

水分胁迫对柳枝稷生长和生物质品质的影响

朱毅^{1,2} 范希峰² 武菊英^{2*} 段留生^{1*} 侯新村²

(1. 中国农业大学 农学与生物技术学院/农业部农作制度重点开放实验室,北京 100193;

2. 北京市农林科学院 北京草业与环境研究发展中心,北京 100097)

摘要 为了明确水分胁迫对挖沙废弃地生境中柳枝稷(*Panicum virgatum* L.)生长和生物质品质的影响,在温室中通过盆栽试验,研究土壤相对含水量(80%、60%和40%)对3个柳枝稷品种(Alamo、Bay Canada、Cave-in-Rock)农艺性状、生理特性和生物质品质的影响。结果表明:随水分胁迫程度增加,柳枝稷株高降低、分蘖减少、生物量下降、根冠比增加;叶片净光合速率、气孔导度、胞间CO₂浓度、蒸腾速率均显著下降;植株生物质中纤维素质量分数显著降低,半纤维素质量分数和热值有降低的趋势,木质素质量分数有升高趋势,但均无显著性差异。3个品种对水分胁迫的响应存在显著差异,其中Alamo综合表现最好,其长势、净光合速率、水分利用效率和干物质积累量最高,Cave-in-Rock次之,Bay Canada最低。

关键词 柳枝稷; 水分胁迫; 边际土地; 生物质

中图分类号 S 216.2

文章编号 1007-4333(2012)02-0059-06

文献标志码 A

Effects of water stress on growth and biomass quality of switchgrass

ZHU Yi^{1,2}, FAN Xi-feng², WU Ju-ying^{2*}, DUAN Liu-sheng^{1*}, HOU Xin-cun²

(1. Key Laboratory of Farming System of Ministry of Agriculture/College of Agronomy and Biotechnology,

China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Beijing Research and Development Center for Grass and Environment,

Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract The effects of water stress (the relative water contents were 80%, 60% and 40% respectively) on growth and biomass quality of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) were studied using three cultivars, namely Alamo, Cave-in-Rock and Bay Canada, in pots with soil from marginal land of sand with gravel in greenhouse. It showed that all the plant height, tiller number and biomass accumulation were decreased with the increase of the intensity of water stress; whereas the root/shoot ratio was increased. The net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration and transpiration rate were lowered significantly under water stress. Water stress reduced significantly the concentrations of cellulose and hemicellulose and the gross caloric values; while increased the lignin concentration. Three cultivars showed different responses to water stress. When concerned growth, net photosynthetic rate, water use efficiency and dry biomass accumulation in this experiment, Alamo was better than Bay Canada and Cave-in-Rock.

Key words switchgrass; water stress; marginal land; biomass

柳枝稷是一类原产北美地区的多年生纤维素类草本能源植物,属禾本科(Gramineae)黍属(*Panicum*)。柳枝稷植株高大,根系发达,适应性

广,抗逆能力强^[1],已被美国能源部列为能源植物研究的模式植物^[2]。近年来我国开始注重柳枝稷作为能源植物的栽培管理措施研究^[3],已通过育苗移栽

收稿日期: 2011-09-14

基金项目: 北京市科技计划(Y06050600000701, Z07000601580708); 北京市农林科学院青年科研基金(QNJJ201019)

第一作者: 朱毅, 博士研究生, E-mail: zydahaoren110@163.com

通讯作者: 段留生, 教授, 主要从事作物生长发育激素调控机理研究, E-mail: duanlsh@cau.edu.cn;

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

等方式实现了其在北京郊区边际土地上的规模化种植^[4]。

我国有各类边际土地约 1 亿 hm^2 ，利用这些边际土地种植抗逆能力较强的能源植物^[3]，是既不与粮争地又获取生物质原料的重要途径。挖沙废弃地和沙化土地是我国北方地区一类典型的边际土地，该类土地上往往存在较严重的干旱胁迫，不利于植物生长。因此，研究水分胁迫对柳枝稷生长的影响，将为实现柳枝稷在该类土地上大面积种植提供依据。左海涛等和徐炳成等分别以北京潮褐土、兰州灰钙土和陕北安塞地区黄绵土为基质的研究表明，水分胁迫显著抑制柳枝稷生长，使其干物质积累下降、株高和分蘖数减少、净光合速率下降、蒸腾速率降低^[5-6]。但以上研究所用基质均为理化性质较好的壤土，且主要研究株高、分蘖和生物量等农艺性状指标，对于挖沙废弃地生境中水分胁迫对柳枝稷生长发育、生理特性和生物质品质的影响尚未见报道。

