

我国北方能源草研究进展及发展潜力

范希峰 侯新村 武菊英* 朱毅

(北京市农林科学院 草业与环境研究发展中心,北京 100097)

摘要 能源草是一类重要的能源植物。立足北方地区边际土地,我国已在能源草种质资源收集筛选、产量潜力评价、生物质品质分析、生态效应评估等方面开展了大量研究工作,并取得重要研究进展。在我国北方有栽培历史且生物质产量高于 $3.0 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$ 的草种主要有23种,其中生物质产量高于 $20 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$ 的有柳枝稷(*Panicum virgatum*)、芒草(*Miscanthus* spp.)、芦竹(*Arundodonax*)和杂交狼尾草(*Pennisetum americanum* × *P. Purpureum*)4种,它们在适应性、产量、品质方面各有优势,在我国北方地区开发利用前景广阔,但存在杂交狼尾草在我国北方地区不能越冬,芦竹和低地型柳枝稷越冬率低的问题。因此,在我国北方地区收集能源草资源,既要考虑产量、品质,还需兼具耐寒、抗旱或耐盐能力。在广泛收集资源的基础上,明确各能源草在我国北方的适应范围、种植区划和发展潜力,通过育种技术进一步提高能源草的产量、品质和抗逆能力,建立配套栽培管理技术,实现能源草多元化、区域化种植利用,对其经济社会效益和生态效应进行系统评估,构建评价技术体系,应是目前我国北方能源草开发利用的重点研究方向。

关键词 能源草; 边际土地; 生产潜力

中图分类号 S 216.2

文章编号 1007-4333(2012)06-0150-09

文献标志码 A

Research progress and development potential analysis of bioenergy grass in the north of China

FAN Xi-feng, HOU Xin-cun, WU Ju-ying*, ZHU Yi

(Beijing Research and Development Center for Grass and Environment,
Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract Bioenergy grasses display many beneficial attributes as energy crops, and a lot of works have been carried out for their germplasm screening, yield and quality evaluation, ecological effects evaluation in the north of China. 23 species of grass continuously cultivated in the north area with biomass yield higher than $3.0 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{year})$ have been identified. Among these species, the biomass yield of switchgrass (*Panicum virgatum*), miscanthus (*Miscanthus* spp.), giant reed (*Arundodonax*) and hybrid pennisetum (*Pennisetum americanum* × *P. Purpureum*) are higher than $20 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{year})$, they have been superior in adaptability, yield and quality etc. The four kinds of grasses are promising in the north area, but existing problems should be taken into consideration; hybrid pennisetum cannot live through the winter; giant reed and highland ecotype's switchgrass have a low overwintering rate. In conclusion, the germplasm collected in north area should be with superior yield, quality and relatively high cold, drought and salt resistance. The main researches on the development and utilization of bioenergy grass in north area include: extensive collection of germplasm, reveal of the applicable scope, regional planning and development potential of grass and tapping the comprehensive potential, improvement of yield, quality and stress resistance by means of breeding, technology of cultivation and management, systematic evaluation of beneficial and ecological effects and establishment of evaluation system.

收稿日期: 2012-06-27

基金项目: 农业部 948 项目(2011-Z62); 北京市科技计划项目(Y0605060000701, Z09090501040902, Z09050600630901, D101105046410001)

第一作者: 范希峰, 助理研究员, 主要从事能源草栽培育种研究, E-mail: fanxifengcau@yahoo. cn

通讯作者: 武菊英, 研究员, 主要从事草业科学研究, E-mail: wujuying1@263. net

Key words bioenergy grass; marginal land; production potential

随着化石燃料日趋枯竭和生态环境日渐恶化,可再生替代能源的开发利用成为时代需求。生物质能被认为是最具前景的可再生能源之一^[1],因为,生物质是绿色植物通过光合作用形成的有机体,其种类多,数量大,可转化为气、液、固 3 种形态燃料,还可生产多种生物基产品。因此,高光效高生物量能源植物的开发利用是生物质原料供应的重要保障^[2]。其中,能源草(指纤维素类草本能源植物)具有多年生、抗性强、光能利用效率高、种植成本低、生态效益好和适宜在边际土地上种植等诸多优点,被认为是最具开发利用前景的能源植物之一^[3-5]。

欧美国自 20 世纪 80 年代开始对能源草进行系统筛选,已培育出多个专用能源草品种并实现了规模化种植和开发利用。美国能源部早在 1984 年就启动了“草本能源植物研究计划项目”(1990 年更名为“生物质能原料发展计划项目”),通过对 35 种草本植物的系统筛选,获得 18 种具有开发利用潜力的能源草,其中 C3 和 C4 植物各 9 种,并认为柳枝稷(*Panicum virgatum*)最有潜力,随后启动多项课题资助柳枝稷研究^[3,6],目前已培育出多个柳枝稷品种,如 Alamo、Kanlow 和 Cave-in-Rock 等。欧洲自 1989 年开始,先后启动了“JOULF 计划”、“AIR 计划”、“FAIR 计划”和“STAR 计划”等多个专项,在全球范围内搜集能源草资源^[3],已在能源草生殖、发育、种植管理、收获加工等领域取得重要进展^[7-8]。欧美国综合了生物产量、水分和养分利用、生态影响和生产成本等因素,普遍认为能源草是边际土地上最具潜力的能源植物,在广泛收集资源并选育专用能源草品种的基础上,积极推动能源草的规模化种植和开发利用,已在能源草压缩成型、气化、燃烧发电、纤维素乙醇转化等领域取得重要进展^[4]。据 Clifton-Brown^[9] 的报道,2000 年能源草(芒草 *Miscanthus* spp.)的产电量在欧盟 15 国中占其总发电量的 9%,其中爱尔兰最高,占总发电量的 37%。

