

黄河三角洲盐碱地不同柳枝稷品种生长特性比较

张进红 王国良 吴波 张清平 贾春林* 盛亦兵

(山东省农业可持续发展研究所/农业农村部华东都市农业重点实验室, 济南 250100)

摘要 采用田间随机区组试验方法,分析4个品种(系)柳枝稷(Alamo、JAp-014、CHp-005和CAp-017)在黄河三角洲盐碱地1~3年生的株高、分蘖数、叶长、叶宽和产量等农艺性状,并用灰色关联度分析法评价了其适应性,以期筛选出适合该地区种植的柳枝稷品种。结果表明:4个品种(系)柳枝稷在连续3年生长过程中,株高、叶长、叶宽和产量差异显著,按Alamo、JAp-014、CHp-005和CAp-017顺序呈递减趋势,3年生Alamo最高分别达到211.80 cm、54.90 cm、1.57 cm和7.20 t/hm²;株高、叶长、叶宽与产量之间均有显著的相关性。不同品种间的分蘖数则因生长年限而异。4个品种(系)柳枝稷加权关联度和等权关联度均为Alamo>JAp-014>CHp-005>CAp-017,表明Alamo适应性强,为供试品种(系)中最适宜在黄河三角洲盐碱地种植推广的品种。

关键词 柳枝稷; 品种; 盐碱地; 农艺性状; 适应性

中图分类号 S216.2

文章编号 1007-4333(2018)12-0158-08

文献标志码 A

Comparative study on the growth characteristics of different switchgrass varieties in saline-alkali soil of the Yellow River Delta

ZHANG Jinhong, WANG Guoliang, WU Bo, ZHANG Qingping, JIA Chunlin*, SHENG Yibing

(Shandong Institute of Agriculture Sustainable Development/Key Laboratory of East China Urban Agriculture of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jinan 250100, China)

Abstract The objective of this study was to select suitable switchgrass varieties for large scale cultivation in saline-alkali soil of the Yellow River Delta. The plant height, tiller number, leaf length, leaf width and yield of four switchgrass varieties (Alamo, JAp-014, CHp-005 and CAp-017) were determined during a 3-year experiment with complete randomized block design. Grey correlation analysis was applied to evaluate their adaptability. The results showed that: The plant height, leaf length, leaf width and yield of the four switchgrass varieties were significantly different throughout the 3-year experiment, with the order of Alamo>JAp-014>CHp-005>CAp-017. The Alamo at 3-year-old had the maximum plant height, leaf length, leaf width and yield of 211.80 cm, 54.90 cm, 1.57 cm and 7.20 t/hm², respectively. Tiller number varied according to the plant age. There were significantly positive correlations between the above agronomic traits. Both weighted grey correlative degree and grey correlative degree of different switchgrass varieties in descending order was Alamo>JAp-014>CHp-005>CAp-017. Therefore, Alamo was suitable to be cultivated on large scale in saline-alkali soil of the Yellow River Delta due to its superior adaptability.

Keywords switchgrass; variety; saline-alkali soil; agronomic trait; adaptability

柳枝稷(*Panicum virgatum* L),为禾本科黍属多年生草本C4植物,原产北美,通常被用于放牧、

水土保持以及生态建设等^[1-2]。作为典型的纤维素类能源植物,在贫瘠边际土地上可保持高产,能有效

收稿日期: 2018-01-18

基金项目: 山东省牧草产业体系(SDAIT-23-02); 山东省重点研发计划(2017CXGC0309-1, 2016ZDJS10A04, 2017CXGC0311); 国家牧草产业技术体系(CARS-34)

