

## 黄河三角洲边际性土地资源开发与生物质能源研究

吴从稳<sup>1,2</sup>, 陈小兵<sup>2\*</sup>, 位才波<sup>3</sup>, 徐化凌<sup>4</sup>, 张立宾<sup>4</sup>,  
刘守军<sup>5</sup>, 张培农<sup>5</sup>, 毕玉波<sup>5</sup>

(1.烟台大学生命科学学院, 山东 烟台 264005; 2.中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室,  
山东 烟台 264003; 3.山东省第四地质矿产勘查院, 山东 潍坊 261021;  
4.东营市农业科学研究所, 山东 东营 257000; 5.山东省垦利县农业局, 山东 东营 257500)

**摘要:**黄河三角洲具有丰富的后备土地资源,将边际性土地开发与生物质能源发展相结合,有利于该区土地资源合理利用和生物质能原料的高效、可持续供应。在深入分析黄河三角洲水土资源和农村生物质能源利用现状基础上,结合国内外生物能源研究现状和最新进展,探讨了甜高粱、菊芋、柳枝稷和蓖麻等能源植物在黄河三角洲盐碱化土地规模化种植的必要性及可行性,并从技术、政策和市场等方面提出了促进黄河三角洲生物质能发展和边际性土地开发的几点关键建议,对当前黄河三角洲水土资源科学开发具有指导性意义。

**关键词:**黄河三角洲;边际性土地;生物质能源;能源作物;盐碱地

doi:10.13304/j.nykjdb.2014.034

中图分类号:S216 文献标识码:A 文章编号:1008-0864(2014)04-0109-11

## Marginal Land Resources Development and Biomass Energy Research in Yellow River Delta

WU Cong-wen<sup>1,2</sup>, CHEN Xiao-bing<sup>2\*</sup>, WEI Cai-bo<sup>3</sup>, XU Hua-ling<sup>5</sup>, ZHANG Li-bin<sup>5</sup>,  
LIU Shou-jun<sup>5</sup>, ZHANG Pei-nong<sup>5</sup>, BI Yu-bo<sup>5</sup>

(1.College of Life Science, Yantai University, Shandong Yantai, 264005; 2.Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Shandong Yantai 264003; 3.Shandong Provincial No.4 Institute of Geological and Mineral Survey, Shandong Weifang 261021; 4.Dongying Agricultural Science Research Institute, Shandong Dongying 257000; 5.Shandong Kenli County Agricultural Bureau, Shandong Dongying 257500, China)

**Abstract:**The Yellow River Delta has abundant reserve of land resources. Combining the marginal land development with biomass energy development is conducive to the rational utilization of land resources and the efficient and sustainable supply of biomass feedstock in this area. On the basis of depth analysis of soil and water resources and rural biomass energy utilization status in the Yellow River Delta, combining the domestic and international present situation on biological energy research and the latest progress, this paper discussed the necessity and feasibility of large-scale cultivation of energy plants like *sweet sorghum*, *jerusalem artichoke*, *ricinus communis* and *switchgrass* in the saline alkali land, and proposed several key suggestions to promote the biomass energy development and marginal land utilization from the technical, policy, market, etc., which study has guiding significance for the scientific development of land and water resources in the Yellow River Delta.

**Key words:**the Yellow River Delta; arginal land; biomass energy; energy crop; saline and alkaline land

边际性土地是指那些尚未被利用、自然条件较差、而又能产生一定生物量、有一定生产潜力和开发价值的土地,这类土地暂时不宜被开垦为农

田,但可以种植某些适应性强的植物<sup>[1]</sup>。随着石油能源短缺和价格飞涨、环境污染加剧以及全球变暖等问题的日益突出,当前,生物质能源的开发

收稿日期:2014-01-15;接受日期:2014-04-15

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903001);海洋公益性行业科研专项(201105020);“十二五”国家科技支撑计划项目(2009BADA3B04);中国科学院烟台海岸带研究所前沿项目(Y254021031)资助。

作者简介:吴从稳,硕士研究生,主要从事土壤质量与农产品安全研究。E-mail:wucongwen@163.com。\*通信作者:陈小兵,副研究员,博士,主要从事海岸带盐碱土盐肥运移过程与农业可持续发展研究。E-mail:xbchen@yic.ac.cn

与生产已势不可挡地席卷全球。生物质能 (biomass energy) 是一种新兴能源能,以农业有机废弃物以及利用边际土地种植的能源植物为主要原料进行能源生产,因其具有可再生性、低污染、分布广泛和原料丰富等特点,在许多国家和地区能源供应中的作用不断增强。基于粮食为主要原料的燃料乙醇曾由于生产工艺成熟、产品应用广泛,成为各国竞相发展的热点,但因其“与粮争地”而产生了较大争议<sup>[2,3]</sup>。生物质资源来自利用边际性土地开发的能源农业和能源林业将占据主导地位<sup>[4]</sup>。据国土资源部及林业局发布数据,我国有后备性土地 8 254 万  $\text{hm}^2$ , 现有能源林地 5 176 万  $\text{hm}^2$ 。如不计条件差的约 22% 的后备性土地,如受土质、坡度等因素影响难以开发利用的土地资源,可供种植能源作物的边际性土地面积为 11 608 万  $\text{hm}^2$ , 经过综合产能评估,年总产能潜力为 4.15 亿 t 标准煤<sup>[5]</sup>。利用低质的宜耕边际性土地种植能源作物,不仅解决能源危机和环境污染,而且对保障粮食安全和解决“三农”问题也具有积极地促进作用,可以加快我国的城镇化步伐、农业现代化进程,促进城乡居民收入倍增计划的实现,其规模化实施具有重大的现实意义和紧迫性<sup>[6,7]</sup>。

我国生物质能现代技术的研究和应用起步较晚,但国家高度重视,先后出台了《可再生能源法》等系列法规、配套政策和规章,并将其列入我国战略性新兴产业。我国沼气技术经过多年攻关已步入世界前列,秸秆气化及发电、燃料乙醇、生物柴油等技术均取得明显进展,但与世界发达国家相比,我国目前的开发利用总体水平较低,各种技术的成熟度和商业化水平极不均衡,国内生物质能源尚未形成真正的产业结构<sup>[8]</sup>。究其原因关键在于忽略了产业链条的基础(即原料生产),导致生物质能源没有足量、稳定的原料供应。生物质原料是限制与决定生物质能成本与市场竞争力的主要因素,除了农业废弃物、垃圾等被动利用的原料外,主要是通过大面积种植能源作物来获得。以生物质发电为例,我国绝大部分生物质发电厂因收集不到足够的秸秆,即使加上国家财政补贴,在短时间内集体仍陷入亏损状态,鲜有盈利。生物柴油的窘境则源于当初对于原料供应的错误判断,缺乏对原料实际供应量、可利用量、持续供应能力等进行准确的、详细的调查和研究,导

致对木本油料作物对生物柴油原料供应的能力盲目乐观<sup>[9,10]</sup>。

未来利用边际性土地的能源农业和能源林业生物质资源将占据主导地位,黄河三角洲是我国重要的后备土地资源,且以边际性土地居多,其未利用土地的合理开发一直广受瞩目;其次,大力发展生物质能能源也是黄河三角洲高效生态经济区建设的重要内容,即强调研发生物质能多层次利用和多能互补等技术,一些科研单位已在黄河三角洲开展了以甜高粱为代表的能源植物的引种和栽培技术等研究工作<sup>[11,12]</sup>。但这些研究多处于田块尺度的试验阶段,缺乏与黄河三角洲区域边际性土地评价相结合,未能从潜在能源植物的环境适应性等方面给予充分分析,仍缺乏从能源植物的主体-农户/农场的角度进行分析,对科学利用黄河三角洲水土资源的宏观战略性研究更为薄弱,故严重制约了已有成果的推广和产业化形成。