我国近年来也开始重视能源草研究和开发利用,北京市农林科学院在 10 余项国家和北京市科技计划项目的支持下,共收集柳枝稷、芒草、芦竹(*Arundo donax*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)和杂交狼尾草(*Pennisetum americanum* × *P.*

Purpureum)等国内外能源草资源 23 种共 208 份,对其系统开展了生态适应性评价、抗逆性评价^[10-14]、品种选育、栽培管理技术^[15-19]、产量和品质特性^[20-23]、生态效益^[24-25]和利用前景^[26-27]等方面的研究,已在北京地区利用挖沙废弃地、河滩地、污染农田等多种类型边际土地示范种植 200 hm² 以上,并与当地生物质颗粒成型加工厂、生物质气化站合作进行产业化示范应用,同时与首都师范大学合作在能源草纤维素乙醇转化方面也取得重要研究进展。中国科学院水土保持研究所在西北干旱半干旱地区系统研究了柳枝稷的适应性^[28-29]、生理特性^[30-31]、产量水平^[32-34]和生态效益^[35-37]等;中国农业大学^[38]、山西农科院^[39]、黑龙江农科院^[40]等单位也分别对柳枝稷或芒草进行了研究。以上研究为我国北方地区(包含按照地里区域划分的北方地区和西北地区 2 个区域)能源草开发利用奠定了基础。笔者对我国北方地区能源草研究进展进行综述,分析其开发利用前景,旨在促进我国能源草研究和开发利用。

1 能源草种质资源收集、筛选

在我国北方地区有栽培或引种历史,有报道^[20-21,24,41-43]干物质产量在 3.0 t/(hm²·年)以上的多年生草本植物主要有 23 种(表 1)。这些草目前主要用于饲草、造纸原料或生态修复,而作为能源草以生产生物质原料为目的的主要有柳枝稷、芒草、芦竹和杂交狼尾草 4 种,它们在产量上较其他草种具有明显优势。

柳枝稷原产于北美地区,属禾本科黍属,系多年生高大丛生的 C4 草本植物,是目前美国研究能源植物的模式植物^[3]。我国科研工作者自 1992 年起通过多种途径将柳枝稷引入我国北方地区,并对其系统进行研究^[37]。柳枝稷据生态型可分为低地型和高地型^[3],低地型起源于低纬度地区,喜温暖湿润的气候条件,株型高大,生物量高,但耐寒性差,在我国北方地区越冬率低;高地型起源于高纬度地区,抗旱耐寒能力强,但生物量相对较低,在我国北方地区不存在越冬问题。北京地区(N 39°34', E 116°28')低地型品种‘Alamo’、‘Kanlow’的产量显著高于高地型品种‘Blackwell’,‘Pathfinder’,‘Trailblazer’,

表1 我国北方地区多年生草资源的产量和品质特征
Table 1 Yield and quality characters of perennial grass in the north of China

草种	光合特征	株高/cm	报道产量/(t/hm ²)	文献来源
芨芨草 <i>Achnatherum splendens</i>	C3	50~250	2.00~3.00	[41]
羽茅 <i>A. sibiricum</i>	—	50~150	4.50~5.30	[41]
沙芦草 <i>Agropyron mongolicum</i>	C3	40~90	2.30~3.00	[41]
西伯利亚冰草 <i>A. sibiricum</i> (Willd.) Beauv.	C3	30~60	6.38*	[41]
准格尔看麦娘 <i>Alopecurus songoricus</i>	—	40~80	3.75	[41]
燕麦草 <i>Arrhenatherum elatius</i>	—	100~150	7.50~9.40*	[41]
白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>	C4	25~80	9.00	[41]
鸭茅 <i>Dactylis glomerata</i>	C3	70~120	9.40*	[41]
羊草 <i>Leymus chinensis</i>	C3	30~90	3.00~7.75	[41-43]
赖草 <i>L. secalinus</i>	C3	45~100	4.00~11.00	[41]
粟草 <i>Milium effusum</i>	—	90~150	5.43*	[41]
狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i>	C4	30~125	6.25*	[41]
中亚狼尾草 <i>P. centrasiaticum</i>	C4	30~120	11.50	[41]
藨草 <i>Phalaris arundinacea</i>	C3	60~140	10.60	[41,43]
猫尾草 <i>Phleum pretense</i>	C3	10~100	9.40~15.00*	[41]
星星草 <i>Puccinellia tenuiflora</i>	—	30~60	5.50~7.50	[41]
短柄鹅观草 <i>Roegneria brevipes</i>	C3	30~120	8.25~11.25	[41]
大米草 <i>Spartina anglica</i>	C4	20~150	3.75~7.5*	[41]
无芒雀麦 <i>Bromus inermis</i>	C3	90~130	4.50~6.00	[43]
柳枝稷 <i>Panicum virgatum</i>	C4	150~300	6.77~28.33	[21]
荻 <i>Triarrhena sacchariflora</i>	C4	246~383	7.00~29.67	[21]
芦竹 <i>Arundo donax</i>	C3	400~486	16.17~34.46	[21]
杂交狼尾草 <i>Pennisetum americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	C4	419~430	40.14~59.22	[20,24]

