

木质纤维素草本植物边际土地可持续生产模式探究

侯新村¹ 范希峰¹ 陈龙池² 朱毅¹ 武菊英^{1*} 赵春桥¹ 李钰莹¹

(1. 北京市农林科学院 北京草业与环境研究发展中心/农业部都市农业(北方)

重点实验室,北京 100097;

2. 中国科学院 沈阳应用生态研究所/森林与土壤生态国家重点实验室,沈阳 110016)

摘要 基于边际土地长期规模化种植木质纤维素草本植物有利于解决我国非粮生物质原料可持续生产和供应问题。然而,由生物质原料集约化生产与边际土地生境所致的一些潜在问题会影响木质纤维素草本植物的可持续生产。基于京郊边际土地木质纤维素草本植物规模化示范种植实践,提出了种类筛选、保护性耕作、混合种植、水肥管理、杂草控制、生物质收获等一系列可持续生产技术,构建了木质纤维素草本植物边际土地可持续生产模式,展望了今后开展木质纤维素草本植物可持续生产技术研究的主要内容,以期为我国非粮生物质原料的可持续生产和供应提供理论支持与技术支撑。

关键词 木质纤维素; 非粮生物质; 边际土地; 生产模式

中图分类号 S 216.2

文章编号 1007-4333(2014)02-0014-07

文献标志码 A

Sustainable production model of lignocellulosic herbaceous plant on marginal land in china

HOU Xin-cun¹, FAN Xi-feng¹, CHEN Long-chi², ZHU Yi¹, WU Ju-ying^{1*},
ZHAO Chun-qiao¹, LI Yu-ying¹

(1. Beijing Research and Development Center for Grass and Environment/Key Laboratory of Urban Agriculture (North) of Ministry of Agriculture, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;

2. Institute of Applied Ecology/State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract Lignocellulosic herbaceous plant has the potential to be cultivated on marginal land in large scale for a long run, for the sustainable production and supply of biomass feedstock in China in the future. Potential problems, due to the intensive production of biomass feedstock and the habitats of marginal land, would exert negative influences on its sustainable production. Based on the large-scale cultivation of lignocellulosic herbaceous plant on marginal land in Beijing suburb, the sustainable production techniques were proposed, namely, species screening, conservation tillage, mixed cultivation, water and fertilizer management, non-weeding, biomass harvest, etc. The sustainable production model of lignocellulosic herbaceous plant was constructed and the main research work on sustainable production technique was proposed, which would provide theoretical basis and technical support for the sustainable production and supply of non-food biomass feedstock on marginal land in China.

Key words lignocellulosic; non-food biomass; marginal land; production model

收稿日期: 2013-09-04

基金项目: 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJXC201102005); 北京市农林科学院青年科研基金(QNJJ201316); 北京市农林科学院科技创新基金(CXJJ201312)

第一作者: 侯新村, 副研究员, 博士, 主要从事草本能源植物研究, E-mail: houxincun@aliyun.com

通讯作者: 武菊英, 研究员, 主要从事草本植物资源研究, E-mail: wujuying1@263.net

木质纤维素主要由纤维素、半纤维素、木质素组成,是地球上资源最为丰富的可再生性生物质资源^[1-3],可以通过致密成型、热解、气化、水解、发酵等物理、化学或生物方法转化加工多种生物质能或生物基产品^[1-4],作为重要的第二代非粮生物质原料^[5],将成为未来大农业生产的重要组成部分^[6]。