因此,本文拟在深入分析黄河三角洲水土资源特点的基础上,对能源植物栽培和生物质开发进行评估,辨析生物质能产业的关键障碍,系统探讨能源植物在黄河三角洲边际性土地开发的可能性和必要性,以期能给当前黄河三角洲的未利用土地的大规模开发提供指导,为发展生态高效农业提供新的视角,也为当前国内其它地区的生物质能源开发提供借鉴。

## 1 黄河三角洲水土资源基本特点与生物质能源发展现状

### 1.1 黄河三角洲水土资源基本特点

**1.1.1 水资源量年际变化悬殊,年内分配极为不均,淡水资源总体缺乏** 黄河三角洲位于渤海湾南岸和莱州湾西岸,主要分布于山东省东营市和滨州市境内,属温带季风气候,四季变化明显,年平均气温 11.7~12.6℃,7 月份温度最高,平均气温 26.7℃;年平均降雨量 530~630 mm,主要集中在 7~8 月份,占 70% 左右,拦蓄利用难度很大<sup>[13,14]</sup>。区内河流多为季节性河流,每年 7~10 月份多雨季节河水较大,春季径流量很小,甚至断流。黄河为三角洲地区最重要的淡水资源,山东省滨州市和东营市工农业主要依赖于黄河引水。近年来,黄河来水量趋于减少,且受到国家分配指

标限制,导致水资源供需矛盾加剧。浅层地下水主要是咸水,平均矿化度为 32.4 g/L,最高达 70.5 g/L,地下水埋深为 0.5~3 m,矿化度小于 3 g/L 微咸水的只占总数的 3.5%<sup>[15]</sup>,该区的地下水无法用于传统的农业灌溉。从黄河三角洲土地资源开发的的角度上看,传统农业生产的方向和规模均受到地表淡水资源总量和时空分布的制约,而引进和选育耐旱、抗盐碱的能源作物则为解决这一问题提供了新思路。

**1.1.2 成土时间短,盐渍化面积大,地势平坦,荒地广阔** 黄河三角洲由黄河携泥沙入海淤积而成,总面积为 265 万  $\text{hm}^2$ ,耕地 70.03 万  $\text{hm}^2$ ,未利用土地近 53.33 万  $\text{hm}^2$ ,其中荒碱地 28.87 万  $\text{hm}^2$ ,滩涂 14.13 万  $\text{hm}^2$ ,为我国重要的后备耕地资源区之一<sup>[16,17]</sup>。平均海拔高程均在 13 m 以下,地势西南高东北低,最低高程为 1 m,自然比降为 1/2 000~1/800。地面稍有起伏,岗、坡、洼相间,有大片的海滩地、浅平洼地及微斜平地。地下水位普遍偏高,局部离地表仅 1 m 左右,大部分地区地下水矿化度在 20 g/L 以上,极易导致表层土壤盐渍化。盐渍化土地面积约占总面的 60% 以上,盐渍程度一般以顶部较轻、腰部加重,边缘地带往往是重盐碱地,有的甚至是寸草不生的光板地。广阔、平坦的盐碱荒地为能源作物的规模化种植提供了土地基础,但受到滨海地区土地比降小、排水不畅等因素影响,实际能源作物种植过程中应提前做好雨季排水、防涝等方面工作。

**1.1.3 土地质量偏差,整体利用率低,结构不合理,产出效益不高** 黄河三角洲虽然土地资源的数量大,但是土地质量偏差。全区范围荒地和河滩地占地面积 22.92 万  $\text{hm}^2$ ,而农业用地却只占全区面积的 28.8%,并以低产田为主,占耕地面积的 93.4%。据统计,东营市宜农耕地面积占总耕地面积的 27.63%,其中宜农一等地 2.27 万  $\text{hm}^2$ ,仅占 2.87%<sup>[18]</sup>。土壤盐渍化严重,再加上旱涝盐碱等自然灾害频繁,导致该地区主要粮食单产比山东省平均水平低 5%~30%,棉花平均籽棉产量不足 200 kg。长期以来,人们以水利工程改良为主导手段对黄河三角洲盐碱土改良和治理,并取得了一些积极进展<sup>[19~21]</sup>。但受海水浸渍、水文地质和滨海地方特有气候的影响,土壤盐碱化和次生盐碱化依旧是未来很长一段时期内农业生产和生态建设中所必须面临的主要障碍<sup>[22]</sup>。当前

以种植棉粮等经济作物为主的土地利用方式无法摆脱“撂荒-垦殖-撂荒”的怪圈<sup>[23~25]</sup>,远不能满足黄河三角洲高效经济区建设高效生态农业之需求,必须在基于其水土资源特点综合分析的基础上,进行农、林、牧、副、渔等大农业框架下的产业布局 and 结构调整与优化<sup>[26,27]</sup>。选育适合黄河三角洲种植的耐盐碱、抗旱、抗涝、优质高产的能源作物新品种,并进行规模化种植和高效转化的配套模式研究,大力发展生物质能源,是解决边际性土地开发问题的最有前景的途径和关键性措施之一。

## 1.2 黄河三角洲生物质能源发展现状

黄河三角洲地区生物质能源主要包括农作物秸秆、生活垃圾、畜禽粪便和能源作物。现如今,该区生物质能产业主要包括以农作物秸秆、生活垃圾和畜禽粪便为主要原料的直燃发电和农村沼气,然而以能源作物为主要原料的第二代、第三代生物质能产业未能有效发展。

**1.2.1 原料单一,供需失调** 农作物秸秆是农业生产中的副产物,主要由纤维素、半纤维素和木质素三大部分组成。多数秸秆燃烧属于直接燃烧法,热转换效率很低,一般低于 20%,还有 70%~80% 的有机碳和植物养分成为挥发物,易造成环境污染。黄河三角洲地区主要种植作物为棉花、玉米、小麦、水稻、大豆等。根据不同作物产量和谷草比<sup>[28,29]</sup>计算出 2012 年东营市农作物秸秆产量及所占比例(图 1)。由图 1 可知,小麦秸秆、玉米秸秆和棉秆是该区秸秆产量的主要组成部分,而在实际生产中小麦秸秆往往伴随联合收割机械作业直接粉碎还田,玉米秸秆则常用于青贮饲料,棉秆则成为收集的主要目标。但是,受到当地人口密度稀少、劳动力资源匮乏的影响,原料收集的人力成本相应增加,同时由于黄河三角洲地区土地贫瘠,生物量密度低,加大了秸秆收集难度和运输成本。农作物秸秆的市场价格为 200 元/t 左右,较低的收购价格使得农户对农作物秸秆的处理方式更倾向于遗弃或田头焚烧,这进一步加重了当地秸秆发电原料供需关系不协调性。通过实地调查发现,以国能垦利生物发电有限公司为例,该公司年消耗棉花秸秆 20 万 t 仅占到东营棉秆产量的 30% 左右,而实际发电厂的覆盖半径不足 50 km,当地秸秆并未得到有效收集。

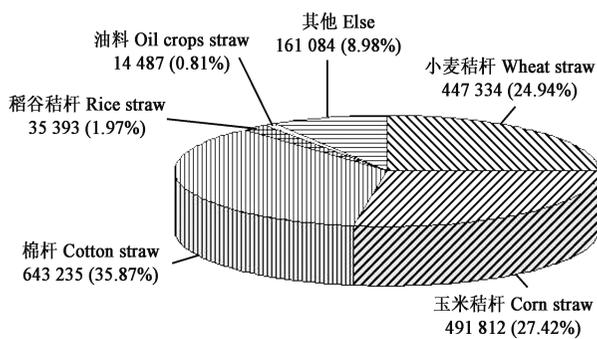


图1 2012年东营市各类农作物秸秆产量(t)及所占比例<sup>[30]</sup>

Fig.1 Dongying city in 2012 all kinds of crops straw yield (t) and the proportion<sup>[30]</sup>