注：“*”文献中报道的产量数据为鲜重，按照70%的含水率折算为干重数据。“—”文献中没有该草种的光合特征。

‘Forestburg’和‘Shawnee’等，但‘Alamo’和‘Kanlow’2个品种的越冬率受到生长年限、土壤类型、种植方式和最低气温等多种因素影响，正常年份越冬率可达80%以上，以直接播种方式种植的低于以育苗移栽方式种植的，在挖沙废弃地生境中生长的低于在农田中的，生长年限高于5年后柳枝稷的越冬率明显降低，遭遇极端低温天气越冬率也明显降低。同样这2个品种在宁夏固原(N 35°59′~36°02′, E 106°26′~106°30′)和陕西定边(N 36°49′~37°53′, E 107°15′~108°22′)也不能越冬，但在陕西杨凌(N 34°12′~34°20′, E 108°~108°7′)能够安全越冬^[34]。高地型品种在北京、宁夏、山西和陕西等地均可以安全越冬。而在我国北纬39°度以北地

区，尚未见有关柳枝稷作为能源植物适应性和产量潜力的研究报道。

芦竹在全球热带亚热带均有分布，属禾本科芦竹属，系多年生高大C3草本植物，在我国南方省份分布较广^[44]。北京地区种植试验结果表明，芦竹生物质产量可以达到45 t/(hm²·年)以上，高于柳枝稷和芒草^[21]，但芦竹也存在越冬问题，芦竹根茎中水分含量较高，且随着生长年限增加根茎会逐渐突出地面，很容易造成冻害而影响越冬，在北京地区随种植年限增加，芦竹的越冬率逐渐降低，超过5年以后，越冬率一般不足50%，需要更新复种。北京以北地区，芦竹作为能源植物的研究未见文献报道。

芒草在亚洲地区有广泛分布,属禾本科芒属,系多年生高大 C4 植物,我国是芒属植物的分布中心之一,拥有其 13 个种中的 8 种,南至台湾,北至黑龙江,东至沿海地区,西至四川、陕西等省均有其自然群落分布^[26,44],主要生长于山地、丘陵、荒坡和撂荒地等边际土地上,这类土地往往存在干旱、渍涝、贫瘠、盐碱和低温等多种逆境胁迫,因此该类植物的野生资源中不乏对逆境胁迫具有较强抗性的优良种质,为筛选、培育优良品种提供了物质基础。在我国北方地区广泛分布的芒草有 3 种分别为金县芒(*M. jinxianensis*)、紫芒(*M. purpurascens*)、和荻(*T. sacchariflora*),虽然芒(*M. sinensis*)、南荻(*T. lutarioriparia* spp.) 主要分布在我国南方省份,但引种试验结果表明,二者均可以再北京地区安全越冬,且长势良好。五节芒(*M. floridulus*)、高山芒(*M. transmorrisonensis*) 和黄金芒(*M. flavidus*) 在北京地区不能越冬。荻和南荻在我国北方地区的适应性很好,返青早,不存在越冬问题,生长迅速,冬季失水速率快,11 月收获生物质含水量低于 10%,在北京地区生物质产量最高可达到 29.67 t/(hm²·年)^[21]。种子小且产量低,不适宜直接播种种植,目前生产上主要通过根茎繁殖,但面临繁殖系数较低,用工多,种植成本高等问题。

杂交狼尾草(*Pennisetum americanum* × *P. Purpureum*),属禾本科狼尾草属,是多年生高大 C4 植物,是美洲狼尾草(*Pennisetum americanum*) 和象草(*P. purpureum*) 的种间杂交种^[45],较好地结合了双亲的优良性状,杂种优势明显,产量高、抗逆性强、较耐盐、对土壤要求不高,作为优质牧草被广泛种植。在北京地区生境条件较好农田中产量可达 40.14~59.22 t/(hm²·年)^[21,24],但在我国北方地区不能越冬,可以通过茎秆繁殖和种子繁殖,对土壤、水分和肥力的要求较其他能源草高。

综上所述,北方地区能源草种植存在显著矛盾,起源于低纬度地区的能源草种(如低地型柳枝稷、芦竹、杂交狼尾草、五节芒等),引种到北方地区以后产量优势明显,但存在越冬问题;起源于高纬度地区的能源草种,不存在越冬问题,但普遍生物量较小。其中只有荻和南荻表现较好,南荻起源于低纬度地区,荻在高低纬度都有分布,二者生物量较高,且在北方不存在越冬问题,应该是北方地区重点研究的能源

草种。

2 主要能源草在我国北方地区的产量潜力

能源草在肥力条件较好的农田中种植,产量潜力可以充分发挥,在干旱、盐碱或贫瘠的边际土地上种植,其产量水平会明显受到抑制。因此,对能源草的产量潜力进行评价,这两种种植条件均需要考虑。

