

doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2014.03.027

# 不同种子处理方法对柳枝稷萌发成苗需水阈值的影响

严 风<sup>1</sup>, 张岁岐<sup>1,2\*</sup>, 王 楠<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100)

**摘要:** 研究柳枝稷(*Panicum virgatum*)成苗期间的抗旱性及需水特性,可为其在干旱条件下播种保苗提供依据。采用不同浓度的聚乙二醇(-0.1~-0.5 MPa)模拟外界环境水分条件,用4℃低温冷冻化和8 M 硫酸处理3个柳枝稷品种(Pathfinder, Traiblazer 和 Alamo)的种子,研究其成苗过程中种子萌动、萌发和出苗3个阶段的需水阈值。结果表明:随着环境水势的降低,种子群体萌动、萌发和出苗达50%概率的时间逐渐延迟;且各阶段的需水阈值不同,出苗阶段的最低。4℃低温冷冻化处理和8 M 硫酸处理均使种子群体萌动、萌发和出苗达50%的时间缩短,各阶段需水阈值增大。在相同处理下,Pathfinder 品种各阶段对环境水势的需求较 Trailblazer 和 Alamo 宽松。可见,柳枝稷种子出苗阶段对环境水分胁迫最为敏感,忍受胁迫能力最弱,抗旱性最弱;其中 Pathfinder 品种忍受胁迫能力最强,抗旱性最强。

**关键词:** 柳枝稷; 种子处理; 水分胁迫; 耐旱性; 需水阈值

中图分类号: S330.3

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2014)03-0617-06

## Effects of Different Seed Treatments on the Threshold of Water Potential during the Seed Germination of Switchgrass

YAN Feng<sup>1</sup>, ZHANG Sui-qi<sup>1,2\*</sup>, WANG Nan<sup>1,2</sup>

(1. State Key Lab. of Soil Erosion and Dryland Farming of the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China;

2. State Key Lab. of Soil Erosion and Dryland Farming of the Loess Plateau, Institute of Soil and Water

Conservation, Yangling, Shaanxi Province 712100, China)

**Abstract:** In order to provide theoretical basis for sowing and seedling establishment under drought condition, the drought resistance and water requirement of switchgrass were investigated at germination and seedling establishment stages. The seeds of different switchgrass species (Pathfinder, Traiblazer and Alamo) were treated with low temperature (4°C) and 8 M sulfuric acid under different PEG concentrations (-0.1~-0.5 MPa). The water requirement thresholds of switchgrass seeds were evaluated at radicle emergence, plumule emergence and seedling establishment stages. Results showed that the times required for achieving the 50% radicle emergence, plumule emergence and seedling establishment of all seeds increased with environmental water potential decreasing. Water requirement threshold at seedling establishment stage was higher than that at radicle emergence and plumule emergence stages. Both low temperature treatment (4°C) and 8 M sulfuric acid treatment shorten the times required for achieving the 50% radicle emergence, plumule emergence and seedling establishment of all tested seeds, and enhanced the water requirement threshold in each stage. Pathfinder variety had lower requirement for environmental water potential than Trailblazer and Alamo varieties under the same treatment. Therefore, seedling establishment stage was the most sensitive to ambient water stress. Pathfinder variety showed the highest stress tolerance and drought resistance among three varieties.

**Key words:** Switchgrass; Seed treatment; Water stress; Drought tolerance; Critical water potential

柳枝稷(*Panicum virgatum*)为禾本科黍属多年丛生暖季型草本植物,原产于中美洲和北美洲,其生物量高,根系发达,分蘖能力强,耐旱性强<sup>[1]</sup>。种

子坚硬光滑,一般较小,具有很高的休眠性<sup>[2]</sup>。柳枝稷还具有适应性广、防风固沙能力强、耐瘠薄等优点,是沙漠绿化、草原植被的理想植物<sup>[3]</sup>。同时,是