木质纤维素草本植物是指富含木质纤维素、生物质产量高、生物质品质优良、抗病虫害、耐干旱瘠薄、生态适应性强、可以规模化开发利用的草本植物,常见种类如柳枝稷(*Panicum virgatum*)^[7-8]、芦竹(*Arundo donax*)^[8]、荻(*Miscanthus sacchariflorus*)^[8-9]、芒(*Miscanthus sinensis*)^[9]、奇岗(*Miscanthus × giganteus*)^[10]、杂交狼尾草(*Pennisetum americanum × Pennisetum purpureum*)^[11]等,多数为多年生克隆植物,在我国均有一定面积的自然群落分布或数十年的引种栽培基础,在我国适宜地区规模化种植应用的前景广阔:柳枝稷为原产于北美洲地区的优质牧草^[12],已经在我国引种栽培 20 余年^[13];芦竹自然分布在广东、海南、广西、贵州、云南、四川、湖南、江西、福建、台湾、浙江、江苏等地的河岸道旁、砂质壤土^[14];荻在北京、黑龙江、吉林、辽宁、河北、山西、河南、山东、甘肃、陕西等地的山坡草地、平原岗地、河岸湿地有自然群落分布^[15];芒遍布于江苏、浙江、江西、湖南、福建、台湾、广东、海南、广西、四川、贵州、云南等地海拔 1 800 m 以下的山地、丘陵、荒坡原野等地带^[16];奇岗为荻与芒的自然杂交种,已经在欧盟地区种植栽培近 80 年,我国已经引种栽培近 20 年,但是至今未发现其自然群落分布^[17-18];杂交狼尾草为美洲狼尾草(*Pennisetum americanum*)和象草(*Pennisetum purpureum*)的种间杂交种^[11,19],高产优质,抗逆性强,已经在我国引种栽培 30 余年^[19]。

进入 21 世纪以来,虽然国内不同研究机构提出的称谓各异,如高大禾草^[17]、木质纤维素植物或草本木质纤维素类能源植物^[20]、草本能源植物^[8,21-22]、纤维素类草本能源植物^[23]、纤维素类能源草^[24]、能源草^[25-27]、能源牧草^[28]、草类能源植物^[29]、能源作物^[30-32]、能源植物^[11,31]、草本纤维能源植物^[31]、纤维质能源植物或木质纤维素能源植物^[33],但均针对木质纤维素草本植物开展了广泛研究,其中,既有关于研究与应用现状及其发展趋势的综合性论述^[27-31],亦有关于其生物生态学特性与地理分布^[8,27,31]、逆境生理^[23]、种植与管理技术^[22,24]、生物质利用技

术^[26]、生产与应用潜力^[8,21,25]等方面的研究工作,阐明了木质纤维素草本植物在我国的应用前景。

生物质原料是生物质产业发展的基础。随着全球生物质产业加快发展,我国陆续出台《农业生物质能产业发展规划》(2007—2015 年)、《促进生物产业加快发展的若干政策》、《生物质能发展“十二五”规划》、《生物产业发展规划》等战略规划,明确提出科学合理开发利用边际土地,因地制宜规模化种植生物质原料植物,建设生物质原料基地。基于边际土地长期规模化种植木质纤维素草本植物并实现可持续生产,是解决我国非粮生物质原料可持续生产和供应问题的战略途径之一。

当前,国内研究机构尚未开展木质纤维素草本植物边际土地可持续生产模式的探究工作。在近年来京郊边际土地木质纤维素草本植物规模化示范种植实践基础上,本研究拟提出木质纤维素草本植物可持续生产技术,并构建木质纤维素草本植物可持续生产模式,以期为我国非粮生物质原料的可持续生产和供应提供理论支持与技术支撑。

1 木质纤维素草本植物边际土地可持续生产及其面临的潜在问题

木质纤维素草本植物边际土地可持续生产是指在长期规模化种植过程中,在能源与资源节约、生态环境友好的前提下实现生物质原料的优质与稳定生产,旨在解决木质纤维素草本植物边际土地长期规模化种植过程中的可持续性问题。其基本要求是,通过实施生态调控与栽培管理,维持或提高边际土地土壤肥力,适当控制木质纤维素生物质原料生产过程的能源与资源投入,同时必须保护边际土地生态环境和生物多样性。然而,由于生物质原料集约化生产与边际土地生境所致,木质纤维素草本植物可持续生产面临一些潜在问题。