北京地区,综合表现优良的柳枝稷品种为 Alamo,在农田中最高产量为 28.33 t/hm²^[21],在条件中等的密云水库荒滩地上的产量为 19.5 t/hm²,在干旱贫瘠的挖沙废弃地上的产量只有 4.0 t/hm²^[22-25]。黄土高原地区柳枝稷最高产量达到 25.01 t/hm²;半干旱黄土丘陵沟壑区柳枝稷生物量可达到 15 t/hm²;川地平均产量维持在 10.00~11.54 t/hm²,而坡地、梯田、山地的生物量分别只有为 1.14、2.12 和 2.00 t/hm²^[32-37]。山西省农科院生物研究所苗圃内,第 1 年柳枝稷‘Traiblazer’生物量为 6.88 t/hm²,第 2 年为 13.00 t/hm²^[39]。

北京地区,建植当年荻的生物量可达 14.77 t/hm²,第 2 和第 3 年分别达 20.36 和 39.05 t/hm²,采取适当的栽培措施可以进一步提高产量^[18-19,21];荻在北京密云水库荒滩地上长势良好,最高产量达到 25.35 t/hm²,在高速公路两侧废弃地上可达 18.90 t/hm²,在生境条件比较恶劣的挖沙废弃地上可达 2.31 t/hm²^[22-25]。黑龙江省荻的生物量可达 37.50 t/hm²^[40];山东省微山县可达 43.76 t/hm²^[46](表 2)。

北京地区,建植当年芦竹生物质量可达 16.17 t/hm²,第 2 和第 3 年分别达 30.48 t/hm² 和 34.46 t/hm²^[21];在石油烃污染农田中的产量可达 47.08 t/hm²^[24];在挖沙废弃地上为 11.45 t/hm²^[27]。杂交狼尾草的产量为 40.14~48.54 t/hm²,最高产量为 59.22 t/hm²,但在生境条件较差挖沙废弃地上生长不佳(表 2)。

综上所述,我国北方有关能源草产量潜力的研究主要集中在北京和黄土高原地区,这 2 个地区的气候条件在北方地区虽然具有一定的代表性,但由于我国北方地区不同区域的气候条件、边际土地类型具有很大差异,因此现有数据尚不能完全体现能源草在我国北方地区的产量潜力,相关研究工作需要进一步深入开展。

表2 主要能源草在我国北方地区的产量潜力

Table 2 Yield potential of main bioenergy grass in the north of China

草种	试验地点	试验地类型	品种	取样时间/年*	产量/(t/hm ²)	文献来源
柳枝稷	陕西省安塞县	农田	—	5~6	7.50~15.00	[32-37]
		川地	—	>10	10.00~13.98	[32-37]
		山地	—	>10	2.00	[32-37]
		坡地	—	10	1.14~2.36	[32-37]
		梯田	—	10	1.20~2.65	[32-37]
	北京昌平区	农田	Shawnee	1	11.70	[38]
			Trailblazer	1	6.90	[38]
	山西太原市	农田	Trailblazer	1	6.88	[39]
			Trailblazer	2	13.00	[39]
	北京昌平区	农田	Alamo	4	28.33	[21]
	北京昌平区	挖沙废弃地	Alamo	3	3.55~4.00	[22-25]
	北京密云县	密云水库荒滩地	Alamo	3	19.50	[22-25]
	北京房山区	石油烃污染农田	Alamo	3	23.23	[24]
	北京密云县	公路两侧废弃地	Alamo	3	15.30	[22-25]
芒草	北京昌平区	农田	荻	3~4	28.28~29.67	[21]
	北京昌平区	挖沙废弃地	荻	3	2.31	[22-25]
	北京密云县	密云水库荒滩地	荻	3	25.35	[22-25]
	北京房山区	石油烃污染农田	荻	3	28.22	[24]
	北京密云县	高速公路两侧废弃地	荻	3	18.90	[22-25]
	黑龙江省农科院	试验田	荻	—	37.50	[42]
	山东微山县	荒滩地	荻	—	43.76	[46]
芦竹	北京昌平区	农田	—	3~4	34.37~34.46	[21]
		挖沙废弃地	—	3	11.45	[27]
	北京房山区	石油烃污染农田	—	1	47.08	[24]
杂交狼尾草	北京昌平区	农田	—	1	40.14~48.54	[21]
	北京房山区	石油烃污染农田	—	1	59.22	[24]

注：“*”成功建植后，在第几年进行取样测定干物质产量。“—”文献中没有供试草种的品种名称。

3 主要能源草生物质品质特性

作为优良的能源草品种，除具有较高的生物质产量外，还应具有较高的生物质品质，以适应不同的转化利用方式，如气化、液化、燃烧等。

北京地区，柳枝稷、荻、芦竹和杂交狼尾草4种草的热值分别达到17.98、18.03、18.29和17.02 MJ/kg^[21]，均高于玉米和小麦秸秆^[47-54]（表3）。

柳枝稷、荻、芦竹和杂交狼尾草4种草的生物质组分主要为纤维素、半纤维素和木质素，总含量

在66.08%以上^[21]，纤维素、半纤维素总含量为57.16%~64.80%^[21]，与延迟收获的玉米秸秆相当^[47]；木质素含量为5.84%~8.92%^[21]，均低于成熟后的玉米秸秆^[47]。从纤维素燃料乙醇生产角度考虑，4种草中柳枝稷和荻的纤维素、半纤维素总含量高，木质素含量低，有利于水解发酵（表3）。

