

# 潜在木质纤维素能源植物香根草的初步研究

周 强<sup>1,2</sup>, 於丙军<sup>1,①</sup>

(1. 南京农业大学生命科学学院, 江苏 南京 210095; 2. 吉首大学 植物资源保护与利用湖南省高校重点实验室, 湖南 吉首 416000)

**摘要:** 对南京试验地种植的香根草 [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash] 叶片的光合特性和主要矿质元素含量以及株高生长速率进行了测定, 并对来源于南京试验地和东台滩涂地的香根草叶片中与纤维特性有关的化学组分的含量及水解产物的含量进行了分析和比较。结果显示: 香根草叶片的净光合速率 (Pn) 对光量子通量密度的响应曲线呈单峰型, Pn 最高可达  $15.3 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 光饱和点为  $1528.6 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; Pn 日变化曲线呈明显的双峰型, 峰值分别出现在 10:00 和 15:00。叶片中 K、N、Ca、P、Mg 和 S 的含量分别为 11.2、7.6、4.3、2.7、2.8 和  $1.5 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。5 月份至 10 月份是香根草的快速生长期, 7 月份的株高生长速率最高, 达 42.1 cm。种植于试验地和滩涂地的香根草叶片中纤维素、半纤维素和木质素的含量分别为 326.1 和  $321.7 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、380.2 和  $369.5 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、147.8 和  $154.0 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 产地间差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 苯-乙醇抽提物和灰分的含量分别为 59.5 和  $54.1 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、81.7 和  $71.7 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 产地间差异显著 ( $P < 0.05$ )。种植于试验地和滩涂地的香根草叶片水解产物中葡萄糖和木糖含量均较高, 分别为  $368.3$  和  $359.9 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $245.7$  和  $204.3 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 阿拉伯糖、半乳糖和甘露糖含量较低, 三者的总含量仅为 58.6 和  $55.8 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 其中, 仅木糖含量产地间具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。研究结果表明: 香根草具有很强的光合能力及较快的生长速率, 叶片中纤维素和半纤维素含量均较高, 能够适应边际性土地种植, 是一种潜在的优良木质纤维素能源植物。

**关键词:** 香根草; 木质纤维素; 能源植物; 光合特性; 水解产物; 生长速率

中图分类号: Q949.94; X382 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2012)01-0098-06

**Preliminary study on *Vetiveria zizanioides* using as a potential lignocellulosic energy plant** ZHOU Qiang<sup>1,2</sup>, YU Bing-jun<sup>1,①</sup> [1. College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Key Laboratory of Plant Resource Conservation and Utilization (Jishou University), College of Hu'nan Province, Jishou 416000, China], *J. Plant Resour. & Environ.* 2012, **21**(1): 98-103

**Abstract:** The photosynthetic characteristics and main mineral elements content in leaf and height growth rate of *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash cultivated in experimental field in Nanjing were determined, and contents of chemical components related to fiber property and of hydrolysis products in leaf of *V. zizanioides* cultivated in experimental field in Nanjing and beach in Dongtai were analyzed and compared. The results show that response curve of net photosynthetic rate (Pn) with photon flux density of leaf is a single peak curve with a max Pn of  $15.3 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  and light saturation point of  $1528.6 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . And daily change curve of Pn is an obvious double peak curve with the two peaks appearing respectively at 10:00 and 15:00. The contents of K, N, Ca, P, Mg and S in leaf are 11.2, 7.6, 4.3, 2.7, 2.8 and  $1.5 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , respectively. The rapid growth period of the species is from May to October and height growth rate in July is the highest with 42.1 cm per month. Contents of cellulose, hemicellulose and lignin in leaf of *V. zizanioides* cultivated in experimental field and beach are 326.1 and  $321.7 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 380.2 and  $369.5 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 147.8 and  $154.0 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , respectively, without significant difference between different locations ( $P > 0.05$ ). While contents of benzene-ethanol extractives and ash are 59.5 and  $54.1 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 81.7 and  $71.7 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , respectively, with significant

收稿日期: 2011-07-12

基金项目: 江苏省研究生培养创新工程项目 (CX10B-304Z); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 周 强 (1981—), 男, 湖南隆回人, 博士, 主要从事植物逆境生物学和资源植物开发利用方面的研究。

