

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2013.03.006

庞静, 吴沿友, 邢德科. 喀斯特环境下两种生物质能源植物的光合产能[J]. 广西植物, 2013, 33(3):313-318

Pang J, Wu YY, Xing DK. Photosynthetic energy production by two species of biomass energy plants under karst environment[J]. *Guihaia*, 2013, 33(3): 313-318

喀斯特环境下两种生物质能源植物的光合产能

庞 静¹, 吴沿友^{1,2,*}, 邢德科¹

(1. 现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室/江苏省重点实验室, 江苏大学 农业工程研究院, 江苏 镇江 212013; 2. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

摘 要: 以贵州省贞丰县鲁荣乡五个地区为采样点, 选择各点生长良好、树龄 4~5 a 的野生成年麻疯树与油桐作为研究对象, 测定采样点土壤的理化性质和植物的光合、叶绿素荧光参数及干质量热值。结果表明: 土壤磷含量的大小顺序为许妹 < 沙坝 < 喜朝 < 孔索 < 里外; 土壤 HCO_3^- 含量大小顺序为许妹 > 喜朝 > 里外 > 孔索 > 沙坝。土壤 $\text{pH} > 8$ 时, 土壤有效磷含量越高或者 HCO_3^- 含量越低, 麻疯树与油桐光合能力越强, 同一生长点的麻疯树光合与抗胁迫能力都高于油桐。麻疯树和油桐热值均随土壤磷含量增加而增大, 随土壤 HCO_3^- 含量增加而减小。油桐抗逆性差于麻疯树, 但产能多于后者。因此, 可以依据土壤的理化性质选择种植麻疯树和油桐。

关键词: 麻疯树; 油桐; 净光合速率; 叶绿素荧光; 热值

中图分类号: Q945 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2013)03-0313-06

Photosynthetic energy production by two species of biomass energy plants under karst environment

PANG Jing¹, WU Yan-You^{1,2,*}, XING De-Ke¹

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education & Jiangsu Province, Institute of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: The experiment was conducted in five sampling sites in Lurong Town, Zhenfeng County, Guizhou Province. Four to five years' old wild *Jatropha Curcas* L. and *Vernicia Fordii* H. which grew well in each sampling site were studied by analyzing photosynthesis characteristics, chlorophyll fluorescence features and gross calorific value, meanwhile, physical and chemical properties of soils were determined. The results showed that the content sequence of soil available phosphorus was Xumei < Shaba < Xichao < Kongsuo < Liwai, and that of soil bicarbonate was Xumei > Xichao > Liwai > Kongsuo > Shaba. With $\text{pH} > 8$, the higher the soil available phosphorus content or the lower the soil bicarbonate content was, the higher the photosynthetic capacity of *J. curcas* and *V. fordii* were. At same sampling site, the photosynthetic capacity and stress resistance ability of *J. curcas* were better than *V. fordii*. The gross calorific value of both *J. curcas* and *V. fordii* increase along with the soil available phosphorus content increased, while decrease with the soil bicarbonate content increased. Although the stress resistance ability of *V. fordii* was a little lower than that of *J. curcas*, it could accumulate more energy. Therefore, planting and developing *J. curcas* and *V. fordii* could be selected according to the physical and chemical properties of soils.

收稿日期: 2012-11-02 修回日期: 2013-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(31070365); 中国科学院百人计划项目

作者简介: 庞静(1986-), 女, 河北张家口市人, 硕士研究生, 研究方向为生物质能源, (E-mail)jing1986319@163.com.

通讯作者: 吴沿友, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为环境地球化学, (E-mail)yanyouwu@uj.s.edu.cn.

Key words: *J. curcas*; *V. fordii*; net photosynthetic rate; chlorophyll fluorescence; gross calorific value

贵州是世界上喀斯特发育典型的地区之一,喀斯特地貌占全省土地面积的 61.9% (潘学军等, 2011), 是中国的喀斯特省 (陈川等, 2006)。该地区土壤多具低磷、高重碳酸盐的特性, 严重制约着植物的生长发育, 导致生态环境极其脆弱, 容易引发石漠化。而随着该地区石漠化程度的加剧, 植物群落种类减少, 植被受到破坏 (姜运力等, 2006), 生产力低下, 导致全省的经济发展落后, 生态环境恶化, 加速石漠化进程, 形成恶性循环。有研究发现, 草本植物的盖度与土壤有效磷含量呈显著正相关, 营养的缺乏限制植物的生长 (高昇等, 2012); 另外, 营养胁迫 (低磷) 对植物的叶绿素荧光参数有显著负效应, 抑制植物捕获及转化光能用于光化学反应的相关能力 (王程媛等, 2012)。碳酸盐岩的溶蚀作用还形成大量碳酸氢根离子, 使土壤上覆层呈现高重碳酸盐的环境, 严重阻碍植物进行光合作用。重碳酸盐的增加会抑制光合色素的合成, 破坏光合机构, 进而抑制植物的光合活性 (Cavalli *et al.*, 2011)。能源植物麻疯树 (*Jatropha curcas*) 和油桐 (*Vernicia fordii*) 都是耐瘠薄的抗逆植物, 同属大戟科, 但是有关低磷和高重碳酸盐胁迫对这两种能源植物光合和叶绿素荧光参数影响的研究还未见报道。