1.1 木质纤维素草本植物生物生态学特性

木质纤维素草本植物的生物生态学特性是可持续生产的基础。对 23 种草本植物生物质产量的比较分析表明,相比其他草本植物,柳枝稷、芦竹、荻的生物质产量优势明显^[27],在京郊一处耕地——昌平区小汤山镇国家精准农业研究示范基地(以下简称小汤山)的最高生物质产量分别达到 28.33、34.46 和 29.67 t/hm²^[8,27],其他草本植物的生物质产量均在 15.00 t/hm² 以下^[27];在京郊一处边际土地——

昌平区马池口镇土楼村挖沙废弃地(以下简称土楼村),柳枝稷、芦竹、荻的生物质产量分别为 4.00、12.01 和 2.31 t/hm²[21,25],分别为小汤山最高生物质产量的 14.12%、34.67%和 7.79%。芒在欧盟地区的生物质产量达到 15.00~20.00 t/hm²,在中国华东地区的最高生物质产量达到 40.00 t/hm²[30]。然而,在边际土地规模化种植木质纤维素草本植物,尤其长期种植单一或少数种类时,可能导致物种单一化、物种多样性降低等问题,在一定程度上会影响其可持续生产。

木质纤维素草本植物利用光合作用源源不断地生产生物质原料,具有传统石化资源无可比拟的可再生性。然而,相比传统石化资源,木质纤维素草本植物的缺点亦较为明显:其生长发育的季节性,决定了生物质原料生产和供应的季节性[4],与生物质产业对原料的连续性需求之间存在一定的矛盾,加之其相对分散、密度低,需要采取分散收集、致密成型、集中运输和贮存等预处理措施缓解生物质原料生产和供应的季节性问题,以提高其可利用水平,但在预处理过程中又面临微生物侵蚀与自然霉变等难题[33]。而且,木质纤维素草本植物的低位发热量低于传统石化资源:原煤、原油、汽油、柴油的低位发热量分别为 20.91、43.07 和 42.65 MJ/kg^[34],在土楼村种植的柳枝稷、芦竹、荻的低位发热量分别为 17.87、18.21 和 17.97 MJ/kg^[21,25]。

1.2 边际土地生境

边际土地生境是木质纤维素草本植物可持续生产的保障。我国边际土地资源丰富[27,35-36],基于GIS技术的研究表明,我国适合草本植物种植的各类草地、盐碱地、滩涂地、裸露地等边际土地总计 6.47×10⁷ hm²[35]。基于边际土地规模化种植木质纤维素草本植物,有望实现生物质原料生产与边际土地生态治理的双赢[25,27]。然而,边际土地多数生境脆弱,原生植被盖度小,土壤肥力质量偏低,部分边际土地甚至已经属于退化土地。如果在边际土地长期规模化种植能源作物,实施集约化耕作,大量收获生物质,而没有应用相应的施肥、生物质还田或其他提高土壤肥力质量的技术,存在导致土壤养分流失与肥力质量下降的可能[37]。

木质纤维素草本植物耐干旱瘠薄,生态适应性强,可以利用木质纤维素草本植物实现边际土地地表裸露区域植被快速建植,对边际土地生态治理以

及物种多样性与生境多样性保护具有积极作用。然而,需要科学评价木质纤维素草本植物规模化种植对边际土地物种多样性与生境多样性造成的长期影响,尤其长期连片种植时,容易破坏原生植被与野生生物栖息地,降低边际土地的物种多样性与生境多样性[37-38]。美国与爱尔兰研究人员曾警告,虽然在替代传统石化资源、控制温室气体排放等方面具有良好的应用前景,但柳枝稷、芒的规模化种植存在造成物种多样性丧失的危险[39-40]。

2 木质纤维素草本植物边际土地可持续生产模式的主要内容

探究木质纤维素草本植物边际土地可持续生产模式,正是针对前述潜在问题,在生长季或生命周期的不同阶段应用相关可持续生产技术,充分发挥木质纤维素草本植物本身的生物生态学特性优势,创造有利于可持续生产的边际土地生境,实现可持续生产。

