii, Interes, Interes 21, Matrav, Raposvar, Hybrid 32, Seedling 32等菊芋无性系在块茎产量、单个块茎重和块茎外观等特征上具有良好的育种应用价值^[34]。对自我国24个省区收集的59份菊芋种质材料,从生物学、农艺学及遗传学的角度加以鉴定比较,结果表明59份种质材料在形态特征、生育时期、地上部和块茎产量等方面存在很大的变异幅度,并且主要性状间遗传特性存在差异,筛选出适宜在半干旱地区种植的10份综合性状表现

优异的无性系^[4,16]。近年来,国外研究机构开展了用分子生物学方法鉴定种质资源的工作。研究人员运用分子标记技术分析种质资源的遗传结构和基因关联性^[35],种质资源的分子多样性^[36-37]。这些研究成果有利于菊芋优秀基因资源发掘和遗传改良。

菊芋是六倍体($2n=102$),基本染色体数为17。属异花授粉作物,具有很强的自交不亲和性^[38],不规则的减数分裂^[39]和花粉生活力弱^[40]是导致育性差的原因。确定关键性状及其遗传力是培育新品种的核心步骤。Schittenhelm 利用7个父本与2个母本,研究了菊芋12个主要农艺性状和产量性状的一般配合力与特殊配合力。研究发现除块茎产量、块茎芽数和收获指数外,两个母本之间在其他性状上均表现出显著差异^[41]。Le Cohec 分析了菊芋15个生物学性状的变异系数、表型和基因型变异、遗传力和遗传度,结果发现单株块茎数和单株茎数呈增加趋势,这两个性状不利于生产应用,同时也反映了选育新的大块茎类型的品系是比较困难的^[42]。Liu 等的研究得出了相近的结果,而且,59份菊芋无性系在茎粗、单株主茎数、主茎分支数、单株块茎数、单个块茎重、块茎产量及地上部产量上表现出很大程度的变异(基因型变异系数 $>20\%$)^[16]。主要性状变异程度高表明遗传改良的潜力大。

目前我国栽培的菊芋品种多为农民自留自用的当地品种。与主要作物相比,菊芋遗传改良程度十分滞后,且目标单一,主要集中在提高块茎产量和菊糖含量上,选育抗逆性品种是能源植物育种的重要目标。近年来,国内有关研究机构利用国外引进材料和地方品种,选育出了表现较好的菊芋新品种,如耐盐碱品种南菊芋1号,适合在沿海地区盐份含量3%左右的滩涂地上种植;适合高海拔高寒地区种植的耐寒品种青芋1号;适合半干旱地区种植的地上部高产无性系HUB-2和BJ-4等^[4,16]。选用高产优质品种是菊芋能源利用的关键。不同品种在产量和化学成分上存在差异。Baldini 等对比6个菊芋无性系发现,品种间块茎和茎秆中菊糖、总糖含量存在显著差异^[12]。Stolzenburg 研究了17个菊芋品种的块茎产量和乙醇产率,结果表明,块茎产量越高,乙醇产率越高,其中,Henriette 块茎产量和乙醇产率分别为 5.6 t/hm^2 和 $2\ 630\text{ L/hm}^2$,BS-86-17 块茎产量和乙醇产率最高,分别为 12.2 t/hm^2 和 $5\ 589\text{ L/hm}^2$ ^[43]。Liu 等研究了我国59份菊芋无性系材料在陇东黄土高原半干旱地区的产量表现,在

雨养条件下,品种间产量差异非常显著,块茎干物质产量 $2.9\sim 10.6\text{ t/hm}^2$,地上部干重 $5.5\sim 31.3\text{ t/hm}^2$ ^[16]。系统整合国内种质资源,积极引入国外优秀种质,明确育种目标,选配杂交组合,利用杂种优势,在边际性土地资源丰富的地区开展比较试验和区域试验,培育优良新品种是菊芋育种工作的当务之急。

3 抗逆性和产量

具备较强的抗逆性是能源植物的基本特征之一,是能源植物适应边际性土地的前提。菊芋对生态环境条件要求不严,耐寒、耐旱、耐盐碱、耐贫瘠,分布和栽培范围广泛。能够在降雨量 $310\sim 2\ 820\text{ mm}$ 的区域生长^[44],大多数菊芋栽培品种完成整个生长发育过程至少需要125 d无霜期,年平均温度要求在 $6\sim 26\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,适合我国温带和亚热带高海拔地区种植。研究报道,我国适宜种植菊芋的边际地面积为 $1\ 760\text{ 万 hm}^2$ ^[45],主要集中在东北、西北和中部地区^[46]。

菊芋耐旱能力强,具备在我国干旱半干旱地区生产条件下获得较高产量的能力。在陇东半干旱地区,2008和2011年全年降水量为391和334 mm,且全生育期不灌溉的条件下,59份菊芋无性系块茎产量干重最高 16.3 t/hm^2 ,地上部干物质产量最高为 31.3 t/hm^2 ,总生物量最高为 35.0 t/hm^2 ^[16];无性系GZ-1, HEN-1, HUB-1, IM-1, 和SD-2连续两年块茎产量(干基)均超过 8 t/hm^2 ;品种GZ-1, HUB-1, SD-2的干旱敏感系数(DSI) <1 ,表现出较好的耐旱性^[4]。在新疆年降雨量 $180\sim 270\text{ mm}$ 的干旱区,不同品种、栽培管理措施处理下,块茎鲜重产量可达 $22\sim 127\text{ t/hm}^2$ ^[47]。青海低位山旱地区栽培方式筛选试验结果表明,大垄双行栽培菊芋块茎鲜重产量最高,达 24 t/hm^2 ^[48]。块茎中的水分可供应幼苗生长所需水分,新生根系开始从土壤中吸水。其地上部附有大量茸毛,可以减少水分蒸发,这些特征有助于菊芋对干旱条件的耐受。

菊芋也是一种具备生态效力,能够在防沙治沙工作中发挥重要作用的植物。如果将菊芋产业化利用与生态环境改善结合起来,将更有效地发挥其经济效益、生态效益和社会效益。固沙试验表明,菊芋在固持沙土和减少流动、半流动沙地土壤风蚀方面效果显著,经过5年生长,单株菊芋地上茎秆与地下根系团可固持沙土约 $5\sim 8\text{ kg}$ ^[49]。在科尔沁风沙地