①通信作者 E-mail: bjiu@njau.edu.cn

difference between different locations ( $P < 0.05$ ). Among hydrolysis products in leaf of *V. zizanioides* cultivated in experimental field and beach, contents of glucose and xylose all are higher with 368.3 and 359.9  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 245.7 and 204.3  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , respectively, and contents of arabinose, galactose and mannose are lower with total contents of 58.6 and 55.8  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , respectively. In which, only xylose content has the significant difference between different locations ( $P < 0.05$ ). It is concluded that *V. zizanioides* has a very high photosynthetic capacity, fast growth rate, relative high contents of cellulose and hemicellulose in leaf. And it can grow well in the marginal land and be considered as a potential lignocellulosic energy plant.

**Key words:** *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash; lignocellulose; energy plant; photosynthetic characteristics; hydrolysis products; growth rate

香根草 [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash] 是禾本科 (Poaceae) 香根草属 (*Vetiveria* Bory) 多年生草本植物, 为  $C_4$  植物, 原产印度等热带地区; 成熟植株高 1.5 ~ 2.0 m, 叶宽约 0.8 cm、长约 75 cm, 生长周期为 180 ~ 247 d。大多数香根草种群不结果实和种子, 以分蘖方式繁殖, 不会成为入侵性杂草, 具有很强的耐热、耐寒、耐旱、耐盐碱、耐瘠、耐涝、耐酸和抗重金属等综合抗性能力, 在气温  $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、年降水量 300 ~ 6 000 mm 的区域内均可生长<sup>[1]20-27</sup>; 香根草植株可通过有效的渗透调节和多胺代谢机制适应中度盐胁迫 (小于  $200\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}\text{ NaCl}$ )<sup>[2-3]</sup> 和 中度干旱胁迫 (低于质量体积分数 40% PEG-6000 溶液)<sup>[4]</sup>; 香根草光合能力强, 生物产量高, 产量一般为 350 ~ 750  $\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$ <sup>[5]</sup>, 燃烧热能达到  $18.6\text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ <sup>[6]</sup>。因而, 香根草能够在边际性土地上、甚至条件更为恶劣的环境中推广种植, 近年来该种被广泛应用于农业水土保持、工程边坡固定、矿山生态恢复、土地复垦和净化水体等环保领域。此外, 香根草还具有提取香根油、作为饲料和编织原料等经济用途。目前已在中国、美国、印度和泰国等几十个国家推广应用, 有着广泛的种植基础<sup>[1]20-27, [7]</sup>。

作者着重从纤维素能源植物利用的角度, 对香根草植株生长以及叶片的光合特性、主要矿质元素含量、与纤维特性有关的化学组分含量及水解产物组分含量进行了初步分析, 以期拓展香根草新的开发和利用价值提供基础数据。

## 1 材料和方法

### 1.1 香根草种植与样品采集和处理

种植地分别位于江苏省南京市南京农业大学卫岗试验田和江苏省东台市沿海滩涂地; 前者土壤为粘

土, 肥力中等; 后者土壤为沙质, 肥力中等。均设置 3 个重复小区, 小区面积为  $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ 。于 2009 年 5 月上旬进行种苗种植, 以 3 株为 1 穴, 株行距  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ , 常规施肥、浇水和田间管理。

于 2010 年 7 月在南京农业大学卫岗试验田进行叶片光合作用测定; 并于 2010 年 11 月末收割各小区香根草叶片, 于  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  杀青 15 min、 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  烘干后, 剪切为长度约 1 cm 小段, 混匀后备用。

于 2010 年 11 月底, 分别在南京农业大学卫岗试验田和东台市沿海滩涂地, 按上述方法收割香根草叶片并进行相应的预处理, 用于化学组分和水解产物组分的分析。

### 1.2 测定方法

1.2.1 光合特性测定 参照赵玉红等<sup>[8]</sup>的方法 (略有改动) 测定香根草倒 4 叶的光合特性。于 2010 年 7 月选择天气晴朗的日子, 采用 LI-6400 XTP 便携式光合仪 (美国 LI-COR 公司) 进行测定, 温度  $24\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 36\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{CO}_2$  浓度为  $384.1 \sim 390.6\text{ }\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 光子通量密度设置为: 0、50、150、300、600、900、1 100、1 400、1 700 和  $2\text{ }100\text{ }\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。重复测定 5 个单株。

