农业资源与环境学报
2014年4月·第31卷·第2期:140-145

Journal of Agricultural Resources and Environment
April 2014·Vol.31·No.2:140-145

柳枝稷苗期对钾营养胁迫耐受性的综合评价

朱　毅,范希峰,侯新村,武菊英,赵春桥

(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)

摘　要:为明确能源作物柳枝稷在缺钾条件下的耐受能力,筛选出耐贫瘠性强的优质种质资源,以13个柳枝稷品种为供试材料,在人工气候室中开展水培试验,通过相关农艺性状和生理指标等评价指标的测定,采用标准差系数赋予权重法对柳枝稷在缺钾胁迫下的表现做出综合评价。结果表明:在缺钾胁迫下,13个柳枝稷品种地上及地下部的生长均受到显著抑制,具体表现为:生长速度下降,叶绿素含量减少,光合面积减少,光合速率降低,进而导致其总生物量积累下降。由标准差系数赋予权重法得出的13个品种耐胁迫性由高到低依次为:Cave-In-Rock、Trailblazer、BJ-5、Forestburg、BJ-4、Pathfinder、BJ-3、BJ-2、Blackwell、Alamo、BJ-1、BJ-6、Kanlow。

关键词:柳枝稷;钾素胁迫;标准差赋予权重法

中图分类号:S216.2　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:2095-6819(2014)02-0140-06　　**doi:** 10.13254/j.jare.2013.0248

Comprehensive Evaluation of Potassium-deficiency Stress of Switchgrass at Seedling Stage

ZHU Yi, FAN Xi-feng, HOU Xin-cun, WU Ju-ying, ZHAO Chun-qiao

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

Abstract: To illustrate the effects of potassium-deficiency stress on biomass, agronomic traits and physiological indexes of switchgrass, a sort of bioenergy crop, and to obtain the cultivar with best tolerance, 13 switchgrasses were treated under potassium-deficiency in hydroponic artificial climatic chamber. The comprehensive evaluation was made through the analysis of evaluation indexes using standard deviation coefficient allocation weighed method. The results indicated that: the potassium-deficiency stress had exerted significantly inhibitory effects on the aboveground and belowground growth of switchgrass, including the reduction of growth rate, decrease of chlorophyll content, reduction of effective photosynthetic area, decrease of photosynthetic rate, which led to the lower biomass production. The tolerance of 13 switchgrasses from strong to weak was as follows: Cave-In-Rock, Trailblazer, BJ-5, Forestburg, BJ-4, Pathfinder, BJ-3, BJ-2, Blackwell, Alamo, BJ-1, BJ-6 and Kanlow.

Keywords: switchgrass; potassium-deficiency stress; standard deviation coefficient allocation weighed method

柳枝稷(*Panicum virgatum* L.),原产于北美洛基山脉以东、北纬55°以南大草原,是禾本科(*Gramineae*)黍属(*Panicum*)多年生高大丛生的C4草本植物[1-3]。对干旱、盐碱等逆境胁迫具有较强的耐受和适应能力,在贫瘠性边际土地上仍可保持较高产量,能有效地抵御病虫害的发生[4-7],并且对环境友好,适宜于生物质能源原料的生产与转化,具有广阔的应用前景。近年来我国以"不与人争粮,不与粮争地"为基本原则大力推进生物质能源产业的发展。利用边际土地规模化种植柳枝稷是我国获取生物质原料的一条重要途径。

钾在植物体内的含量约占其总干物重的0.3%~3%,是维持作物正常生长发育、获得农业高产所必需的大量矿质营养元素之一[8],植物生长环境中钾素供应是否充足直接影响植物的生长发育。不同植物种类间和同一作物的不同品种间对钾的吸收、积累、运转及利用效率等存在很大差异[9-10]。根据我国现有国情,许多类型的边际土地乃至耕地都面临着普遍缺钾的问题,而我国钾矿资源严重短缺、钾肥成本较高,因

收稿日期:2013-12-20
基金项目:北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX201103001);北京市农林科学院青年科研基金(QNJJ201019);中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(K2011-35)
作者简介:朱　毅(1984—),男,河南周口人,博士后,主要从事能源作物品质调控及生命周期评价研究。
E-mail: zydahaoren110@163.com

