

网络出版时间:2014-03-26 17:09

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.04.019

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.04.019.html>

水与氮肥耦合对柳枝稷产量及品质的影响

杜金鸿, 哈依夏·叶尔赛依提, 刘 源, 李雁博, 陈 果, 王仝珍

(西北农林科技大学 动物科学学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] **【目的】**研究水与氮肥耦合对柳枝稷产量及品质的影响, 探求水肥调控机理, 为建立柳枝稷稳产管理体系提供科学依据。**【方法】**以施氮量和土壤含水量为考察因子, 采用 2 因子 5 水平通用旋转正交组合设计, 测定各处理下柳枝稷产量及纤维素、半纤维素、木质素和可溶性糖含量, 构建柳枝稷产量与 2 个因子间的回归方程, 并通过方差分析研究水与氮肥耦合对柳枝稷产量及品质的影响。**【结果】**水与氮肥耦合对柳枝稷产量和品质均产生了不同程度的影响。对产量而言, 水与氮肥之间存在明显的协同效应, 对产量有显著的影响($P < 0.05$)。土壤含水量由 8% 提高到 32% 时, 产量达最大值所需氮肥量由 1.174 g/盆增加到 2.764 g/盆。在土壤含水量为 20% 或施氮量为 1.152 g/盆时, 产量趋于稳定。对柳枝稷品质而言, 纤维素含量与木质素含量均随着土壤含水量增大呈下降趋势; 随着施氮量的增加, 木质素含量不断降低, 施氮量为 2.232 g/盆时, 柳枝稷木质素含量最低为 36.957 mg/g, 仅为 0.072 g/盆施氮量的 2/3。半纤维素含量在不同水与氮肥处理下差异不显著($P > 0.05$), 纤维素、木质素和可溶性糖含量均受到施氮量和土壤含水量的显著影响($P < 0.05$), 但是两者的交互作用只对木质素含量影响显著($P < 0.05$)。**【结论】**水与氮肥对柳枝稷产量存在明显的协同效应, 其木质素含量随着氮肥和土壤含水量的增加呈下降趋势, 故提高氮肥施用量和土壤含水量对柳枝稷作为能源作物生产较为有利。

[关键词] 柳枝稷; 水与氮肥耦合; 产量; 品质

[中图分类号] S543

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2014)04-0075-06

Effects of water and nitrogen fertilizer coupling on biomass yield and quality of switchgrass

DU Jin-hong, HAYIXIA · Ye-er-sai-yi-ti, LIU Yuan, LI Yan-bo,
CHEN Guo, WANG Quan-zhen

(College of Animal Science and Technology, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】**The experiment studied effects of water and nitrogen fertilizer coupling on biomass yields and quality of switchgrass and explore the regulation mechanism of water and nitrogen fertilizer treatments, so as to establish proper management system for switchgrass production. **【Method】**The experiment were designed to incorporate nitrogen and soil water content at five levels using general rotary orthogonal combination design matrix. Yield and quality indexes including contents of cellulose, hemicellulose, and lignin and soluble sugar were measured. Then regression models between switchgrass yield and the two factors and variance analysis were conducted to test the effects of water and nitrogen fertilizer coupling on switchgrass. **【Result】**Effects of water and fertilizer interaction on switchgrass yield and quality were observed. The interaction of water and nitrogen fertilizer has significant synergistic effect on switch-

[收稿日期] 2013-04-09

[基金项目] 国际科技合作项目“牧草植物生物能开发的实施挑战和报酬评估”(2009BADA7B04); 科技部“973”子项目“耐盐碱能源草筛选与新品种选育”(2009BADA7B04)