种植菊芋,播种后45 d无雨的情况下仍能正常生长,菊芋群体组成了2~3 m的防风带,能减弱一定的风速;根系深度可达0.5 m以上,根幅最高可达0.6 m,呈现网状结构^[30]。在接近成熟或成熟时,菊芋自身高密度的地上茎形成一片低矮的防护带,随着地下块茎增多、重量加大,以及其根系的牢固抓沙能力,对沙土产生的强大压力起到固沙作用^[50-51]。

菊芋有较强的耐寒能力,研究认为,菊芋植株通过提高内源多胺含量来减轻冷害^[13]。其幼苗能够忍受0℃左右低温的微冻,秋季能够忍受-4~5℃低温侵袭。块茎能够忍受低温的主要原理是细胞原生质中含有大量的菊糖,形成了较高的细胞质浓度^[52]。在无霜期80 d的青海大通地区,不同品种和栽培管理措施处理下,块茎鲜重产量可达47.2~75.8 t/hm²^[47]。

菊芋生长适宜的土壤pH是4.5~8.6,有一定的耐盐碱能力,其幼苗根部可维持较高的K⁺含量,维持一定的Na⁺与K⁺比值,以保证根部Na⁺的高浓度,这是菊芋耐盐特性的重要基础^[53]。菊芋幼苗品种间耐碱性差异与其不同器官生物量和可溶性渗透物质的分配积累有关,耐碱菊芋品种在较高碱胁迫时,叶片和根系保持了较高的可溶性糖含量,根系保持了较高的K⁺含量和较低的Na⁺含量,即耐碱品种幼苗保持了较低的Na⁺/K⁺,这可能是其耐碱性较强的重要原因之一^[27]。因此,菊芋具有良好的机制以适应一定的盐碱度环境,具备在盐碱地规模化种植的可能性。国内研究证明,利用沿海滩涂地或灌区盐渍化土壤种植菊芋是可行的。在沿海滩涂荒地,菊芋生物量(鲜基)可达75~150 t/hm²,灌溉水中加10%海水对菊芋幼苗生长发育没有抑制作用,甚至有一定的促进作用,加25%海水对菊芋幼苗形态发育上具有一定胁迫作用^[24]。海水灌溉条件下,种植密度影响菊芋产量,全生育期3次灌溉50%海水,株行距为50 cm×70 cm的产量最高,菊芋的除盐能力随着种植密度增加而增强^[54]。5%~40%不同浓度海水灌溉,随着海水浓度的提高,株高和地下部生物量呈先增加后减少的趋势,低浓度海水有利于提高菊芋水分利用效率^[55]。不同品种间生物量、块茎产量、总糖和菊糖含量及离子分布对海水灌溉的响应存在差异^[56]。在甘肃秦王川灌区次生盐渍化土壤上进行6个菊芋品种比较试验,在株行距为50 cm×60 cm时,块茎鲜重产量最高可达59 t/hm²,茎秆鲜重产量最高达28 t/hm²^[57]。在滩

涂海水灌溉条件下种植菊芋,种质资源筛选及高产栽培调控技术是应该深入研究的课题。

4 种植技术研究

4.1 播种、收获与贮藏

合理的播种技术是改善菊芋生长发育、实现高产优质的重要措施,也是资源化利用大规模生产的必然要求。目前菊芋机械化种植技术研究尚不多见,是有待研究的重点。菊芋的适宜播期因品种、地域和气候条件而异,有春播和秋播两种方式,我国各地以春播为主。种植密度根据土壤肥力状况而定,在低肥力地上,密度宜高,水肥条件好的地区适当增加株行距。在青海湟水流域灌区,随着菊芋种植密度的减小,株高、茎粗等植物学性状指标呈增加趋势,其中以株行距40 cm×80 cm最大,但因种植密度小,产量稍低,株行距40 cm×70 cm块茎产量最高^[58]。不同播期与密度交互作用对沙地菊芋地上部植株植物学性状无显著影响;而对于块茎,春播优于秋播,密度以25 500株/hm²为宜^[59]。播种采用平播或垄播,旱地宜采用垄播,垄播时垄高约20 cm,垄宽30~40 cm^[60]。在甘肃定西地区全膜双垄沟播双行种植菊芋,较露地平作栽培增产20.33%,块茎鲜重达到77.3 t/hm²^[61]。播深一般为5~10 cm,粘土宜浅,沙土宜深。连作定位试验结果表明,连作4~5年对菊芋生长、块茎产量、块茎蛋白质、还原糖和纤维素含量及土壤酶活性已产生负面影响,另外,菊芋连作会导致土壤微生物种群组成发生变化,随着连作年限的延长细菌与放线菌呈先增加而后降低的趋势,而真菌含量在连作年限内一直呈增加态势,连作7年时土壤真菌含量比种植1年增加325%;土壤脲酶、脱氢酶、(酸、碱性)磷酸酶、淀粉酶与蛋白酶活性随着菊芋种植地连作年限的延长,呈先增加而后降低的趋势,而过氧化氢酶活性则表现为先降低而后上升的态势,如果继续连作可能产生连作障碍^[62],为防止连坐障碍发生,需要根据生产实际,统筹安排种植规划。

同时,菊芋块茎难以收获彻底,残留在土壤中的块茎在第二年会继续萌发生长,影响轮作体系中后茬作物的生长。可利用化学控制、机械控制和密植作物轮作三种方式解决该问题^[13,63]。目前把菊芋作为多年生植物栽培的研究十分罕见,仅在用作治沙或饲料作物时略有涉及,作为能源植物,一年播种多年收获未见报道,需要考虑结合菊芋全株利用方

式加以探索,比如利用菊芋茎秆中糖分发酵产乙醇,块茎留存于地下,作为次年的种子利用。

菊芋块茎收获时间对乙醇产量至关重要。收获时间因品种和地域而异,正常收获在9、10月初进行,也可延迟到次年早春。在地上部没有枯萎之前,贮存在茎叶中的同化产物仍在向块茎转移。过冬后收获或者正常收获后经过冬储的块茎更利于发酵,因为此过程中菊糖分解成易发酵碳水化合物,有利于水解^[13],但延迟收获会降低干物质产量,也增加了块茎腐败变质的风险。冬季和春季收获块茎碳水化合物组成差异显著,4月份采收时,块茎中果糖/葡萄糖下降,总碳水化合物不变,由于菊糖水解,蔗糖含量上升^[64]。研究表明,块茎成熟度影响菊糖性质,种植菊芋16、18、20周时收获块茎,聚合度较高的菊糖(DP > 10)含量下降,果糖和蔗糖含量上升^[65]。钟启文等通过研究成熟度对菊芋产量、品质和耐贮性的影响,证实在湟水流域灌区10月下旬收获,块茎产量、可溶性总糖和粗纤维已趋于平稳,质量减少率、腐烂感病率、失水软化率最低,说明成熟度已达到适宜状态^[66]。在菊芋生产实践中,要统筹考虑收获与贮存环节,既能够保证原料的连续供应,又要确保原料质量可靠,因地制宜,降低成本,提高效益。