1.2.2 叶片主要矿质元素含量测定 将叶片小段粉碎并过 80 目筛, 烘干至质量恒定, 采用四分法取样 0.5 g; 参考吕伟仙等<sup>[9]</sup>的方法测定叶片总氮 (N) 含量; 使用 Optima 2100DV 等离子体发射光谱仪 (美国 Perkin Elmer 公司), 参照 Shen 等<sup>[10]</sup>的方法测定叶片中磷 (P)、钾 (K)、钙 (Ca)、镁 (Mg) 和硫 (S) 含量。重复测定 3 次。

1.2.3 株高生长速率测定 从 2010 年 3 月 31 日开始至 11 月 30 日结束, 于每月的 30 日或 31 日定株测量香根草植株的株高, 计算其株高生长速率。重复测定 9 个单株。

1.2.4 叶片中与纤维特性有关的化学组分分析 参照石淑兰等的方法测定叶片中纤维素<sup>[11]35</sup>、半纤维素<sup>[11]37-39</sup>、木质素(或克拉松木素)<sup>[11]46</sup>、苯-乙醇抽提物<sup>[11]33</sup>和灰分<sup>[11]26</sup>等化学组分的含量。重复测定 3 次。

1.2.5 水解产物组分分析 参照张红漫等<sup>[12]</sup>的方法略加修改进行样品的水解。称取适量样品粉末,加入体积分数 72% 硫酸 3 mL, 搅匀, 30 °C 水浴水解 1 h; 然后用去离子水将硫酸水解液稀释至硫酸体积分数为 4%, 随后于 121 °C 高温处理 45 min; 冷却后抽滤, 用氧化钙调节滤液 pH 至中性, 即为待测样液。

参照陈克克<sup>[13]</sup>的 HPLC 法测定待测样液中葡萄糖、甘露糖、乳糖、木糖和阿拉伯糖的含量。待测样液经 1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮衍生化后, 用 Waters 515 高效液相色谱仪进行 HPLC 分析。色谱条件为: 反相 C<sub>18</sub> 色谱柱 (Novapak, 150 mm×3.9 mm, 4 μm); 流动相为体积分数 20% 乙腈和 0.05 mol·L<sup>-1</sup> 磷酸盐缓冲液 (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>-NaOH) 的混合液, pH 6.8; 流速 0.8 mL·min<sup>-1</sup>; 2487 双波长紫外/可见检测器, 检测波长 245 nm。重复测定 3 次。

### 1.3 数据统计分析

按照公式:  $v_H = H_{n+1} - H_n$  计算株高生长速率。式中:  $v_H$  为株高生长速率 (cm·month<sup>-1</sup>);  $H$  为株高 (cm);  $n$  为月份。

用 Excel 2003 软件绘制净光合速率 (Pn) 对光量子通量密度的模拟曲线, 曲线的峰值即为光饱和点。

采用 SPSS 13.0 软件进行均值、标准误和差异显著性分析 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果和分析

### 2.1 香根草叶片的光合作用特性

香根草叶片净光合速率 (Pn) 对光量子通量密度 (PFD) 的响应曲线及其 Pn 日变化曲线见图 1。由图 1 可见: 香根草叶片的 Pn 对 PFD 的响应曲线呈单峰型, 曲线方程为  $y = 7 \times 10^{-6} x^2 + 0.021 4x - 1.081 2$ ; 在 PFD 从 0 增加至 1 400 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 的过程中, Pn 也随之增大; 当 PFD 达到 1 400 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 时, Pn 达到最大值 (15.2 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)。由 Pn 对 PFD 响应曲线 (图 1-A) 计算可知: 香根草叶片净光合速率的理论最大值为 15.3 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 光饱和点为 1 528.6 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。

香根草叶片的净光合速率日变化曲线呈明显的双峰型 (图 1-B), 第 1 个高峰出现在 10:00, 峰值为 13.3 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>; 第 2 个高峰出现在 15:00, 其峰值略低于第 1 个峰, 为 10.4 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>; 在 2 个峰之间的 12:00 至 14:00, 有 1 个显著的低谷期, 应为植物的“午休期”。