[作者简介] 杜金鸿(1989—), 女, 山东聊城人, 在读硕士, 主要从事牧草种质资源开发研究。E-mail: dudu167cn@sina.com

[通信作者] 王仝珍(1963—), 男, 内蒙古卓资人, 副教授, 博士生导师, 主要从事牧草繁育栽培、种质资源评定及天然产物提取研究。E-mail: wangquanzhen191@163.com

grass yield($P<0.05$). When soil water content increased from 8% to 32%, the amount of nitrogen applied leading to the maximum yield increased from 1.174 g/pot to 2.764 g/pot. When the soil water content increased to 20% and nitrogen application raised to 1.152 g/pot, the yield stabilized. The contents of cellulose and lignin decreased with the increase of soil moisture content. With the increase of nitrogen, the lignin content declined with the lowest content of 36.957 mg/g when nitrogen content was 2.232 g/pot, which was 2/3 of the lignin content when nitrogen content was 0.072 g/pot. Hemicellulose content was not significantly changed under different treatments ($P>0.05$) while contents of cellulose, lignin and soluble sugar were significantly affected by nitrogen and soil water content ($P<0.05$). However, the interaction of nitrogen and soil water only affected the lignin content significantly ($P<0.05$). 【Conclusion】 Water and nitrogen had significant synergistic effects on switchgrass yield. Increase of nitrogen and soil water content decreased the content of lignin. Thus, increasing nitrogen fertilizer and soil water content was beneficial to the production of switchgrass for energy purpose.

Key words: switchgrass; water and nitrogen fertilizer coupling; yield; quality

随着经济的发展,人类对能源的需求不断增加,而石油资源十分有限,因此能源形势在当今社会变得十分严峻;同时,化石能源的大量使用导致了大气污染、全球气候变暖等一系列环境问题。这都促进全球,特别是发达国家对生物能源的高度重视和深入研究。

柳枝稷(*Panicum virgatum* L.)属于禾本科(Poaceae)黍属(*Panicum* Linn.)植物,起源于北美洛基山脉以东、北纬 55°以南的大草原,为高秆多年生草本 C4 植物。其与披碱草(*Sorghastrum nutans* (L.)Nash)和大须芒草(*Andropogon gerardii* Vitman)组成了北美大草原的三大主要牧草。很长时间以来,柳枝稷一直被作为一种牧草来种植和管理。但在美国能源部 1978 年启动的生物质能原料发展计划项目进展中发现,多年生的纤维素类草本植物是最有潜力的能源植物,柳枝稷因其适应性强、产量大、水氮利用效率高被列为重点的能源植物研究对象^[1-2];1992 年,在生物质能原料发展计划项目中,美国南部的 5 个洲又启动了 6 个专项课题,继续对柳枝稷在能源方面的利用进行研究^[3-5]。

氮肥和水分是限制植物生长的 2 个主要因素。由于柳枝稷根部的真菌能帮助其吸收土壤中的磷和钾,因此氮肥成为制约柳枝稷产量的主要限制因素^[6-8]。能源草对土地利用要求较低,具有较强的环境抗逆性,可利用边际和荒弃土地种植,不与农田争地。而我国边缘性土地荒漠化严重,水分为这些地区植物生长的最主要限制因素^[9-11]。理想的生物能源作物生物量高,水、氮、灰分、木质素含量少,纤维素和半纤维素含量高^[12],目前有关水氮肥耦合对柳

枝稷生长及品质影响的研究报道^[13-14]很少。本试验采用通用旋转正交试验设计,分析研究水与氮肥耦合效应对柳枝稷产量及品质的影响,探求水肥调控机理,为建立能源草柳枝稷稳产管理体系提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料及处理

盆栽试验于 2011-05-07 在西北农林科技大学农一试验站全自动草业科学温室(34°28'N, 108°07'E)内进行,花盆为圆柱形塑料花盆(直径 25 cm,盆高 15 cm)。所用盆土采自西北农林科技大学农一试验站大田,为黏性土,其理化性质为:土壤含水量 10.78%,有机质含量 18.37 g/kg,全碳 10.65 g/kg,全氮 97.3 mg/kg,有效氮 57 mg/kg,有效磷 7.80 mg/kg,有效钾 238.93 mg/kg。每盆装风干土 3 kg,所用土壤均过 2 mm 筛。试验材料为根茎繁殖的营养期柳枝稷,将柳枝稷芽栽在花盆中,置于温室外,平均昼夜温度为 28/20 ℃。2 周后,选择生长一致的柳枝稷移植到新的花盆中备用。