柳枝稷、荻、芦竹和杂交狼尾草的生物质组分中C、H两元素总含量在50%左右，其中碳含量为41.86%~44.52%；氢含量为5.62%~6.10%^[21]，与小麦和玉米秸秆相当^[47-54]，而能源草N含量为

表 3 主要能源草生物质品质特性
Table 3 Biomass quality character of main bioenergy grass

指标	柳枝稷 ^[21]	芒属 ^[21]	芦竹 ^[21]	杂交狼尾草 ^[20]	玉米秸 ^[47-51]	小麦秸 ^[48-54]
φ (收获时水分)/%	15.00~26.00	7.00~100.00	37.00~50.00	70.00~71.50	12.82~20.00	4.39~13.47
热值/(MJ/kg)	17.98	18.03	18.29	17.02	15.55	15.37
w (纤维素)/%	39.80	39.38	35.68	36.15	34.00	30.00~41.20
w (半纤维素)/%	24.12	25.42	27.23	21.01	17.00~37.50	23.46~23.50
w (木质素)/%	5.84	6.60	8.12	8.92	22.00	18.0~19.39
w (灰分)/%	3.58	3.56	4.79	9.26	5.93~8.59	6.42~9.07
w (C)/%	44.37	44.52	—	41.86	42.17	41.28~49.04
w (H)/%	6.08	6.10	—	5.62	5.45	5.31
w (N)/%	0.99	1.00	—	1.52	0.74	0.65
灰熔点						
变形温度/°C	1 200.8	1 136.6	1 127.5	942.0	1 125.0	840.0
软化温度/°C	1 222.1	1 181.8	1 167.0	980.8	1 170.0	1 055.0
半球温度/°C	1 235.9	1 196.3	1 194.5	1 010.3	1 180.0	1 117.5
流动温度/°C	1 287.7	1 246.5	1 224.3	1 054.8	1 200.0	1 182.5

注：“—”文献中没有该数据。

0.99%~1.52%，均高于小麦和玉米秸秆，所以能源草的 C/N 较小，尤其杂交狼尾草只有 27.54，有利于用于沼气发酵(表 3)。

柳枝稷、荻、芦竹和杂交狼尾草的灰分含量为 3.58%~9.26%，其中柳枝稷、荻灰分含量较低为 3.58%和 3.56%，与棉花秸秆和大豆秸秆相当^[48]；芦竹灰分含量为 4.79%，略低于玉米秸秆^[48]；杂交狼尾草灰分含量最达 9.26%，高于小麦秸秆^[48]。4 种草的灰熔点的变形温度、软化温度、半球温度和流动温度等熔融特征温度从高到低均为柳枝稷、荻、芦竹和杂交狼尾草，其中柳枝稷的灰熔点特征温度最高，与木屑、废弃木材和锯末^[49]相近或略高；荻和芦竹的灰熔点熔融特征温度略低于柳枝稷，但均高于一年生的玉米、水稻、小麦等农作物秸秆^[49-50]；杂交狼尾草最低，其灰分的各熔融特征温度与一年生的农作物秸秆^[49-50]相当(表 3)。

综上所述，与禾谷类作物秸秆相比，能源草的生物质品质具有明显优势，尤其在热值、纤维素含量、灰分和灰熔点等指标上，随着育种进程加速，专用能源草新品种的生物质品质会得到进一步提升。

4 能源草在边际土地上的生态效应

利用边际土地大规模种植高生物量的能源草必

定会对生态环境产生重要影响。在北京郊区重金属轻度污染土地试验结果显示，柳枝稷、荻、芦竹和杂交狼尾草均属于非超积累植物，但与植株矮小、生物量低的超积累植物相比，能源草生物量较高，因而单位面积的富集量有可能更高^[24]，在重金属污染土壤修复中仍然具有独特优势。能源草具有强大的碳汇能力，规模化种植能源草有利于减缓温室气体的排放，京郊挖沙废弃地上种植的柳枝稷、芦竹在一个生长季中固定的大气 CO₂ 的量分别达到 6 108.75 和 18 544.95 kg/hm²。同时能源草还具有释放 O₂、吸收 SO₂、滞降粉尘等生态功能^[27]。通过北京地区能源草产量数据和实验室小型纤维素乙醇制备装置得出的纤维素乙醇转化数据，初步对能源草种植的生态效益进行评估，以柳枝稷、荻和芦竹为原料，每制备 1.00 t 纤维素乙醇的的大气净化生态价值分别为 4 320.39~4 639.28 元^[25]。

5 我国北方能源草存在的问题及研究方向

利用边际土地种植能源植物获取生物质原料是我国推动生物质能产业可持续发展的战略举措。我国可利用而尚未利用的后备土地面积是 8 873.99 万 hm²，其中自然条件相对较好的宜农后备土地面积为 734.39 万 hm²，其中荒草地占 51.53%、盐碱地占 11.41%^[55]。这些后备土地资源主要分布在我