此，研究同一植物不同品种间钾素营养效率差异,充分利用植物高效吸收土壤难溶性钾素的能力,可在一定程度上解决我国钾素资源严重不足的问题[11]。自 20 世纪 80 年代至今,我国已引进了多个柳枝稷品种,但只有 Alamo 等少数品种实现了规模化种植,且作为后备土地资源的大量瘠薄型边际土地尚未得到开发利用。在边际土地上种植耐贫瘠性强的能源作物能够为生物质能产业的发展提供原料,并能有效地改善生态环境,增加土壤内有机质的含量[12]。因此针对柳枝稷不同品种钾素利用效率的遗传性差异,通过综合评价筛选出具有良好耐钾营养胁迫能力的柳枝稷品种并分析其产量潜力,使之在钾肥投入降低的情况下保持相对高产,是生物质能原料持续供应的一个重要前提。

国内外针对作物对钾素响应的研究主要集中于缺钾对根系生长[13]、对叶绿素及保护性酶的含量和对光合生理指标的影响[14-15],以及作物吸钾特性和耐低钾及缺钾机理研究上[16]。已有研究表明,柳枝稷对钾肥的利用效率相对较高[17-18],且在磷素缺乏的土壤中施用磷、钾肥对柳枝稷没有影响[18]。王会梅等[19]研究发现，柳枝稷的生物量与全钾之间的相关性不显著,但与速效钾之间的相关性达到显著水平。目前针对多品种柳枝稷耐钾营养胁迫能力的分析和评价尚鲜有报道。朱毅等[20]曾以多个品种柳枝稷为试验材料,通过在人工气候室中开展水培试验,研究氮营养胁迫对柳枝稷生长的影响。本研究借鉴该试验研究及数据分析方法,以 13 个柳枝稷栽培种质为供试材料,研究钾素胁迫对柳枝稷苗期生长及生理特性的影响,采用标准差系数赋予权重法综合评价缺钾水平下柳枝稷的耐贫瘠性,并筛选出耐贫瘠性强、钾营养性状优良的优质品种,为推广柳枝稷适地高产种植、获取优质生物质原料、提高我国生物质能源生产的经济性与可持续性提供可靠的理论依据,对改善沙性边际土地的受损生态系统、提升土壤肥力,发展低碳经济等具有重要意义[21]。

1　材料与方法

1.1 试验材料

供试材料参照参考文献[20]。

1.2 试验设计及方法

试验于 2010 年在北京市农林科学院草业中心的人工气候室内进行。供试材料种子于 7 月份进行育苗,待长出 2 片真叶时将幼苗移栽至水培箱(箱体长 41 cm,宽 30.5 cm,高 13.5 cm),13 个品种各放置 16 棵幼苗。水培箱内灌注 Hoagland 缺钾营养液对幼苗进行缺钾胁迫[22](K_0:0 mmol·L^{-1}),把灌注 Hoagland 完全营养液的水培箱作为对照(CK),重复 4 次。试验期间气候室内日平均气温 24.7 ℃(最高 28.9 ℃，最低 20.5 ℃),相对湿度为白天 32.2%、夜间 53%,相对光照时数为 12 h,光照强度为 400 μmol·m^{-2}·s^{-1})。待幼苗开始分蘖进行胁迫处理，每周更换 2 次营养液,使用气泵 24 h 通气,每 2 d 调节 1 次 pH 值,胁迫处理 60 d 后测定农艺性状及相关生理指标。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 形态指标

以水培箱塑料板表面至分蘖顶端叶片的长度为株高，重复 3 次。测定每株的分蘖总数，采用 LI-3100C 台式叶面积仪测量叶表面积。将水培箱中根系取出,用清水冲洗干净,使用根系扫描仪(Epison expression 1000XL)进行扫描,测定根表面积。

1.3.2 生理指标

植株生物量、光合生理参数和叶绿素含量等测定项目与方法参照参考文献[20]。

1.4 数据分析

1.4.1 耐缺钾指数计算

为避免不同品种的柳枝稷因自身生长发育特性的不同对综合评价造成影响,试验采用耐缺素指数来表述不同材料对钾素胁迫的耐受性[23]。耐缺素指数(Tolerant K-Deficiency Index,TKI)为营养胁迫下某一性状调查值或元素含量与正常条件下某一性状调查值或元素含量比值的百分数。