收稿日期: 2013-09-02; 修回日期: 2013-10-23

基金项目: 国家高新技术研究发展计划项目(863 计划)(2011AA100504)资助

作者简介: 严风(1988-),女,内蒙古丰镇人,硕士,主要从事生理生态学研究, E-mail: 1160872261@qq.com; \* 通信作者 Author for correspondence, E-mail: sqzhang@ms.iswc.ac.cn

一类理想的纤维素类草本能源植物,也是美国能源植物研究的模式植物<sup>[4-5]</sup>。20 世纪 90 年代,柳枝稷开始被引入半干旱黄土丘陵沟壑区陕西省安塞地区。作为水土保持和防风固沙植物及在荒漠化土壤种植的优良抗逆性牧草,柳枝稷表现出良好的生态适应性,具有良好的应用前景<sup>[6-7]</sup>。

由于黄土高原地区降雨不足且不均匀,导致作物从播种开始就受到不可预测的干旱影响<sup>[8]</sup>。其中植物萌发出苗所需的水分条件已成为植物良好生长的关键要素。山仑等<sup>[8]</sup>认为种子不同成苗阶段对水分的需求存在差异,其中出苗阶段对水分最为敏感;Owen<sup>[9]</sup>和 Hadas<sup>[10]</sup>也都认为,种子萌发时对水分十分敏感,对外界环境水势存在一个阈值,低于该值便不能萌发。

目前已在苜蓿(*Medicago sativa*)、高粱(*Sorghum bicolor*)和玉米(*Zea mays*)等植物上研究表明,种子在萌发成苗各阶段对水分的需求并非完全一致,存在着不同临界值<sup>[11-13]</sup>。而柳枝稷作为一种引进牧草,近年来国内对其的研究日益增多,但主要集中在能源生产管理、生物学特性、生态适应性、耐盐性等方面,对环境低水分需求鲜有报道。同时,柳枝稷种子具有很高的休眠性,种子休眠会抑制其萌发和出苗<sup>[14-15]</sup>。有研究表明,用酸腐蚀和低温处理柳枝稷种子,可打破休眠提高其萌发率<sup>[16-17]</sup>。针对以上问题,本研究在对不同品种柳枝稷种子进行不同方式的处理(4℃低温冷冻化和 8 M 硫酸处理),并用 PEG 溶液模拟干旱胁迫,对种子成苗各阶段需水条件进行了探讨。进而了解其抗旱适应性及对干旱环境的忍受能力,以期于干旱条件下的播种出苗和合理种植提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

参试材料具体情况如表 1 所示。

表 1 3 个柳枝稷品种的基本特征

品种	生态型	倍性	描述
Cultivars	Ecotype	Ploidy	Description
Alamo	低地型	4 倍体	易在潮湿和温暖的环境中生长,晚熟,产量高
Pathfinder	高地型	8 倍体	易建植,耐寒,晚熟
Trailblazer	高地型	8 倍体	耐寒,可消化营养高

### 1.2 试验方法

种子处理设为:处理 1:4℃低温冷冻化处理 14 d;处理 2:8 M 硫酸处理 5 min;对照处理(CK)。取

备用种子放入培养皿,用 75%乙醇溶液消毒 2 min 后,用蒸馏水冲洗,自然干燥后备用。取各 30 粒干燥后的种子,摆放在铺垫双层滤纸的中号培养皿内,以聚乙二醇(PEG-6000)为培养介质,在 30℃恒温培养箱中暗萌发。待种子萌动后,转移至昼夜光/暗时间 12 h/12 h,28℃条件下继续培养。每 1 d 更换一次培养液,以减少其水势变动。胁迫水势梯度为 -0.10, -0.20, -0.30, -0.40 和 -0.50 MPa,每个浓度 3 次重复,以蒸馏水培养为对照。

### 1.3 种子萌动、萌发和出苗指标

从种子开始吸水始计时,定义 50%种子露白为萌动(胚根突破种皮),50%种子胚芽长度达到种长的 1/2,且根长与种子等长为萌发,50%种子胚芽长 1 cm、种苗长 2 cm 为出苗。播种后连续记录种子萌动、萌发及出苗过程中达到标准的种子个数、胚芽(包括胚轴)和胚根长度,用于计算种子各阶段的需水阈值。