本研究拟以 3 个柳枝稷栽培品种为材料，研究挖沙废弃地土壤水分胁迫对柳枝稷农艺性状、生理指标及品质特性的影响，以期为柳枝稷在京郊边际土地上推广与应用提供指导。

1 材料及方法

1.1 试验材料

供试柳枝稷 (*Panicum virgatum* L.) 品种为 Alamo、Bay Canada 和 Cave-in-Rock，种子于 2008 年 11 月在北京草业与环境研究发展中心小汤山试验基地采集。栽培基质取自北京市昌平区马池口镇挖沙废弃地，为沙石土的混合物，石块 (粒径 2~60 mm) 与沙土质量比为 1:2。土壤 pH 7.81，有机质质量分数 0.72%，碱解氮、速效磷和速效钾质量分数分别为 10.50、3.95 和 49.50 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计，以土壤相对含水量为主区，3 个柳枝稷品种为副区，重复 4 次。土壤相对含水量设 3 个处理，分别为 80% (充分供水, CK)、60% (中度胁迫)、40% (重度胁迫)。2010 年 6 月开始育苗，待幼苗长至 5 叶期时 (7 月 10 日) 挑选长势一致的苗移植到花盆中 (盆口直径 26 cm，盆底直径 17.5 cm，盆高 31.5 cm)，每盆装基质 4.0 kg。充分供水 15 d，待幼苗全部成活后，开始进行水分胁迫处理，

采用称重法控制土壤相对含水量，每天 17:00 测定，并补水至试验设置的土壤相对含水量。试验期间温室内日平均气温 23.3 °C (最高 31.9 °C，最低 14.6 °C)，相对湿度 52.2% (白天)~93% (夜间)。水分胁迫 60 d 后试验结束，测定农艺性状及各项生理指标。

1.3 测定方法

1.3.1 植株干质量

试验结束后，将整株取出，分为地上和地下 2 部分测定单株生物量，将待测植株冲洗干净，置于 105 °C 鼓风干燥箱中杀青 30 min，然后在 65 °C 烘干至恒重，称量，粉碎过 1 mm 筛待测。

1.3.2 生物质成分

从待测样品中随机抽取一部分，测定灰分、热值、纤维素、半纤维素和木质素质量分数。纤维素、半纤维素、木质素质量分数采用范氏分析法测定^[7]；干重热值用 XPY-1C 型氧弹式热量计测定，灰分质量分数用干灰化法测定^[8]，并计算去灰分热值，换算公式：

去灰分热值 = 干质量热值 / (1 - 灰分质量分数)
去灰分热值能比较正确反映单位有机物中所含的热量，免受灰分质量分数不同的干扰。因而，以 2 种热值求算进行比较^[9]。

1.3.3 生理参数

水分胁迫 60 d 后，采用便携式光合作用系统测定仪 LI-6400 (LI-COR Lincoln, USA) 测定净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率，测定时采用自然光，光合有效辐射为 1 100~1 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、温度设定为 (30±1) °C。水分利用效率采用下式计算：

$$\text{水分利用效率} = \text{净光合速率} / \text{蒸腾速率}$$

1.4 统计分析

试验数据采用 SAS 软件 Duncan's 新复极差法进行方差显著性分析，差异显著水平为 $P=0.05$ ，表 1~3 中数据为 4 次重复的平均值。

2 结果及分析

2.1 土壤相对含水量对柳枝稷苗期形态指标的影响

与充分供水相比，水分胁迫显著抑制柳枝稷的生长，表现为株高降低、分蘖减少、生物量下降、根冠比增加。水分胁迫程度越高，下降的幅度越大，3 个

品种表现趋势一致,但受胁迫程度不同。中度水分胁迫时,与对照相比,Bay Canada 的株高下降幅度最大,为 30.8%,而 Alamo 和 Cave-in-Rock 的下降幅度只有 14.5%和 13.6%;Bay Canada 的生物量下降幅度为 22.8%,而 Alamo 和 Cave-in-Rock 的下降幅度分别为 34.5%和 40.0%。重度水分胁迫