2008年以来,在京郊昌平、房山、密云、顺义、大兴、延庆等区县选取挖沙废弃地、污染土地、荒滩地、撂荒地等边际土地开展了柳枝稷、芦竹、荻、杂交狼尾草等木质纤维素草本植物的规模化示范种植,总计 202.00 hm²,并在生产实践中探索了规模化种植与管理技术[24]。在此基础上,提出了种类筛选、保护性耕作、混合种植、水肥管理、杂草控制、生物质收获等一系列可持续生产技术,构成木质纤维素草本植物边际土地可持续生产模式的主要内容(图1)。

2.1 种类筛选

因地制宜规模化种植木质纤维素草本植物是可持续生产的前提,因此,应该以种植土著物种与当地选育的品种为主[38],对于外来物种或品种,需要开展生态适应性评价或引种驯化,防止因其迅速扩张而导致的生物入侵现象。在此前提下,按照种类多元化的原则,筛选更多克隆构型、更多物种或品种的木质纤维素草本植物,以丰富其物种多样性;同时,注重成熟期多元化原则,尽可能实现按梯度收获期收获生物质[33],以缓解生物质原料生产和供应的季节性与生物质产业对原料需求的连续性之间的矛盾。

2.2 保护性耕作

作为一项现代农业系统工程技术,保护性耕作具有“少裸露”、“少动土”、“少污染”、“高保蓄”、“高

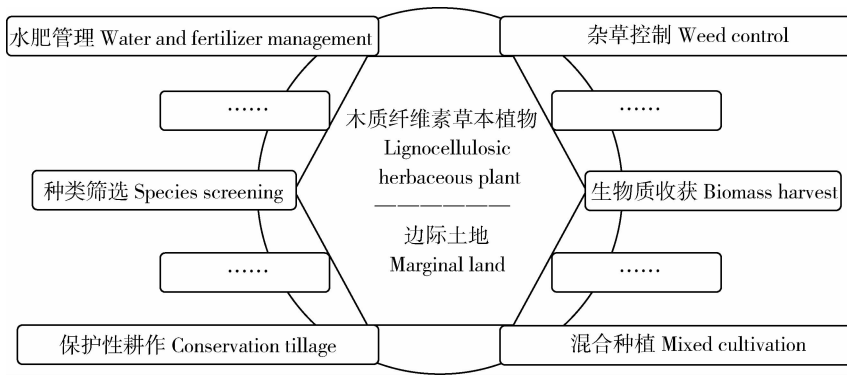


图1 木质纤维素草本植物边际土地可持续生产模式

Fig. 1 Sustainable production model of lignocellulosic herbaceous plant on marginal land in China

效益”等特点^[41]，有利于减弱对土壤表层、土壤生物、原生植被的扰动，保护物种多样性与生境多样性，控制土壤水分蒸发，提高土壤肥力质量。在我国干旱半干旱地区大面积开发利用边际土地、长期规模化种植木质纤维素草本植物，可能导致水土流失、风沙危害等环境问题，更需要应用保护性耕作技术，以防风固沙、保水肥土，保护边际土地生态环境，同时控制种植与管理成本。

2.3 混合种植

如前所述，在边际土地规模化种植木质纤维素草本植物过程中，应该筛选更多克隆构型、更多物种或品种的木质纤维素草本植物。由于不同木质纤维素草本植物具有不同的生态位与竞争力，探索木质纤维素草本植物的混合种植，将成为一种积极选择与有益尝试。

不同克隆构型、不同物种或品种的木质纤维素草本植物混合种植后，如果通过资源利用性竞争、植物化感作用等相互作用形成相对稳定的木质纤维素草本植物单优势种或多优势种群落，则有利于丰富其物种多样性，如果形成某一物种或品种木质纤维素草本植物的种群，则无需应用混合种植技术。如果开展木质纤维素草本植物与耐荫性强的豆科(Leguminosae)植物的混合种植试验，二者通过相互作用形成相对稳定的木质纤维素草本植物—豆科植物群落或以木质纤维素草本植物为优势种的群落，则可以利用豆科植物—根瘤菌共生体系的生物固氮功能提高土壤肥力质量。