### 1.4 指标计算

1.4.1 种子群体吸水时间(d)与萌动、萌发、出苗百分率的计算 种子萌动、萌发和出苗对外界环境水势都有一个阈值,低于此值种子便不能达到相应阶段。一般定义群体的 50%萌动、萌发或出苗的时间为某一群体在特定环境水势下萌动、萌发或出苗的时间<sup>[18]</sup>。莫惠栋<sup>[19]</sup>指出,在不同时间种子萌动、萌发和出苗的累计百分率(即累计频率)与相应的时间对数值存在线性关系,如下所示:

$$P_i = a + b \log t \quad (1)$$

其中  $t$  表示从水分处理到该概率出现的时间,  $P_i$  表示观测到累计萌动、萌发和出苗百分率的概率单位转换值。用此方程进行拟合,得到种子萌动、萌发和出苗一半的时间  $t$ ,  $t$  代表该品种种子萌动、萌发及出苗的速率和整齐度。

1.4.2 各阶段需水阈值的计算 按照 Scott<sup>[20]</sup>的方法将不同的外界环境水势和种子萌动、萌发及出苗一半时间  $t$ (表 2~4)的倒数进行拟合,得到方程:

$$1/t = b\Psi\omega + a \quad (2)$$

其中,  $\Psi\omega$  为外界环境水势,  $-a/b$  为该品种在某一阶段所能忍受的临界环境水势(需水阈值)。

### 1.5 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件进行方程拟合,用 Sigma-Plot 12.0 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 种子群体吸水时间与萌动、萌发、出苗百分率的关系

如表 2~4 所示,同一品种下,4℃低温处理和 8 M 硫酸处理柳枝稷,都使种子萌动、萌发和出苗达 50% 时间缩短。相同处理下,种子萌动、萌发和出苗达 50% 时间按 Pathfinder, Trailblazer 和 Alamo 品种呈依次下降趋势。随着 PEG 浓度的增加,Pathfinder, Trailblazer 和 Alamo 品种种子达到萌动、萌发和出苗的时间相应推迟。

正常供水、4℃低温处理下,Pathfinder 萌动、萌发

和出苗达 50% 概率时间分别为 1.97, 3.08, 5.36 d, 经 -0.1~-0.5 MPa PEG 胁迫后,所需时间分别比对照延长 11.17%~116.24%, 7.47%~137.66% 和 6.90%~180.22%。Trailblazer 和 Alamo 萌动、萌发和出苗达 50% 概率时间长于 Pathfinder, 分别是 2.09, 3.58, 6.50 d 和 7.18, 8.08, 9.52 d, 胁迫处理后所需时间增加了 14.35%~150.23%, 6.70%~143.85%, 5.38%~131.08% 和 25.77%~163.79%, 16.58%~202.97%, 23.32%~263.24%。同样 8 M 硫酸处理下,随着胁迫浓度的增加,种子萌动、萌发和出苗达 50% 概率时间较对照长,Pathfinder 萌动、萌发和出苗达 50% 概率时间较 Trailblazer 和 Alamo 的短。

表 2 4℃低温处理下柳枝稷种子萌动、萌发和出苗百分率达 50% 的时间随环境水势变化的关系

Table 2 The times needed for 50% radicle emergence, plumule emergence and seedling establishment of switchgrass seed at different environmental water potential gradients under low-temperature treatment (4℃)