### 1.2.2 生物质能产业结构单一,市场竞争力弱

农村沼气工程的不断推进为新农村生态建设提供了强大助力。但黄河三角洲地区以农作物秸秆为主要原料的单一产业结构极大的限制了当地生物质能产业的发展。据统计,2012年,滨州市沼气用户6.77万,同比增长11.7%,而东营市沼气用户6.64万,同比下降10.5%<sup>[31]</sup>。造成东营市沼气用户下降的原因主要是农村沼气池初期投资较大,当地政府补贴不到位;技术服务不完善,建池施工和日常维护中的问题不能得到及时解决,出现大量病池、废池;以棉秆为代表的农作物秸秆难以腐解,产气率低,难以维系沼气池正常工作。熊飞龙等<sup>[32]</sup>分析认为,沼气虽有较大发展潜力,但在市场经济影响下,项目很难在有效运行期内收回初始投资成本,只能作为公益项目来对待。据报道,2012年,山东省京能生物质发电有限公司净利润亏损8534万元;2013年,该公司净利润却巨亏1.7亿元<sup>[33]</sup>。分析认为,造成这种现象的主要原因是原料成本高、热效率偏低,发电设备投资大、维修费用高。

综上所述,要想实现黄河三角洲地区生物质能健康持续发展,在完善相关技术基础上,保证原料供应起着至关重要的作用。而生物质能原料供应必须与黄河三角洲边际性土地开发相结合,充分发挥该地区丰富的后备土地资源的优势,积极引进适应性强、速生、高效的能源作物,建立健全能源作物选育、推广和收购长效机制,从而实现边际性土地开发利用和生物质能产业双向、高效、持续发展。同时紧紧抓住国家发展“蓝黄经济区”的有利契机,优化产业结构升级,从而达到

能源、经济和生态效益协调统一提升。

## 2 具有潜在价值能源作物

选育能源作物对于生物质能的规模化、产业化发展有着至关重要的作用。近10多年来,欧美等发达国家基于经济、社会和政策等角度全面分析了发展全球生物质能的必要性、可行性和研发现状,提出了今后生物质能发展趋势<sup>[34-36]</sup>。为此,本文主要结合国内外能源植物在环境适应性、产量和效益等方面最新研究进展,初步分析其在黄河三角洲边际性土地规模化栽培的潜力。

### 2.1 能源植物种类

根据形成能源载体物质的成份,可把能源作物分为3类:①淀粉和糖料作物类,富含淀粉和糖类,用于生产燃料乙醇;②油脂作物类,富含油脂,通过脂化过程形成脂肪酸甲酯类物质,即生物柴油(biodiesel);③木质纤维素作物类(lignocellulosic crops),富含木质素和纤维素、半纤维素,可以直接燃烧提供热能或转化获得电能、乙醇和生物气体(biogas)等。

**2.1.1 淀粉和糖料作物类** 用于生产燃料乙醇的淀粉类作物主要有玉米、高粱等谷类和甘薯、木薯等薯类,而糖料作物则主要包括甘蔗、甜高粱、甜菜等。早在30多年前,巴西人以甘蔗为原料,发展甘蔗乙醇用来代替汽车化石燃料。目前,巴西以甘蔗原料生产的燃料乙醇产量已取代国内40%以上石油消费,为其第二大能源,美国则主要利用玉米生产燃料乙醇,玉米和小麦陈化粮也曾是我国生产燃料乙醇主要来源<sup>[37]</sup>。不同作物生产燃料乙醇的能力有所不同,从表1可以看出甜高粱和甜菜的乙醇生成力较强,这也是其成为许多国家研究的重要目标。对于甜高粱的研究,自1810年以来,美国和巴西先后选育出一批产量高、糖分含量高、抗性好的甜高粱新品种,如Rio、Roma、Bailey、Cowley、BR-504和BXH34-3-1等,我国科学家为寻找适合北方种植的糖料作物,对以美国为主的甜高粱品种开展了系统的评价、筛选和育种工作,极大促进了我国甜高粱的引种、选育和广泛推广<sup>[38,39]</sup>,先后选育出以晋杂5号、辽杂1号、沈杂5号、矧1A、吉杂26等为代表的一大批

优良杂交种,并得到大面积推广<sup>[40~42]</sup>。杂交甜高粱生长期较短,需水量仅为甘蔗的三分之一,在干旱、盐碱与耐涝抗逆能力良好,故被视作干旱和盐

碱土壤农业区可持续农业发展的一种主要作物;同时,在同等条件下,其生物质能转化效率高,技术相对成熟,是最有发展前景的能源作物。

表 1 淀粉和糖料作物及其乙醇生产力<sup>[10,43~45]</sup>

Table 1 The starch and sugar crops and their ethanol productivity<sup>[10,43~45]</sup>

作物种类 Corps	单产 (t/hm <sup>2</sup> ) Yield of per unit (t/hm <sup>2</sup> )	糖/淀粉 含量(%) Sugar/starch content (%)	乙醇产量 (L/hm <sup>2</sup> ) Ethanol production (L/hm <sup>2</sup> )	环境适应性 Environmental suitability	主要产地 Main planting area	主要用途 Main purpose
甜高粱 <i>Sorghum bicolor</i>	90	10.0	5 400	抗旱、耐涝、耐盐碱 Drought, waterlogging, salt resistance	辽宁、吉林、山东等地 Liaoning, Jilin, Shandong etc.	生物乙醇、饲料、酿酒等 For bioethanol, feed, brewing etc.
甜菜 <i>Beta vulgaris</i>	57.4	16.0	5 600	耐严寒、耐高温、适应性强 Resistant to cold, high temperature, strong adaptability	黑龙江、辽宁、内蒙古等地 Heilongjiang, Liaoning, Inner Mongolia etc.	制糖、饲料、生物乙醇 For sugar, feed, bioethanol
菊芋 <i>Jerusalem artichoke</i>	35	13.0	2 730	喜光、耐寒、耐盐碱 Happy light, cold resistant, salt resistance	辽宁、陕西、河南等地区 Liaoning, Shaanxi, He'nan etc.	制糖、添加剂、饲料、酒精原料 For sugar, additives, feed and alcohol
玉米 <i>Zea mays</i>	6.9	65.0	2 874	耐寒、抗旱 Cold resistant, drought resistance	辽宁、山东和四川等地区 Liaoning, Shandong and Sichuan etc.	饲料、酿酒、燃料乙醇等 For feed, wine, fuel ethanol

**2.1.2 油脂作物类** 油脂作物类是以榨取油脂为主要用途的草本和木本植物,表 2 为国内外适合在北方环境下主要油脂类能源植物。如今,蓖麻(*Ricinus communis*)、大豆(*Glycine max*)和油菜(*B. Rapa ssp.*)等油脂作物已经实现了以生产生物柴油为目的商业化种植。但目前能够直接生产生物柴油的作物品种还非常有限,再加上作物生存环境和土地资源的限制,生物柴油的发展道路依然任重道远。开发边际性土地和选育生殖能力强、生长周期短、产油量大、抗逆性强的油料作物成为生物柴油产业发展的两个重要课题。

**2.1.3 木质纤维素作物类** 木质纤维作物可以作为生物乙醇、生物燃气的能量来源,也可以通过燃烧提供热能或用来发电,其主要作物产量和能值特性见表 3。同时较传统作物相比,木质纤维作物具有更好的抗逆性和对边际性土地的适应能力,有利于边际性土地资源开发和生物质能源发展。