原料贮存是生物能源生产的重要一环。块茎贮存方式和时间会使块茎干物质重下降,糖分含量与组成发生变化。冷库贮藏和室外塑料桶柱贮藏两种方式对比,总固形物、总碳水化合物和菊糖含量变化差异不显著,蔗糖、还原糖含量及葡萄糖/果糖差异不显著^[64]。菊糖聚合度随贮存温度的升高和时间的延长而出现显著变化,其中贮存4~6周后,聚合度在3~10的菊糖和蔗糖含量增加而聚合度大于10的菊糖含量下降^[67]。在-18℃冷冻保存时菊糖组成保持稳定^[65]。

4.2 肥水管理

普遍认为菊芋耐低水肥投入。但合理施肥是提高菊芋产量并改善品质所必需的,特别是在边际性土地上种植,根据土壤养分状况、生育期、收获目的和产量目标确定施肥种类及用量^[60]。

掌握营养吸收利用规律将为生产实践中肥料运筹提供理论指导。钟启文等报道,成熟期时,块茎氮磷钾质量分数分别为1.39%、0.32%和0.58%,茎中分别为0.88%、0.22%和0.61%,叶中分别为2.78%、0.25%和0.15%^[68],略低于成熟期甜高粱

地上部氮磷钾元素浓度^[69]。随着生育期的推移菊芋地上各器官营养元素浓度呈下降趋势,营养元素积累总量表现为氮>钾>磷,块茎开始膨大后,N、P、K营养元素在茎、叶的分配量均迅速减小,块茎中分配量迅速增加。其中,在块茎形成前,菊芋全株70%以上氮素分配到茎中,30%分配到叶片。成熟期时,75%以上氮素分配到块茎,叶片氮素分配量下降到20%左右,而茎中不足2%^[68]。

基肥能提高土壤肥力,改善理化性状,为菊芋生长提供充足养分。氮磷钾元素比例以N:P₂O₅:K₂O=1:0.6:0.9为宜^[5]。在半干旱地区灌溉条件下施氮肥能够显著影响株高和产量,在施氮量25~50 kg/hm²的范围内,产量得到明显提高^[70]。氮素是苏北沿海滩涂菊芋生长的关键限制因子,增施氮肥能显著提高菊芋地下和地上的干物质积累。在氮肥供应充足情况下,适当增施磷肥(75 kg/hm²)可以增加菊芋地下和地上干物质的积累。施氮量在150~225 kg/hm²递增时,土壤氮素由净消耗转变为氮素积累,同时菊芋地下和地上干物质获得最大产量^[71]。

研究发现,适时喷施叶面肥能够增强菊芋抗逆性并提高产量。菊芋现蕾初期,叶面喷施0.3%~0.5%的磷酸二氢钾2~3次,每次间隔15 d,能增强抗倒伏、抗旱、抗寒能力^[72]。在菊芋生长期喷叶面肥,有一定的增产效应,可改善菊芋生物学性状,促进生长发育,加快同化物积累速度,单株块茎数增加幅度较大,提高菊芋的抗逆性^[73]。

幼苗期、现蕾期和开花期是菊芋需水的3个关键期,苗期发生干旱胁迫导致植株生长缓慢,灌水有利于促进幼苗生长。现蕾至开花期,地上部生长速率达到最大值,同化产物向块茎转移加快,此时也不能缺水^[52]。菊芋虽然耐旱,但是发生干旱时及时灌溉可以有效提高产量^[5,13]。在半干旱地区,水分是菊芋株高、叶片、茎秆、根生物量的主要限制因子^[70]。菊芋现蕾期与开花期相差仅20~25 d,且现蕾期是北方干旱地区雨水较为集中的时期,提出应在现蕾前半个月和盛花期进行灌溉^[5]。土壤类型、人力、机械、坡度等因素决定灌溉方法和灌溉量。在甘肃张掖地区,总灌水量在1 800~6 300 m³/hm²范围内,菊芋块茎产量随耗水量的增加而增加,但水分利用效率呈下降趋势,但株高、茎粗和单株块茎个数差异不显著^[74]。研究表明,在山东莱州地区全淡水同海水和淡水比例为1:9、1:4、1:3灌溉,4个

处理的菊芋块茎产量没有显著差异,且灌溉2次的块茎产量显著高于灌溉1次的产量^[24],在海水浓度配比5%~40%范围内,浓度越高,株高和块茎产量呈先增加后减少的趋势,净光合速率和气孔导度在10%海水浓度下最高,低浓度海水有利于提高植物水分利用效率^[55],表明利用海水灌溉菊芋是开发沿海滩涂地、盐碱地的新途径^[75]。

4.3 病虫害及其防治

在野生或适宜的栽培条件下,菊芋病虫害非常轻微,没有因虫害导致减产的报道。但在大规模生产时,菊芋生长环境发生变化,容易引发各类病虫害。菊芋害虫主要有蚜虫、象鼻虫、向日葵甲虫、蛴螬、金针虫和地老虎等。菊芋的主要病害有茎腐病、锈病、灰霉病、白粉病、菌核病和斑枯病等,一般在连作或水肥措施不当导致群体密度过高时容易发生。播种前要选择健康无病无伤的种块,种植密度要合理,生长前期要培养壮苗。干旱时注意及时灌溉,雨季做好排水工作,发现病株及时拔除。对于菌核病、灰霉病、斑枯病等病害,在发病初期用70%代森锰锌1000~1500倍溶液,或者50%速克灵1000~1500倍液喷雾防治,每7~10d喷一次,共喷2~3次^[60]。