第一作者: 张进红, 博士研究生, E-mail: 87283625@163.com

通讯作者: 贾春林, 研究员, 主要从事牧草育种与栽培研究, E-mail: jcl567@163.com

抵御病虫害发生,且乙醇转化率高,对环境友好,引起国内外广泛关注^[3-4]。

黄河三角洲土壤盐碱化严重,盐碱地达20万 hm^2 ^[5],且地下水埋深浅、矿化度高、蒸降比大,土壤易于返盐^[6]。盐胁迫严重制约了该地区土地的开发利用,造成大量资源浪费。如果能在该地区规模化种植柳枝稷,可降低土面蒸发,减少盐分在土壤表层积累;可促进土壤有机碳的积累,改良培肥土壤;能减缓温室气体排放,具有明显的大气净化生态价值^[7-8]。在管理适宜的条件下,柳枝稷可连续收获10年以上^[9],作为饲草,可满足该地区发达的畜牧业对饲料作物的需求,产生显著经济效益的同时也降低对饲料来源(玉米)单一依赖的风险^[5];作为生物质能产业原料,能量回报率高,根据我国人均耕地面积不足0.1 hm^2 的国情,在边际土地发展柳枝稷、发展生物质能产业潜力巨大。因此,在黄河三角洲盐碱地规模化种植柳枝稷,不仅“不与粮争地”,丰富该地区的牧草种质资源和发展生物质能源,而且在协调生态环境和发展低碳经济等方面具有重要意义。

不同柳枝稷品种耐盐碱程度区别很大,目前我国关于柳枝稷的耐盐性研究多集中在实验室内盐胁迫对柳枝稷的影响。朱毅等^[10]、丁晓丹等^[11]研究发

现,高浓度盐溶液抑制柳枝稷种子萌发;盐分类型和浓度等对柳枝稷苗期和营养生长期也产生显著影响^[12-15]。田间生产环境尤其是盐碱地中柳枝稷的生长特征研究报道较少。本研究在黄河三角洲中度盐碱地进行了不同柳枝稷品种(系)田间试验,从株高、分蘖数和产量等相关农艺性状进行比较分析,借助灰色关联度分析方法,对其适应性进行综合评价,旨在筛选出适宜黄河三角洲盐碱地种植的柳枝稷品种(系),为其在该地区大面积推广提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区设于山东东营广北农场二分场山东省农科院牧草科技示范基地,地处118°36'E,37°17'N,属暖温带半湿润地区大陆性季风气候,四季分明,雨热同期。多年平均气温12.5℃,年极端最高气温38.5℃,极端最低气温-17.5℃,无霜期长达206d,平均日照时数2596.1h,年降水量550~600mm。试验区土壤为滨海盐化潮土,土质为砂壤土,pH为7.9,全盐含量0.3%,有机质含量为30.6g/kg,碱解氮46.0mg/kg,速效磷16.4mg/kg,速效钾356.0mg/kg。试验期间水热状况见图1。

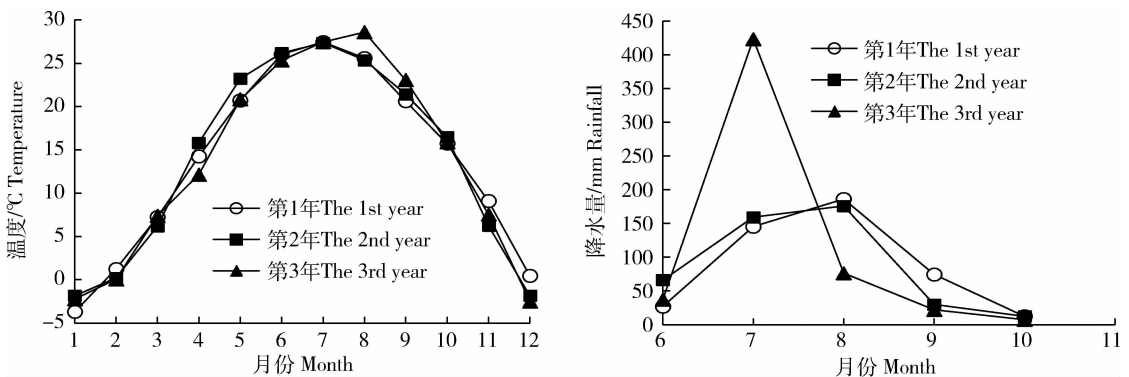


图1 试验区月均气温和降水量

Fig.1 Temperature and rainfall in experimental region

1.2 试验材料与设计

供试柳枝稷4个品种(系)分别为Alamo、JAp-014、CHp-005和CAp-017,均由中国农业大学提供。采用随机区组设计,3次重复,小区面积为5m×10m。试验于2011年3月2日育苗,移栽前人工翻耕,大水漫灌试验地1次,行距100cm。9月下旬至10月初测定柳枝稷株高、分蘖数、叶长和叶宽后刈