美国是最先将木质纤维转化乙醇技术进行商业化的国家。生物转化技术核心是酶解糖化及 C6 和 C5 共同发酵,可使纤维素的转化率高达

80%以上<sup>[48]</sup>。能源牧草的种类很多,主要包括苜蓿、柳枝稷、芒草属(*Miscanthus spp.*)、藜草(*Phalaris arundinacea*)和蒿柳(*Artemisia integrifolia*)等,对未来生物能源起到至关重要的作用<sup>[49]</sup>。被称为“牧草之王”的苜蓿,每公斤鲜苜蓿压榨后可得到 300 g 榨渣和 100 g 乙醇<sup>[50]</sup>。美国农业部种质资源信息网(US Department of Agriculture's Germplasm Resources Information Network, USDA-GRIN)公布了 4 000 多份紫花苜蓿及其近亲种质,可为生物质型苜蓿品种的选育或改良提供丰富的种质材料<sup>[51]</sup>。

## 2.2 适合在黄河三角洲边际性土地种植的能源作物

目前,中国生物转化技术还不成熟,生物质利用效率较低,经济成本高,市场竞争力较小,严重限制了生物质能产业的发展<sup>[52]</sup>。黄河三角洲边际性土地有机质含量低,氮、磷、钾等营养元素缺乏,盐渍化和次生盐渍化严重,常规农业生产受到很大限制,但未利用土地面积大,且相对平坦,经过适当的土地整理后,适宜进行规模化种植。高

表 2 主要油脂类作物及产油能力<sup>[10,46,47]</sup>

Table 2 Major oil crops and their productivity.

作物种类 Crops	籽粒产量 (t/hm <sup>2</sup> ) Grain yield (t/hm <sup>2</sup> )	含油量 (%) Oil content (%)	产油量 (t/hm <sup>2</sup> ) Oil production (t/hm <sup>2</sup> )	环境适应性 Environmental suitability	主要产地 Main planting area	主要用途 Main purpose
棉花 <i>Gossypium</i> spp.	1.20	15~25	0.29	喜热、喜光、耐旱,抗盐碱 Heat-loving, happy light, drought and some salt tolerance	全国分布广泛,主要有江汉平原等五大产区 Widely distributed in China, mainly in Jiangnan plain etc. five big region	棉絮用于纺织,棉籽生产棉籽油 Cotton for textile, cotton seed for cottonseed oil
文冠果 <i>Xanthoceras</i> <i>sorbifolia</i>	6.0	30~36	1.80~2.16	耐瘠薄、抗寒、抗旱 Resistant infertile, cold and drought	黑龙江、辽宁、山东、河南等零星分布 Sporadic distribution in Heilongjiang, Liaoning, Shandong, He'nan etc.	可制肥皂、高级润滑油及天然石油的替代原料 For soap, senior oil and natural petroleum alternative raw materials
蓖麻 <i>Ricinus</i> <i>communis</i>	1.20	50	0.6	喜温、抗旱、抗盐碱 Thermophilous, drought and salt tolerance	主要分布在内蒙古、吉林、陕西等 Mainly distributed in Inner Mongolia, Jilin, Shaanxi and other areas in China.	生物柴油以 20% 的比例与 80% 普通柴油混合使用 Mixed use by 20 percent biodiesel and 80 percent ordinary diesel
向日葵 <i>Helianthus</i> <i>annuus</i>	2.50~3.20	35~52	0.88~1.67	喜光、抗逆性强 Happy light, strong resistance	主要分布于辽宁、陕西、山西和内蒙古等地区 Mainly distributed in Liaoning, Shaanxi, Shanxi and Inner Mongolia etc.	食用、榨油 For food, oil

表 3 主要木质纤维作物产量和能值特性<sup>[53-56]</sup>

Table 3 The yield and capacity characteristics of major ligocellulosic crops.

作物种类 Crops	鲜重 (t/hm <sup>2</sup> ) Fresh weight yield (t/hm <sup>2</sup> )	能量 (GJ/t) Energy content (GJ/t)	能量产出 (GJ/hm <sup>2</sup> ) Energy output (GJ/hm <sup>2</sup> )	环境适应性 Environmental suitability	主要产地 Main planting area	主要用途 Main purpose
甜高粱 <i>Sweet</i> <i>sorghum</i>	50~100	16.7~16.9	250~422	抗旱,耐涝,耐盐碱 Drought, waterlogging, salt resistance	黑龙江、四川、山东、云南等地区 Northeast, Shandong and etc.	生物乙醇、饲料、酿酒等 For bioethanol, Feed, wine etc.
柳枝稷 <i>Panicum</i> <i>virgatum</i>	25~60	17.4	174~435	喜光,喜热,耐盐碱 Happy light, thermophilic, salt tolerance	西北干旱、半干旱地区及华北滨海盐碱地区 Northwest arid and semi-arid regions and northern coastal saline areas	建筑、饲料、乙醇 For building, feed and ethanol
红麻 <i>Hibiscus</i> <i>cannabinus</i>	70~100	15.5~16.3	155~326	短日照喜温作物 Short daylight thermophilic crops	广东、浙江、山东、四川等地 Zhejiang, Shandong, Guangdong, Sichuan etc.	造纸、纺织、饲料、吸附剂等 For paper, textile, feed and adsorbents

效能源植物的开发需要一个漫长的选择和发展过程,目前关于能源植物的研究多数尚处于实验和示范阶段,未达到全面推广水平。结合黄河三角洲地区水土资源的基本特点及较高的经济发展水平,筛选、改良和培育能够适应贫瘠、盐渍化的土地以及广泛变化的气候环境的高产能源作物,同时大力发展能源作物高产、易转化等条件,是解决现阶段生物能源发展原料供应瓶颈的可行之路,促进农业经济结构优化、可再生能源开发和生态环境保护,推动“农业-能源-环境”一体化发展。

**2.2.1 甜高粱** 甜高粱被称作“二代甘蔗”,同时又有“作物骆驼”的美誉,具有再生能力强、抗旱、抗涝和耐盐碱等特性<sup>[57]</sup>。研究表明,甜高粱在33℃高温干旱条件下,花粉能存活2 h,耐受盐浓度为0.5%~0.9%,远高于玉米等作物<sup>[58]</sup>。一般甜高粱每公顷可产籽粒3~4.5 t,茎秆45~60 t,可生产乙醇1 250~5 625 L<sup>[59]</sup>。孙宏<sup>[60]</sup>对甜高粱不同品种茎秆能量转换实验得出,甜高粱茎秆汁液锤度11.6%~14.12%,平均13.1%;出酒率6.0%~10.7%,平均出酒率7.85%。甜高粱对土地适应能力很强,对含盐量<6 g/kg、pH 5.6~8.5的土壤均能正常生长<sup>[61]</sup>。甜高粱已在滨州市种植成功<sup>[62]</sup>。山东省农业科学院在东营市已经建立了甜高粱杂交种试验和示范基地,培育了适合黄河三角洲的新品种,研发了高产栽培技术,为黄河三角洲的边际性土地开发奠定了较好的基础<sup>[63]</sup>。同时,黄河三角洲地区的相关公司在甜高粱茎秆乙醇发酵工艺也做了较多的技术储备,滨州光华生物能源集团有限公司拥有知识产权的“甜高粱秸秆发酵生产燃料乙醇新工艺”将成本控制在合理范围内,全套生产工艺经受了生产实践的检验,中试获得了成功<sup>[64,65]</sup>。