5 化学组成与能源转化利用

原料的化学组成决定着能源转化利用方式和效率。菊芋新鲜块茎含水量一般为80%、碳水化合物15%、蛋白质1%~2%。块茎中主要的碳水化合物是菊糖,约占干重的50%~75%,在陇东黄土高原半干旱地区种植59份菊芋无性系,其块茎总糖含量(干基)为55~83%^[16]。菊糖(inulin)是菊芋主要的碳水化合物,平均含量达块茎干重的75%^[76],是一种由呋喃构型的D-果糖经 β -2-1糖苷键脱水聚合而成果聚糖的混合物,其末端以 α -1-2糖苷键连接一分子葡萄糖,聚合度一般在2~60^[6],分子量在3500~5500之间。菊糖的聚合度受收获时间、贮藏条件、土壤以及气候等因素的影响^[77]。块茎中几乎不含淀粉^[13],存在少量的脂肪酸^[78]。

菊芋成熟期茎秆含水量一般为70%~80%^[16]。茎秆中含纤维素13.1%~14.2%、半纤维素9.3%~9.6%、木质素10.8%~14.1%,叶片含纤维素6.6%~7.3%、半纤维素4.3%~4.5%、木质素17.9%~21.7%^[79]。根据测定,10月初收获菊芋时,59份菊芋无性系地上部茎秆中纤维素和半纤维

素总含量(干重)为26%~54%。可溶性总糖含量(干重)为27%~64%(Liu et al., Unpublished data)。茎中含量钾为7 g/kg、钠40 mg/kg、钙3.2 g/kg、镁0.6 g/kg、磷0.7 g/kg,叶片中钾36 g/kg、钠70 mg/kg、钙24.8 g/kg、镁6.9 g/kg、磷3.4 g/kg^[80]。摸清原料化学成分组成对于转化利用和副产物加工有重要意义。

生物质转化方法分为生物化学转化(发酵和消化)、热化学转化(直接燃烧、气化、热解和液化)、机械萃取等^[81-82]。菊芋潜在的能源利用方式有:1)块茎或整株糖分发酵产乙醇和甲烷;2)菊糖发酵催化生产生物柴油;3)茎秆纤维素发酵产乙醇;4)菊芋茎秆直接燃烧或制成固体成型燃料。

5.1 乙醇

菊芋转化生产乙醇历史悠久。19世纪末,法国化学家Anselme Payen建议酒精工业使用菊芋块茎作为碳源发酵生产啤酒,经蒸馏提纯生成纯酒精。自20世纪90年代以来,国内外开展了大量菊芋块茎菊糖制乙醇的研究工作,主要方法包括先将菊糖酸解或酶解,然后利用酵母或细菌等具有发酵能力的菌株进行发酵,或者利用产菊糖酶能力较高的微生物如黑曲霉(*Aspergillus niger*)或脆壁克鲁维酵母(*Kluveromyces fragilis*)与酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)混合发酵^[83-86]。

发酵菊芋制酒精的研究主要集中在发酵菌株的筛选和发酵工艺上,并取得了一些成果^[84-88]。在生产中,乙醇产量能够达到3900~4500 L/hm²^[89],而理论上可以达到11230 L/hm²^[90]。菊糖发酵生产乙醇工艺主要有:同步发酵法和分步水解发酵法^[84-86]。乙醇产量和原料中可发酵糖含量有关,研究表明,块茎糖产量6.7和10.3 t/hm²时,其乙醇产量分别为3840和5850 L/hm²^[91]。德国一项研究表明,菊芋块茎可产乙醇6000 L/hm²^[43]。开花后40d,5个甜高粱品种的可溶性总糖产量为4.1~10.5 t/hm²,理论乙醇产量为2252~5414 L/hm²^[92]。根据美国橡树岭国家实验室Vogel等人的报告,现有柳枝稷品种生物量可达14 t/hm²,可产纤维素、半纤维素10 t/hm²以上,在75%转化率的条件下,柳枝稷可产乙醇5000 L/hm²^[93]。说明利用菊芋块茎产乙醇可以达到柳枝稷和甜高粱的乙醇产量水平。

菊芋开花前,碳水化合物临时贮存地上部,有研究证实,茎秆中可溶性碳水化合物的含量达到高峰

的时间与花芽出现时间一致^[94]。如果利用地上部分生产乙醇,一方面需要植株地上部含有大量的可溶性和不溶性糖分,另一方面要确保已经形成足够的块茎用于下一年的繁殖^[13,60]。收获过早会影响块茎形成,收获过晚则茎秆中糖含量下降,所以应该在开花以前地上部同化产物积累量最多时收获^[95]。根据胡剑锋和邱树毅的报道,开花前收获菊芋茎秆,其中含有 58.7% 的水溶性糖,其中果聚糖占 84%^[96]。Stolzenburg 报道,9 月份收获地上部生产乙醇,最高产量可达 3 197 L/hm²^[43]。利用菊芋茎秆中的可溶性糖发酵产乙醇是一个新的有潜力的途径^[94,97],同时,利用茎秆可以避免收获块茎过程中对水土保持可能带来的负面影响。

菊芋茎秆是潜在的纤维素乙醇原料来源。目前尚无利用菊芋茎秆纤维素成分产乙醇的报道。

5.2 甲烷

菊芋茎秆中含有大量的易于发酵的非结构性碳水化合物,青贮的菊芋茎秆中总干物质占 17.1%,挥发性固体占 15.4%,其中可被微生物降解的挥发性固体占 81.7%。青贮料中碳和氮分别占总固体干物质的 42.0% 和 2.5%,碳氮比为 17^[98]。研究证明,鲜料和青贮两种原料利用方式的甲烷产量相近^[9]。营养生长期收获(8 月 27 日)和开花期收获(9 月 19 日)茎秆,甲烷产量分别为 93.3 和 110.1 m³/tww^[9]。当茎秆产量(鲜重)达到 9~16 t/hm²时,甲烷产量 3 100~5 400 m³/hm²,总产能 30~53 MWh/hm²,高于藜草,狼尾草和苜蓿^[9,99-100]。当利用地上部生产甲烷时,块茎产量约为正常收获块茎产量的 50%^[95]。另外,菊芋块茎发酵后的残渣和废液可用于发酵产甲烷。由此可见,菊芋是一种适合生产甲烷的原料植物^[13,60],茎秆产甲烷也是菊芋整株利用方式之一,然而国内目前尚无利用菊芋产甲烷方面的报道。

5.3 生物柴油

用菊芋制生物柴油的技术正处于中试阶段^[101]。中科院化学物理研究所开辟了菊糖发酵生产微生物油脂,筛选得到了能直接利用菊芋块茎汁、水解液和菊芋浆发酵产油的菌株,在优化条件下菌体油脂含量可达 60% 以上,成功实现了从菊芋到生物柴油的转化^[102]。