割测产,刈割留茬高度15~20cm。2012和2013年同上测定柳枝稷株高、分蘖数、叶长、叶宽和产量。试验期间人工除草,无灌溉和施肥。根据三年观测,柳枝稷在该试验区一般于4月初返青,5月分蘖,7—8月抽穗、开花,9—10月种子成熟。

1.3 测定指标和方法

株高:随机抽取10株柳枝稷观测每株自地面到

顶端生长点高度。

分蘖数:随机抽取 10 株柳枝稷测定地表根茎部形成的分枝数。

叶长和叶宽:随机抽取 10 株柳枝稷,取植株中部叶片测量叶长和叶宽。

产量:随机取样,取样面积 3 m²,于烘箱内 105 ℃ 下杀青 30 min 后在 65 ℃ 下烘干至恒重,称干重。

1.4 不同品种(系)柳枝稷适应性评价

1.4.1 研究方法及其原理

灰色系统的关联分析是系统态势的量化比较分析。灰色关联度的原理是:若干个统计数列所构成的各条曲线几何形状越接近,即越相平行,则它们的变化趋势越接近,其关联度就越大。关联序反映各评价对象对理想对象(参考对象)的接近次序,即评价对象的优劣次序,其中关联度最大的评价对象为最佳。

1.4.2 评价对象与指标体系

以 4 个柳枝稷品种(系)为评价对象。选择株高、叶长、叶宽、分蘖数和产量作为评价指标,构成数据列。所有评价对象的数据列构成数据矩阵。

1.4.3 灰色关联度分析模型建立

1)参考数据列的选取。

以各指标实测的最优值组成灰色关联分析的参考数据列: $X_0(k) = \{X_0(1), X_0(2), X_0(3) \cdots X_0(n)\}$;以各指标的测定值构成比较数列: $X_i(k) = \{X_i(1), X_i(2), X_i(3) \cdots X_i(n)\}$;其中 $k=1, 2, 3 \cdots n$, n 为测定指标数, $i=1, 2, 3 \cdots m$, m 为不同柳枝稷品种(系)。

2)评价指标的无量纲区间化。

将各指标的实际值转化为评价值,以消除各指标量纲带来的影响。用 $X_i(k) = X_i(k)/X_0(k)$ 对原始数据进行无量纲化处理。通过无量纲区间化使所有数据在 $[0, 1]$ 区间之内。

3)关联系数。

$$\epsilon_i(k) = \frac{\min \min \Delta i(k) + \rho \max \max \Delta i(k)}{\Delta i(k) + \rho \max \max \Delta i(k)}$$

其中: $\Delta i(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$, 表示 X_0 数列与 X_i 数列在第 k 点的绝对差值; $\min \min \Delta i(k)$ 为二级最小差; $\max \max \Delta i(k)$ 为二级最大差; ρ 为分辨系数,取值范围 $[0, 1]$, 本试验取值 0.5。

4)灰色关联度

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \epsilon_i(k)$$

$$\gamma_i' = \sum_{k=1}^n \epsilon_i(k) W_i(k)$$

式中, γ_i 为等权关联度, γ_i' 为加权关联度, $W_i(k)$ 为权重系数。求出关联度后进行排序,关联度越大则相似程度越高,比较数列越接近参考数列,柳枝稷适应性越强,反之则越差。

1.5 数据分析

数据用 Excel 2007 整理输入,采用 SPSS16.0 软件进行数据统计分析,用 LSD 法比较不同品种间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同品种(系)柳枝稷生长特性