1.4.2 数据统计

方差分析、隶属函数值计算、标准差系数赋予权重法等分析方法均参照参考文献[20]。

2　结果与分析

2.1 钾素胁迫对柳枝稷生物量、农艺性状及生理指标的影响

如表 1 所示,与对照相比,缺钾胁迫下,供试的柳枝稷品种各评价性状均受到显著抑制(P<0.05)。其中总生物量降低了 43.06%~69.36%,净光合速率减少了 41.99%~77.45%,叶绿素含量下降了 44.50%~73.53%,叶表面积及根表面积分别减少了 44.83%~74.66%和 34.31%~68.01%,株高降低了 40.45%~63.01%,分蘖数也减少了 41.84%~62.98%。

不同柳枝稷品种在对照或缺钾处理下,各品种的

总生物量、形态指标和光合生理指标间均表现出显著性差异($P<0.05$)。在对照条件下,对于总生物量、叶绿素含量、叶表面积和根表面积来说,Kanlow 表现最好;对于净光合速率和株高来说,Alamo 表现最好;BJ-5 的分蘖数最多,但与 Kanlow 相比无显著差异。在缺钾处理下,对于总生物量和株高来说,Trailblazer 表现最好,且显著优于其余各品种;对于净光合速率和分蘖数来说,Cave-In-Rock 表现最好,且显著优于其余各品种;BJ-5 的叶绿素含量显著高于其余各品种;Kanlow 的叶表面积最大,但与 BJ-5 相比无显著差异。

2.2 钾素胁迫下柳枝稷评价指标的耐缺钾指数

由表 2 可知,在缺钾胁迫下,不同品种柳枝稷的同一评价指标耐缺钾指数表现出显著差异($P<0.05$)。对于总生物量来说,Trailblazer 的耐缺钾指数最高,与 BJ-5、Cave-In-Rock、Pathfinder 相比未表现出显著差异,但显著高于其他品种,BJ-6 最低;Cave-In-Rock 的净光合速率耐缺钾指数最高且显著高于除 BJ-6、Blackwell、Pathfinder、BJ-1 和 Trailblazer 之外的其他品种,Kanlow 表现最差;对于叶绿素含量来说,表现最好的为 BJ-5,且显著高于其余各品种,BJ-3 的耐缺钾指数最低;叶表面积耐缺钾指数最高的品种为 BJ-3,且显著高于除 BJ-4 外的其余各品种,表现最差的品种为 BJ-1;对于根表面积耐缺钾指数来说,Forestburg、BJ-1 和 BJ-2 的耐受性最强,三者之间差异不显著但显著高于其余品种,Pathfinder 耐受性最差。对于株高来说,Trailblazer 的耐缺钾指数与 Pathfinder、BJ-4、Cave-In-Rock 和 BJ-5 相比未表现出显著性差异,但显著高于其余各品种,Kanlow 的耐缺钾指数最低;分蘖数耐缺钾指数最高的品种为 Cave-In-Rock,且显著高于除 Alamo 和 BJ-4 之外的其余各品种,BJ-6 在胁迫下分蘖数下降最为严重($P<0.05$)。

2.3 标准差系数赋予权重法评价柳枝稷耐钾素胁迫性

表 3 表明,缺钾条件下,该评价体系中最重要的评价指标为叶绿素含量和总生物量,权重分别为 0.181 0 和 0.173 8。说明该评价体系侧重于生物量和光合相关生理指标的评价。采用标准差系数赋予权重法对柳枝稷各品种进行综合评价,其中 Cave-In-Rock 的综合评价 D 值最大,表明该品种耐缺钾胁迫能力最强,依照此权重法得出各品种的耐缺钾胁迫能力由高到低依次为:Cave-In-Rock、Trailblazer、BJ-5、Forestburg、BJ-4、Pathfinder、BJ-3、BJ-2、Blackwell、Alamo、BJ-1、BJ-6、Kanlow。

3 讨论

钾素作为植物生长发育所必需的大量元素之一,在碳水化合物代谢、呼吸作用及蛋白质代谢方面起重要作用,是调节植物细胞渗透势的最重要组分[8]。植物在生长发育过程中缺少钾供应时,蛋白质、叶绿素等物质被分解破坏,细胞的结构及功能成分受到影响。

表 1 钾素胁迫对柳枝稷各评价指标的影响

Table 1 Effect of K-deficiency stresses on evaluation indexes of *Panicum virgatum* L.