国北方地区,集中在蒙新区、黄土高原区、华北沿海滩涂和东三省西部地区^[55]。我国北方地区的耕地后备土地资源占全国的80%以上,其中蒙新区占全国的52.05%、黄土高原区占12.03%、华北区占8.30%、东北区占7.61%^[55]。这些后备土地资源,尤其宜农后备土地资源,是用来进行能源草规模化种植并开发利用的主要战场。因此,立足这些土地资源,系统开展能源草种质资源收集评价、品种选育、栽培技术、收储运技术和转化利用技术研究,对其经济效益、社会效益和生态效益进行全面评价,建立示范基地,实现产业化开发利用,将有助于推动我国生物质产业健康发展。目前,我国北方地区能源草研究应集中在以下几方面:

1) 能源草种质资源收集评价。种质资源收集筛选是品种选育的基础。我国北方边际土地主要分布在蒙新区、黄土高原区、华北沿海滩涂和东三省西部地区,该地区冬季寒冷干燥且极端低温天气时常发生,夏季高温少雨,边际土地主要类型为荒草地和盐碱地,主要逆境胁迫为低温、干旱、贫瘠和盐碱,主要生境特点为无霜期短、植被覆盖度低、生物多样性差、生态环境脆弱等。综合考虑以上因素,依据本土为主、国外为辅、北方为主、南方为辅的原则,广泛收集多年生、高大丛生、生物量大、品质优、抗逆性强的草本植物,建立能源草种质资源圃,在此基础上选择典型边际土地进行长期多点田间定位试验对能源草资源的适应性、生物学特性、抗逆能力、产量潜力、品质特点等进行系统筛选评价,进而明确不同区域的适宜能源草种和主要能源草种的种植区划,为我国专用能源草新品种培育奠定基础。

2) 能源草育种技术研究。我国能源草育种研究工作刚刚起步,尚没有国家审定或商业化的品种。在能源草资源收集评价的基础上,根据我国北方地区不同区域的边际土地类型和生境特点,通过各种育种手段,结合分子生物学技术,培育生物量高、品质优、水肥利用效率高、抗逆性强(抗旱、抗盐碱、耐寒)的能源草新品种,进一步提高能源草的生产潜力,是能源草研究的另一项重要工作内容。目前收集的能源草资源大部分尚处于野生状态,尚未进行人工驯化,需要大量系统的工作对其繁殖特性、遗传背景、遗传规律进行研究,进而确定适宜的育种方法和技术。在过去几十年中,通过育种和栽培技术的进步,粮食作物产量翻了两番,而随着分子育种和生物技术的应用,人们还在努力突破产

量的上限,作为尚未经过人工驯化的能源草,在通过育种技术进一步高产量、降低投入方面均具有巨大的发展空间^[56]。

3) 能源草栽培管理技术研究。目前能源草种植管理技术已经取得一些进展,但仍面临一些问题。首先,边际土地能源草建植存在很大困难。边际土地生境条件普遍较差,干旱、沙化、盐碱等逆境胁迫时常存在,而大部分能源草种子较小,如柳枝稷和芒草种子的千粒重分别只有1.0和0.5g左右,通过直接播种很难建植成功。北京市农林科学院经过多年实践通过育苗移栽的方式成功的将柳枝稷种植于多类边际土地上,但育苗移栽无疑大幅度增加了种植成本;由于芒草种子更小,通过育苗移栽也行不通,主要通过地下根茎进行繁殖,但这种繁殖方式的繁殖系数较低,地下根茎的获取时间也严格受季节限制,且不容易保存。其他能源草均面临同样问题,这也是一个世界难题。其次,能源草种植后的管理、维护、收获等也存在很多问题。如能源草大部分为多年生根茎型植物,需要2~3年才能达到生长高峰期,建植当年经常面临乡土杂草的竞争;能源草生长过程中也时常会遇到病虫害发生,但能源草病虫害的发生规律和防治办法等尚缺乏系统研究。随着能源草种植面积不断扩大,更多的问题会被提出来,因此能源草栽培管理技术体系的建立是一个长期的过程。

4) 能源草生态效应研究。我国北方边际土地的生态环境脆弱,在这些区域大面积种植能源植物,必将会对生物多样性、植被覆盖、土壤理化性质、水土流失和土壤碳汇等产生重大影响,这种影响有正面的,也可能会有负面的。做好了既能实现边际土地生态修复,又可以生产大量生物质原料,一举两得;做不好可能会对该地区生态环境产生大量负面影响,得不偿失。因此,对能源草大面积种植的生态效应进行系统研究,是非常重要的一项工作。

5) 能源草生物质品质及转化利用技术研究。能源草属于纤维素类生物质,与作物秸秆属于同一类,可以转化为气、液、固3种形态燃料,但能源草与作物秸秆之间、不同能源草之间的热值、生物质组分、元素含量等品质指标存在很大差异,因此不同植物的转化利用工艺也不尽相同,但目前针对能源草的转化利用技术尚不多见。同时,不同的转化利用方式,对生物质原料的品质要求也不相同,因此对各能源草种的生物质品质进行系统的取样分析也是十分