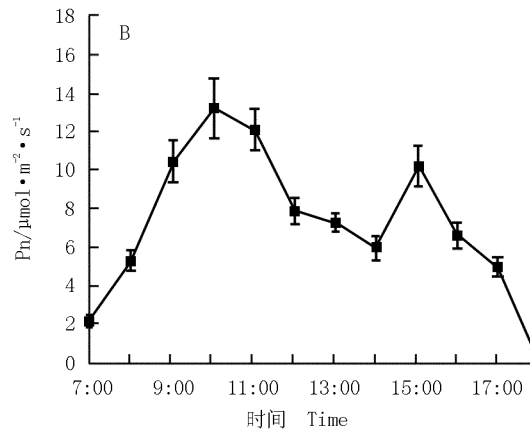
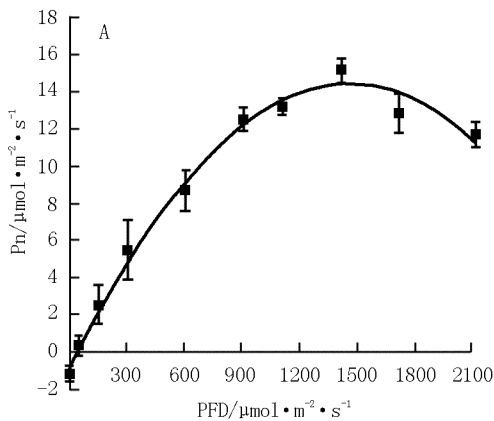


图 1 香根草叶片净光合速率 (Pn) 与光量子通量密度 (PFD) 的响应曲线 (A) 及其 Pn 日变化曲线 (B)

Fig. 1 Response curve (A) of net photosynthetic rate (Pn) with PFD and Pn daily change curve (B) of *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash leaf

### 2.2 香根草株高的生长特性

在生长季香根草株高的月变化见图 2。由图 2 可见: 在南京地区, 香根草可以自然越冬, 从 4 月份开始

缓慢恢复生长, 5 月份至 10 月份是其株高的快速增长期, 特别是在 6 月份、7 月份和 8 月份, 株高增长尤为迅速; 7 月份的月生长量最高, 达 42.1 cm; 11 月份, 香

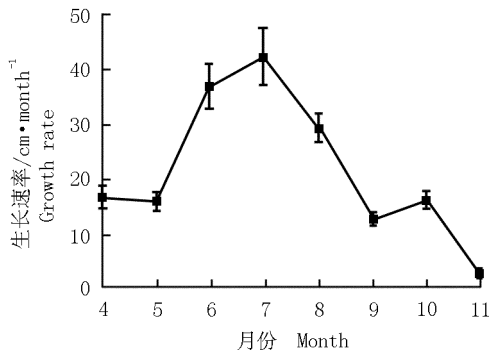


图2 香根草株高的月生长速率曲线  
Fig. 2 Curve of growth rate per month of plant height of *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash.

根草几乎停止生长。

### 2.3 香根草叶片主要矿质元素含量分析

于11月末收割香根草叶片进行主要矿质元素含量分析,结果表明:香根草叶片中K和N含量较高,分别为11.2和7.6 mg·g<sup>-1</sup>;Ca、P和Mg的含量也较

高,分别为4.3、2.7和2.8 mg·g<sup>-1</sup>;S含量最低,为1.5 mg·g<sup>-1</sup>。

### 2.4 香根草叶片中与纤维特性有关的化学组分分析

不同种植地香根草叶片中与纤维特性有关的化学组分的分析结果见表1。由表1可见,种植于试验地和滩涂地的香根草叶片中纤维素的平均含量分别为326.1和321.7 mg·g<sup>-1</sup>,半纤维素的平均含量分别为380.2和369.5 mg·g<sup>-1</sup>,木质素的平均含量分别为147.8和154.0 mg·g<sup>-1</sup>,各指标在不同种植地间的差异不显著( $P>0.05$ )。而种植于试验地的香根草叶片中苯-乙醇抽提物和灰分的平均含量分别为59.5和81.7 mg·g<sup>-1</sup>,均高于种植于滩涂地的香根草叶片(平均含量分别为54.1和71.7 mg·g<sup>-1</sup>),且差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.5 香根草叶片水解产物组分分析

来源于不同种植地的香根草叶片经体积分数72%硫酸酸解后,用HPLC法检测其中各单糖的含量,结果见表2。

表1 不同种植地香根草叶片中与纤维特性有关的化学组分的含量( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Content of chemical components related to fiber property of *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash leaf from different planting sites ( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>

种植地 Planting site	不同组分的含量/mg·g <sup>-1</sup> Content of different components				
	苯-乙醇抽提物 Benzene-ethanol extractives	纤维素 Cellulose	半纤维素 Hemicellulose	木质素 Lignin	灰分 Ash
试验地 Experimental field	59.5±1.4a	326.1±7.2a	380.2±8.8a	147.8±11.9a	81.7±4.1a
滩涂地 Beach	54.1±1.2b	321.7±9.4a	369.5±7.7a	154.0±3.9a	71.7±1.3b

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P<0.05$ ).