2.4 水肥管理

在木质纤维素草本植物边际土地长期规模化种植过程中，除在种植时浇足一次安家水、施足一次底

肥外，应该适当控制人工灌溉与施肥(尤其化学肥料的施用)^[24]，以保护边际土地水土资源，同时控制木质纤维素生物质原料生产过程中水肥方面的能源与资源投入。

在木质纤维素草本植物生长发育过程中，边际土地土壤水分的保障可以应用保护性耕作技术，并结合自然降水实现，如在我国黄土高原雨养农业地区完全可以规模化种植柳枝稷^[30]；边际土地土壤肥力质量的提高可以应用保护性耕作技术、与豆科植物混合种植技术，并结合凋落物还田措施，以及生物质转化加工后的废渣、废液、灰分等废弃物或副产物还田措施实现。

2.5 杂草控制

杂草种类繁多，繁殖迅速，生长迅猛，常与栽培植物伴生，被视为有害之草^[42-43]和农业生产的大敌^[44]。然而，杂草本身也具有良好的生态效应^[42]，见草必除、除草务尽的做法在经济上不可取，也会对局部区域的生态环境造成一定的破坏^[43]。在可持续发展观念逐步增强的今天，可以通过栽培植物的资源利用性竞争优势和植物化感作用开展生态安全条件下杂草的有效控制^[45]。而且，随着现代生物科学的发展与自然资源可持续利用观念的增强，人们逐渐认识到，杂草并非无用。杂草作为一种潜在的生物质资源，有的可以用作植物性农药原料，如泽漆(*Euphorbia helioscopia*)^[42]，有的可以用作饲料原料，如小花棘豆(*Oxytropis glabra*)^[43]，有的可以作用化工原料，如盐角草(*Salicornia europaea*)^[42]，有的可以用作石油植物，如乳浆大戟(*Euphorbia esula*)^[43]；管理得当，杂草还可以防风固沙、保水肥土^[42-43]，并有利于保护物种

多样性与生境多样性。

同时,在木质纤维素草本植物边际土地规模化种植与管理过程中,人工防治杂草耗费大量的人力、物力、财力。因此,探索利用木质纤维素草本植物本身的生长竞争优势控制杂草的可行性,将成为一种积极选择与有益尝试。免除杂草后,如果通过资源利用性竞争、植物化感作用等相互作用形成相对稳定的以木质纤维素草本植物为优势种的群落,则有利于保护边际土地的物种多样性与生境多样性,可以利用木质纤维素草本植物有效控制杂草,实现低维护高效管理与杂草资源可持续利用,如果形成杂草群落,则不能应用免除杂草技术。

2.6 生物质收获

科学的生物质收获技术有利于木质纤维素草本植物可持续生产。在一个生长季中多次收获,会在该生长季收获更多的生物质,同时可以缓解生物质原料生产和供应的季节性,但是,连续多个生长季多次收获容易导致木质纤维素草本植物生命力衰退,缩短其生命周期与可利用年限,同时由于增加了木质纤维素草本植物种植频率以及边际土地耕作频率,会加剧土壤养分流失与土壤肥力下降。

收获生物质时,适当增加留茬高度,有利于减弱对土壤表层、土壤生物、原生植被的扰动,保护边际土地的物种多样性与生境多样性,控制土壤水分蒸发,增加生物质还田量,促进土壤有机质积累,提高土壤肥力质量^[46]。