**2.2.2 菊芋** 菊芋为菊科向日葵属多年生草本植物,对生态环境条件要求不严,具有较强的耐旱、耐盐碱、耐寒、耐贫瘠性能,是为数不多的抗逆高产能源植物之一,这也为其在边际性土地上的选育和种植提供了可能<sup>[66-68]</sup>。有研究显示,其pH适宜范围在4.5~8.2,可利用含盐量10%的海水浇灌,鲜菊芋产量仍可达60 t/hm<sup>2</sup>以上<sup>[69]</sup>,在生育期不需要灌溉,能有效克服黄河三角洲地区淡水资源贫乏的问题;但抗涝能力弱,要开好排水沟,防止涝害<sup>[70,71]</sup>。Kosaric等<sup>[72]</sup>认为,利用由菊芋生产燃料乙醇的成本较玉米生产燃料乙醇更

具优势,菊芋块茎可转化乙醇4 500 L/hm<sup>2</sup>,乙醇转化率为理论值的92%。由于菊芋根系发达,繁殖力强,只需2~3 a就会在土地表层形成茂密的茎和根系,可有效降低盐分,改良盐碱地土壤<sup>[73]</sup>。2012年,中国科学院烟台海岸带研究所在东营市垦利县建设了“海岸带菊芋种质繁育试验基地”和“菊芋种植示范基地”并取得丰硕成果,其在2013年开展了“千亩盐碱地菊芋种植”推广计划,为菊芋的大规模推广奠定了理论和实践基础。综合表明,在做好雨季及时排涝工作条件下,菊芋在黄河三角洲地区边际性土地适宜规模化种植,有利于改善当地土地质量、美化生态环境、协调生物质能源发展。

**2.2.3 柳枝稷** 柳枝稷为禾本科黍属多年生暖季型丛生草本,生长力旺盛,根系发达,抗病虫害能力强,易于收割,能够在土壤贫瘠和盐碱地区生长,具有较强的适应能力<sup>[74]</sup>。柳枝稷的耐盐能力较强,0.4%的Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和NaCl混合盐处理的柳枝稷种子的发芽率和发芽指数相对于没有盐胁迫的对照组有显著提高<sup>[75]</sup>;200 mmol/L NaCl溶液中处理30 d后仍能存活,以生长量下降50%为标准,柳枝稷的耐盐阈值为178.6 mmol/L<sup>[76]</sup>。柳枝稷生物产量高达20 t/hm<sup>2</sup>,1 kg柳枝稷含热值大于14.5 MJ,相当于同等质量煤炭热值的70%~80%。柳枝稷为C<sub>4</sub>植物,较C<sub>3</sub>植物对环境温度要求较高,最适生长温度为30℃左右,耐寒能力随品种不同而存在较大差异并存在遗传变异性,可以通过育种手段筛选抗寒性强的品种,从而实现柳枝稷在黄河三角洲等中高纬度地区种植<sup>[77,78]</sup>。2005年,中国农业大学从美国引进了Shawnee和Trailblazer两个品种,并在北方地区进行试种。2010年,国家牧草产业技术体系科技示范基地和山东省农业科学院牧草科技示范基地“落户”东营<sup>[79]</sup>。2011年,该示范基地已初选出柳枝稷、狗尾草等品种5个品系<sup>[80]</sup>。这一系列的工作都为柳枝稷能源牧草在黄河三角洲盐碱土地上的种植和推广提供了理论和实践指导,也进一步证明了柳枝稷在黄河三角洲边际性土地规模化种植的可行性。

**2.2.4 蓖麻** 蓖麻具有非常好的耐盐碱、抗贫瘠、抗旱等特点,在全盐量0.4%以下可以正常生长,苗期过后在全盐量为0.6%的盐渍化土壤中也可是生长<sup>[81]</sup>。还有研究表明,低浓度盐碱处理有利

于蓖麻种子萌发<sup>[82]</sup>。张红菊等<sup>[83]</sup>研究发现,种植蓖麻 3 年的盐渍土小区蓖麻产量平均可达  $5.4 \text{ t/hm}^2$ ,土壤脱盐率高达 51.95%,盐碱土理化和生物特性得到明显改善。以 KOH 为催化剂,通过蓖麻油与甲醇的酯交换反应制备的蓖麻油质生物柴油理化性能接近,甚至高于 0#柴油和欧洲车用生物柴油标准<sup>[84]</sup>;以蓖麻油为原料利用索氏提取法控制反应条件在  $65^\circ\text{C}$ 、提取 8 h 生产生物柴油,产品产出率为 73.62%,纯度高达 83.41%<sup>[85]</sup>。同时,种植蓖麻有利于土壤结构的改善,降低土壤中可溶性盐分、重金属和有机污染物含量,保护生态环境,实现生物质能绿色、循环、可持续发展<sup>[86,87]</sup>。2013 年 8 月,山东省滨州市试种无棣县盐碱地蓖麻成功,平均产量为  $4.5 \sim 6.0 \text{ t/hm}^2$ ,将美国蓖麻成功引种到黄河三角洲地区,为蓖麻在边际性土地上推广奠定了理论和实践基础<sup>[86]</sup>。综合考虑以上各因素考虑,有些学者将蓖麻被评为盐碱地修复和生产生物柴油原料最有前途植物。

### 3 黄河三角洲边际性土地发展能源作物的建议

黄河三角洲地区有着丰富的后备土地资源,将边际性土地资源开发与生物质能源发展相结合具有巨大的经济、社会和生态效益。在发展生物质能源方面,相关研究机构和部门也已进行了基本的技术储备,黄河三角洲已经具备了基于能源植物规模化种植为基础的边际性土地开发的基本条件。但生物质能开发利用涉及土地使用、农业产业结构调整、乡村基础设施建设、农村劳动力就业、相关工业布局、能源产品和工业原料流向等各个多方面,为保证各部门、各行业协调、快速运转,加快黄河三角洲边际性土地开发进程和生物质能产业发展,故提出如下几点建议:

①针对能源作物种植需求,开展土地资源系统调查和配套设施建设。在地理信息等高新技术的支持下,开展大比例尺的黄河三角洲地区土地资源系统调查和制图研究,将边际性土地进行能源植物适宜性分区,针对不同分区构建能源植物种植、管理和评价体系。这有利于提升能源作物规模化推广的成功率,降低原料收集成本,保证原料统一性。在土地分区基础上,针对不同种植作物习性特点建立相应配套工程设施,而不是一味

地挖渠、台田等措施,从而减少资源浪费。

②在土地分区基础上,建立以甜高粱、菊芋等为代表的能源作物选育和推广基地。利用转基因和杂交等多种手段定向选育适合该区规模化种植的新品种、新品系,合理部署物种选择、培育和种植栽培的试验。通过温室和田间试验评价甜高粱等能源植物的抗旱、耐盐碱、耐贫瘠能力和适应性,确立其最佳施肥量和施肥时间,明确其最佳收获时期,研究其品质形状的主要参数,包括灰分、纤维素等,建立健全一整套针对不同能源作物品种的试验、评价、推广、收获、运输、提炼及销售的规范化模型,进而形成具有黄河三角洲特色的“科研+(农户)农场+工厂+市场”研、产、供、销一条龙式规模化生物质能产业示范区。

③不断创新生物质能转化技术,着力点转向以纤维素类原料为主的第二类生物质能源,降低对粮食作物的依赖性以及粗放模式带来的环境污染。黄河三角洲可以依托中国科学院、国能生物发电等有关龙头企业与科研院所,积极开展以甜高粱秸秆、菊芋秸秆等纤维素类原料为基础的燃料乙醇转化技术和生物柴油发酵技术研究,并不断推向产业化。加强政府、企业和研究机构之间的联系,努力把握先进技术发展方向和实施进度,实现先进转化技术快速应用、积极反馈并不断完善。

④完善立法体制和扶持政策。明确生物质能发展方向,制定并完善税收优惠政策,加大企业发展扶持力度,进而提高大型生物质能企业投资和入驻三角洲地区的积极性。政府部门的优惠和扶持政策一定要做细、做精,如政府补贴和减免政策不能只顾一头,要从种植、运输、工业生产到消费,认真把握生物质能产业中的每一个环节,保证产业运行的完整性和持续性。同时,将生物质能产业发展与边际性土地开发紧密结合,通过培植龙头企业,建立示范县、乡、村等形式,形成新的生物质能产业区,进而带动全地区能源产业结构优化升级。当地政府应从其产生的社会效益、环境效益和生态效益等多方面出发对相关企业、机构和个体给予适当的经济鼓励,以增强市场竞争力和规模化发展速度。

#### 参 考 文 献

[1] 边际性土地[J]. 农村工作通讯, 2008, 16:39.