除 3 年生 CHp-005 株高和产量外,3 个生长季内,4 个品种(系)柳枝稷株高、叶长、叶宽和产量差异显著,且变化趋势一致,均为 Alamo > JAp-014 > CHp-005 > CAp-017, CAp-017 株高、叶长、叶宽和产量平均值仅为 Alamo 的 64.0%、48.6%、48.0% 和 44.0%(表 1);分蘖数则因生长年限而异。除 3 年生 CHp-005 产量降低外,4 个品种(系)柳枝稷分蘖数和产量均为第 3 年 > 第 2 年 > 第 1 年,3 年生 CAp-017 分蘖数和产量比生长第 1 年分别增加了 1.0 和 2.9 倍;叶长和叶宽随生长年限的变化差异较小;生长第 2 年株高显著增加,第 3 年有所降低,降幅最大的是 CHp-005,其 3 年生株高仅为生长第 2 年的 77.5%。

4 个品种(系)柳枝稷株高、叶长、叶宽和产量间均呈显著正相关关系,相关系数达到 0.65 以上,。与之不同,分蘖数与以上 4 个性状指标间均无显著的相关性(表 2)。6—8 月雨热同步阶段是柳枝稷生物量快速累积时期,此阶段温度和降雨量与分蘖数和产量呈显著正相关,其中与 Alamo、JAp-014、CAp-017 产量的相关系数为 0.9~1.0(图 1,表 1),但与不同品种柳枝稷株高、叶长、叶宽的相关系数较小。

2.2 基于灰色关联分析的不同品种(系)柳枝稷适应性排序

选择株高、分蘖数、叶长、叶宽和产量的最大值建立参考数列 $X_0(k)$, $X_0(k) = \{211.8, 70.7, 54.9, 1.6, 7.2\}$ 。计算不同品种(系)柳枝稷的灰色关联度并排序(表 3)。生长第 1~3 年,4 个品种(系)柳枝稷加权关联度均为 Alamo > JAp-014 > CHp-005 > CAp-017,同一个柳枝稷品种不同生长年限的加权

关联度均为第 3 年 > 第 2 年 > 第 1 年。等权关联度和加权关联度分析所得结果一致, 2 种关联度相关系数 $R=0.998$, 达到极显著水平 ($P<0.01$)。说明

Alamo 在黄河三角洲盐碱地生长适应性最强, 且其适应性随着年限的延长而增加。

表 1 不同柳枝稷品种生长特性

Table 1 Growth characteristics of different switchgrass varieties

指标 Trait	时间 Time	品种 Varieties			
		Alamo	JAp-014	CHp-005	CAp-017
株高/cm	第 1 年	162.62 a	145.88 ab	126.31 bc	112.67 c
	第 2 年	211.61 a	191.85 ab	162.63 b	135.31 c
	第 3 年	211.80 a	161.25 b	126.00 c	127.00 c
分蘖数	第 1 年	43.30 a	48.10 a	30.80 b	30.70 b
	第 2 年	46.30 a	49.30 a	33.40 b	38.50 b
	第 3 年	56.00 bc	51.22 c	70.67 a	60.78 b
叶长/cm	第 1 年	48.61 a	40.03 a	28.32 b	24.71 b
	第 2 年	52.11 a	42.53 b	30.73 c	25.78 c
	第 3 年	54.90 a	42.20 a	29.10 b	25.10 b
叶宽/cm	第 1 年	1.40 a	1.15 a	0.86 b	0.69 b
	第 2 年	1.57 a	1.25 a	0.88 b	0.74 b
	第 3 年	1.51 a	1.19 b	0.77 c	0.72 c
产量/(t/hm ²)	第 1 年	2.90 a	2.61 a	1.59 b	0.88 c
	第 2 年	3.94 a	3.39 a	2.58 b	1.81 c
	第 3 年	7.20 a	6.93 a	1.92 c	3.48 b

注: 每行中均值后标有不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

Note: Values within each row followed by different lowercase letters are significantly different at 5% level.