1.2 试验设计

试验采用 2 因子 5 水平通用旋转正交组合设计方案,共 22 个处理,每处理 3 个重复。以施氮量(X_1)和土壤含水量(X_2)作为试验因素,各设 5 个水平,具体方案见表 1。以相同处理但不种植作物的空白盆为对照,用于确定棵间蒸发量,土壤水分用称重法监测和调控,氮肥一次性基施。2011-05-20 定植后,用称重法控制土壤水分,试验期不接受自然灌水。处理 8 周后,刈割,测定其产量和品质指标。

表 1 水与氮肥耦合对柳枝稷产量及品质影响的 L₂₂(2)⁵ 正交试验设计方案

Table 1 L₂₂(2)⁵ orthogonal experiment design for investigation on effects of soil water content and nitrogen fertilizer coupling on yield and quality of switchgrass

设计水平 Design Level	因素 Factor	
	施氮量/(g·盆 ⁻¹) Nitrogen fertilizer	土壤含水量/% Soil water content
	X ₁	X ₂
3	2.232	32
1	1.512	24
0	1.152	20
-1	0.792	16
-3	0.072	8
变化间距 Distance	0.360	4

1.3 测定指标及方法

将刈割样品放入 105 ℃烘箱中烘 3 h,冷却后称取质量,然后将样品粉碎,过 0.45 mm 筛,每个分析样 3 次重复。

表 2 水与氮肥单因素对柳枝稷产量的影响

Table 2 Effects of soil water content or nitrogen fertilizer on switchgrass yield

施氮量/(g·盆 ⁻¹) Nitrogen fertilizer	产量/(g·盆 ⁻¹) Yield	土壤含水量/% Soil water content	产量/(g·盆 ⁻¹) Yield
0.072	12.442±2.63 a	8	6.117±0.51 a
0.792	20.542±5.38 ab	16	19.983±2.25 b
1.152	28.758±2.11 b	20	28.758±2.11 c
1.512	27.417±7.75 b	24	29.900±5.09 c
2.232	26.908±2.50 b	32	31.308±6.64 c

注:表中同列数据后标不同字母代表差异显著($P<0.05$),标相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。下表同。
Note:Different lowercase letters in each column mean significant difference ($P<0.05$),while same lowercase letters mean insignificant difference ($P>0.05$). The same below.

由表 3 可知,施氮量、土壤含水量及两者交互作用的相伴概率均小于 0.05,说明施氮量、土壤含水量及两者交互作用对柳枝稷的产量均有显著影响($P<0.05$)。

表 3 水与氮肥耦合对柳枝稷产量影响的方差分析

Table 3 Variance analysis on effects of soil water content and nitrogen fertilizer on switchgrass yield

因素 Factors	Ⅲ型离差平方和 Type Ⅲ sum of squares	df	均方差 Mean square	F 值 F value	相伴概率 Sig.
施氮量 X ₁ Nitrogen fertilizer	3 284.087	3	1 094.696	24.479	0.000
土壤含水量 X ₂ Soil water content	6 149.377	3	2 049.792	45.837	0.000
交互作用 X ₁ ·X ₂ Interaction effect	2 120.840	9	235.649	5.270	0.000
误差 Error	1 922.921	43	44.719		
总和 Total	52 452.166	60			

由图 1A 可见,当土壤含水量为 8%时,柳枝稷产量随施氮量增加变化幅度最小,表明存在水分胁迫时氮肥的增产效果不明显;当施氮量超过 1.152 g/盆时,各处理产量趋于平稳。图 1B 显示,土壤含水量超过 24%时,各处理柳枝稷的产量趋于平稳甚至下降;施氮量为 1.512 g/盆处理的产量与 2.232 g/盆处理差异不明显。

2.2 柳枝稷产量模型的建立与检验

2.2.1 产量模型的建立 根据二次通用旋转组合

可溶性糖含量采用蒽酮显色法^[15]测定。
纤维素、半纤维素和木质素含量采用范氏洗涤纤维分析法^[16]测定。

1.4 数据分析

用 SPSS 17.0 对数据进行方差分析,并用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 水与氮肥耦合对柳枝稷产量的影响