时,Alamo、Cave-in-Rock 和 Bay Canada 的株高下降幅度分别为 24.4%、30.2%和 34.2%,其中 Bay Canada 的下降幅度明显高于 Alamo 和 Cave-in-Rock;Bay Canada 的生物量下降幅度为 43.1%,而 Alamo 和 Cave-in-Rock 的下降幅度分别为 54.5%和 60.1%(表 1)。

表 1 不同土壤相对含水量处理对柳枝稷生长的影响
Table 1 Effects of soil water stress on agronomic traits of switchgrass

品 种	相对含水量/%	株高/cm	分蘖数	地上生物量/g	地下生物量/g	总生物量/g	根冠比
Alamo	80	96.37 a	7.98 a	2.35 a	2.26 a	4.62 a	0.96 b
	60	82.40 b	4.86 b	1.50 b	1.53 b	3.03 b	1.02 b
	40	72.87 c	4.39 b	0.92 c	1.18 c	2.10 c	1.29 a
Bay	80	34.50 a	6.67 a	0.51 a	0.67 a	1.18 a	1.32 a
	60	23.87 b	4.73 b	0.36 b	0.55 b	0.91 b	1.54 a
	40	22.70 b	4.67 b	0.26 c	0.41 c	0.67 c	1.57 a
Cave	80	53.13 a	7.67 a	1.55 a	2.36 a	3.92 a	1.52 a
	60	45.93 b	5.33 b	0.84 b	1.51 b	2.35 b	1.81 a
	40	37.07 c	4.33 c	0.54 c	1.02 c	1.56 c	1.87 a
Alamo		83.88 A	5.74 A	1.59 A	1.66 A	3.25 A	1.09 C
Bay		27.02 C	5.36 A	0.38 C	0.54 B	0.92 B	1.48 B
Cave		45.38 B	5.78 A	0.98 B	1.63 A	2.61 A	1.74 A

注:同一指标每列数据后,不同小写字母表示同一品种不同水分处理间差异显著($P<0.05$),大写字母不同表示不同品种间差异显著($P<0.05$)。下表同。

参加试验的 3 个品种长势存在明显差异,其中 Alamo 最好,Cave-in-Rock 次之,Bay Canada 最差。无论是充分供水还是受到水分胁迫,Alamo 的株高和地上部分生物量均显著高于 Cave-in-Rock 和 Bay Canada;Alamo 的地下部分生物量和总生物量与 Cave-in-Rock 相比无显著性差异,但是二者均显著高于 Bay Canada;三者分蘖无显著性差异。

2.2 土壤相对含水量对柳枝稷苗期光合作用的影响

与充分供水相比,水分胁迫显著抑制柳枝稷的光合生理作用,具体表现为净光合速率下降、气孔导度减小、胞间 CO_2 浓度降低、蒸腾速率下降、水分利用效率升高(表 2)。土壤相对含水量越低,下降的幅度越大,3 个品种表现趋势一致,但受胁迫程度不同。中度水分胁迫时,与对照相比,Bay Canada、

Cave-in-Rock 和 Alamo 的净光合速率下降幅度分别为 13.0%、13.6%和 14.3%;气孔导度下降幅度分别为 12.9%、14.8%和 18.0%;Bay Canada 的胞间 CO_2 浓度下降幅度为 35.3%,而 Alamo 和 Cave-in-Rock 的下降幅度分别为 48.1%和 44.8%;Alamo、Cave-in-Rock 和 Bay Canada 的蒸腾速率下降幅度分别为 31.9%、33.5%和 34.9%;水分利用效率上升幅度分别为 25.8%、29.9%和 33.6%。重度水分胁迫时,Alamo、Cave-in-Rock 和 Bay Canada 的净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率下降幅度范围分别为 44.3%~50.9%、28.1%~31.5%、49.8%~65.2%、68.3%~72.4%,其中 Bay Canada 的胞间 CO_2 浓度下降幅度明显低于 Alamo 和 Cave-in-Rock;3 个品种水分利用效率的上升幅度为 75.6%~83.8%。

表2 不同土壤相对含水量处理对柳枝稷光合、水分利用效率等相关参数的影响

Table 2 Effects of soil water stress on photosynthesis, WUE and other related index of switchgrass