表 2 气温、降水量、柳枝稷生长性状间的相关分析

Table 2 Correlation coefficients between temperature, rainfall and switchgrass traits

指标 Traits	温度 Temperature	降雨量 Rainfall	株高 Height	分蘖数 Tiller number	叶长 Leaf length	叶宽 Leaf width	产量 Yield
温度	1.000						
降雨量	0.959**	1.000					
株高	-0.020	0.117	1.000				
分蘖数	0.780**	0.796**	0.152	1.000			
叶长	0.049	0.074	0.891**	0.212	1.000		
叶宽	-0.036	-0.004	0.898**	0.147	0.992**	1.000	
产量	0.592*	0.634*	0.676*	0.414	0.694*	0.648*	1.000

注: 表中 * 表示 $P<0.05$ 水平的差异显著, ** 表示 $P<0.01$ 水平的差异极显著。

Note: * and ** mean significant difference at 5% and 1% levels, respectively.

表3 不同品种(系)柳枝稷适应性的等权关联度(GCD)、加权关联度(WGCD)和排序

Table 3 Values and orders of grey correlative degree (GCD) and weighted GCD (WGCD) of different switchgrass varieties

时间 Time	品种 Varieties	GCD	排序 Grade	WGCD	排序 Grade
第1年	Alamo	0.641	5	0.651	5
	JAp-014	0.562	7	0.569	6
	CHp-005	0.457	10	0.462	11
	CAp-017	0.427	12	0.432	12
第2年	Alamo	0.789	2	0.806	2
	JAp-014	0.642	4	0.653	4
	CHp-005	0.503	9	0.509	9
	CAp-017	0.463	11	0.468	10
第3年	Alamo	0.919	1	0.918	1
	JAp-014	0.697	3	0.688	3
	CHp-005	0.568	6	0.571	7
	CAp-017	0.527	8	0.528	8

3 讨论与结论

3.1 不同品种(系)柳枝稷在黄河三角洲盐碱地的性状特征

柳枝稷丛生,一般高1~2 m,根深可达3.5 m,叶长30~80 cm,叶宽0.8~1.3 cm^[11,16];产量高,但随品种、种植地和管理水平的不同,其干物质产量存在一定的变幅,约为2~30 t/hm²^[17-19],在我国京郊农田中可达28.33 t/hm²^[20],在黄土丘陵区川地可达12.29 t/hm²^[21]。柳枝稷具有一定的耐盐性,可在盐碱地区种植,但盐碱胁迫对柳枝稷生长有较大影响^[11-13,22]。刘吉利等^[22]研究表明随着盐碱胁迫程度加重,柳枝稷株高、分蘖数和产量显著降低。本研究结果表明,在黄河三角洲盐碱地自然生长状态下,4个品种(系)柳枝稷株高、叶长和叶宽均按Alamo、JAp-014、CHp-005和CAp-017顺序呈递减趋势。产量与株高、叶长和叶宽呈显著正相关关系,Alamo产量最高,达到7.2 t/hm²,高于其在黄河三角洲含盐0.34%地块的产量(4.7 t/hm²)^[23]。CAp-017和CHp-005产量较低,最高分别仅为3.5和2.6 t/hm²,与柳枝稷在挖沙废弃地和坡地上的产量分别只有4.2和2.1 t/hm²结果类似^[24-25]。与农田柳枝稷产

量相比,本研究相对偏低的产量可能归因于该地区的中度盐碱胁迫和自然维持状态下的水肥不足,可通过改善水肥条件和防治病虫害等措施提高柳枝稷产量。随着种植年限的增加,4个品种(系)柳枝稷产量显著提升,这与Cave-in-Rock柳枝稷在西北盐碱地的研究结果一致^[26]。气候是影响植物生长的主要因素,而温度与降水量又是决定区域气候的2个主要因素。3年试验期间,6-8月均温26.6℃,降水量360~540 mm(图1),此雨热同步阶段是暖季植物柳枝稷生物量快速累积时期,如何有效利用这种局部性资源优势,是柳枝稷生物质生产可持续发展的关键^[27]。值得注意的是生长第3年CHp-005产量降低,可能原因是该品种抗逆性差,该年春季倒春寒尤其是4月19日的大雪对其返青产生不利影响。