麻疯树是近年来发展起来的能源植物, 其耐干旱、耐瘠薄的特性使其成为优选能源植物 (Wang *et al.*, 2011; Rao *et al.*, 2012)。Maes *et al.* (2009) 研究了干旱胁迫对麻疯树的影响, 结果表明麻疯树有极强的抗旱能力, 其他研究大多集中在麻疯树种子的产油率及其经济价值方面 (吴伟光等, 2010), 其产油率高、生物柴油转化率高的优点得到广泛认可。而油桐在我国的种植已有上千年历史, 常以油桐果提炼的桐油出口国外, 在国际上享有很高的声誉, 桐油出口产量和质量高居世界第一位。关于油桐的研究则大多集中在桐油的提取和利用 (张天顺等, 2010; 黄福长, 2011)。从植物的热值方面评价麻疯树和油桐产油潜能的报道较少。

国外对植物热值的研究开始于 1934 年 Long (1934) 对向日葵不同部位叶片的测定, 随后, Golley (1961) 应用氧弹式热量计对热带雨林至极地泰加林主要植物群落中优势植物种类的平均热值进行了测定。我国对植物热值的研究见著于 20 世纪 80 年代初 (刘灿等, 2012)。热值是能量的尺度, 是衡量植物

对太阳辐射能利用率的重要指标, 反映了植物光合作用中固定太阳辐射能的能力, 热值大小直接反映植物净光合速率的高低, 热值高, 净光合速率就高, 对有机物的积累高, 产量就高。

如果将两种能源植物的非粮、生物质能源特性与喀斯特生态恢复相结合, 充分利用贵州省大面积的喀斯特荒废土地, 便可以实现不与民争粮, 同时为我国生物柴油生产提供原料, 并且改善当地生态环境的目标, 具有深远的社会意义和生态经济价值。

所以, 本研究选取喀斯特环境下生长的麻疯树和油桐为实验材料, 通过叶绿素含量、净光合速率、叶绿素荧光参数以及茎、叶中热值的测定, 分析喀斯特环境下这两种能源植物的光合特性及其茎、叶能值的变化规律, 对比研究野生麻疯树和油桐光合产能的变化规律及其喀斯特岩溶环境的生态适应性, 以期为喀斯特岩溶地区适生能源植物的选育和广泛种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品的采集与分析方法

土壤样品采集于贵州省安顺市贞丰县鲁容乡的许妹、喜朝、孔索、里外和沙坝 5 个不同生长点。土壤在自然条件下风干、研磨, 过 0.25 mm 筛后分析土壤样品的化学指标。

土壤 pH 使用电极法测定, 水土比为 5 : 1; 土壤中速效磷含量采用 NaHCO_3 浸提—钼锑抗分光光度计法测定; 土壤中 HCO_3^- 含量采用双指示剂—中和滴定法测定; 土壤全氮的测定选用开氏消煮法; 速效钾的测定方法是 NH_4OAc 浸提—火焰光度法; 土壤中有机质的测定选用高温干烧法。每个样品的测定重复 3 次。

1.2 采样点自然条件及光合特性的测定

5 个采样点的光照强度 ($\text{PAR}(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$) 基本一致, 分别是许妹 (935.7), 喜朝 (985.5), 孔索 (1 002.5), 里外 (1 042.7), 沙坝 (987.3); 温度差只在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内, 分别是许妹 (30.9), 喜朝 (33.2), 孔索 (31.6), 里外 (31.3), 沙坝 (29.5); 大气 CO_2 浓度 (ppm) 几乎一样, 分别为许妹 (415.4), 喜朝 (405.6), 孔索 (412.8), 里外 (411.6), 沙坝 (415.8)。利用 LI-6400 便携式光合测定仪 (LI-COR, Lincoln, NE, USA) 于上午

9:00 至 11:30 对植物叶片的光合作用进行测定(该时间段植物光合作用较为活跃,最能代表植物光合碳同化能力(时丽冉等,2010))。每个地区的油桐和麻疯树选取树龄为 4~5 a,长势良好且无病虫害和机械损伤的 6 株植物,每株植物选取枝条从顶端往下数第 4 片充分展开且生长状况良好的叶片进行测定,每一叶片重复测定 3 次,每株植物重复测定 3 片叶片。