- [2] 葛如江,林艳兴,王晓明.中国粮食能否承受“能源化”之重 [N]. 经济参考报, 2006-12-29, 第 004 版.
- [3] 吴方卫, 沈亚芳, 张锦华, 等. 生物燃料乙醇发展对中国粮食安全的影响分析——基于“与粮争地”的视角[J]. 农业技术经济, 2009, 1:21-29.  
Wu F W, Shen Y F, Zhang J H, *et al.*. Analysis of biological fuel ethanol development impact on China's food security based on the perspective of "to reclaim land with food" [J]. J. Agron. Econ., 2009, 1:21-29.
- [4] Wicke B. Bioenergy production on degraded and marginal land: assessing its potentials, economic performance, and environmental impacts for different settings and geographical scales [D]. Netherlands: Utrecht University, Doctor Dissertation, 2011.
- [5] 温明炬, 唐程杰. 中国耕地后备资源 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2005.
- [6] 陈义龙. 抓住生物质能源的发展机遇 [N]. 人民日报, 2013-07-15, 012.
- [7] 王久臣, 戴林, 田宜水, 等. 中国生物质能产业发展现状及趋势分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 276-282.  
Wang J C, Dai L, Tian Y S, *et al.*. Analysis of the development status and trends of biomass energy industry in China [J]. Trans. CSAE, 2007, 23(9): 276-282.
- [8] 吴创之, 周肇秋, 阴秀丽, 等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报, 2009, 1:91-99.  
Wu C Z, Zhou Z Q, Yin X L, *et al.*. Current status of biomass energy development in China [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Mac., 2009, 01:91-99.
- [9] 潘少军. 生物质发电如何走出困境 [N]? 人民日报, 2009-12-07, 第 009 版.
- [10] 中国科学院青岛生物能源与过程研究所. 中国生物能源发展现状与技术预见 [EB/OL]. <http://www.qibebt.cas.cn/xschw/xcep/ztbg/201110/P020111026499140612013.pdf>, 2005.
- [11] 管延安, 张华文, 杨延兵, 等. 能源甜高粱高产高效栽培技术[J]. 山东农业科学, 2008, 7:107-108.  
Guan Y A, Zhang H W, Yang Y B, *et al.*. High-yielding cultivation technique of *sweet sorghum* [J]. Shandong Agric. Sci., 2008, 7:107-108.
- [12] 武海栋. 黄河三角洲盐碱地甜高粱栽培技术研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 硕士学位论文, 2013.  
Wu H D. Study on the cultivation techniques of *sweet Sorghum* in the saline soil of Yellow River Delta [D]. Ji'nan: Shandong Normal University, Master Dissertation, 2013.
- [13] 张伟华. 黄河三角洲土地利用动态变化及其驱动力研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 硕士学位论文, 2008.  
Zhang W H. Analysis on land use change and its driving forces in the Yellow River Delta [D]. Ji'nan: Shandong Normal University, Master Dissertation, 2008.
- [14] 杨劲松, 姚荣江, 刘广明, 等. 黄河三角洲地区土壤盐分的空间变异性及其 CoKriging 估值[J]. 干旱区研究, 2006, 23(3): 439-445.  
Yang J S, Yao R J, Liu G M, *et al.*. Spatial variability of soil salinity in the Yellow River Delta and its estimation by CoKriging method [J]. Arid Zone Res., 2006, 23(3): 439-445.
- [15] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙. 黄河下游三角洲盐渍区表层土壤积盐影响因子及其强度分析[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1115-1119.  
Yao R J, Yang J S, Jiang L. Analysis on factors of salt accumulation and intensity in topsoil in the saline region of lower Yellow River Delta [J]. Chin. J. Soil Sci., 2008, 39(5): 1115-1119.
- [16] 关元秀, 刘高焕, 王劲峰. 基于 GIS 的黄河三角洲盐碱地改良分区[J]. 地理学报, 2001, 56(2): 198-205.  
Guan Y X, Liu G H, Wang J F. Regionalization of salt-affected land for amelioration in the Yellow River Delta based on GIS [J]. Acta Geog. Sin., 2001, 56(2): 198-205.
- [17] 邓卫华, 腾军伟. 国务院正式批复《黄河三角洲高效生态经济区发展规划》[EB/OL]. [http://news.xinhuanet.com/fortune/2009-12/03/content\\_12582348.htm](http://news.xinhuanet.com/fortune/2009-12/03/content_12582348.htm), 2009-12-03.
- [18] 东营市国土资源局. 东营市国土资源志 [M]. 北京: 中华书局出版社, 2003, 45-70.
- [19] 刘文龙, 罗纨, 贾忠华, 等. 黄河三角洲暗管排水的综合效果评价[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2): 122-126  
Liu W L, Luo W, Jia Z H, *et al.*. Comprehensive assessment of subsurface drainage construction in the Yellow River Delta [J]. Agric. Res. Arid Areas, 2013, 31(2): 122-126.
- [20] 张化, 王静爱, 徐品泓, 等. 台田及海冰水灌溉利用对洗脱盐的影响研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(10): 1658-1665.  
Zhang H, Wang J A, Xu P H, *et al.*. Study on desalinization efficiency of the raised-land and sea ice water irrigation in coastal Barren-saline region [J]. J. Nat. Res., 2010, 25(10): 1658-1665.
- [21] 岳耀杰, 张峰, 张国明, 等. 滨海盐碱地利用变化与优化研究——以黄骅市“台田-浅池”模式为例[J]. 资源科学, 2010, 32(3): 423-430.  
Yue Y J, Zhang F, Zhang G M, *et al.*. Coastal saline-alkali land use change and its optimization: a case study on the 'raised field-shallowpond' pattern in Huanghua county [J]. Res. Sci., 2010, 32(3): 423-430.
- [22] 席承藩. 黄淮海平原综合治理与农业发展问题 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [23] 张婷婷. 黄河三角洲土地盐渍化格局的遥感监测及盐渍化过程的空间分析与评价 [D]. 上海: 复旦大学, 博士学位论文, 2011.  
Zhang T T. Monitor, evaluate and analyze land salinization pattern, process and ecological effects in the Yellow River Delta; using remote sensing and ecological models [D]. Shanghai: Fudan University, Doctor Dissertation, 2011.
- [24] 王瑞燕, 赵庚星, 于振文, 等. 利用生态位适宜度模型评价土地利用环境脆弱性效应[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 218-224.  
Wang R Y, Zhao G X, Yu Z W, *et al.*. Assessment of land use effects on environmental vulnerability by ecological niche suitability model [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2012, 28(11): 218-224.
- [25] 王莉莉. 黄河三角洲耕地后备资源评价与开发利用研究 [D]. 山东泰安: 山东农业大学, 硕士学位论文, 2011.  
Wang L L. Research on evaluation of reserve cultivated land resources and the development and utilization of Yellow River delta [D]. Shandong Taian: Shandong Agricultural University, Master Dissertation, 2011.
- [26] 张秀海, 蒋大华, 魏珣, 等. “十一五”国家 863 计划现代农业技术领域回顾与展望[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(6): 55-62.  
Zhang X H, Jiang D H, Wei X, *et al.*. Retrospect and prospect of national 863 program in the field of modern agriculture technology during the 11<sup>th</sup> five year plan period [J]. J. Agric.