品种 Cultivar	总生物量 Total dry weight/g		净光合速率 Pn/ $\mu mol CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$		叶绿素含量 Chlorophyll content/$mg \cdot g^{-1}$FW		叶表面积 Leaf area/cm^2		根表面积 Root area/cm^2		株高 Plant height/cm		分蘖数 Tiller No./ $No \cdot plant^{-1}$	
	CK	K_0	CK	K_0	CK	K_0	CK	K_0	CK	K_0	CK	K_0	CK	K_0
Alamo	4.73b	1.72b	16.07a	5.69cd	4.35a	1.51b	238.1b	84.16b	456.3b	221.2bc	69.34a	28.51b	7.09cd	3.75cd
BJ-6	2.35de	0.72fg	9.87ef	4.87ef	4.07ab	1.31c	131.2fg	56.14d	384.1cd	151.8ef	30.74e	12.90e	6.05e	2.24g
Blackwell	4.55b	1.59b	15.01ab	7.21b	4.33a	1.63b	205.7c	86.74b	521.0a	266.7a	61.32b	27.14b	4.33f	1.69h
BJ-4	1.66f	0.64g	9.10f	4.06fg	2.54e	0.80f	86.3h	42.58e	286.3f	146.5f	15.41f	8.17f	6.39cde	3.43cde
Cave-In-Rock	3.31c	1.75b	13.67bc	7.93a	3.17d	1.11cde	199.6c	68.07cd	396.6bcd	203.2cd	39.41d	21.97c	8.27b	4.81a
Forestburg	2.72d	1.16d	10.09ef	4.21fg	3.04de	1.11cde	187.0cd	78.03bc	314.6ef	206.7cd	35.64de	17.31d	7.15cd	3.29def
BJ-5	3.47c	1.70b	14.53ab	6.34c	4.27ab	2.37a	251.0b	99.27a	416.1bcd	158.8ef	55.71bc	29.27b	9.24a	4.33b
Kanlow	5.29a	1.69b	15.21ab	3.43g	4.41a	1.64b	294.4a	104.76a	543.7a	233.5b	74.12a	27.42b	9.23a	3.96bc
BJ-2	2.14ef	0.94e	9.02f	4.13fg	2.85de	0.96def	165.5de	65.34d	310.3ef	171.4ef	29.75e	11.93e	6.24de	3.02ef
Pathfinder	2.76d	1.32c	11.37de	5.37de	4.23ab	1.70b	146.4ef	66.15d	357.7de	114.4g	35.98de	18.41d	7.41bc	3.54cde
BJ-3	1.89ef	0.86ef	9.54ef	4.13fg	3.40cd	0.90ef	116.0g	63.98d	310.3f	153.4ef	19.57f	9.43f	5.98e	2.77f
BJ-1	4.23b	1.44c	14.68ab	6.93b	3.71bc	1.07de	241.4b	61.17d	432.2bc	273.0a	58.42bc	22.88c	7.34bc	3.27def
Trailblazer	3.53c	2.01a	12.67cd	6.03cd	3.13d	1.15cd	181.5cd	77.69bc	403.2bcd	183.1de	52.16c	31.06a	7.47bc	3.65cd