武汉理工大学的研究人员利用菊芋块茎,开发出 C7-C15 烷烃生物柴油全套工艺,完成了实验室千克级小试。其主要工艺流程为:菊糖浸提,菊糖酶

催化水解生成果糖,果糖催化脱水生成羟甲基糠醛,在催化剂作用下,羟甲基糠醛与丙酮进行醇缩合反应,生成 C7-C15 醛酮缩合产物,经催化氢解生成 C7-C15 烷烃和水。

目前,菊芋制生物柴油的成本有待降低,包括原料成本和工艺技术成本。其中原料成本占总生产成本的 60% 以上^[101]。研制高效产油微生物,提高产油率是降低工艺技术成本的途径。

5.4 直接燃烧

菊芋茎秆生物量高,可用于生产固体颗粒燃料或直接燃烧的生物质原料。研究报道,秋季和春季收获的菊芋茎秆容积密度分别是 78 和 65 kg/m³,净热值分别是 18.0 和 18.5 MJ/kg^[10]。有报道称菊芋茎秆含水量高,干燥过程需要较高的成本^[98]。在生长期菊芋茎秆含水量 70%~80%^[5,16]。Liu 等分析了 59 份菊芋材料的灰分含量,其中茎秆灰分含量为 2.2%~4.1%,叶片灰分含量较高,为 16.3%~21.4%(Liu et al., Unpublished data)。高凯等研究发现,不同生境下块茎热值、灰分含量,认为生境条件对块茎热值和灰分有显著影响^[28]。有关利用菊芋茎秆作为直燃燃料的研究十分少见,分析其物化特性,探索其作为直燃燃料的可行性是有待研究的课题。

5.5 其他用途

菊芋是医药和食品工业的原料。菊芋块茎含有丰富的菊糖,其对血糖具有双向调节作用,一方面可使糖尿病患者血糖降低,另一方面又能使低血糖患者血糖升高。利用现代生物技术对菊芋进行深加工精制而成的菊粉、低聚果糖和超高果糖浆,具有特殊的保健作用,是当今保健食品行业的全新多功能配料。菊芋块茎还富含氨基酸和维生素等,质地白细脆嫩,无异味,可生食、炒食、煮食或切片油炸,若腌制成酱菜或制成洋姜脯,更具独特风味,也是食品工业的新型原料。茎秆和叶片蛋白质含量为 8.8%~11.9% 和 26.9%~29.4%^[13],既可在菊芋生长旺季割取地上茎叶直接用做青饲料,也可在秋季粉碎后制作干饲料。

6 存在问题及前景展望

6.1 原料研发

原料成本过高是生物质能源产业发展最严重的限制因子之一,采取积极有效的应对措施,保证优质原料可持续供应、降低原料生产成本是关键工作。

高产优质的能源专用良种将是降低未来菊芋生物燃料工业化生产成本的重要因素。与其他主要作物相比,菊芋的系统育种工作显得十分不足,种质资源收集、保存与鉴定、引种、品种选育、组织培养和快速繁殖技术等尚处在起步阶段。我国种植的菊芋大部分是当地农家品种,并且大规模生产实践缺乏。因此,培育能源专用良种,是今后研究工作的重要方向之一。前人研究表明,通过系统选育,能够选育高产优质的能源用菊芋新品种。一方面应加快国内种质资源收集、保存和鉴定,在明确现有种质资源生物学特点的基础上,研究其化学成分组成。根据特定的育种目标,系统开展比较试验和区域试验,筛选适合各类型边际地生产条件的品种。另一方面,俄罗斯、加拿大、德国、奥地利及东欧国家的研究机构在菊芋种质资源研究和品种选育上做了相当的工作,保存有一定数量的种质资源,育成了一些著名的品种,可根据实际情况考虑予以引种。

菊芋常规育种目标是提高产量和质量,如块茎产量和菊糖含量;茎秆是潜在的纤维素乙醇和固体成型燃料原料来源,应着重分析茎秆菊糖、木质素、纤维素、半纤维素的含量,研究其生物可降解性,筛选木质素含量低并易于生物降解的菊芋品种;利用菊芋茎秆糖发酵产乙醇可能是一种更有应用前景的开发途径,但需要深入探讨不同品种和条件下可溶性总糖含量出现高峰的时间、成分变化规律,以确定最佳收获时机。菊芋作为多年生植物种植时,其生物产量、化学组成、能源利用方式会发生何种变化是需要研究的课题。

随着种植年限的增长,轮作周期缩短,土壤营养元素失衡,原料质量受到影响。应进一步明确菊芋在各类型边际地上营养元素吸收、积累与分配规律,以及品种、生长环境和栽培管理对其产生何种影响,进而制定相配套的肥水管理措施。利用边际土地发展菊芋可能带来的环境影响也应给予高度重视。应做好原料基地建设,科学划区轮作,推广运用高效生产技术,做到营养平衡施肥。

利用海水灌溉菊芋是开发沿海滩涂地、盐碱地的新途径。研究其对菊芋生长、水分及营养元素利用、化学组成成分会产生何种影响、及生理生化机理和应对措施,筛选培育耐盐碱品种,探索高效种植技术,对原料生产有重要意义。应统筹规划菊芋的收获时间和贮存方式,保证质量,降低成本,以适应原料大规模生产的要求,这是原料生产体系中十分重

要的内容。

能源植物的生命周期评价是生物能源原料植物最敏感的部分。适合我国生物能源发展要求的能源植物多样,但亟需对主要能源植物进行全生命周期评价,针对种植过程、原料运输过程、终端产品生产过程,其能源投入产出、经济成本和环境影响等是否真正具有优势,谁更有优势,进行系统的可行性分析。

6.2 能源转化利用

关于菊芋制乙醇和生物柴油,国内研究集中在发酵菌株的筛选、酶的性质和适于工业生产发酵工艺上,取得了一些成果,但远远不足。今后应在高活力菊糖酶的获得、高效发酵菌株和产油微生物的筛选、茎秆发酵乙醇去木质化等方面着力研究,优化工艺、缩短流程、提高效率、降低能耗,降低乙醇或生物柴油的工艺成本。