表 2 显示,在不同土壤含水量下,柳枝稷产量呈现先增后减的变化趋势,且在土壤含水量为 20%时达最大值,但与土壤含水量为 24%和 32%处理差异不显著($P>0.05$);随着施氮量的增加,柳枝稷产量不断增加,但施氮量大于 1.152 g/盆后,产量增加不显著($P>0.05$)。

设计原理^[17],以柳枝稷产量作为目标函数因变量,采用 SPSS17.0 软件进行回归分析,得到柳枝稷产量与土壤含水量和施氮量的数学回归模型为:

$$Y=28.622+2.514x_1+4.275x_2+0.816x_1x_2-0.554x_1^2-0.795x_2^2。(1)$$

式中: x_1 和 x_2 分别代表施氮量和土壤含水量 2 个因素的编码水平。经检验,模型模拟项的 $F=51.370,R^2=0.941$,达极显著水平,表明在试验范围内模型模拟值与实测值吻合较好。

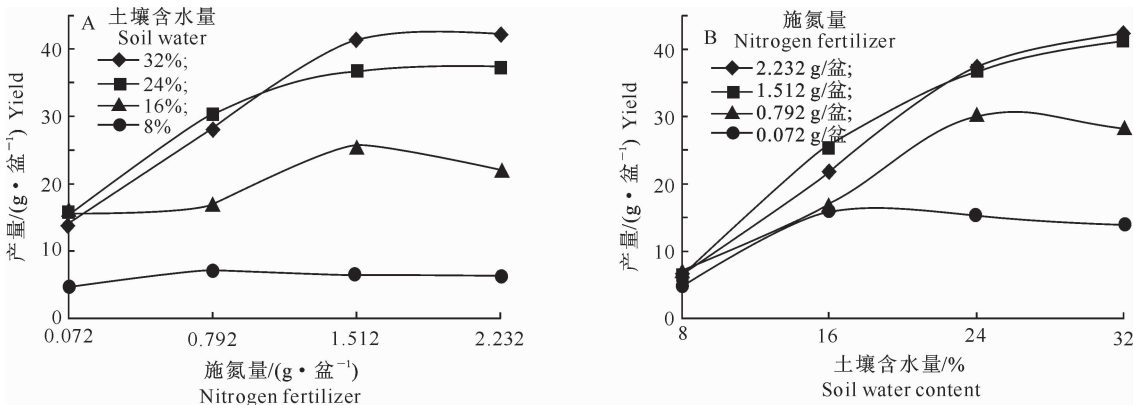


图 1 水与氮肥耦合对柳枝稷产量的影响

Fig. 1 Effects of soil water content and nitrogen fertilizer coupling on switchgrass yield

2.2.2 水与氮肥耦合对柳枝稷产量的效应 从式(1)的系数可以看出,水与氮肥的一次项系数均为正值,表示在试验设计范围内水与氮肥对柳枝稷产量的作用为正效应;二次项系数均为负,表示水与氮肥的增加呈报酬递减,即当水与氮肥量超过临界值时产量趋于平稳并稍微下降。

对式(1)进行降阶处理,可分别得氮肥产量效应方程(2)和土壤含水量产量效应方程(3):

$$Y_1 = \partial Y / \partial x_1 = 2.514 + 0.816x_2 - 1.108x_1. \quad (2)$$

$$Y_2 = \partial Y / \partial x_2 = 4.275 + 0.816x_1 - 1.59x_2. \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可求得,当土壤含水量为8%时,产量在施氮量为1.174 g/盆达最大值;但是当土壤含水量增加到32%时,产量在施氮量提高到2.764 g/盆时达最大值,表明土壤含水量的增加能促进氮肥的增产效力;同样施氮量的提高也能增强

水分的增产效果。说明水与氮肥对柳枝稷产量存在明显的协同效应,即一个因子水平的升降,直接影响另一因子增产力的升降。

2.3 水与氮肥对柳枝稷品质的影响

2.3.1 施氮量对柳枝稷品质的影响 由表4可知,施氮量对柳枝稷品质有一定程度的影响。柳枝稷纤维素含量在施氮量为2.232 g/盆时为264.321 mg/g,显著高于0.072 g/盆处理($P < 0.05$);半纤维素含量在各处理间差异不显著($P > 0.05$),其含量在施氮量为2.232 g/盆时达最大值302.706 mg/g;木质素含量随着施氮量的增加不断降低,施氮量为2.232 g/盆时最低为36.957 mg/g,仅为0.072 g/盆施氮量的2/3;可溶性糖含量随着施氮量的增加呈增加趋势。