延迟收获可以显著降低生物质产量,改善生物质品质,收获时间从12月推迟至翌年2月,因茎叶脱落而使芒草的生物质产量降低14%~15%,如果从翌年2月再推迟1个月,生物质产量又降低13%^[47];收获时间从10—11月推迟至翌年4—5月,因雨雪淋洗而使柳枝稷的灰分含量降低27%以上,各种矿质元素含量平均降低30%^[48],脱落的茎叶、淋洗的灰分与矿质元素还田后,有利于提高土壤肥力质量。延迟收获还有利于生物质充分干燥,降低预处理过程中的自然霉变风险。在我国干旱半干旱地区,收获时间从生长季末推迟至翌年春季,有利于减少秋冬与早春季节的地表裸露面积,控制土壤水分蒸发,防止土壤风蚀与风沙危害^[49];在秋冬季节,木质纤维素草本植物具有良好的直立性,如果开展延迟收获,可以为野生动物创造良好的栖息地,有利于保护边际土地的物种多样性与生境多样性。

3 木质纤维素草本植物边际土地可持续生产技术研究展望

在边际土地开展木质纤维素草本植物长期规模化种植过程中,可以通过长期试验研究,开展相关分析,为提出木质纤维素草本植物边际土地可持续生产技术、构建可持续生产模式奠定基础。

1)为筛选适应当地地理与气候条件以及边际土地生境的适宜木质纤维素草本植物种类,需要通过3~5个生长季的连续观测,对不同克隆构型、不同物种或品种木质纤维素草本植物的生长发育特性、生态适应性、生物质产量、生物质品质进行系统分析与评价。

2)在保护性耕作技术方面,可以连续3~5个生长季开展带状或片状种植、免耕或少耕种植、前茬残余秸秆覆盖、立茬免耕等保护性耕作技术及其不同组合方式处理,分析物种多样性与生境多样性、土壤水分含量与肥力质量以及木质纤维素草本植物生长发育特性、生物质产量、生物质品质的响应,阐明保护性耕作技术对可持续生产的积极作用。

3)在混合种植技术方面,需要按不同组合与配置方式混合种植不同克隆构型、不同物种或品种的木质纤维素草本植物,通过3~5个生长季的连续观测,分析它们之间的竞争关系及其相互作用类型,研究其群落演替趋势,揭示其生理生态机制。在此基础上,分析混合种植后的生长发育特性、生物质产量、生物质品质与单独种植之间的差异,探究木质纤维素草本植物之间的科学组合与合理配置方式及其对可持续生产的长期效应。

4)在杂草控制技术方面,需要连续3~5个生长季开展免除杂草技术处理,分析木质纤维素草本植物与杂草之间的竞争关系及其相互作用类型,研究其群落演替趋势,揭示其生理生态机制。在此基础上,分析免除杂草条件下,杂草生长发育是否处于可控制水平及其用作木质纤维素生物质原料的可行性与贡献率,木质纤维素草本植物能否正常生长发育,其生物质产量能否/需要几个生长季达到去除杂草条件下的水平,其生物质品质与去除杂草条件下的差异是否显著,探究免除杂草对可持续生产的长期效应。

5)在生物质收获技术方面,可以连续3~5个生长季开展收获次数、留茬高度、延迟收获等生物质收

获技术及其不同组合方式处理,分析物种多样性与生境多样性、土壤水分含量与肥力质量以及木质纤维素草本植物生长发育特性、生物质产量、生物质品质的响应,阐明科学的生物质收获技术对可持续发展的积极作用。

4 结 语

在传统石化资源日益匮乏的今天,生物质产业的可持续发展与全球可持续发展息息相关。生物质产业的可持续发展涉及生物质原料的可持续生产和供应,可持续收集、储藏和运输,以及生物质与生物基产品的可持续转化和利用等环节,其中,生物质原料的可持续生产和供应是生物质产业可持续发展的基础。木质纤维素草本植物边际土地可持续生产有利于解决我国木质纤维素非粮生物质原料可持续生产和供应问题,关乎第二代生物质产业发展,亦是生物质产业可持续发展的题中应有之义。

基于京郊边际土地木质纤维素草本植物规模化示范种植实践,本研究提出了一系列可持续生产技术,构建了木质纤维素草本植物边际土地可持续生产模式。由于对应着生长季或生命周期的不同阶段,不同可持续生产技术之间相对独立,对木质纤维素草本植物可持续生产发挥各自的积极作用与长期效应;同时,这些可持续生产技术又是相互连接、相互交叉的有机整体,构成木质纤维素草本植物边际土地可持续生产模式的主要内容。