品种 Cultivars	环境水势/MPa	50%萌动时间/d		50%萌发时间/d		50%出苗时间/d	
	External water potential	Time of 50% radical emergence	+CK%	Time of 50% plumule emergence	+CK%	Time of 50% seedling establishment	+CK%
Pathfinder	0.0	1.97	0.00	3.08	0.00	5.36	0.00
	-0.1	2.19	11.17	3.31	7.47	5.73	6.90
	-0.2	2.46	24.87	3.70	20.13	6.24	16.42
	-0.3	2.61	32.49	4.17	35.39	7.79	45.34
	-0.4	3.46	75.63	5.95	93.18	9.28	73.13
	-0.5	4.26	116.24	7.32	137.66	15.02	180.22
Trailblazer	0.0	2.09	0.00	3.58	0.00	6.50	0.00
	-0.1	2.39	14.35	3.82	6.70	6.85	5.38
	-0.2	2.64	26.32	3.95	10.34	7.92	21.85
	-0.3	2.66	27.27	4.91	37.15	9.74	49.85
	-0.4	3.87	85.17	7.95	122.07	15.02	131.08
	-0.5	5.23	150.23	8.73	143.85	15.02	131.08
Alamo	0.0	7.18	0.00	8.08	0.00	9.52	0.00
	-0.1	9.03	25.77	9.42	16.58	11.74	23.32
	-0.2	10.04	39.83	10.84	34.16	13.53	42.12
	-0.3	10.90	51.81	11.32	40.10	17.97	88.76
	-0.4	13.39	86.49	16.86	108.66	28.17	195.90
	-0.5	18.94	163.79	24.48	202.97	34.58	263.24

注: +CK% = (处理达到各个阶段所需时间 - 对照达到相应阶段所需时间) ÷ 对照达到相应阶段所需时间 × 100%, 即各个处理达各个阶段所需时间和对照相比, 增加的数值占对照值的百分比。下同

Note: +CK% = (time needed for treatment to reach 50% radicle emergence, plumule emergence or establishment stage - time needed for control to reach corresponding stage) ÷ time needed for control to reach corresponding stage × 100%. The same as below

### 2.2 种子萌动、萌发和出苗各阶段的需水阈值

由表 2~4 可知,随着 PEG 胁迫浓度的增加,种子萌动、萌发和出苗的时间依次推迟。如图 1~3 所示,4℃低温处理下,种子萌动、萌发和出苗各阶段所能忍受的临界环境水势阈值增高。其中低温处理下 Pathfinder 种子萌动、萌发和出苗需水阈值分别为 -0.95, -0.86 和 -0.83 MPa, 同时 Pathfinder, Trailblazer 和 Alamo 品种各阶段需水阈值存在差异,表现为 Path-

finder > Trailblazer > Alamo。8 M 硫酸处理下,种子萌动、萌发和出苗各阶段所能忍受的临界环境水势阈值增高,结果与 4℃低温处理相似。说明 Pathfinder 品种萌动、萌发和出苗过程对水分的敏感程度弱于 Trailblazer 和 Alamo,且种子萌动、萌发和出苗各阶段的需水阈值逐渐降低。这表明,忍受环境水势胁迫的能力逐渐减弱,对干旱的敏感性逐渐增大,即出苗阶段抗旱性最差。

表3 8 M 硫酸处理下柳枝稷种子萌动、萌发和出苗百分率达50%的时间随环境水势变化的关系

Table 3 The times needed for the 50% seed radicle emergence, plumule emergence and seedling establishment of switchgrass at different environmental water potential gradients under 8 M sulfuric acid treatment

品种 Cultivars	环境水势/MPa	50%萌动时间/d		50%萌动时间/d		50%出苗时间/d	
	External water potential	Time of 50% radical emergence	+CK%	Time of 50% plumule emergence	+CK%	Time of 50% seedling establishment	+CK%
Pathfinder	0.0	2.32	0.00	4.04	0.00	6.11	0.00
	-0.1	2.69	15.95	4.40	8.91	6.77	10.80
	-0.2	2.95	27.16	4.85	20.05	7.27	18.99
	-0.3	3.12	34.48	5.66	40.10	8.78	43.70
	-0.4	4.12	77.59	8.44	108.91	13.16	115.38
	-0.5	6.40	175.86	9.52	135.64	15.02	145.83
Trailblazer	0.0	2.63	0.00	4.37	0.00	6.77	0.00
	-0.1	3.17	20.53	4.85	10.98	7.10	4.87
	-0.2	3.52	33.84	5.40	23.57	8.22	21.42
	-0.3	4.47	69.96	6.60	51.03	9.68	42.98
	-0.4	5.83	121.67	8.02	83.52	11.85	75.04
	-0.5	6.44	144.87	12.82	193.36	28.17	316.10
Alamo	0.0	7.98	0.00	8.39	0.00	11.80	0.00
	-0.1	8.84	10.78	9.75	16.21	13.59	15.17
	-0.2	10.29	28.95	11.21	33.61	25.06	112.37
	-0.3	12.80	60.40	12.93	54.11	28.17	138.73
	-0.4	16.29	104.14	19.22	128.08	34.58	193.05
	-0.5	27.34	242.61	34.44	310.49	34.58	193.05