表 4 施氮量对柳枝稷品质的影响

Table 4 Effects of nitrogen fertilizer on switchgrass quality

施氮量/ (g·盆 ⁻¹) Nitrogen fertilizer	纤维素含量/ (mg·g ⁻¹) Cellulose content	半纤维素含量/ (mg·g ⁻¹) Hemicellulose content	木质素含量/ (mg·g ⁻¹) Lignin content	可溶性糖含量/ (mg·g ⁻¹) Soluble sugar content
0.072	244.733±1.07 a	278.032±1.44 a	54.712±0.18 a	3.250±0.47 a
0.792	264.152±1.06 b	272.137±0.71 a	41.053±0.28 b	4.023±0.56 b
1.152	252.749±0.34 ab	299.848±2.00 a	41.771±0.28 b	4.426±0.17 bc
1.512	254.621±0.55 ab	275.708±0.49 a	39.901±0.43 b	4.438±0.44 bc
2.232	264.321±0.30 b	302.706±1.88 a	36.957±0.40 b	4.899±0.42 c

2.3.2 土壤含水量对柳枝稷品质的影响 由表5可以看出,柳枝稷纤维素含量和木质素含量随土壤含水量的减少呈上升趋势,均在土壤含水量为8%时达最大值,显著高于土壤含水量32%处理($P < 0.05$);半纤维素含量在不同水分处理间差异不显著,在土壤含水量为8%时(即存在严重的水分胁迫时),其值最高为310.499 mg/g;可溶性糖含量总体呈下降趋势,且在土壤含水量为32%时达最小值。

2.3.3 水与氮肥耦合对柳枝稷品质的影响 由表6可知,对半纤维素含量而言,施氮量、土壤含水量及两者的交互作用的相伴概率均大于0.05,说明其对柳枝稷半纤维素含量均无显著的影响($P > 0.05$);施氮量和土壤含水量对纤维素、木质素和可溶性糖含量的相伴概率均小于0.05,表明两者均能显著影响柳枝稷的这3种品质指标($P < 0.05$)。值得注意的是,两者的交互作用只对木质素含量有显

著影响($P<0.05$)。

表 5 土壤含水量对柳枝稷品质的影响

Table 5 Effects of soil water content on switchgrass quality

土壤含水量/% Soil water content	纤维素含量/ (mg·g ⁻¹) Cellulose content	半纤维素含量/ (mg·g ⁻¹) Hemicellulose content	木质素含量/ (mg·g ⁻¹) Lignin content	可溶性糖含量/ (mg·g ⁻¹) Soluble sugar content
8	274.687±0.41 a	310.499±1.72 a	49.651±0.28 a	5.488±0.31 a
16	255.251±0.89 b	263.491±0.79 a	45.354±0.39 ab	3.720±0.51 c
20	252.745±0.34 b	299.851±1.99 a	41.767±0.28 ab	4.426±0.17 b
24	250.754±0.69 b	274.287±0.80 a	42.331±0.47 ab	3.926±0.33 bc
32	247.132±0.76 b	280.313±0.17 a	35.303±0.52 b	3.476±0.31 c

表 6 水与氮肥耦合对柳枝稷品质影响的方差分析

Table 6 Variance analysis on effects of soil water content and nitrogen fertilizer on switchgrass quality