1.3 叶绿素含量的测定

叶绿素含量用 SPAD-502 叶绿素含量测量仪测定,在各植株上随机选取生长良好的叶片进行测定。每个处理下选取 6 株植物进行测定,每株植物叶片重复测定 3 次。

1.4 叶绿素荧光参数的测定

用德国 Heinz Walz GmbH 公司生产的 IMAGING-PAM 调制式叶绿素荧光仪,对每个地区的油桐和麻疯树进行叶绿素荧光特性的测定,测定指标包括 PS II 最大光能转化效率(F_v/F_m)、PS II 的潜在活性(F_v/F_o)、PS II 捕获激发能的效率(F_m/F_o)和 PS II 表观光合电子传递速率(ETR)等荧光参数,测定前先将叶片暗适应 20 min,每个处理下选取 6 株植物进行测定,每株植物叶片重复测定 3 次,叶片的选取同光合特性的测定。

1.5 茎、叶中热值的测定

叶片是植物进行光合作用的主要器官,其生理活动最活跃,含有较多的高能有机物,研究表明,高等植物干质量平均热值除繁殖体外,叶片干重热值

在植物各部分热值中最高(何晓等,2007)。

将上述测定之后的同一植株的叶片收集保存于密封袋中,于江苏大学农业工程研究院生理生化分析实验室进行茎、叶中能值的测定。将带回的叶片和茎放入烘箱在 105 °C 杀青 2 h,然后在 75 °C 下烘干至衡重。烘干后用研钵分别研磨至粉末状,再用 XRY-1B 型氧弹热量计测定其热值。

1.6 数据处理

数据用 Excel, SPSS 等软件统计分析,并整理和作图。对两种植物在不同采样点各指标值之间分别进行差异显著性分析,采用 SPSS 分析软件进行 5% 显著水平上的单因素方差分析,对平均值进行 LSD 多重比较。测定结果采用统计方法,统计分析采用的软件是 SPSS,用 LSD 多重分析法检验结果的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 五个取样点土壤的主要化学指标

从表 1 中看出,土壤 N、K 及有机质含量都相对较高,足以满足植物生长所需,不会对植物生长形成胁迫。而土壤由于长期风化,雨水冲刷等原因,导致其 HCO_3^- 含量相对较低,但土壤都为碱性土,其中沙坝土壤 pH 值为 7.54,而其余 4 个土样的 pH 皆大于 8。并且从表中看出,除沙坝点外,土壤 pH 值越高,则土壤有效 P 含量则越低。5 个采样点的磷含量差异显著。

表 1 五个取样点土壤的主要特征(样品数 $n=3$)

Table 1 Chemistry characteristics of soil at five sampling sites (samples $n=3$)

采样点 Sampling site	酸碱度 pH	磷含量 P content ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	HCO_3^- 含量 HCO_3^- content ($\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮含量 N content ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾含量 K content ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质含量 Organic matter content (%)
许妹 (Xumei)	8.11±0.05a	0.50±0.02e	1.38±0.08a	17.06±0.14d	51.57±0.63c	8.90±0.30a
喜朝 (Xichao)	8.06±0.06a	0.91±0.02c	1.12±0.06b	27.33±0.38b	50.45±0.57c	7.92±0.27b
孔索 (Kongsuo)	8.03±0.12a	1.86±0.05b	1.03±0.04b	27.44±0.33b	54.32±0.16b	3.76±0.07d
里外 (Liwai)	8.01±0.07a	3.08±0.04a	1.09±0.06b	37.85±0.55a	72.54±0.59a	6.48±0.05c
沙坝 (Shaba)	7.54±0.08b	0.65±0.03d	0.79±0.07c	22.03±0.60c	45.85±0.19d	7.56±0.34b

注:平均值±标准误差后面字母表示在同一显著水平 $P \leq 0.05$ 下,通过单因素方差分析与 t 检验对同一列进行差异显著性分析。下同。

Note: The mean± followed by different letters in the same column differ significantly at $P \leq 0.05$, according to one-way ANOVA and t test. The same below.