表4 未处理柳枝稷种子萌动、萌发和出苗百分率达50%的时间随环境水势变化的关系

Table 4 Variations in the times needed for 50% of seed radicle emergence, plumule emergence and seedling establishment of Switchgrass along environmental water potential gradients under untreatment

品种 Cultivars	环境水势/MPa	50%萌动时间/d		50%萌动时间/d		50%出苗时间/d	
	External water potential	Time of 50% radical emergence	+CK%	Time of 50% plumule emergence	+CK%	Time of 50% seedling establishment	+CK%
Pathfinder	0.0	2.47	0.00	4.05	0.00	6.64	0.00
	-0.1	2.96	19.84	4.77	17.78	7.16	7.83
	-0.2	3.44	39.27	6.61	63.21	7.86	18.37
	-0.3	4.92	99.19	7.90	95.06	9.99	50.45
	-0.4	4.92	99.19	8.37	106.67	11.85	78.46
	-0.5	7.05	185.43	9.99	146.67	28.17	324.25
Trailblazer	0.0	3.18	0.00	4.67	0.00	7.04	0.00
	-0.1	3.55	11.64	5.31	12.05	7.39	4.97
	-0.2	4.07	27.99	6.10	30.62	9.74	38.35
	-0.3	5.22	64.15	9.29	98.93	18.38	161.08
	-0.4	7.00	120.13	9.87	111.35	15.02	113.35
	-0.5	9.08	185.53	13.74	194.22	34.58	391.19
Alamo	0.0	7.81	0.00	9.23	0.00	9.07	0.00
	-0.1	9.88	26.50	10.64	15.28	11.85	30.65
	-0.2	11.37	45.58	12.09	30.99	15.02	65.60
	-0.3	12.25	56.85	12.92	39.99	28.17	210.58
	-0.4	20.39	161.08	24.48	165.22	34.58	281.26
	-0.5	24.48	213.44	34.44	273.13	34.58	281.26

### 3 讨论

水是植物生存、生长和发育的限制因子<sup>[21]</sup>。对于干旱逆境下植物种子水分需求的研究是植物种子

水分吸收机理和幼苗耐旱机制研究的基础<sup>[13]</sup>。山仑等<sup>[8]</sup>研究表明,植物种子的需水阈值越大,耐旱性越差。本研究表明,不同品种的柳枝稷种子需水阈值不同,所能忍受环境胁迫能力不同,但均表现出

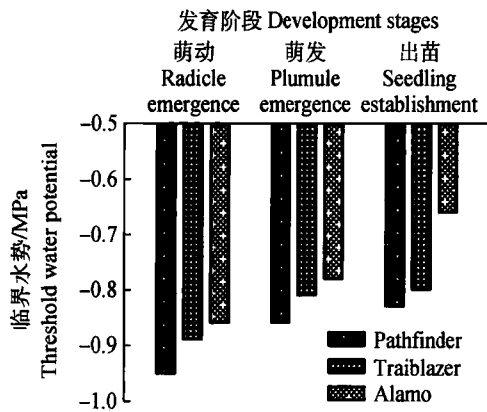


图 1 4℃低温处理柳枝稷种子群体 50%萌动、萌发和出苗时间与临界水势的关系

Fig. 1 Relationship between the times of 50% seed radicle emergence, plumule emergence and seedling establishment (d) and the water potential threshold of switchgrass under low-temperature treatment (4℃)