注:表中数值为同一种质柳枝稷 4 个重复的指标实测值的平均值;同列数字后不同小写字母表示同一列不同品种间差异显著($P<0.05$)。下同。

表 2 缺钾胁迫下各评价指标的耐缺钾指数

Table 2 TKI indexes of different evaluation indexes under K-deficiency treatment

品种 Cultivar	总生物量 Total dry weight	净光合速率 Pn	叶绿素含量 Chlorophyll content	叶表面积 Leaf area	根表面积 Root area	株高 Plant height	分蘖数 Tiller No.
Alamo	36.71def	35.82c	35.06bc	35.78cd	49.07bcd	41.59de	52.95ab
BJ-6	30.76f	49.44ab	32.28bc	42.88bc	39.59de	42.05de	36.97d
Blackwell	35.29def	48.43abc	38.06bc	42.52bc	51.60bcd	44.37cde	39.35cd
BJ-4	38.75cdef	44.67bc	31.48bc	49.40ab	51.25bcd	53.10abc	53.77ab
Cave-In-Rock	53.08ab	58.11a	35.08bc	34.16cd	51.31bcd	55.83ab	58.17a
Forestburg	42.85bcde	41.87bc	36.76bc	41.87bc	65.92a	48.61bcd	46.11bc
BJ-5	49.07abc	43.69bc	55.56a	39.60bc	38.22de	52.59abc	46.89bc
Kanlow	32.24ef	22.72d	37.52bc	35.86cd	43.29cde	37.19e	42.91cd
BJ-2	43.76bcde	45.85bc	33.78bc	39.54bc	55.30abc	40.10de	48.57bc
Pathfinder	48.23abc	47.46abc	40.28b	45.42bc	32.15e	51.49abc	47.82bc
BJ-3	45.93bcd	43.56bc	26.49c	55.46a	52.01bcd	48.42bcd	46.43bc
BJ-1	34.07ef	47.30abc	28.87bc	25.40d	62.91ab	39.20de	44.58bcd
Trailblazer	57.08a	47.66abc	36.69bc	42.86bc	45.46cd	59.65a	48.88bc

表 3 缺钾胁迫下各指标隶属函数值、权重、综合评价 D 值

Table 3 Subordinate function value, index weight and evaluation D value and order of each cultivar under K-deficiency treatment

品种 Cultivar	隶属函数值 Subordinative function							综合评价值 Evaluation D	排序 Order
	总生物量 Total dry weight	净光合速率 Pn	叶绿素含量 Chlorophyll content	叶表面积 Leaf area	根表面积 Root area	株高 Plant height	分蘖数 Tiller No.		
Alamo	0.240 5	0.377 4	0.287 3	0.182 5	0.749 7	0.340 7	0.495 1	0.366 9	10
BJ-6	0.000 0	0.754 7	0.195 4	0.220 3	0.000 0	0.582 4	0.227 7	0.238 9	12
Blackwell	0.177 2	0.726 4	0.402 3	0.322 3	0.097 1	0.571 4	0.574 3	0.380 1	9
BJ-4	0.316 4	0.613 2	0.160 9	0.709 6	0.786 6	0.802 2	0.564 4	0.535 0	5
Cave-In-Rock	0.860 7	1.000 0	0.287 3	0.831 3	1.000 0	0.285 7	0.564 4	0.677 2	1
Forestburg	0.468 3	0.547 2	0.344 8	0.513 7	0.425 0	0.549 4	1.000 0	0.535 5	4
BJ-5	0.696 2	0.594 3	1.000 0	0.689 6	0.467 5	0.472 5	0.178 2	0.614 2	3
Kanlow	0.050 6	0.000 0	0.379 3	0.000 0	0.279 9	0.340 7	0.336 7	0.200 3	13
BJ-2	0.493 7	0.660 4	0.241 4	0.137 5	0.542 7	0.472 5	0.673 3	0.431 7	8
Pathfinder	0.670 9	0.698 1	0.471 2	0.628 3	0.508 1	0.659 3	0.000 0	0.516 6	6
BJ-3	0.582 3	0.603 8	0.000 0	0.495 2	0.439 7	1.000 0	0.584 2	0.493 5	7
BJ-1	0.126 6	0.698 1	0.080 4	0.095 9	0.355 9	0.000 0	0.910 9	0.286 6	11
Trailblazer	1.000 0	0.707 6	0.333 3	1.000 0	0.559 8	0.571 4	0.396 1	0.662 0	2
权重	0.173 8	0.090 7	0.181 0	0.167 9	0.136 6	0.116 1	0.134 0		

植物对钾素胁迫的响应情况是一个综合性状,难以用单一指标进行评价,需要结合多个评价指标进行综合衡量,目前,国内外针对不同作物的耐钾素胁迫基因型筛选和耐钾素胁迫潜力分析已有大量报道,但对作物耐钾素胁迫评价指标的选定尚无统一意见。本研究基于柳枝稷培育过程中指标测定情况和实地观测结果,选定总生物量、净光合速率、叶绿素含量、株高、分蘖、叶表面积及根表面积等作为柳枝稷耐钾素胁迫性的评价指标。