因素 Factors	因变量 Dependent variable	Ⅲ型离差平方和 Type Ⅲ sum of squares	<i>df</i>	均方差 Mean square	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	相伴概率 Sig.
施氮量 X_1 Nitrogen fertilizer	纤维素含量 Cellulose content	30.410	3	10.137	3.568	0.022
	半纤维素含量 Hemicellulose content	39.570	3	13.190	0.355	0.786
	木质素含量 Lignin content	18.812	3	6.271	3.867	0.016
	可溶性糖含量 Soluble sugar content	24.067	3	8.022	22.772	0.000
土壤含水量 X_2 Soil water content	纤维素含量 Cellulose content	19.214	3	6.405	2.254	0.046
	半纤维素含量 Hemicellulose content	172.908	3	57.636	1.550	0.215
	木质素含量 Lignin content	17.864	3	5.955	3.672	0.019
	可溶性糖含量 Soluble sugar content	31.857	3	10.619	30.142	0.000
交互作用 $X_1 \cdot X_2$ Interaction effect	纤维素含量 Cellulose content	48.442	9	5.382	1.895	0.079
	半纤维素含量 Hemicellulose content	350.792	9	38.977	1.048	0.419
	木质素含量 Lignin content	12.576	9	1.397	2.582	0.018
	可溶性糖含量 Soluble sugar content	4.531	9	0.503	1.429	0.206
误差 Error	纤维素含量 Cellulose content	122.160	43	2.841		
	半纤维素含量 Hemicellulose content	1 598.513	43	37.175		
	木质素含量 Lignin content	23.274	43	0.541		
	可溶性糖含量 Soluble sugar content	1.694	43	0.039		

3 结论与讨论

1)水与氮肥耦合对柳枝稷产量和品质均产生了不同程度的影响。土壤含水量由 8% 提高到 32% 时,产量达到最大值需施用的氮肥量由 1.174 g/盆提高到 2.764 g/盆,表明土壤含水量的增加能促进氮肥的增产效力;同样随施氮量提高,水分增产效应也逐渐增大。表明水与氮肥之间存在明显的协同效应。

2)柳枝稷纤维素含量受到施氮量和土壤含水量的显著影响($P<0.05$),但是两者的交互作用对其影响并不显著($P>0.05$);单因素分析结果表明,其随着氮肥的增加而增大,随着土壤含水量的增加而减少。说明在高氮肥处理下,柳枝稷长势好,纤维素含量有所增加。这与有关牧草的研究结果^[18]不同,但 Lemus 等^[19]同样发现,随着氮肥的增加,柳枝稷纤维素含量有所增加。柳枝稷半纤维素含量受水肥的影响不大,施氮量、土壤含水量及两者的交互作用对其影响均不显著($P>0.05$)。

3)由于木质素会妨碍细胞壁的降解,因此对于能源作物而言,木质素含量越少越好。本试验结果表明,水与氮肥耦合对柳枝稷木质素含量有显著影响($P<0.05$)。单因素分析结果显示,木质素含量随着氮肥和土壤含水量的增加均呈下降趋势,这与前人的研究结果^[20-21]一致。说明提高氮肥施用量和土壤含水量有利于用作能源的柳枝稷的生长。

4)本试验表明,柳枝稷可溶性糖含量随着氮肥的增加而增大,这说明在高氮水平下,柳枝稷的长势更好,因为可溶性糖是合成细胞壁的必需成分^[22]。但是可溶性糖含量随着土壤含水量的增加而减少,这是因为在水分胁迫条件下,可溶性糖能够增加细胞渗透压,对柳枝稷逆境生长有利^[23-24]。

[参考文献]

[1] Jason H,Erik N,David T,et al. Environmental,economic,and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2006, 103:11206-11210.
[2] Keshwani D R,Cheng J J. Switchgrass for bioethanol and other