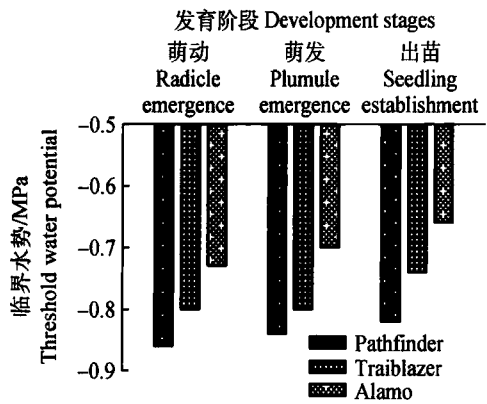


图 2 8 M 硫酸处理柳枝稷种子群体 50%萌动、萌发和出苗时间与临界水势的关系

Fig. 2 Relationship between time of 50% seed radicle emergence, plumule emergence and seedling establishment (d) and threshold water potential in switchgrass under 8 M sulfuric acid treatment

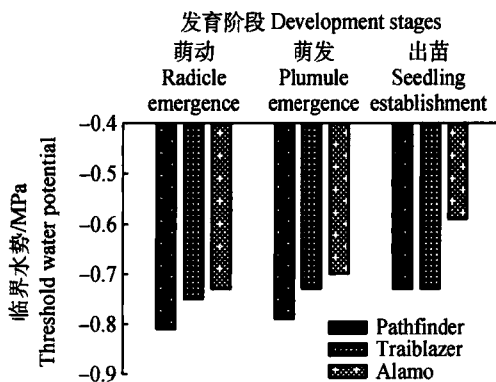


图 3 未处理柳枝稷种子群体 50%萌动、萌发和出苗时间与临界水势的关系

Fig. 3 Relationship between the times of 50% seed radicle emergence, plumule emergence and seedling establishment (d) and the water potential threshold of control switchgrass

萌动和萌发阶段对水分需求较为宽松,而出苗阶段对环境水分较敏感。说明在种子萌动、萌发和出苗各阶段对水分的需求逐渐增加,所以对干旱的敏感性逐渐增加。出苗阶段由于种子生长由依靠自身贮藏的养分逐渐转变为依靠光合作用,因而对水分需求最敏感<sup>[13]</sup>,需水阈值最大,耐旱性最差。山仑等<sup>[8]</sup>和苏佩等<sup>[11-12]</sup>对玉米和高粱的研究也得出:种子出苗阶段对水分最敏感,耐旱能力存在差异,即吸胀>萌动>幼苗生长。李文烧等<sup>[13]</sup>在苜蓿的研究上也得出成苗阶段耐旱能力最差的结论。

4℃低温处理种子和 8 M 硫酸处理种子均使 Pathfinder, Trailblazer 和 Alamo 萌动、萌发和出苗时间不同程度的缩短,使得种子从吸水萌动到出苗过程需水阈值减小,对环境水势的需求逐渐严格。说明,低温处理和硫酸处理都能不同程度的克服种皮的不透性,打破休眠,增进种子内部的新陈代谢,从而提高种子的萌发能力<sup>[16,22]</sup>,而硫酸处理种子,随浸种时间的不同萌发率不同<sup>[23]</sup>。

对于不同品种来说,水分胁迫下柳枝稷种子群体萌动、萌发和出苗所需时间均延长,但 Pathfinder 种子萌动、萌发和出苗各阶段所需时间相对 Trailblazer 和 Alamo 较短,因此,有着相对更低的需水阈值,具有更强的干旱忍受能力,即 Pathfinder > Trailblazer > Alamo。Sanderson 等<sup>[24]</sup>研究表明,低地型的柳枝稷品种更适应于温暖潮湿的环境,高地型柳枝稷品种则更适应于干燥的环境,这与本试验结果基本一致。同时,种子从吸水到出苗,需水阈值增大,对环境水势的要求逐渐严厉,表现为出苗阶段对水分需求最为敏感<sup>[13]</sup>。