- Sci. Technol., 2013, 15(6):55-62.
- [27] 王济民, 肖红波. “十二五”中国农业科技发展的战略需求、发展重点与对策建议[J]. 中国农业科学, 2011, 44(11):2398-2402.
- Wang J M, Xiao H B. Strategic demands, development emphases and countermeasures of agricultural sciences and technology in the 12th-five-year period[J]. Sci. Agric. Sin., 2011, 44(11):2398-2402.
- [28] 潘志强, 刘高焕, 周成虎. 黄河三角洲农作物种植分区的遥感研究[J]. 地理研究, 2003, 22(6):799-807.
- Pan Z Q, Liu G H, Zhou C H. The crop distribution of Yellow River Delta using remote sensing method[J]. Geog. Res., 2003, 22(6):799-807.
- [29] 毕于远. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 博士学位论文, 2010.
- Bi Y Y. Study on straw resources evaluation and utilization in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, Doctor Dissertation, 2010.
- [30] 2012年山东省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [31] 2012年分市农村可再生能源利用情况[EB/OL]. <http://www.sdny.gov.cn/art>, 2013-07-12.
- [32] 熊飞龙, 朱洪光, 石惠娟, 等. 关于农村沼气集中供气工程沼气价格分析[J]. 中国沼气, 2011, 29(4):16-19.
- Xiong F L, Zhu H G, Shi H X, et al.. Analysis on the price of the biogas for rural centralized biogas plant [J]. Chin. Biog., 2011, 29(4):16-19.
- [33] 杜海. 山东鲁能100%股权难脱手[EB/OL]. 经济导报, 2014-02-10, B3版.
- [34] Bassam N E L. Energy Plant Species: Their Use and Impact on Environment and Development [M]. NPG Books Ltd., 1998.
- [35] Bassam N E. Handbook of Bioenergy Crops: A Complete Reference to Species, Development and Applications [M]. UK: Earthscan, 2010.
- [36] Wicke B. Bioenergy Production on Degraded and Marginal Land [M]. Oisterwijk Proefschrift-maken.nl, 2011.
- [37] 李军, 吴平治, 李美茹, 等. 能源植物的研究进展及其发展趋势[J]. 自然杂志, 2007, 29(1):21-25.
- Li J, Wu P Z, Li M R, et al.. Development of energy plant: progress and suggestions [J]. Nat. China, 2007, 29(1):21-25.
- [38] 廖馥荪, 黎大爵. 甜高粱及其利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [39] 张丽敏, 刘智全, 陈冰嫄, 等. 我国能源甜高粱育种现状及应用前景[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6):76-82.
- Zhang L M, Liu Z Q, Chen B X, et al.. Current status and application prospects of sweet sorghum breeding in China[J]. J. Chin Agric. Univ., 2012, 17(6):76-82.
- [40] 魏保权, 徐景梅. 高粱杂交育种思路探讨[J]. 杂粮作物, 2001, 21(6):16-17.
- Wei B Q, Xu H M. Probe to the idea of sorghum hybrid breeding [J]. Rain Fed. Crops, 2001, 21(6):16-17.
- [41] 李公德. 高粱育种四十年[C]. 长春: 吉林省农科院四十年, 1988:36-43.
- [42] Zheng L Y, Guo X S, He B, et al.. Genome-wide patterns of genetic variation in sweet and grain sorghum (*Sorghum bicolor*) [J]. Gen. Biol., 2011, 12:R114.
- [43] 张彩霞, 谢高地, 李士美, 等. 中国能源作物甜高粱的空间适宜分布及乙醇生产潜力[J]. 生态学报, 2010, 30(17):4765-4770.
- Zhang C X, Xie G D, Li S M, et al.. Spatial suitability and its bio-ethanol potential of sweet sorghum in China [J]. Acta Ecol. Sin., 2010, 30(17):4765-4770.
- [44] Torner L. Energy balance for sugar beet growing; influence of nutrient efficiency and level of mechanization [A]. In: Proceedings of the 60th Congress IIRB Congress [C]. UK: Cambridge, 1997.
- [45] 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.
- [46] 侯元凯, 李阳元, 赵生军, 等. 文冠果结实情况的调查与产量的预测[J]. 经济林研究, 2011, 29(1):144-148.
- Hou Y K, Li Y Y, Zhao S J, et al.. Fructification investigation and yield prediction in *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Nonwood Forest Res., 2011, 29(1):144-148.
- [47] 段乃雄, 姜慧芳. 油料作物种质资源的研究现状与发展对策[J]. 中国农业科技导报, 2002, 4(3):14-17.
- Duan N X, Jiang H F. Research status and development strategy for oil crop germ plasm resource [J]. J. Agric. Sci. Tech., 2002, 4(3):14-17.
- [48] 陈介南. 木质纤维生物转化乙醇技术[J]. 生物质化学工程, 2006, 40(S1):69-77.
- Chen J N. Bioconversion of lignocellulose to ethanol [J]. Biomass. Chem. Eng., 2006, 40(S1):69-77.
- [49] 程序. 能源牧草堪当未来生物能源之大任[J]. 草业学报, 2008, 17(3):1-5.
- [50] Samac D A. Development of alfalfa as a feedstock for production of ethanol and other bio-products [A]. In: Shelley Minter, Alco-holic Fuel [M]. UK: Taylor & Francis, 2006.
- [51] Sakiroglu M, Brummer E C. Clarifying the ploidy of some accessions in the USDA alfalfa germplasm collection [J]. Turkish J. Bot., 2011, 35(5):509-519.
- [52] 管天球. 我国生物质能源产业发展存在的问题及其优化对策[J]. 湖南科技学院学报, 2010, 31(4):71-74.
- [53] Venturi P, Venturi G. Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems [J]. Biomass Bioeng., 2003, 25(3):235-255.
- [54] Lewandowski I, Clifton-Brown J C, Scurlock, J M O, et al.. Miscanthus: European experience with a novel energy crop [J]. Biomass Bioeng., 2000, 19(4):209-227.
- [55] 余醉, 李建龙, 李高扬. 芦竹作为清洁生物质能源牧草开发的潜力分析[J]. 草业科学, 2009, 26(6):62-69.
- Yu Z, Li J L, Li G Y. Analysis on the potential capacity of exploiting giant reed as an energy forage [J]. Pratacul. Sci., 2009, 26(6):62-69.
- [56] 解新明, 周峰, 赵艳慧, 等. 多年生能源禾草的产能和生态效益[J]. 生态学报, 2008, 28(5):2329-2342.
- Xie X M, Zhou F, Zhao Y H, et al.. A summary of ecological and energy-producing effects of perennial energy grasses [J]. Acta Ecol. Sin., 2008, 28(5):2329-2342.
- [57] 黎大爵. 亟待开发的甜高粱酒精燃料[J]. 中国农业科技导报, 2003, 5(4):48-51.
- Li D J. Ethanol fuel from sweet sorghum desiderates development [J]. Rev. Chin. Agric. Sci. Technol., 2003, 5(4):48-51.
- [58] 刘公社, 周庆源, 宋松泉, 等. 能源植物甜高粱种质资源和分子生物学研究进展[J]. 植物学报, 2009, 44(3):253-261.
- Liu G S, Zhou Q Y, Song S Q, et al.. Research advances into germplasm resources and molecular biology of the energy plant sweet sorghum [J]. Chin. Bull. Bot., 2009, 44(3):253-261.