目前,对菊芋茎秆燃料物化特性的研究未见报道,掌握现有种质资源茎秆的燃料物化特性,筛选热值高、灰分低、物化特性好的菊芋品种,分析环境、收获时间、管理措施对物化特性的影响,有针对性地改善燃料性状,燃烧废弃物利用是有待深入研究的课题。

菊芋能源化利用也会产生一系列有价值的副产品,包括作为动物饲料的含丰富蛋白质的浆液,酒精蒸馏后剩余的块茎残渣可以作为生产沼气的原料。来自副产品的经济价值是菊芋作为能源植物发挥综合效益的重要因素。

参 考 文 献

- [1] Hoogwijk M, Faaij A, Van D B R, et al. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy [J]. *Biomass Bioenergy*, 2003, 25(2): 113-119
- [2] 谢光辉. 能源植物分类及其转化利用[J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(2): 1-7
- [3] 黄相国, 葛菊梅, 沈裕虎, 等. 青海高原菊芋 (*Helianthus tuberosus* L) 开发研究述评[J]. *西北农业学报*, 2004(2): 35-38
- [4] Liu Z X, Spiertz J H J, Sha J, et al. Growth and Yield Performance of Jerusalem artichoke clones in a semi-arid region of China[J]. *Agron J*, 2012, 104(6): 1538-1546
- [5] 徐长警, 王建华, 秦亚兵, 等. 新兴经济作物: 菊芋[M]. 北京: 台海出版社, 2005
- [6] 殷洪, 林学进. 菊粉、低聚果糖的研究进展[J]. *中国食品添加剂*, 2008(3): 97-101
- [7] 胡素琴, 蔡飞鹏, 王建华, 等. 菊芋的种植和开发利用[J]. *生物质化学工程*, 2012, 46(1): 51-54
- [8] Baldini M, Danuso F, Turi M, et al. Evaluation of new clones of

- Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L) for inulin and sugar yield from stalks and tubers[J]. *Ind Crop Prod*, 2004 (19):25-40
- [9] Lehtomaki A. Feedstocks for anaerobic digestion, in *Biogas from Energy Crops and Agro Wastes*[DB/OL]. (2005)http://www.cropgen.soton.ac.uk/publication/AL%20Feedstocks.pdf
- [10] Rutkauskas G. Research on the characteristics of energy plant biofuel and combustion ability subject to harvest time, in 10th International Conference on New Technological Processes and Investigation Methods for Agricultural Engineering [C] // Raudondvariz, Lithuania, 2005; 350-356
- [11] Cheng Y, Zhou W G, Gao C F, et al. Biodiesel production from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L) tuber by heterotrophic microalgae *Chlorella protothecoides*[J]. *J Chem Technol Biot*, 2009, 84:777-781
- [12] Baldini M, Danuso F, Monti A, et al. Chicory and Jerusalem artichoke productivity in different areas of Italy, in relation to water availability and time of harvest[J]. *Ita J Agron*, 2006, 1: 1125-4718
- [13] Kays S J, Nottingham S F. *Biology and chemistry of Jerusalem artichoke*[M]. Athens, GA: CRC Press, 2008
- [14] 赵耕毛, 刘兆普, 汪辉, 等. 滨海盐渍区利用异源海水养殖废水灌溉耐盐能源植物(菊芋)研究[J]. *干旱地区农业研究* 2009, 27:107-111
- [15] 鹿天阁, 周景玉, 马义, 等. 优良的防沙治沙植物—菊芋[J]. *辽宁林业科技*, 2007(2):58-60
- [16] Liu Z X, Han L P, Yosef S, et al. Genetic variation and yield performance of Jerusalem artichoke germplasm collected in China[J]. *Agr Sci China*, 2011, 10:668-678
- [17] 隆小华, 刘兆普. 菊芋株型在高产育种中的作用[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(9):263-266
- [18] McLaurin W J, Somda Z C, Kays S J. Jerusalem artichoke growth, development, and field storage. I. Numerical assessment of plant development and dry matter acquisition and allocation[J]. *J Plant Nutr*, 1999, 22:1303-1313
- [19] Wyse D L, Wilfahrt L. Today's weed: Jerusalem artichoke[J]. *Weeds Today*, 1982, spring issue:14-16
- [20] Westley L C. The effect of inflorescence bud removal on tuber production in *Helianthus tuberosus* L (Asteraceae) [J]. *Ecology*, 1993, 74:2136-2144
- [21] Denoroy P. The crop physiology of *Helianthus tuberosus* L: a model orientated view[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1996, 11:11-32
- [22] Barloy J. Etudes sur les bases genetiques, agronomiques et physiologiques de la culture de topinambour (*Helianthus tuberosus* L) [J]. *Rapport COMES-AWWE 1982-1983*, Laboratoire d'Agronomie, INRA-Rennes, 41, 1984 (In France with English abstract)
- [23] Kosaric N, Cosentino G P, Wieczorek A, et al. The Jerusalem artichoke as an agricultural crop[J]. *Biomass*, 1984, 5:1-36
- [24] 隆小华, 刘兆普, 徐文君. 海水处理下菊芋幼苗生理生化特性及磷效应的研究[J]. *植物生态学报*, 2006(2):307-313
- [25] 薛延丰, 刘兆普. 不同浓度 NaCl 和 Na₂CO₃ 胁迫对菊芋幼苗光合及叶绿素荧光参数的比较研究[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(1):161-167
- [26] 黄增荣, 隆小华, 刘兆普, 等. KNO₃ 对 NaCl 胁迫下两菊芋品种幼苗生长及光合能力的影响[J]. *草业学报*, 2011, 20(1):82-88
- [27] 吴成龙, 周春霖, 尹金来, 等. 碱胁迫对不同品种菊芋幼苗生物量及可溶性渗透物质分配的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 45(3):901-909
- [28] 高凯, 朱铁霞, 徐苏铁, 等. 不同生境条件对菊芋块茎的热值、C、N 和灰分含量的影响[J]. *作物杂志*, 2011(2):17-19
- [29] 钟启文, 王怡, 王丽慧, 等. 菊芋生长发育动态及光合性能指标变化研究[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(9):1843-1848
- [30] 孔涛, 吴祥云, 刘玲玲, 等. 风沙地菊芋的主要生态学特性[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(9):1763-1766
- [31] 张美德, 陈强, 沈世华. 菊芋块茎形成期的光合特性[J]. *山东农业大学学报:自然科学版*, 2010, 41(4):498-502
- [32] Serieys H, Souyris I, Gil A, et al. Diversity of Jerusalem artichoke clones (*Helianthus tuberosus* L) from the INRA-Montpellier collection [J]. *Genet Resour Crop Ev*, 2010, 57: 1207-1215
- [33] Vasić D, Miladinović J, Marjanović-Jeromela A, et al. Variability between *Helianthus tuberosus* accessions collected in the USA and Montenegro[J]. *Helia*, 2002, 25(37):79-84
- [34] Kiru S, Nasenko I. Use of genetic resources from Jerusalem artichoke collection of N. Vavilov Institute in breeding for bioenergy and health security[J]. *Agron res*, 2010, 8(Special Issue III):625-632
- [35] Wangsomnuk P P, Khampa S, Jogloy S, et al. Assessing genetic structure and relatedness of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L) germplasm with RAPD, ISSR and SRAP markers [J]. *A J of Plant Sci*, 2011, 2:753-764
- [36] Uthai R, Khampa S, Wangsomnuk P P, et al. The molecular diversity of *Helianthus tuberosus* germplasm as assessed by HAT-RAPD and selected characterized DNA markers[J]. *AP J Mol Biol*, 2010, 18(1):99-101
- [37] Wangsomnuk P P, Khampa S, Wangsomnuk P, et al. Genetic diversity of worldwide Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*) germplasm as revealed by RAPD markers[J]. *Genet and Mol Res*, 2011, 10(4):4012-4025
- [38] Toxopeus, H. Improvement of plant type and biomass productivity of *Helianthus tuberosus* L[J]. *Final Report to the EEC*, 1991
- [39] van de Sande Bakhuyzen H L, Wittenrood H G. Het tot bloei en zaadvorming brengen van topinambour-rassen (project 143) [J]. *Verslag C I L O. over 1949, 1950*:137-144 (In Dutch)
- [40] Atlagic J, Dozet B, Skoric D. Meiosis and pollen viability in *Helianthus tuberosus* L and its hybrids with cultivated sunflower[J]. *Plant Breeding*, 1993, 111:318-324
- [41] Schittenhelm S. Inheritance of agronomical important traits in