- value-added applications; A review [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(4): 1515-1523.
- [3] Wullschlegel S D, Davis E B, Borsuk M E, et al. Biomass production in switchgrass across the United States; Database description and determinants of yield [J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(4): 1158-1168.
- [4] Wright L, Turhollow A. Switchgrass selection as a “model” bioenergy crop: A history of the process [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34(6): 851-868.
- [5] David K, Ragauskas A J. Switchgrass as an energy crop for biofuel production: A review of its lignin-cellulosic chemical properties [J]. *Energy & Environmental Science*, 2010, 3(9): 1182-1190.
- [6] Guretzky J A, Biermacher J T, Cook B J, et al. Switchgrass for forage and bioenergy; Harvest and nitrogen rate effects on biomass yield and nutrient composition [J]. *Plant and Soil*, 2011, 339(1/2): 69-81.
- [7] Thomason W E, Raun W R, Johnson G V, et al. Switchgrass response to harvest frequency and time and rate of applied nitrogen [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, 27: 1199-1226.
- [8] Owens V N, Viands D R, Mayton H S, et al. Nitrogen use in switchgrass grown for bioenergy across the USA [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 58: 286-293.
- [9] Ma Y, An Y, Shui J, et al. Adaptability evaluation of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) cultivars on the Loess Plateau of China [J]. *Plant Science*, 2011, 181(6): 638-643.
- [10] Guo R, Lin Z, Mo X, et al. Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1185-1194.
- [11] 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.
Hou X C, Fan X F, Wu J Y, et al. Cellulose energy grass planting and management techniques in Beijing suburbs marginal land [J]. *Crop Journal*, 2011(4): 98-101. (in Chinese)
- [12] Hendrickson J R, Schmer M R, Sanderson M A. Water use efficiency by switchgrass compared to a native grass or a native grass alfalfa mixture [J]. *Bioenergy Research*, 2013, 6(2): 746-754.
- [13] Pasangulapati V, Kumar A, Jones C L, et al. Characterization of switchgrass, cellulose, hemicellulose and lignin for thermochemical conversions [J]. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2012, 6(3): 249-258.
- [14] 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 J L, Zhu W B, Xie G H, et al. Research advance of energy plant of switchgrass [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(3): 232-240. (in Chinese)
- [15] 中国科学院上海植物生理研究所, 上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 127-128.
- Shanghai Institute of Plant Physiology CAS, Shanghai Society of Plant Physiology. Modern guide of plant physiology experiment [M]. Beijing: Science Press, 1999: 127-128. (in Chinese)
- [16] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
Zhang L Y. Feed analysis and feed quality detection technology [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003. (in Chinese)
- [17] 王兴仁. 现代肥料试验设计 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
Wang X R. Modern fertilizer experiment design [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996. (in Chinese)
- [18] 董召荣, 田灵芝, 赵波, 等. 小黑麦牧草产量与品质对施氮的响应 [J]. *草业科学*, 2008, 25(5): 64-67.
Dong Z R, Tian L Z, Zhao B, et al. Respond of nitrogen fertilization on biomass yield and quality of wheat [J]. *Practaculture Science*, 2008, 25(5): 64-67. (in Chinese)
- [19] Lemus R, Parrish D J, Wolf D D. Nutrient uptake by ‘Alamo’ switchgrass used as an energy crop [J]. *Bioenergy Research*, 2009, 2(1/2): 37-50.
- [20] 徐宇强, 胡铁, 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.
Xu Y Q, Hu Y, Fu F L, et al. Lignin content and its relationship with drought resistance in inbred maize leaves under drought stress [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2007, 15(5): 72-75. (in Chinese)
- [21] 朱毅, 范希峰, 武菊英, 等. 水分胁迫对柳枝稷生长和生物品质品质的影响 [J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(2): 59-64.
Zhu Y, Fan X F, Wu J Y, et al. The effect of water stress on growth and biomass of switchgrass [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(2): 59-64. (in Chinese)
- [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.
Pei H J, Zhang M X, An L Z. Plant cell wall components under abiotic stress change [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(6): 1279-1286. (in Chinese)
- [23] 刘建新, 王鑫, 王凤琴. 水分胁迫对苜蓿幼苗渗透调节物质积累和保护酶活性的影响 [J]. *草业科学*, 2005, 22(3): 18-21.
Liu J X, Wang X, Wang F Q. The effects of water stress on accumulation of osmotic adjustment substances and protective enzyme activity of alfalfa seedlings [J]. *Practaculture Science*, 2005, 22(3): 18-21. (in Chinese)
- [24] 李国龙, 吴海霞, 温丽, 等. 作物抗旱生理与分子作用机制研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2010, 26(23): 185-191.
Li G L, Wu H X, Wen L, et al. Crop drought resistance physiology and molecular mechanism research [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(23): 185-191. (in Chinese)