表2 不同种植地香根草叶片中水解产物组分的含量( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Content of hydrolysis products in *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash leaf from different planting sites ( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>

种植地 Planting site	各单糖的含量/mg·g <sup>-1</sup> Content of different single sugars								
	葡萄糖 Glucose	木糖 Xylose	阿拉伯糖 Arabinose	半乳糖 Galactose	甘露糖 Mannose	葡萄糖 Glucose	木糖 Xylose	阿拉伯糖 Arabinose	甘露糖 Mannose
试验地 Experimental field	368.3±21.7a	245.7±19.6a	39.5±3.3a	15.1±0.4a	4.0±0.4a	368.3±21.7a	245.7±19.6a	39.5±3.3a	15.1±0.4a
滩涂地 Beach	359.9±20.1a	204.3±3.4b	35.4±1.8a	15.8±0.6a	4.6±0.3a	359.9±20.1a	204.3±3.4b	35.4±1.8a	15.8±0.6a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P<0.05$ ).

由表2可见:来源于试验地和滩涂地的香根草叶片的水解产物中,葡萄糖含量均为最高,平均含量分别为368.3和359.9 mg·g<sup>-1</sup>;木糖含量次之,平均含量分别为245.7和204.3 mg·g<sup>-1</sup>;阿拉伯糖、半乳糖和甘露糖含量均较低,三者的总含量仅为58.6和55.8 mg·g<sup>-1</sup>。差异显著性分析结果显示:除种植于试验地的香根草叶片中木糖含量显著高于种植于滩涂地的香根草外( $P<0.05$ ),葡萄糖、阿拉伯糖、半乳

糖和甘露糖含量在2个种植地间无显著差异( $P>0.05$ )。

## 3 讨论

能源危机和全球变暖正威胁着人类社会的生存和发展,开发利用可替代能源迫在眉睫。利用纤维素资源生产生物乙醇被认为是解决能源危机的最为理



想的办法,具有原料来源广泛而稳定、不占用粮食耕地以及能耗较低等显著特点<sup>[14]</sup>。寻找和培育新的廉价优质的木质纤维素能源植物用以生产生物乙醇,是目前生物质能源研究领域的热点之一。柳枝稷(*Panicum virgatum* L.)被普遍认为是合适的能源植物之一<sup>[15-16]</sup>,而百喜草(*Paspalum notatum* Flügge)、狗牙根[*Cynodon dactylon* (L.) Pers.]、紫狼尾(*Pennisetum purpureum* Schum.)<sup>[17]</sup>和苦草[*Vallisneria spiralis* (L.) L.]<sup>[18]</sup>等被认为是能源植物的候选种类。还有研究者采用杂交或基因工程等方法对植物的品质特性进行改良,如让植物能够自身产生纤维素酶,降低木质素含量或增加纤维素含量等<sup>[19-20]</sup>。能源植物的评价需考虑多方面的因素,如:生物原料的化学成分含量、栽培实践、对土地的适应能力、投入消耗的资源、对土壤水体矿物质的吸收、杀虫剂的使用、对土壤的侵蚀、对生物多样性和环境景观的影响以及水分的需求和利用等方面<sup>[21]</sup>。中国《可再生能源中长期发展规划》指出:适合中国生物乙醇植物种植的宜耕边际性土地面积约为 $7.02 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。要积极利用宜耕边际性土地,发展适应性好、抗逆性强、生物量较高的非粮食基生物乙醇原料<sup>[22]</sup>。

南京地区香根草7月份的株高月生长量最高,达42.1 cm;光饱和点为 $1528.6 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,净光合速率(Pn)最高可达 $15.3 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其Pn对光量子通量密度的响应曲线与赵玉红等<sup>[8]</sup>对广东产香根草光合特性的测量结果接近;香根草Pn的大小及日变化的趋势均与在黄土丘陵区种植的柳枝稷<sup>[23]</sup>相似。表明在南京地区香根草的光合能力强、生长快速。