品种	相对含水量/%	净光合速率/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	气孔导度/ ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol}/\text{mL}$)	蒸腾速率/ ($\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	水分利用效率/ ($\mu\text{mol}/\text{mmol}$)
Alamo	80	14.86 a	228.07 a	181.03 a	3.15 a	4.72 c
	60	12.74 b	194.38 b	94.01 b	2.15 b	5.94 b
	40	8.28 c	163.21 c	71.32 c	1.00 c	8.29 a
Bay	80	11.09 a	170.33 a	135.31 a	2.61 a	4.26 c
	60	9.65 b	148.34 b	87.32 b	1.70 b	5.69 b
	40	5.63 c	122.54 c	68.10 c	0.72 c	7.83 a
Cave	80	12.50 a	191.85 a	152.28 a	2.75 a	4.55 c
	60	10.80 b	157.34 b	84.04 b	1.84 b	5.91 b
	40	6.14 c	131.47 c	53.12 c	0.76 c	8.07 a
Alamo		11.96 A	195.22 A	115.42 A	2.10 A	6.32 A
Bay		8.79 A	147.07 B	96.87 A	1.68 A	5.93 A
Cave		9.81 A	160.22 B	96.53 A	1.78 A	6.18 A

除了 Alamo 的气孔导度显著高于 Cave-in-Rock 和 Bay Canada 外,3 个品种的光合性能无显著性差异。

2.3 土壤相对含水量对柳枝稷苗期生物质组分及热值的影响

与充分供水(土壤相对含水量 80%,CK)相比,

中度水分胁迫对柳枝稷的纤维素类物质质量分数、灰分质量分数及热值等品质指标的影响并不显著,3 个品种表现趋势一致(表 3);除 Bay Canada 的热值外,重度水分胁迫对柳枝稷的纤维素质量分数、热值及去灰分热值有显著性抑制作用,3 个品种表现趋势一致,但胁迫程度不同。重度水分胁迫时,Alamo

表3 不同土壤相对含水量处理对柳枝稷生物质组分及热值的影响

Table 3 Effects of soil water stress on biomass component, GCV and AFCV of switchgrass

品种	相对含水量/%	ω (纤维素)/%	ω (半纤维素)/%	ω (木质素)/%	热值/ (MJ/kg)	ω (灰分)/%	去灰分热值/ (MJ/kg)
Alamo	80	36.23 a	21.14 a	5.56 a	22.39 a	1.34 a	22.69 a
	60	35.69 a	20.59 a	5.74 a	21.34 a	1.31 a	21.62 a
	40	31.24 b	20.15 a	5.85 a	18.91 b	1.42 a	19.18 b
Bay	80	33.13 a	20.62 a	5.04 a	20.47 a	0.96 a	20.67 a
	60	33.01 a	19.83 a	5.18 a	20.35 a	0.90 a	20.53 a
	40	28.66 b	19.17 a	5.25 a	17.37 a	0.94 a	17.53 b
Cave	80	33.88 a	21.32 a	5.74 a	22.32 a	1.27 a	22.61 a
	60	32.50 a	19.83 a	5.95 a	21.34 a	1.16 a	21.59 a
	40	29.10 b	18.94 a	6.18 a	17.65 b	1.18 a	17.86 b
Alamo		34.42 A	20.63 A	5.72 B	20.88 A	1.36 A	21.17 A
Bay		31.60 B	19.87 A	5.16 C	19.40 A	0.93 C	19.58 A
Cave		31.89 B	20.03 A	5.96 A	20.44 A	1.20 B	20.69 A

和 Cave-in-Rock 的热值下降幅度分别为 15.5% 和 20.9%；Bay Canada、Alamo 和 Cave-in-Rock 的去灰分热值下降幅度分别为 15.2%、15.5% 和 21.0%，其中 Cave-in-Rock 的下降幅度明显高于 Bay Canada。随着水分胁迫程度的升高，3 个品种的木质素质量分数均呈上升趋势。

3 个品种的纤维素、木质素和灰分质量分数均存在显著性差异，表现为 Alamo 的纤维素和灰分质量分数显著高于 Cave-in-Rock 和 Bay Canada；Cave-in-Rock 的木质素质量分数显著高于 Alamo 和 Bay Canada，且 Alamo 显著高于 Bay Canada。

3 讨论

3.1 水分胁迫对柳枝稷生长和生理特性的影响

北方干旱半干旱地区降雨较少，在该地区的沙化地上种植柳枝稷，各生育阶段都有可能受到严重的水分胁迫。大量研究结果表明，水分胁迫严重影响植物的生长发育，土壤水分胁迫使玉米^[10]的株高降低，柳枝稷^[6]的分蘖显著减少，使沙漠蕨^[11]的干物质积累降低，影响柳枝稷^[12]地上地下部分的生长及分配，使蒙古莠^[13]的根冠比增大。本试验结果表明，水分胁迫显著抑制沙石基质中柳枝稷的生长，使其株高降低，分蘖数减少，总生物量显著下降，根冠比增加。