3.2 不同品种(系)柳枝稷在黄河三角洲盐碱地的引种适应性

灰色系统理论是近年发展起来的一种分析理论,可客观地反映供试柳枝稷品种诸多指标在引种适应性上的综合表现,克服了依靠单一指标评价其引种适应性的弊端。基于灰色系统理论,认为供试柳枝稷品种的灰色关联度值越高,其在黄河三角洲盐碱地的引种适应性越强。本研究结果表明,4个

品种(系)柳枝稷在黄河三角洲盐碱地的灰色关联度为 Alamo>JAp-014>CHp-005>CAp-017, 可见, Alamo 耐盐碱能力较强, 适应性最强, 为供试品种中最适宜在该地区种植推广的品种, JAp-014 次之, CAp-017 最差。黄河三角洲现有的耐盐碱牧草主要有苜蓿、獐茅、白茅、早熟禾和盐地碱蓬等, 能源牧草稀缺^[28]。柳枝稷作为引起广泛关注的能源牧草, 对土壤的干旱、贫瘠、盐碱和环境的高温、低温等多种逆境胁迫具有很强的耐受能力, 适应范围广^[29]。柳枝稷自 1992 年引入我国^[30], 目前已在我国北方黄土丘陵区^[25,31]和京郊挖沙废弃地^[32-33]等边际土壤实现引种和规模化种植, 表现出良好的生态适应性, 适宜大面积推广应用。本研究主要针对黄河三角洲盐碱环境, 评价了不同品种(系)柳枝稷在黄河三角洲盐碱地的适应性, 结果表明 Alamo 适应性强, 为供试品种(系)中最适宜在黄河三角洲盐碱地种植推广的品种, 但仅是在中度盐碱地上 3 年的研究结果, 重度或轻度盐碱地的结果如何, 仍需进行多年、多点试验。

参考文献 References

[1] 张爱玲, 付晨, 陈志宏, 杨晓鹏, 邱盛洁, 董青林, 严海东, 蒋洁, 张新全, 缪致铭, 解关琦, 黄琳凯. 8 份柳枝稷种质资源苗期抗旱性综合评价[J]. 草业科学, 2017, 34(4): 706-713
Zhang A L, Fu C, Chen Z H, Yang X P, Qiu S J, Kong Q I, Yan H D, Jang J, Zhang X Q, Miao Z M, Xie G Q, Huang L K. Evaluation of drought resistance in seedlings of eight switchgrass accessions[J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(4): 706-713 (in Chinese)

[2] 刘吉利, 朱万斌, 谢光辉, 林长松, 程序. 能源作物柳枝稷研究进展[J]. 草业学报, 2009, 18(3): 232-240
Liu J L, Zhu W B, Xie G H, Lin C S, Cheng X. The development of *Panicum virgatum* as an energy crop[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2009, 18(3): 232-240 (in Chinese)

[3] 郭春燕, 李晋川, 岳建英, 杨生权, 卢宁, 王翔. 两种高质牧草不同生育期光合生理日变化及光响应特征[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1751-1761
Guo C Y, Li J C, Yue J Y, Yang S Q, Lu N, Wang X. Diurnal changes in the photosynthetic characteristics of two high yield and high quality grasses during different stages of growth and their response to changes in light intensity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(6): 1751-1761 (in Chinese)

[4] Velandia M, Lambert D M, Fox J, Walton J C, Sanford E K. Intent to continue growing switchgrass as a dedicated energy crop: A survey of switchgrass producers in East Tennessee[J]. *European Journal of Social Sciences*, 2010, 15(3): 299-375

[5] 贾春林, 盛亦兵, 张华文, 赵逢涛, 王国良, 毕玉波, 李新华, 管延安. 黄河三角洲盐碱地甜高粱产草量和饲用价值[J]. 草业科学, 2013, 30(1): 116-119
Jia C L, Sheng Y B, Zhang H W, Zhao F T, Wang G L, Bi Y B, Li X H, Guan Y A. Comparisons on forage yield and feeding value of sweet sorghum in saline soil of Yellow River Delta[J]. *Pratacultural Science*, 2013, 30(1): 116-119 (in Chinese)