必要的。

6)能源草评价技术体系构建。能源草种植的最终目的是生产生物质能源。而生物质能产业是一个系统复杂的过程,涉及农业种植、运输、工业制备等多个环节,每个环节都会涉及多个行业和部门。但不管产业链有多长,整个过程有多复杂,最终要回答一个问题,即它的能量投入产出比是多少?回答这个问题,需要构建评价体系,系统研究生物质能产业各环节的能力投入和产出过程,并对其经济效益、社会效益和生态效益进行综合评估,需要确立每个过程的评价指标和权重关系,设立评价标准。这需要能源草种植、运输和转化利用等过程中大量数据的支撑。

6 我国北方能源草开发利用前景

我国是人口大国,正处于社会经济快速发展的关键时期,对能源的需求日益增多,但人均能源占有量严重不足,对外依存度不断增加,能源危机日益凸显。中国在可再生能源中长期发展规划中计划,2020年,我国生物质发电总装机容量达到 30×10^6 kW,固体成型燃料年利用量达到 50×10^6 t,生物燃料乙醇年利用量达到 10×10^6 t。这给中国生物质能的发展提供了机遇和挑战。

我国拥有大量边际土地,其中可开发的后备土地面积是 8.874×10^8 hm²,其中有一半以上分布在我国北方地区。桑涛研究员曾撰文指出,如果在我国选择集中连片的边际土地种植能源草,面积达到 1.0×10^8 hm²,每hm²平均干物质达到10 t,每年可以获得 10×10^8 t生物质原料,用已有的模型估算,这些能源草可以燃烧发电 1.458×10^{12} kWh,减少 17×10^8 t煤炭火力发电排放的CO₂,相当于2007年全国电力总输出的45%和CO₂排放量的28%^[56]。虽然我国北方地区的边际土地,尤其是西北地区,存在一种或多种逆境胁迫,不利于能源草生长,但每公顷10 t/hm²的产量目标也是一种保守估计,随着现代育种技术和栽培技术的发展,能源草的生物质产量会不断的提高。由此可见,能源草在我国北方地区的开发利用前景十分广阔。

综上所述,我国已在能源草种质资源收集、产量潜力分析、品质特性评价、生态效应评估等方面已经开展了大量的工作,取得重要研究进展,为北方地区利用边际土地种植利用能源草奠定了基础。但我国能源草研究依然尚处于起步阶段,其研究的深度、广

度有待进一步加强。同时,我国生物质能产业的市场发育不健全、体制不完善。但从国内外发展情况来看,这些问题的解决指日可待。因此,充分利用这段时间,广泛收集适合在我国边际土地上应用的能源草资源,对其进行鉴定、评价,进而筛选、培育出对干旱、贫瘠、盐碱、低温等多种逆境胁迫具有较高耐受能力的优良品种,并积极开展其栽培管理措施和生物质品质特性的研究,开发相应的转化利用工艺并进行试验示范,做好技术储备,对我国生物质能源产业健康发展具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Hoogwijk M, Faaij A, Broek Rvanden, et al. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy [J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 25(2): 113-119
- [2] Lemus R, Lal R. Bioenergy crops and carbon sequestration [J]. Critical Reviews In Plant Science, 2005, 24(1): 1-21
- [3] Lewandowska I, Scurlock J M O, Lindvall E, et al. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe [J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 25(4): 335-361
- [4] 谢光辉, 卓岳, 赵亚丽, 等. 欧美根茎能源植物研究现状及其在我国北方的资源潜力 [J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(6): 11-18
- [5] 解新明, 周峰, 赵燕慧, 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
- [6] David J P, John H F. The biology and agronomy of switchgrass for biofuels [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2005, 24(5/6): 423-459
- [7] Naidu S L, Moose S P, Al-Shoaibi A K, et al. Cold tolerance of C4 photosynthesis in *Miscanthus × giganteus*: Adaptation in amounts and sequence of C4 photosynthetic enzymes [J]. Plant Physiology, 2003, 132: 1688-1692
- [8] Wang D, Naidu S L, Portis Jr A R, et al. Can the cold tolerance of C4 photosynthesis in *Miscanthus × giganteus* relative to *Zea mays* be explained by differences in activities and thermal properties of Rubisco? [J]. Journal of Experimental Botany, 2008, 59: 1779-1787
- [9] Clifton-Brown J C, Stampfl P F, Jones M B. Miscanthus biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emissions [J]. Global Change Biology, 2004, 10(4): 509-518
- [10] 朱毅, 范希峰, 武菊英, 等. 水分胁迫对柳枝稷生长和生物质品质的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(2): 59-64
- [11] 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
- [12] 李继伟, 左海涛, 李青丰, 等. 土壤水分垂直分布对建植当年柳枝稷的影响 [J]. 草地学报, 2011, 19(1): 43-50