本试验结果表明,在缺钾胁迫下,13 个柳枝稷品种地上及地下部的生长均受到显著抑制,具体表现为:生长速度下降,叶绿素含量减少,光合面积减少,光合速率降低,进而导致其总生物量积累下降。张志勇等[13]研究发现,缺钾会抑制苗期棉花的根系长度、根表面积和根平均直径。Wallingford[24]研究表明缺钾会阻碍植物体内蛋白质和光合色素的合成;Pettigrew[25]和 Bednarz 等[26]研究发现缺钾对棉花叶片的光合能力和光合产物的运转具有显著的抑制作用;孙骏威等[27]

研究发现,缺钾降低了水稻剑叶的光合作用,显著抑制了水稻的生长;夏乐等[15]研究认为低钾胁迫下,玉米光合面积减少,光合速率、蒸腾速率均有所下降,产量降低;陈建忠等[28]研究发现施用钾肥对玉米果穗叶片的光合强度、叶绿素含量、玉米子粒灌浆和产量均有显著的促进作用。本试验研究结果与前人的研究结果一致。

除不同种作物外,针对同种不同基因型植物间的钾营养效应差异研究亦有大量报道。吕福堂等[16]针对不同基因型玉米的耐低钾机理进行了研究,易九红等[29]以棉花为材料研究不同品种对低钾胁迫的响应,项虹艳等[11]通过盆栽试验对耐缺钾胁迫的水稻品种进行了筛选;唐劲驰等[30]研究了在不同钾梯度条件下不同基因型大豆在不同生育时期的低钾极限。这些结果都表明,不同种或不同基因型作物对低钾胁迫的响应情况不尽相同。本试验中,不同柳枝稷品种在缺钾胁迫条件下的响应情况差异显著,其中 Cave-In-Rock、Trailblazer 2 个品种的综合评价值最高,对缺钾胁迫的适应性最强,属于耐钾素胁迫型品种。而朱毅等[20]开展的柳枝稷苗期耐氮营养胁迫的试验结果则反映出各品种的耐缺氮胁迫能力强弱依次为:BJ-4、BJ-3、Forestburg、Pathfinder、BJ-5、Blackwell、BJ-2、Kanlow、Alamo、Cave-In-Rock、BJ-1、Trailblazer、BJ-6,其中 BJ-4 和 BJ-3 2 个品种对氮营养胁迫的适应性最强。结合 13 种柳枝稷在氮、钾营养胁迫下的综合表现来看,综合得出,BJ-4、BJ-5 和 Forestburg 3 个品种对氮、钾胁迫的耐受性较强,而 Alamo、BJ-6 和 BJ-1 等品种在 2 种胁迫下的综合评价值排名均靠后,属于耐胁迫性较弱的品种。

尽管完全缺素胁迫在能源作物规模化种植与利用的实践中指导意义并不显著,但针对柳枝稷本身耐极端条件的机理研究却有较强的指导意义。文中的评价方法仅能反映柳枝稷不同品种的耐缺钾胁迫能力,在实际生产中,柳枝稷栽培的土壤条件较为复杂,需要结合各品种本身的生产潜力和其耐胁迫性进行综合考虑,才能更充分地发挥品种的生产能力。因此,针对柳枝稷对大量元素营养胁迫的科学研究还需进一步开展。

本研究通过试验数据采集,采用标准差系数法来确定指标的权重,这就忽略了人为的试验经验带来的主观信息。在以后针对柳枝稷耐贫瘠性的研究中,如何确定评价指标和探讨合理的定权方法依然是研究的重点之一。

4 结论

缺钾胁迫对不同品种柳枝稷的总生物量、净光合速率、叶绿素含量、叶表面积、根表面积、株高及分蘖等评价指标具有显著抑制作用;不同柳枝稷品种在同一胁迫下各指标表现出显著性差异。通过标准差系数赋予权重法对不同品种进行综合评价,得出各品种耐胁迫性由高到低依次为:Cave-In-Rock、Trailblazer、BJ-5、Forestburg、BJ-4、Pathfinder、BJ-3、BJ-2、Blackwell、Alamo、BJ-1、BJ-6、Kanlow。

参考文献:

[1] Lewandowskia 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.