香根草叶片中主要矿质元素(N、P、K、Ca、Mg和S等)含量低于或与一般高等植物体内营养元素含量水平相当<sup>[24]</sup>,与柳枝稷<sup>[25]</sup>接近;此外,香根草体内还含有遗传多样性丰富的联合固氮菌,能够进行生物固氮<sup>[26]</sup>。这些都表明将香根草作为木质纤维素能源植物进行开发利用,具有肥料投入较低的优势,而一般纤维素原料植物在种植过程中在肥料上的能量投入可占种植能量总投入的67%<sup>[15]</sup>。另外,香根草可以作为植物性杀虫剂和杀菌剂,并且能够通过化感作用抑制杂草种子的萌发及植株的生长<sup>[1]232-241</sup>。在本研究和以往的香根草栽培过程中,均未使用除草剂等农药,也未发现明显的草害和病虫害,也说明了香根草的这一特性。

Methacanona等<sup>[27]</sup>的研究结果显示:在香根草生态型Maehae和Songkha 3中,纤维素、半纤维素和木质素的含量分别为 $395.7$ 和 $394.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $282.4$ 和 $344.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $100.9$ 和 $78.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;而在本研究中,种植于南京试验田的香根草叶片中纤维素含量( $326.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )略低于上述2种生态型的香根草,半纤维素和木质素含量则略高(分别为 $380.2$ 和 $147.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),纤维素和半纤维素总量( $706.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )介于生态型Maehae和Songkha 3之间(分别为 $678.1$ 和 $738.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )。推测栽培条件和生态型的不同是造成这种差异的原因之一。

与柳枝稷类似,10月中旬至11月为香根草的生长末期,一般在此时收割叶片。与同处于生长末期的柳枝稷叶片<sup>[28]</sup>相比,种植于南京的香根草叶片中纤维素与半纤维素的总含量达到 $706.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,比柳枝稷( $678 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )略高;而木质素含量则比柳枝稷( $168 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )低12.02%。已有研究表明:植物细胞壁所含的木质素能够抵抗自然界中多数微生物的有效降解,它和半纤维素组分交织在一起,紧密包裹着纤维素的多糖部分,导致木质素预处理过程复杂且耗能;同时木质素还会对纤维素酶的水解活性产生致钝作用。因此,降低木质素含量或改变其组分,将有利于能源植物资源的充分利用<sup>[20]</sup>。从木质素含量看,香根草作为纤维素能源植物具有一定的优势。

本研究结果表明:香根草叶片水解后,其主要成分为葡萄糖和木糖,二者含量占总糖的91.29%,均高于柳枝稷叶片<sup>[29]</sup>。种植于江苏沿海滩涂盐碱地这类边际性土壤上的香根草叶片中纤维素和半纤维含量与种植于试验地的无显著差异;水解产物中除木糖外,葡萄糖、阿拉伯糖、半乳糖和甘露糖4种单糖的含量也没有显著差异,说明滩涂盐碱环境对香根草的品质没有明显影响,表明香根草具有较强的适应边际性土壤种植的特性。

根据以上分析结果可见:与能源植物柳枝稷类似,香根草也是禾本科多年生草本 $C_4$ 植物,它们有许多相似的特征。都具有较高的光合能力、较快的生长速率、在种植生长过程中对肥料要求都比较低、很少需用除草剂和杀虫剂等,都能够适应恶劣的边际性土壤种植环境,叶片中纤维素、半纤维素和木质素等化学成分及其水解产物水平相似,又各有所长。因此,香根草是潜在的优良木质纤维素能源植物,可加以深入研究和开发。