- [13] 李继伟,左海涛,李青丰,等.柳枝稷根系垂直分布及植株生长对土壤盐分类型的响应[J].草地学报,2011,19(4):644-651
- [14] 左海涛,李继伟,郭斌,等.盐分和土壤含水量对营养生长期柳枝稷的影响[J].草地学报,2009,17(6):760-766
- [15] 范希峰,侯新村,武菊英,等.北京地区新收获柳枝稷种子的萌发和出苗特性[J].草业科学,2011,28(9):1636-1639
- [16] 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
- [17] 范希峰,侯新村,左海涛,等.边际土地类型及移栽方式对柳枝稷苗期生长的影响[J].草业科学,2010,27(1):97-102
- [18] 黄杰,黄平,左海涛.栽培管理对获生长特性及生物质成分的影响[J].草地学报,2008,16(6):646-651
- [19] 黄平,左海涛,韩烈保,等.拔节期水分胁迫对获生长和生物质特性的影响[J].草地学报,2007,15(2):153-157
- [20] 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
- [21] 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
- [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] 侯新村,范希峰,左海涛,等.氮肥对挖沙废弃地能源草生长特性与生物质产量的影响[J].草地学报,2010,18(2):268-273,279
- [24] 侯新村,范希峰,武菊英,等.草本能源植物修复重金属污染土壤的潜力[J].中国草地学报,2012,34(1):59-64,76
- [25] 侯新村,范希峰,武菊英,等.纤维素类能源草在京郊地区的经济效益与生态价值评价[J].草业学报,2011,20(6):12-17
- [26] 范希峰,左海涛,侯新村,等.芒和获作为草本能源植物的潜力分析[J].中国农学通报,2010,26(14):381-387
- [27] 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
- [28] 林长松,程序,杨新国.半干旱黄土丘陵沟壑区引种能源植物柳枝稷生态适宜性分析[J].西南大学学报:自然科学版,2008,30(7):125-131
- [29] 王会梅,徐炳成,李凤民,等.黄土丘陵区白羊草和柳枝稷适应性生长的比较[J].干旱地区农业研究,2005,23(5):35-40
- [30] 徐炳成,山仑,黄占斌,等.黄土丘陵区柳枝稷光合生理生态特性的初步研究[J].西北植物学报,2001,21(4):625-630
- [31] 徐炳成,山仑,李凤民.黄土丘陵半干旱区引种禾草柳枝稷的生物量与水分利用效率[J].生态学报,2005,25(9):2206-2213
- [32] 吴全忠,常欣,程序.黄土丘陵区柳枝稷生物量与土壤水分的动力学研究[J].扬州大学学报:农业与生命科学版,2005,26(4):70-73
- [33] 王会梅,徐炳成,李凤民,等.不同立地柳枝稷生长响应的初步研究[J].水土保持研究,2006,13(3):91-93
- [34] Yongqing Ma, Yu An, Junfeng Shui, et al. Adaptability evaluation of switchgrass (*Panicum Virgatum* L.) cultivars on the loess Plateau of China[J]. Plant Science, 181(6):638-643
- [35] 杨新国,李玉英,吴天龙,等.半干旱黄土丘陵沟壑区柳枝稷 (*Panicum virgatum*) 的生物质形成[J].生态学报,2008,28(12):6043-6050
- [36] 姜俊,李代琼,黄瑾.柳枝稷的生长发育与土壤水分特征[J].水土保持通报,2007,27(5):75-79
- [37] 李代琼,刘国彬,黄瑾,等.安塞黄土丘陵区柳枝稷的引种及生物生态学特性试验研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(增刊):125-128
- [38] 丁荣娥.我国北方主要乙醇植物资源分析及其应用前景[D].北京:中国农业大学,2007,34-37
- [39] 郭春燕,杨生权,田良才,等.卢宁,王宇宏,王文英.柳枝稷、新引1号东方山羊豆在山西的引种试验[J].山西农业科学,2011,39(3):247-249
- [40] 王春艳,王立志,李忠杰,等.黑龙江省野生植物获的营养分析[J].黑龙江生态工程职业学院学报,2009,22(2):23-24
- [41] 陈默君,贾慎修.中国饲用植物[M].北京:中国农业出版社,2002
- [42] 刘大林,钟小仙,谷文英.优质牧草高效生产技术手册[M].上海:上海科学技术出版社,2004
- [43] 刘公社,齐冬梅.羊草生物学研究进展[J].草业学报,2004,13(5):6-11
- [44] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志[M].北京:科学出版社,1997,10(2):19-26
- [45] 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
- [46] 刘大汉,张施耀.南荻北引栽培技术研究[J].山东农业科学,1993(1):45-46.
- [47] 刘吉利,程序,谢光辉,等.收获时间对玉米秸秆产量与燃料品质的影响[J].中国农业科学,2009,42(6):2229-2236
- [48] 程备久,卢向阳,蒋立科,等.生物质能学[M].北京:化学工业出版社,2008:83-84
- [49] 王革华,原鲲.生物质燃料用户手册[M].北京:化学工业出版社,2007:17-18
- [50] 乐园,李龙生.秸秆类生物质燃烧特性的研究[J].能源工程,2006,(4):30-33
- [51] 刘荣厚.生物质能工程[M].北京:化学工业出版社,2009:11-193
- [52] 陈建华.小麦秸秆氢氰酸预处理及乙醇发酵工艺研究[D].西安:陕西科技大学,2008:13-17
- [53] 张利,张清东,刘世贵,等.利用丙酸降解小麦秸秆的研究[J].四川大学学报:自然科学版,2001,38(3):430-433
- [54] 郎芳,马晓茜,王晶晶.秸秆灰特性的研究[J].可再生能源,2007,25(4):25-28
- [55] 温明炬,唐程杰.中国耕地后备资源[M].北京:中国大地出版社,2005:51-66
- [56] 桑涛.能源植物新秀:芒草[J].生命世界,2011(1):38-43