[6] 夏江宝, 陈印平, 王贵霞, 任加云. 黄河三角洲盐碱地不同造林模式下的土壤碳氮分布特征[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4633-4641
Xia J B, Chen Y P, Wang G X, Ren J Y. Distribution characteristics of soil carbon and nitrogen under different afforestation modes of saline land in the Yellow River Delta [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4633-4641 (in Chinese)

[7] 张蕴薇, 李洪超, 杨富裕, 谢光辉. 我国能源草耐盐性研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 159-164
Zhang Y W, Li H C, Yang F Y, Xie G H. Recent advances in salt tolerance of bioenergy grass in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(6): 159-164 (in Chinese)

[8] 侯新村, 范希峰, 武菊英, 左海涛. 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
Hou X C, Fan X F, Wu J Y, Zuo H T. Evaluation of economic benefit and ecological values of cellulosic bioenergy grasses in Beijing suburban areas [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2011, 20(6): 12-17 (in Chinese)

[9] Lewandowski I, Scurlock J M O, Lindvall E, Christou M. 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

[10] 朱毅, 范希峰, 刘吉利, 李钰莹, 武菊英, 侯新村. 盐胁迫对柳枝稷种子萌发的影响[J]. 中国草地学报, 2014, 36(4): 38-43
Zhu Y, Fan X F, Liu J L, Li Y Y, Wu J Y, Hou X C. Effects of salt stress on switchgrass germination [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2014, 36(4): 38-43 (in Chinese)

[11] 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 Agrestia Sinica*, 2010, 18(6): 810-815 (in Chinese)

[12] 朱毅, 范希峰, 侯新村, 刘吉利, 李钰莹, 武菊英. 中性盐胁迫对柳枝稷苗期生长和生理特性的影响[J]. 草地学报, 2015, 23(2): 1476-1480
Zhu Y, Fan X F, Hou X C, Liu J L, Li Y Y, Wu J Y. Effects of neutral salt-stress on the seedling growth and physiological characteristics of switchgrass [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 23(2): 1476-1480 (in Chinese)