木质纤维素草本植物可持续生产技术来源于生产实践,又指导生产实践,在生产实践中不断发展,木质纤维素草本植物可持续生产模式是一个持续发展的创新与开放体系,木质纤维素草本植物可持续生产模式探究是一项长期的理论探索与实践工程。在木质纤维素草本植物长期规模化种植中,需要针对生产实践中不断出现的新问题,补充发展新的可持续生产技术,逐步完善木质纤维素草本植物边际土地可持续生产模式,为我国非粮生物质原料的可持续生产和供应提供科学的理论支持与有力的技术支撑。

参 考 文 献

[1] 余强,庄新妹,袁振宏,等.木质纤维素类生物质制取燃料及化学品的研究进展[J].化工进展,2012,31(4):784-791

[2] 李园园,吴虹,黄超,等.发酵性丝孢酵母 HWZ004 利用水稻秸

秆水解液发酵产油脂[J].生物工程学报,2011,27(9):1309-1316

[3] 高瑞芳,袁旭峰,李佳佳,等.四种含木质纤维素原料在牛粪液中的酸化[J].农业工程学报,2012,28(17):199-204

[4] Gabriele Centi,Rutger A. Van Santen.可再生资源催化技术:从资源到能源生产[M].黄和,余定华译.北京:化学工业出版社,2011:17-33,120-131

[5] 谢光辉.论我国非粮生物质原料的非粮属性[J].中国农业大学学报,2013,18(6):1-5

[6] 赵其国,黄季焜.农业科技发展趋势与面向2020年的战略选择[J].生态环境学报,2012,21(3):397-403

[7] Schmer M R, Vogel K P, Mitchell R B, et al. Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass[J]. PNAS, 2008, 105(2): 464-469

[8] 范希峰,侯新村,左海涛,等.三种草本能源植物在北京地区的产量和品质特性[J].中国农业科学,2010,43(16):3316-3322

[9] Yan Juan, Chen Wenli, Luo Fan, et al. Variability and adaptability of *Miscanthus* species evaluated for energy crop domestication[J]. GCB Bioenergy, 2012, 4(1): 49-60

[10] Nishiwaki A, Mizuguti A, Kuwabara S, et al. Discovery of natural *Miscanthus* (Poaceae) triploid plants in sympatric populations of *Miscanthus sacchariflorus* and *Miscanthus sinensis* in southern Japan[J]. Amer J Bot, 2011, 98(1): 154-159

[11] 范希峰,侯新村,朱毅,等.杂交狼尾草作为能源植物的产量和品质特性[J].中国草地学报,2012,34(1):48-52

[12] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志(第十卷第一分册)[M].北京:科学出版社,1990:200-201

[13] 马永清,郝智强,熊韶峻,等.我国柳枝稷规模化种植现状与前景[J].中国农业大学学报,2012,17(6):133-137

[14] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志(第九卷第二分册)[M].北京:科学出版社,2002:20-21

[15] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志(第十卷第二分册)[M].北京:科学出版社,1997:26-27

[16] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志(第十卷第二分册)[M].北京:科学出版社,1997:6-7