- [59] 黎大爵. 甜高粱可持续农业生态系统研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(8):1021-1024.  
Li D J. Studies on sustainable agro-ecology system of sweet sorghum [J]. Sci. Agric. Sin., 2002, 35(8): 1021-1024.
- [60] 孙宏. 能源作物甜高粱培育及能量转换技术研究[J]. 农业工程学报, 2006, S1:256-258.  
Sun H. Technical research on breeding and energy conversion of sweet sorghum [J]. Trans. CSAE, 2006, 22(S1):256-258.
- [61] Li X, Weng J K, Chapple C. Improvement of biomass through lignin modification [J]. Plant J., 2008, 4:569-581.
- [62] 徐锭明. 生物能源开发将成为热点 山东滨州甜高粱种植基地及燃料乙醇中试装置考察[J]. 中国新技术新产品精选, 2007, 2:14-15.
- [63] 廖洋. 山东生物质能甜高粱种植技术获得突破[N]. 科学时报, 2010-1-12, B4 版.
- [64] 甜高粱种植基地和汽油醇加工项目建设步伐加快[EB/OL]. <http://www.binzhou.net/>, 2006-01-18.
- [65] 甜高粱种植及汽油醇加工进展情况[EB/OL]. <http://www.bzny.gov.cn/>, 2006-07-01.
- [66] 刘兆普, 邓力群, 刘玲, 等. 莱州海涂海水灌溉下菊芋生理生态特性研究[J]. 植物生态学报, 2005, 29(3):374-378.  
Liu Z P, Deng L Q, Liu L, et al.. Physiological characteristics of *Helianthus tuberosus* irrigated by seawater, laizhou coast, shandong province [J]. Acta Phyt. Sin., 2005, 29(3):374-378.
- [67] 孙晓娥, 孟宪法, 刘兆普, 等. 氮磷互作对菊芋块茎产量和品质的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2):363-367..  
Sun X E, Meng X F, Liu Z P, et al.. Effects of nitrogen and phosphorus interaction on the tuber yield and its quality of *Jerusalem artichoke* [J]. Chin. J. Ecol., 2013, 32(2): 363-367.
- [68] 刘祖昕, 谢光辉. 菊芋作为能源植物的研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6):122-132.  
Liu Z X, Xie G H. An overview of researches on *Jerusalem artichoke* as a biofuel crop [J]. J. Chin. Agric. Univ., 2012, 17(6):122-132.
- [69] 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, 40(3):606-609.  
Wang J X, Liu Z P, Long X H, et al.. Effects of growth, photosynthesis and water consumption of *Helianthus tuberosus* irrigated with seawater [J]. Chin. J. Soil Sci., 2009, 40(3): 606-609.
- [70] Kays S J, Nottingham S F. Biology and Chemistry of Jerusalem Artichoke: *Helianthus tuberosus* L [M]. USA: CRC Press, 2007.
- [71] Shannon M C, Grieve C M. Tolerance of vegetable crops to salinity [J]. Sci. Horticul., 1998, 78(1): 5-38.
- [72] Kosaric N, Cosentino A, Wiczorek A, et al.. The *Jerusalem artichoke* as an agricultural crop [J]. Biomass, 1984, 5:1-36.
- [73] 张国新, 杨扬, 薛志忠. 菊芋应用价值及其在河北滨海盐碱区的发展前景[J]. 河北农业科学, 2011, 15(8):72-74.  
Zhang G X, Yang Y, Xue Z Z. Application value and development prospect of *Jerusalem artichoke* in coastal saline area of Hebei Province [J]. J. Hebei Agric. Sci., 2011, 15(8):72-74.
- [74] 李高扬, 李建龙, 王艳, 等. 利用高产牧草柳枝稷生产清洁生物质能源的研究进展[J]. 草业科学, 2008, 25(5):15-21.  
Li G Y, Li J L, Wang Y, et al.. Research progress on the clean bio-energy production from high yield *Panicum virgatum* [J]. Pratacul. Sci., 2008, 25(5):15-21.
- [75] 于晓丹, 杜菲, 张蕴薇. 盐胁迫对柳枝稷种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 草地学报, 2010, 18(6):810-815.  
Yu X D, Du F, Zhang Y W. Effects of salt stress on switchgrass seed germination and seedling growth [J]. Acta Pratacul. Sin., 2010, 18(6):810-815.
- [76] 范希峰, 侯新村, 朱毅, 等. 盐胁迫对柳枝稷苗期生长和生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6):1476-1480.  
Fan X F, Hou X C, Zhu Y, et al.. Impacts of salt stress on the growth and physiological characteristics of *Panicum virgatum* seedlings [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2012, 23(6):1476-1480.
- [77] 刘吉利, 朱万斌, 谢光辉, 等. 能源作物柳枝稷研究进展[J]. 草业学报, 2009, 28(3):232-240.  
Liu J L, Zhu W B, Xie G H, et al.. The development of *Panicum virgatum* as an energy crop [J]. Acta Pratacul. Sci., 2009, 28(3):232-240.
- [78] Hsu F H, Nelson C J, Matches A G. Temperature effects on germination of perennial warm-season forage grasses [J]. Crop Sci., 1985, 25(2): 215-220.
- [79] 国家牧草产业技术体系科技示范基地和山东省农业科学院牧草科技示范基地“落户”东营[EB/OL]. <http://www.dyn.gov.cn/news>, 2010-9-13.
- [80] 山东省农业可持续发展研究所研究所 2011 年度年检信息公开内容[EB/OL]. <http://www.saas.ac.cn/saas/?notice-15.html>, 2012-3-16.
- [81] 于彩英. 蓖麻出苗率及苗期耐盐量测定[J]. 山东农业科学, 1985, 3:15-17.
- [82] 王金妹, 阮成江, 黄明月, 等. 蓖麻耐盐性的初步研究[J]. 河南农业科学, 2011, 40(5):67-73.  
Wang J M, Ruan C J, Huang M Y, et al.. Preliminary study of salt-tolerant of *castor* [J]. J. He'nan Agric. Sci., 2011, 40(5):67-73.
- [83] 张红菊, 赵怀勇. 蓖麻对盐渍土的改良效果研究[J]. 中国水土保持, 2010, 7:43-44.
- [84] 佟拉嘎, 荣华, 李海燕. 蓖麻油质生物柴油的制备及其性能[J]. 化工进展, 2010, S1:166-168.  
Tong L G, Rong H, Li H Y. Preparation and properties of *castor* oil biodiesel[J]. Chem. Ind. Engin. Prog., 2010, S1: 166-168.
- [85] Dias J M, Araújo J M, Costa J F, et al.. Biodiesel production from raw castor oil [J]. Energy, 2013, 53:58-66.
- [86] Andreatza R, Bortolon L, Pieniz S, et al.. Use of high-yielding bioenergy plant castor bean (*Ricinus communis* L.) as a potential phytoremediator for copper-contaminated soils [J]. Pedosphere, 2013, 23(5): 651-661.
- [87] Ruiz Olivares A, Carrillo-González R, González-Chávez M C A, et al.. Potential of castor bean (*Ricinus communis* L.) for phytoremediation of mine tailings and oil production [J]. J. Environ. Manage, 2013, 114: 316-323.
- [88] 初宝瑞, 张家斌. 滨州无棣县盐碱地上试种蓖麻成功[EB/OL]. <http://finance.sina.com.cn/money/future/>, 2013-08-21.