- 参考文献:
- [1] 徐礼煜,夏汉平. 香根草系统的理论与实践[M]. 北京:中国广播电视出版社,2008.
  - [2] ZHOU Q, YU B J. Accumulation of inorganic and organic osmolytes and its role in osmotic adjustment in NaCl-stressed vetiver grass seedlings[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2009, 56: 678-685.
  - [3] ZHOU Q, YU B J. Changes in free, conjugated and bound polyamine content in salt adaptation of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*, Poaceae)[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 2009, 31: 477-485.
  - [4] ZHOU Q, YU B J. Changes in content of free, conjugated and bound polyamines and osmotic adjustment in adaptation of vetiver grass to water deficit[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48: 417-425.
  - [5] 徐礼煜,方长久,万明,等. 香根草系统及其在中国的研究与应用[M]. 香港:亚太国际出版有限公司,2003:1-2.
  - [6] HILL R D. Calorimetric value of vetiver[J]. *Vetiver Newsletter*, 1992(8):18.
  - [7] 夏汉平. 关于香根草及其资源和利用的研究[J]. *国外畜牧学:草原与牧草*, 1998(2):1-5.
  - [8] 赵玉红,刘金祥,文军. 2个香根草品种苗期生长与光合特性的研究[J]. *草业科学*, 2007, 24(12):94-98.
  - [9] 吕伟仙,葛滢,吴建之,等. 植物中硝态氮、氨态氮、总氮测定方法的比较研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2004, 24(2):204-206.
  - [10] SHEN Z G, LI X D, CHEN H M. Comparison of elemental composition and solubility in the zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* with the non-hyperaccumulator *Thlaspi ochroleucum* [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, 65: 343-350.
  - [11] 石淑兰,何福望. 制浆造纸分析与检测[M]. 北京:中国轻工业出版社,2003.
  - [12] 张红漫,郑荣平,陈敬文,等. NREL法测定木质纤维素原料组分的含量[J]. *分析试验室*, 2010, 29(11):15-18.
  - [13] 陈克克. 地瓜儿多糖的单糖组成实验中两种流动相的比较研究[J]. *陕西农业科学*, 2009(5):41-45, 49.
  - [14] MARGEOT A, HAHN-HAGERDAL B, EDLUND M, et al. New improvements for lignocellulosic ethanol[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2009, 20: 372-380.
  - [15] SCHMER M R, VOGEL K P, MITCHELL R B, et al. Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105: 464-469.
  - [16] BARNEY J N, DITOMASO J M. Bioclimatic predictions of habitat suitability for the biofuel switchgrass in North America under current and future climate scenarios [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34: 124-133.
  - [17] DURHAM S. Beyond switchgrass [J]. *Agricultural Research*, 2007, 55: 7.
  - [18] VIOLA E, CARDINALE M, SANTARCANGELO R, et al. Ethanol from eel grass via steam explosion and enzymatic hydrolysis [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2008, 32: 613-618.
  - [19] STICKLEN M. Plant genetic engineering to improve biomass characteristics for biofuels [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2006, 17: 315-319.
  - [20] FU C X, MIELENZ J R, Xiao X R, et al. Genetic manipulation of lignin reduces recalcitrance and improves ethanol production from switchgrass [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108: 3803-3808.
  - [21] BALAT M, BALAT H. Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel [J]. *Applied Energy*, 2009, 86: 2273-2282.
  - [22] TIAN Y S, ZHAO L X, MENG H B, et al. Estimation of un-used land potential for biofuels development in (the) People's Republic of China [J]. *Applied Energy*, 2009, 86: S77-S85.
  - [23] 徐炳成,山仓,黄占斌,等. 黄土丘陵区柳枝稷光合生理生态特性的初步研究[J]. *西北植物学报*, 2001, 21(4):625-630.
  - [24] 蔡庆生. 植物生理学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2011:57.
  - [25] EL-NASHAAR H M, BANOWETZ G M, GRIFFITH S M, et al. Genotypic variability in mineral composition of switchgrass [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100: 1809-1814.
  - [26] 赵现伟,彭桂香,张志英,等. 细菌聚类新方法: ddT 聚类技术分析香根草联合固氮菌多样性 [J]. *科学通报*, 2010, 55(7): 562-571.
  - [27] METHACANONA P, CHAIKUMPOLLERT O, THAVORNITI P, et al. Hemicellulosic polymer from vetiver grass and its physicochemical properties [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2003, 54: 335-342.
  - [28] KUMAR S, KOTHARI U, KONG L Z, et al. Hydrothermal pretreatment of switchgrass and corn stover for production of ethanol and carbon microspheres [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35: 956-968.
  - [29] HUANG H J, RAMASWAMY S, AL-DAJANI W, et al. Effect of biomass species and plant size on cellulosic ethanol: a comparative process and economic analysis [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2009, 33: 234-246.

(责任编辑:张明霞)