光合作用是分析环境影响植物生长和代谢的重要环节。在严重水分胁迫下，植物的净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率均受到严重抑制或完全抑制。本试验中，水分胁迫条件下柳枝稷的净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率均显著下降，且变化幅度与水分胁迫程度成正相关，这与徐炳成等^[5,14-15]的研究结果一致，但 Byrd 等认为柳枝稷蒸腾效率受土壤水分条件变化的影响较小^[16]，与本研究结果不同。逆境限制植物光合作用的因素有 2 种，一是气孔因素，由于气孔导度下降导致 CO₂ 进入叶片受阻，表现为净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率均随着水分胁迫程度的增加而趋于降低^[17]；二是非气孔因素，由于光合机构受损，电子传递速率下降，光合磷酸化解偶联，影响同化力的形成^[18]，表现为随着水分胁迫程度的增加，净光合速率、气孔导度、蒸腾速率显著降低，胞间 CO₂ 浓度升高^[19]。本试验结果表明，柳枝稷的净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率均随着水分胁迫程度的增加而显著下降，说明柳

枝稷光合速率的下降主要是由干旱诱导的气孔因素引起的。

水分利用效率是评价水分胁迫影响植物生长的重要指标，随着水分胁迫程度的增加而趋于增大，水分胁迫下植物水分利用效率越大表明其抗旱能力越强^[20]。本试验中，在任何水分胁迫条件下，Alamo 的水分利用效率总是高于 Cave-in-Rock 和 Bay Canada，说明 3 个品种中，Alamo 的抗旱能力最强。

3.2 水分胁迫对生物质品质的影响

柳枝稷生物质的主要成分为纤维素、半纤维素和木质素。由于纤维素和半纤维素经过水解和发酵可转化为乙醇，而木质素不能被水解为单糖，且会在纤维素周围形成保护层，影响纤维素水解^[3,21]，因此在纤维素乙醇制备过程中，纤维素、半纤维素质量分数越高，木质素质量分数越低，乙醇产率越高。水分胁迫能破坏细胞壁完整性，导致纤维素与半纤维素质量分数下降^[22]，使玉米自交系叶片的木质素质量分数呈上升趋势^[23]。本试验中，随着水分胁迫程度增加，柳枝稷纤维素、半纤维素质量分数均逐步降低，而木质素质量分数逐步上升，对乙醇发酵生产产生不利影响。

植物热值是指植物在一定温度条件下干物质完全燃烧时所释放的能量^[24]。植物热值反映了植物对太阳辐射能的利用，是衡量植物燃烧性能的一种度量^[25]，也是评价能源植物利用价值的重要指标。热值越高，植物的燃烧性能就越好。本试验中，水分胁迫未对热值及去灰分热值产生明显的抑制作用，但 Alamo 具有显著的产量优势，决定其去灰分热值的绝对值明显高于 Cave-in-Rock 和 Bay Canada，更适宜于燃烧。

灰分是植物体内矿物质经高温分解和氧化形成的固体残渣，灰分质量分数的高低可以反映植物对矿物质选择吸收与积累的特点。灰分质量分数高，将减少燃料的热值，降低燃烧温度^[26]。本试验结果表明，水分胁迫并未显著抑制柳枝稷的灰分质量分数。

3.3 不同基因型对水分胁迫的反应

研究表明，在同样水分胁迫条件下，同种植物的不同基因型其生理特性受到不同程度的影响，其生理生化指标变化趋势也不同^[27-28]。本试验结果表明，水分胁迫下柳枝稷的农艺形状、生理及品质指标均受到抑制，但不同柳枝稷品种之间存在差异，且不同品种的相关指标随水分胁迫强度的变化也不同。

Alamo 的农艺形状和光合能力均明显优于 Cave-in-Rock 和 Bay Canada, 说明 Alamo 具有较强的抗旱能力。Elbersen 等研究表明^[29], 决定柳枝稷品种适应性与产量的主要因素是品种的起源, 所以应选择起源地与种植地域相近的品种, 这样更容易发挥品种的适应性和产量潜力。但 3 个品种在不同类型边际土地上的具体适应能力和实际生长状况还有待进一步研究。