[2] 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 Xi-feng, HOU Xin-cun, ZUO Hai-tao, et al. Biomass yield and quality of three kinds of bioenergy grasses in Beijing of China[J]. *Scientia Agicultura Sinica*, 2010, 43(16): 3316-3322. (in Chinese)

[3] 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, 18(3): 232-240.
LIU Ji-li, ZHU Wan-bin, XIE Guang-hui, et al. The development of *Panicum virgatumas* an energy crop[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(3): 232-240. (in Chinese)

[4] Lemus R, Charles Brummer E, Moore K J. Biomass yield and quality of 20 switchgrass populations in southern Iowa, USA[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2002(23): 433-442.

[5] Sanderson M A, Reed R L, McLaughlin S B, et al. Switchgrass as a sustainable bioenergy crop[J]. *Bioresource Technology*, 1996, 56(1): 83-93.

[6] 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.
ZUO Hai-tao, LI Ji-wei, GUO Bin, et al. 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)

[7] Boylan D, Bush V, Bransby D I. Switchgrass cofiring: pilot scale and field evaluation[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2000, 19: 411-417.

[8] 武维华. 植物生理学[M]. 北京: 科教出版社, 2006: 100-101.
WU Wei-hua. Plant physiology[M]. Beijing: Science Press, 2006: 100-101. (in Chinese)

[9] 刘国栋, 刘更另. 水稻耐低钾基因型筛选方法的研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(2): 113-120.
LIU Guo-dong, LIU Geng-ling. Study on method screening rice genotypes tolerant to low potassum[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33 (2): 113-120. (in Chinese)

[10] 王永锐, 李卫军, 余款经. 应用营养水培法筛选水稻耐低钾基因型品种[J]. 江西农业大学学报, 1996, 18(2): 193-199.

WANG Yong-rui, LI Wei-jun, YU Kuan-jing. Screening rice varieties (*Oryza sativa* L.) of genotype tolarant to k deficiency with nutrition solution culture [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 1996, 18 (2): 193-199. (in Chinese)

[11] 项虹艳, 丁　洪, 郑金贵, 等. 耐低钾水稻品种的筛选[J]. 江西农业大学学报, 2004, 26(3): 338-344.
XIANG Hong-yan, DING Hong, ZHENG Jin-gui, et al. Screening of low K-tolerant rice varieties[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2004, 26(3): 338-344. (in Chinese)

[12] 朱　毅, 侯新村, 武菊英, 等. 氮肥对两种沙性栽培基质中有机碳类物质含量的影响[J]. 草业学报, 2012, 22(2): 38-46.
ZHU Yi, HOU Xin-cun, WU Ju-ying, et al. The effects of nitrogen fertilizer on the contents of TOC, POC, SMBC and WSOC in two kinds of sandy substrates[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 22(2): 38-46. (in Chinese)

[13] 张志勇, 王清连, 李召虎, 等. 缺钾对棉花幼苗根系生长的影响及其生理机制[J]. 作物学报, 2009, 35(4): 718-723.
ZHANG Zhi-yong, WANG Qing-lian, LI Zhao-hu, et al. Effect of potassium deficiency on root growth of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings and its physiological mechanisms involved[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(4): 718-723. (in Chinese)

[14] 李富恒, 于龙凤, 安福全, 等. 缺钾培养对玉米幼苗部分生理指标的影响[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(4): 459-463.
LI Fu-heng, YU Long-feng, AN Fu-quan, et al. Effects of lacking K cultivation on partially physiological index in maize seedling[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2007, 38(4): 459-463. (in Chinese)

[15] 夏　乐, 于海秋, 郭焕茹, 等. 低钾胁迫对玉米光合特性及叶绿素荧光特性的影响[J]. 玉米科学, 2008, 16(6): 71-74.
XIA Le, YU Hai-qiu, GUO Huan-ru, et al. Effects of potassium deficiency on photosynthetic characters and chlorophyll fluorescence characters in maize plants[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(6): 71-74. (in Chinese)

[16] 吕福堂, 张秀省. 不同基因型玉米吸钾特性和耐低钾机理研究[J]. 玉米科学, 2010, 18(1): 61-65.
LÜ Fu-tang, ZHANG Xiu-sheng. Study on the characteristic of potassium absorption and low potassium endurance mechanism for different genotypes maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2010, 18(1): 61-65. (in Chinese)

[17] Anderson B E, Moore K J. Native warm-season grasses: research trends and issues[R]. Iowa: Soil Science Society of America, Inc, 2000.