- Jerusalem artichoke(*Helianthus tuberosus* L)[J]. Vorträge für Pflanzenzüchtung, 1990, 15-16
- [42] Le Coche F. Variabilité génétique, héritabilités et corrélations de caractères d'une population de clones de topinambour (*Helianthus tuberosus* L)[J]. Agronomie, 1990, 90: 797-806 (In Spanish with English abstract)
- [43] Stolzenburg K. Topinambour (*Helianthus tuberosus* L) - Rohstoff für die Ethanolgewinnung[DB/OL]. (2006) <http://www.lap-forchheim.de/>
- [44] Duke J. Handbook of Energy Crops[DB/OL]. (1983) http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/dukeindex.html
- [45] Zhuang D F, Jiang D, Liu L, et al. Assessment of bioenergy potential on marginal land in China[J]. Renew Sust Energ Rev, 2011, 15: 1050-1056
- [46] Sang T, Zhu W X. China's bioenergy potential [J]. GCB Bioenerg, 2011, 3(2): 79-90
- [47] 隆小华, 田静, 钟启文, 等. 新疆干旱区与青海寒区菊芋品种比较与优化栽培技术[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13): 354-358
- [48] 李江, 钟启文, 马本元, 等. 低位山旱地区菊芋栽培方式筛选试验[J]. 青海科技, 2006(1): 29-30
- [49] 王喜武, 吴德东, 袁春良, 等. 试论菊芋治沙[J]. 防护林科技, 2006(5): 45-46
- [50] 范国儒, 秦秀忱, 金志刚. 菊芋在辽宁沙区的栽植技术及试验效果分析[J]. 辽宁林业科技, 2004(4): 15-16
- [51] 李璟琦. 陕西榆林沙区菊芋资源的综合利用及发展前景[J]. 陕西农业科学, 2008(3): 141-143
- [52] 赵可夫. 菊芋[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1959
- [53] 祁淑艳, 储诚山. 盐生植物对盐渍环境的适应性及其生态意义[J]. 天津农业科学, 2005, 11(2): 42-45
- [54] 杨君, 姜吉禹. 海水灌溉条件下菊芋种植密度对土壤无机盐及产量的影响[J]. 吉林师范大学学报: 自然科学版, 2009, 2: 17-18, 25
- [55] 王建绪, 刘兆普, 隆小华, 等. 海水浇灌对菊芋生长、光合及耗水特征的影响[J]. 土壤通报, 2009(3): 148-151
- [56] 隆小华, 刘兆普, 王琳, 等. 半干旱地区海涂海水灌溉对不同品系菊芋产量构成及离子分布的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 300-306
- [57] 李世煜, 晋小军, 席旭东, 等. 内陆干旱灌区次生盐渍化土壤适宜种植菊芋品种筛选[J]. 中国农学通报, 2010, 26(15): 198-202
- [58] 侯全刚, 李江, 李莉, 等. 种植密度对菊芋植物学性状及产量的影响[J]. 青海科技, 2005(1): 24-25
- [59] 李莉, 钟启文, 马本元, 等. 播期与密度对沙地菊芋产量的影响[J]. 青海农林科技, 2006(2): 13-14
- [60] 谢光辉, 庄会永, 危文亮, 等. 非粮能源植物: 生产原理和边际地栽培[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011
- [61] 曹力强. 起垄方式对旱地菊芋产量的影响试验[J]. 甘肃农业科技, 2009(3): 13-14
- [62] 迟金和, 隆小华, 刘兆普. 连作对菊芋生物量、品质及土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(4): 775-780
- [63] Swanton C J, Cavers P B, Clements D R, et al. The biology of Canadian weeds. 101. *Helianthus tuberosus* L[J]. Can J Plant Sci, 1992, 72: 1367-1382
- [64] Barta J, Pátkai G Y. Chemical composition and storability of Jerusalem artichoke tubers[J]. Acta Alimentaria, 2007, 36(2): 257-267
- [65] Saengthongpinit W, Sajaanantakul T. Influence of harvest time and storage temperature on characteristics of inulin from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L) tubers [J]. Postharvest Bio Tec, 2005, 37: 93-100
- [66] 钟启文, 马本元, 侯全刚, 等. 成熟度对菊芋产量、品质及耐贮性的影响[J]. 长江蔬菜, 2007(1): 52-53
- [67] Danilčenko H, Jarienié E, Aleknavičienė P, et al. Quality of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L) tubers in relation to storage conditions[J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 2008, 36: 23-27
- [68] 钟启文, 刘素英, 王丽慧, 等. 菊芋氮、磷、钾吸收积累与分配特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 948-952
- [69] Han L P, Steinberger Y, Zhao Y L, et al. Accumulation and partitioning of nitrogen, phosphorus and potassium in different varieties of sweet sorghum[J]. Field Crop Res, 2011, 120: 230-240
- [70] Gao K, Zhu T X, Han G D. Water and nitrogen interactively increased the biomass production of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L) in semi-arid area [J]. Afr J Biotechnol, 2011, 10(34): 6466-6472
- [71] 赵秀芳, 杨劲松, 蔡彦明, 等. 苏北滩涂区施肥对菊芋生长和土壤氮素累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 521-526
- [72] 史黎红. 高寒地区菊芋丰产栽培技术[J]. 北方园艺, 2008(4): 136-137
- [73] 马本元, 侯全刚, 李江, 等. 不同叶面肥对菊芋植物学性状及产量的影响[J]. 中国果菜, 2006(1): 30
- [74] 杨斌, 张恒嘉, 李有先, 等. 不同灌水量对菊芋生长及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(4): 140-142
- [75] 刘兆普, 隆小华, 刘玲, 等. 海岸带滨海盐土资源发展能源植物资源的研究[J]. 自然资源学报, 2008, 23(1): 9-14
- [76] Stauffer M D, Chubey B B, Dorrell D G. Growth, yield and compositional characteristics of Jerusalem artichoke as they relate to biomass production, fuels from biomass and wastes [M]. Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science, 1981
- [77] Leible L, Kahnt G. Effect of location, N-fertilization, variety and harvest date on the yield of fermentable sugars of Jerusalem artichoke tops and tubers[J]. J Agron Crop Sci, 1988, 161: 339-352
- [78] Whitney E N, Rolfes S R. Understanding Nutrition[M], 8th ed. Belmont, West/Wadsworth, 1999
- [79] Malmberg A, Theander O. Differences in chemical composition of leaves and stem in Jerusalem artichoke and changes in low-molecular sugar and fructan content with time of harvest[J]. Swed J Agr Res, 1986, 16: 7-12