- [13] 赵春桥, 李继伟, 范希峰, 侯新村, 武菊英, 胡跃高, 刘吉利. 不同盐胁迫对柳枝稷生物量、品质和光合生理的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6489-6495
Zhao C Q, Li J W, Fan X F, Hou X C, Wu J Y, Hu Y G, Liu J L. Effects of salt stress on biomass, quality, and photosynthetic physiology in switchgrass[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6489-6495 (in Chinese)
- [14] 左海涛, 李继伟, 郭斌, 宋尚有, 高旺盛. 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
Zuo H T, Li J W, Guo B, Song S Y, Gao W S. Effect of soil saline type and concentration as well as soil water content on the growth characteristics of switchgrass at the vegetative stage on two soil matrixes[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(6): 760-766 (in Chinese)
- [15] 范希峰, 侯新村, 朱毅, 武菊英. 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, Wu J Y. Impacts of salt stress on the growth and physiological characteristics of *Panicum virgatum* seedlings [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6): 1476-1480 (in Chinese)
- [16] 解新明, 周峰, 赵燕慧, 卢小良. 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, Lu X L. A summary of ecological and energy-producing effects of perennial energy grasses[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2329-2342 (in Chinese)
- [17] Adler P R, Sanderson M A, Boateng A A, Weimer P J, Jung H J G. Biomass yield and biofuel quality of switchgrass harvested in fall or spring[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(6): 1518-1525
- [18] Vogel K P, Brejda J J, Walters D T, Buxton D R. Switchgrass biomass production in the midwest USA: and nitrogen management[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94(3): 413-420
- [19] Sokhansanj S, Mani S, Turhollow A, Kumar A, Bransby D, Lynd L, Laser M. Large-scale production, harvest and logistics of switchgrass (*Panicum virgatum* L): Current technology and envisioning a mature technology [J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2009, 3(2): 124-141
- [20] 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
Fan X F, Hou X C, Zuo H T, Wu J Y, Duan L S. Biomass yield and quality of three kinds of bioenergy grasses in Beijing of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(16): 3316-3322 (in Chinese)
- [21] 姜峻, 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): 75-78, 88
Jiang J, Li D Q, Huang J. Growth of *Panicum virgatum* and soil moisture characteristics[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(5): 75-78, 88 (in Chinese)
- [22] 刘吉利, 吴娜. 自然盐碱胁迫对柳枝稷生物质生产和燃料品质的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 41(17): 25-28
Liu J L, Wu N. Effects of natural salt-alkali stress on biomass production and fuel quality of switchgrass[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(17): 25-28 (in Chinese)
- [23] 高丽欣, 刘静, 邓波, 杨富裕, 张蕴薇. 施氮水平和收获时间对柳枝稷生物质产量和能源品质的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(1): 110-115
Gao L X, Liu J, Deng B, Yang F Y, Zhang Y W. Effects of nitrogen level and harvest time on biomass yield and energy characteristic of switchgrass [J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(1): 110-115 (in Chinese)
- [24] 侯新村, 范希峰, 武菊英, 左海涛. 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
Hou X C, Fan X F, Wu J Y, Zuo H T. Effect of nitrogen fertilizer on biomass quality of herbaceous bioenergy plant in abandoned sand excavation lands [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2011, 33(1): 11-17 (in Chinese)
- [25] 王会梅, 徐炳成, 李凤民, 贺学礼. 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
Wang H M, Xu B C, Li F M, He X L. Preliminary study on growth response of *Panicum virgatum* L to different sites in the loess plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(3): 91-93 (in Chinese)
- [26] 刘晓侠. 枝稷对盐碱土的响应与改良效果研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016
Liu X X. Study on the response of switchgrass to saline-alkali soil and the mprovement effects of switchgrass on saline-alkali soil[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2016 (in Chinese)
- [27] 杨新国, 李玉英, 吴天龙, 程序. 半干旱黄土丘陵沟壑区柳枝稷 (*Panicum virgatum*) 的生物物质形成[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6043-6050
Yang X G, Li YY, Wu T L, Cheng X. Biomass formation for switchgrass (*Panicum virgatum*) in the semiarid loess hilly-gully regions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6043-6050 (in Chinese)
- [28] 江帆, 赵伟. 基于SWOT模型的山东省牧草产业发展战略[J]. 草业科学, 2017, 34(11): 2388-2395
Jiang F, Zhao W. Forage industry development strategy in Shandong Province based on SWOT model[J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(11): 2388-2395 (in Chinese)
- [29] 李继伟, 左海涛, 李青丰, 范希峰, 侯新村. 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
Li J W, Zuo H T, Li Q F, Fan X F, Hou X C. Response of root spatial pattern and growth characteristics of switchgrass to soil saline type[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(4):

- 644-651 (in Chinese)
- [30] 李代琼, 刘国彬, 黄瑾. 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: 125-128
- Li D Q, Liu G B, Huang J. Study on introduction and bio-ecological characters of switchgrass (*Panicum virgatum*) in An-Sailoess hilly-gully region[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5: 125-128 (in Chinese)
- [31] 徐炳成, 山仑, 黄瑾, 黄占斌. 柳枝稷和白羊草苗期水分利用与根冠比的比较[J]. 草业学报, 2003, 12(4): 73-77
- Xu B C, Shan L, Huang J, Huang Z B. Comparison of water use efficiency and root/shoot ratio in seedling stage of switchgrass (*Panicum virgatum*) and old world bluestems (*Bothriochloa ischaemum*) under different soil water conditions[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, 12(4): 73-77 (in Chinese)
- [32] 侯新村, 范希峰, 武菊英, 左海涛. 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
- Hou X C, Fan X F, Wu J Y, Zuo H T. Evaluation for production potentials of bioenergy grasses grown in abandoned sandpits in Beijing suburb [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26 (10): 1768-1774 (in Chinese)
- [33] 侯新村, 范希峰, 左海涛, 武菊英, 李召虎. 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
- Hou X C, Fan X F, Zuo H T, Wu J Y, Li Z H. Effect of nitrogen fertilizer on the growth characteristics and biomass yield of bioenergy grasses on abandoned sand excavation lands [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(2): 268-273, 279 (in Chinese)

责任编辑：王燕华