[18] Hall K E, George G R, Riedl R R. Herbage dry matter yields of switchgrass, big bluestem and indiangrass with N fertilization[J]. *Agronomy Journal*, 1982, 74(1): 47-51.

[19] 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.
WANG Hui-mei, XU Bing-cheng, LI Feng-min, et al. Preliminary study on growth response of switchgrass to different sites in the loess planteau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(3): 91-93. (in Chinese)

[20] 朱　毅, 范希峰, 武菊英, 等. 柳枝稷苗期对氮素胁迫耐受性的综合评价[J]. 中国草地学报, 2013, 35(4): 66-70, 75.
ZHU Yi, FAN Xi-feng, WU Ju-ying, et al. Study on comprehensive evaluation of nitrogen-deficiency stress of switchgrass at seedling stage [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2013, 35(4): 66-70, 75. (in Chinese)

[21] 云锦凤. 低碳经济与草业发展的新机遇[J]. 中国草地学报, 2010, 32 (3): 1-3.
YUN Jin-feng. New opportunity of development of the low-carbon economy and prataculture[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2010, 32 (3): 1-3. (in Chinese)

[22] 张志良, 瞿伟菁, 李小芳. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 21-22.
ZHANG Zhi-liang, QU Wei-jing, LI Xiao-fang. Experimental guide of plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 21-22.(in Chinese)

[23] 张丽梅, 贺立源, 李建生, 等. 玉米自交系耐低磷材料苗期筛选研究[J]. 中国农业科学, 2004,37(12): 1955-1959.
ZHANG Li-mei, HE Li-yuan, LI Jian-sheng, et al. Investigation of maize inbred lines on tolerance to low-phosphorus stress at seedling stage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(12): 1955-1959. (in Chinese)

[24] Wallingford W. Function of potassium in plants[J]. *Potassium for Agriculture*, 1980: 10-27.

[25] Pettigrew W. Potassium deficiency increases specific leaf weights and leaf glucose levels in field grown cotton[J]. *Agron J*, 1999, 91: 962-968.

[26] Bednarz C W, Oosterhuis D M, Evans R D. Leaf photosynthesis and carbon isotope discrimination of cotton in response to potassium deficiency[J]. *Environ Exp Bot*, 1998(39): 131-139.

[27] 孙骏威, 翁晓燕, 李　峤, 等. 缺钾对水稻不同品种光合和能量耗散的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 577-584.
SUN Jun-wei, WENG Xiao-yan, LI Jiao, et al. Effects of potassium-deficiency on photosynthesis and energy dissipation in different rice cultivars[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(4): 577-584. (in Chinese)

[28] 陈建忠, 肖荷霞, 毛彩云. 钾肥对玉米子粒灌浆的影响研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(6): 146-148.
CHEN Jian-zhong, XIAO He-xia, MAO Cai-yun. Study on grouting of corn seeds in the condition of fertilizing K_2O[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(6): 146-148. (in Chinese)

[29] 易九红, 刘爱玉, 李瑞莲, 等. 不同棉花品种苗期低钾胁迫响应研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(5): 101-106.
YI Jiu-hong, LIU Ai-yu, LI Rui-lian, et al. Effect of low potassium stress on different cotton varieties in seeding stage[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(5): 101-106. (in Chinese)

[30] 唐劲驰, 曹敏建, 祝子平, 等. 不同基因型大豆对低钾的耐性极限及缺钾症状研究简报[J]. 大豆科学, 2001, 20(4): 295-297.
TANG Jin-chi, CAO Min-jian, ZHU Zi-ping, et al. Resistance limit and symptom of different genotypes of soybean to low potassium[J]. *Soybean Science*, 2001, 20(4): 295-297. (in Chinese)