- [80] 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]. *J Sci Food Agr*, 1992, 60: 213-221
- [81] Kendry P M. Energy production from biomass (part 2); Conversion technologies[J]. *Bioresource Technol*, 2002, 83: 47-54
- [82] 米铁, 唐汝江, 陈汉平, 等. 生物质能利用技术及研究进展[J]. *煤气与热力*, 2004, 24(12): 701-705
- [83] 葛向阳, 张伟国. 同步糖化发酵菊芋生产酒精中黑曲霉菌株的选育[J]. *食品与生物技术学报*, 2006, 25(2): 83-87, 92
- [84] 吕跃钢, 马家津, 顾天成. 利用固定化菊糖酶和酵母细胞以菊芋为原料发酵生产酒精的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2003, 29(5): 66-68
- [85] 袁文杰, 赵心清, 白凤武. 一步法发酵菊芋产乙醇菌种的筛选及产酶条件、酶学性质的研究[J]. *生物加工过程*, 2008, 6(6): 25-29
- [86] 袁文杰, 任剑刚, 赵心清, 等. 一步法发酵菊芋生产乙醇[J]. *生物工程学报*, 2008, 24(11): 1931-1936
- [87] 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
- [88] 汪伦记, 董英. 以菊芋粉为原料同步糖化发酵生产燃料乙醇[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 263-268
- [89] Kosaric N, Vardar-Sukan F. Potential sources of energy and chemical products, in *The Biotechnology of Ethanol: Classical and Future Applications*[M]. New York: Wiley-VCH, 2001
- [90] Judd B. Feasibility of Producing Diesel Fuels from Biomass in New Zealand [DB/OL]. (2003) <http://eeca.govt.nz/eecalibrary/renewable-energy/biofuels/report/feasibility-of-producing-diesel-fuels-from-biomass-in-nz-03.pdf>
- [91] Kahnt G, Leible L. Studies About The Potential of Sweet Sorghum and Jerusalem Artichoke for Ethanol Production Based on Fermentable Sugar, in *Energy from Biomass*[M]. London: Elsevier Applied Science, 1985
- [92] Zhao Y L, Dolat A, Steinberger Y, et al. Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel[J]. *Field Crop Res*, 2009, 111(1/2): 55-64
- [93] Vogel K P. Genetic variation among switchgrass for agronomic traits, forage quality, and biomass fuel production[J]. Final Report. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 2003
- [94] Curt M D, Aguado P, Sanz M, et al. On the use of the stalks of *Helianthus tuberosus* L for bio-ethanol production[C]// 2005 AAIC Annual Meeting: International Conference on Industrial Crops and Rural Development, Murcia, Spain, 2005: 17-21
- [95] Curt M D, Aguado P, Sanz M, et al. Clone precocity and the use of *Helianthus tuberosus* L stems for bioethanol[J]. *Ind Crop Prod*, 2006, 24: 314-320
- [96] 胡建锋, 邱树毅. 菊芋发酵生产酒精的研究进展[J]. *酿酒科技*, 2009(8): 100-104
- [97] Negro M J, Ballesteros I, Manzaneres P, et al. Inulin-containing biomass for ethanol production: carbohydrate extraction and ethanol fermentation[J]. *Appl Biochem Biotech*, 2006, 132: 129-132, 922-932
- [98] Zubr J. Biogas-energy potentials of energy crops and crop residues[C]// *Proceedings of Bioenergy, Biomass Conversion*, Gothenburg, Sweden, 1985, 84(3): 295-300
- [99] Lehtomaki A. Biogas Production from Energy Crops and Crop Residues[DB/OL]. (2006) <https://jyx.jyu.fi/dspace/handle/123456789/13152>
- [100] Lehtomaki A, Bjorsson L. Two-stage anaerobic digestion of energy crops: methane production, nitrogen mineralisation and heavy metal mobilisation[J]. *Environ Technol*, 2006, 27: 209-218
- [101] 杜昱光. 菊芋制柴油: 离产业化道路有多远? [N]. *中国能源报*, 2009-05-25(12)
- [102] 华艳艳, 赵鑫, 赵金, 等. 圆红冬孢酵母发酵菊芋块茎产油脂的研究[J]. *中国生物工程杂志*, 2007, 27(10): 59-63

责任编辑: 袁文业