## 4 结论

综上所述,种子在萌动、萌发和出苗过程中,萌动时所忍受外界水分胁迫能力最高,萌发时忍受外界水分胁迫能力有所减弱,出苗时忍受外界水分胁迫能力最低,即出苗阶段抗旱性最差。同时,4℃低温处理和 8 M 硫酸处理均可不同程度降低种子的需水阈值,提高种子的抗旱能力。对于 Pathfinder, Trailblazer 和 Alamo 来说,在出苗阶段忍受外界水分胁迫的能力不同,抗旱性存在差异,为 Pathfinder > Trailblazer > Alamo。

## 参考文献

[1] Sanderson M A, Read J C. Harvest management of switch-

- grass or biomass feedback and forage productions [J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91(1): 5-10
- [2] Shen Z X, Parrish D J, Wolf D D, *et al.* Stratification in switchgrass seeds is reversed and hastened by drying [J]. *Crop Science*, 2001, 41(5): 1546-1551
- [3] Sladden S E, Bransby D I, Aiken G E. Biomass yield, composition and production costs for eight switchgrass varieties in Alabama [J]. *Biomass and Bioenergy*, 1991, 1(2): 119-122
- [4] Lewandowski 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
- [5] McLaughlin S B, Kszos L A. Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2005, 28(6): 515-535
- [6] 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*, 2008, 30(7): 125-132
- [7] 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): 10-06
- [8] 山仑, 郭礼坤. 逆境成苗生态生理研究: I 春播谷类作物成苗期间的抗旱性及需水条件[J]. *作物学报*, 1984, 4(10): 257-263
- [9] Owen P C. The relation of germination of wheat to water potential [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1952, 3(2): 188-203
- [10] Hadas A. Water uptake and germination of Leguminous seeds under changing external water potential in osmotic solutions [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1976, 27(3): 480-489
- [11] 苏佩, 山仑. 玉米种子萌发成苗不同阶段需水阈值的研究[J]. *西北植物学报*, 1996, 16(1): 34-37
- [12] 苏佩, 山仑. 高粱种子萌发成苗过程中水分需求的量化研究[J]. *应用与环境生物学报*, 1996, 2(2): 119-122
- [13] 李文尧, 张岁岐, 山仑. 水分胁迫下紫花苜蓿和高粱种子萌发特性及幼苗耐旱性[J]. *生态学报*, 2009, 29(6): 3066-3074
- [14] Loch D S, Adkins S W, Heslehurst M R, *et al.* Warm-season (C<sub>4</sub>) Grasses: Seed formation, development, and germination [M]. *Agronomy Society of America*, 2004: 95-143
- [15] Haynes J G, Pill W G, Evans T A. Seed treatments improve the germination and seedling emergence of switchgrass [J]. *HortScience*, 1997, 32(7): 1222-1226
- [16] 谢正苗. 牧草柳枝稷种子破休眠技术的研究[J]. *种子*, 1996, 15(3): 31-33
- [17] 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
- [18] 毛静, 李绍才, 孙海龙, 等. 生态护坡植物种子萌发需水阈值构建与抗旱性研究[J]. *北方园艺*, 2010(5): 83-86
- [19] 莫惠栋. 农业试验统计[M]. 上海: 科学技术出版社, 1984: 442-446
- [20] Scott S J, Jones R A, Williams W A. Review of data analysis methods for seed germination [J]. *Crop Science*, 1984, 24(6): 1192-1199
- [21] Kramer P J. *Water relations of plants* [M]. New York: Academic Press, 1983: 489
- [22] 杨文秀, 杨忠仁, 李红艳, 等. 促进植物种子萌发及解除休眠方法的研究[J]. *内蒙古农业大学学报: 自然科学版*, 2008, 29(2): 221-224
- [23] 王娟, 师尚. 陇东野生紫花苜蓿硬实种子处理方法研究[J]. *草原与草坪*, 2011, 31(2): 41-43
- [24] Sander M A, Reed R L, McLaughlin S B, *et al.* Switchgrass as a sustainable bioenergy [J]. *Bioresource Technology*, 1996, 56(1): 83-93

(责任编辑 李美娟)