[17] 席庆国,洪浩.外来植物奇岗的生物学特征[J].草业科学,2008,25(2):26-28

[18] 席庆国.利用“巨芒”生产能源与木纤维[J].上海轻工业,1996,26(3):19-20

[19] 陈锦新,张国平,赵国平.杂交狼尾草生育特性研究[J].草业科学,1998,15(4):14-17

[20] 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

[21] 侯新村,范希峰,武菊英,等.边际土地草本能源植物应用潜力评价[J].中国农业大学学报,2013,18(1):172-177

[22] 侯新村,范希峰,武菊英,等.挖沙废弃地草本能源植物生物质品质对氮肥的响应[J].中国草地学报,2011,33(1):11-17

[23] 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

- [24] 侯新村,范希峰,武菊英,等.京郊边际土地纤维素类能源草规模化种植与管理技术[J].作物杂志,2011(4):98-101
- [25] 侯新村,范希峰,武菊英,等.京郊挖沙废弃地能源草生产潜力评价[J].自然资源学报,2011,26(10):1768-1774
- [26] 段仰凯,田沈,于泳,等.改进的柳枝稷预处理方法及乙醇发酵研究[J].太阳能学报,2009,30(12):1709-1712
- [27] 范希峰,侯新村,武菊英,等.我国北方能源草研究进展及发展潜力[J].中国农业大学学报,2012,17(6):150-158
- [28] 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
- [29] 李平,孙小龙,韩建国,等.能源植物新看点:草类能源植物[J].中国草地学报,2010,32(5):97-100
- [30] 程序,朱万斌,谢光辉.论农业生物能源和能源作物[J].自然资源学报,2009,24(5):842-848
- [31] 易自力.芒属能源植物资源的开发与利用[J].湖南农业大学学报:自然科学版,2012,38(5):455-463
- [32] 周中仁,吴文良.生物质能研究现状及展望[J].农业工程学报,2005,21(12):12-15
- [33] 彭源德.纤维质生物降解制备燃料乙醇研究现状[J].中国麻业科学,2009,31(增1):101-107
- [34] 国家发展和改革委员会能源研究所,中国标准化研究院,中国节能监察信息网.GB/T 2589—2008.综合能耗计算通则[S].北京:中国标准出版社,2008
- [35] Zhuang Dafang, Jiang Dong, Liu Lei, et al. Assessment of bioenergy potential on marginal land in China[J]. Renew Sust Energ Rev, 2011, 15(2): 1050-1056
- [36] 中国可再生能源发展战略研究项目组.中国可再生能源发展战略研究丛书·生物质能卷[M].北京:中国电力出版社,2008:40-48
- [37] 杨海龙,吕耀,封志明,等.生物液体燃料发展的环境影响研究进展[J].自然资源学报,2012,27(2):344-352
- [38] 张凤春,李培,曲来叶.中国生物质能源植物种植现状及生物多样性保护[J].气候变化研究进展,2012,8(3):220-227
- [39] Cook J, Beyea J. Bioenergy in the United States: progress and possibilities[J]. Biomass Bioenergy, 2000, 18(6): 441-455
- [40] Dauber J, Jones M B, Stout J C. The impact of biomass crop cultivation on temperate biodiversity [J]. GCB Bioenergy, 2010, 2(6): 289-309
- [41] 陈源泉,隋鹏,高旺盛,等.中国主要农业区保护性耕作模式技术特征量化分析[J].农业工程学报,2012,28(18):1-7
- [42] 陈欣,唐建军,赵惠明,等.农业生态系统中杂草资源的可持续利用[J].自然资源学报,2003,18(3):340-346
- [43] 张无敌,刘士清.有害杂草的利用观[J].生命科学,1995,7(1):30-33
- [44] 毛文华,张银桥,王辉,等.杂草信息实时获取技术与设备研究进展[J].农业机械学报,2013,44(1):190-195
- [45] 孔垂华.植物与其它有机体的化学作用:潜在的有害生物控制途径[J].中国农业科学,2007,40(4):712-720
- [46] 尹辉,张恩和,王琦,等.春小麦留茬处理对复种油菜产量和水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2011,27(2):83-88
- [47] Lewandowski I, Heinz, A. Delayed harvest of *Miscanthus*—influences on biomass quantity and quality and environmental impacts of energy production[J]. Eur J Agron, 2003, 19(1): 45-63
- [48] Adler P R, Sanderson M A, Boateng A A, et al. Biomass yield and biofuel quality of switchgrass harvested in fall or spring [J]. Agron J, 2006, 98(6): 1518-1525
- [49] 赵沛义,妥德宝,李焕春,等.带田残茬带宽度及高度对土壤风蚀模数影响的风洞试验[J].农业工程学报,2011,27(11):206-210

责任编辑:袁文业