4 结 论

水分胁迫会显著影响柳枝稷的形态、生理及品质指标, 使其干物质积累下降、光和性能减弱、品质降低。不同品种的柳枝稷对干旱的耐受能力不同, 但 Alamo、Cave-in-Rock 和 Bay Canada 3 个品种均可以在重度胁迫下生长, 并保持较高的光合能力, 能获得一定的生物质产量, 说明柳枝稷适宜作为优良的草本能源植物在京郊乃至中国北方的干旱型边际土地上进行应用。本试验所研究的 3 个品种, 干旱胁迫下, Alamo 在生物量及品质特性上显著优于 Bay Canada 和 Cave-in-Rock, 说明 Alamo 在挖沙废弃地生境中更具优势。

参 考 文 献

[1] John C, Paul F, Michael B. Miscanthus biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emissions[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10:509-518

[2] 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

[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

[4] 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

[5] 徐炳成, 山仑, 黄瑾, 等. 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

[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*, 17(6):760-766

[7] 冯继华, 曾静芬, 陈茂椿. 应用 Van Soest 法和常规法测定纤维素及木质素的比较[J]. *西南民族学院学报:自然科学版*, 1994, 20(1):55-56

[8] 林益明, 林鹏, 王通. 几种红树植物木材热值和灰分含量的研究

[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(2):181-184

[9] 林益明, 黎中宝, 陈奕源. 福建建安竹园一些竹类植物叶的热值研究[J]. *植物学通报*, 2001, 18(3):356-362

[10] 郑盛华, 严昌荣. 水分胁迫对玉米苗期生理和形态特性的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(4):1138-1143

[11] 尉秋实, 赵明, 李昌龙, 等. 不同土壤水分胁迫下沙漠藜的生长及生物量的分配特征[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(1):7-12

[12] 徐炳成, 山仑, 黄占斌, 等. 沙打旺与柳枝稷单、混播种苗期水分利用和根冠生长的比较[J]. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(5):577-580

[13] 谢乾瑾, 夏新莉, 刘超, 等. 水分胁迫对不同种源蒙古莜光合特性与生长的影响[J]. *林业科学研究*, 2010, 23(4):567-573

[14] 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

[15] 徐炳成, 山仑, 黄占斌, 等. 黄土丘陵区柳枝稷与白羊草光合生理生态特征的比较[J]. *中国草地*, 2003, 25(1):1-4

[16] Byrd G T, May II P A. Physiological comparisons of switchgrass cultivars differing in transpiration efficiency[J]. *Crop Science*, 2000, 40:1271-1277

[17] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and Photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33:317-345

[18] 武维华. 植物生理学[M]. 北京: 科教育出版社, 2006:173-174

[19] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002:32-34

[20] 刘海燕, 李吉越, 赵燕, 等. 干旱胁迫对 5 个种源沙柳气体交换及水分利用效率的影响[J]. *干旱区研究*, 2007, 24(6):815-820

[21] Nigan I N. Ethanol production from wheat straw hemicellulose hydrolysate by *Pichia stipitis*[J]. *Journal of Biotechnology*, 2001, 87(1):17-27

[22] 裴惠娟, 张满效, 安黎哲. 非生物胁迫下植物细胞壁组分变化[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(6):1279-1286

[23] 徐宇强, 胡轶, 付凤玲, 等. 干旱胁迫下玉米自交系叶片木质素含量变化及其与耐旱性的关系[J]. *玉米科学*, 2007, 15(5):72-75

[24] 杨成源, 张加研, 李文政, 等. 滇中高原及于热河谷薪材树种热值研究[J]. *西南林学院院报*, 1996, 16(4):294-302

[25] 鲍雅静, 李政海, 韩兴国, 等. 植物热值及其生物生态学属性[J]. *生态学报*, 2006, 25(9):1095-1103

[26] 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

[27] 赵金梅, 周禾, 王秀艳. 水分胁迫下苜蓿品种抗旱生理生化指标变化及其相互关系[J]. *草地学报*, 2005, 13(3):184-189

[28] 胡兴波, 王敏建, 王学智, 等. 不同玉米品种萌芽期及苗期抗旱性初步研究[J]. *玉米科学*, 2004, 12(3):66-67, 70

[29] Elbersen H W, Christan D G, El-Bassem I, et al. Switchgrass variety choice in Europe[J]. *Aspects Applied Biology*, 2001, 65:21-28