2.2 不同生长地区麻疯树、油桐光合特性的变化

从表 2、表 3 看出,许妹、喜朝、孔索和里外生长的麻疯树和油桐拥有较高的叶绿素含量和气孔导度,大都显著高于沙坝,说明许妹、喜朝、孔索和里外土壤较高的 pH 有助于麻疯树和油桐叶绿素的合成,并且气孔开度较好。此外,孔索和里外生长的麻疯树和油桐的

净光合速率显著高于喜朝和许妹,主要是由于孔索和里外土壤的有效磷含量高,而 HCO_3^- 含量低。而水分利用效率(water use efficiency, WUE)通常用净光合速率/蒸腾速率表示植物对水分的利用水平,是消耗单位重量水分所产生的同化物质的量。植物通过调节气孔的开张程度来提高水分的利用效率,同时维持较高的

光合速率,这是植物适应环境的明显特征(Xing *et al.*, 2012; Höglind *et al.*, 2011; 吴沿友等, 2011; Sinha *et al.*, 2011; Noronha-Sannervik *et al.*, 2003)。同一地区生长

的油桐的水分利用效率普遍高于麻疯树,说明油桐在喀斯特环境下相对于麻疯树每消耗单位水分能够同化更多的二氧化碳,体现出另一种适应特性。

表 2 5 个采样点麻疯树光合参数(净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、水分利用效率(WUE))以及叶绿素含量(SPAD)比较

Table 2 Comparison of photosynthesis (net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), water use efficiency (WUE)) and chlorophyll content (SPAD) in five sampling points of *Jatropha curcas*

采样点 Sampling site	净光合速率 Pn($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度 Gs($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	水分利用率 WUE($\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{mol}^{-1}(\text{H}_2\text{O})$)	叶绿素含量 SPAD (%)
许妹 (Xumei)	10.27±0.05d	0.41±0.006b	3.02±0.061d	34.76±4.36b
喜朝 (Xichao)	13.49±0.12c	0.40±0.005c	2.21±0.010e	35.66±4.00ab
孔索 (Kongsuo)	18.63±0.30b	0.38±0.005d	4.69±0.023a	37.23±2.44ab
里外 (Liwai)	21.40±0.14a	0.44±0.002a	4.47±0.047b	40.44±1.88a
沙坝 (Shaba)	8.47±0.03e	0.32±0.006e	3.43±0.094c	32.22±4.38b

表 3 5 个采样点油桐光合参数(净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、水分利用效率(WUE))以及叶绿素含量(SPAD)比较

Table 3 Comparison of photosynthesis net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), water use efficiency (WUE)) and chlorophyll content (SPAD) in five sampling points of *Vernicia fordii*

采样点 Sampling site	净光合速率 Pn($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度 Gs($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	水分利用率 WUE($\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{mol}^{-1}(\text{H}_2\text{O})$)	叶绿素含量 SPAD (%)
许妹 (Xumei)	10.14±0.22d	0.14±0.007d	6.27±0.113a	41.18±5.62a
喜朝 (Xichao)	12.40±0.10c	0.22±0.002b	3.20±0.007e	41.96±4.05a
孔索 (Kongsuo)	14.95±0.19b	0.26±0.003a	5.74±0.069b	43.12±6.57a
里外 (Liwai)	16.57±0.03a	0.26±0.004a	3.94±0.039d	44.80±2.65a
沙坝 (Shaba)	7.66±0.39e	0.19±0.036c	4.71±0.574c	36.28±3.45b

净光合速率(Pn)是光合作用积累量减去呼吸作用的消耗量,反映了植物对有机物的积累,能反映植物的生长情况。从表 2 看出,随着土壤有效磷含量的增加,麻疯树和油桐的净光合速率呈上升趋势;从表 3 看出,随着土壤 HCO_3^- 含量的增加,两种植物的净光合速率呈下降趋势。所以,土壤有效磷和 HCO_3^- 含量的不同对两种植物的生长具有决定性影响,土壤有效磷含量越高,且 HCO_3^- 含量越低,两种植物生长状况越好。同等条件下相比,麻疯树的净光合速率均大于油桐,说明麻疯树生长状况好于油桐,有机物积累高于油桐。

2.3 不同生长地区麻疯树、油桐叶绿素荧光参数的变化

自然条件下的叶绿素荧光和光合作用有着十分密切的关系,是光合作用的探针(唐仕云等,2012)。

F_0 是初始荧光,大小与叶绿素浓度有关。表 4、表 5 中显示,许妹、喜朝、孔索、里外地区生长的麻疯树和油桐具有较高的叶绿素含量,所以 F_0 显著高于沙坝地区。 F_v/F_m 代表 PS II 原初光能转化效率,反映 PS II 的最大光能转换效率,非胁迫条件下该参数的变化极小,不受物种和生长条件的影响,胁迫条件下该参数明显下降,其大小能够表明植物抗胁迫能力的强弱。许妹地区土壤的有效磷含量最低, HCO_3^- 含量最高,胁迫最严重,麻疯树和油桐的 F_v/F_m 最低,里外地区土壤的有效磷含量最高,相应的 F_v/F_m 也最大,说明磷胁迫与重碳酸盐胁迫会对两种生物质能源植物光合活性产生明显的抑制作用。 F_v/F_0 是植物的 PS II 潜在活性,能和 F_v/F_m 一起说明光系统 II 潜在的光量子效率(Höglind

表 4 5 个取样点麻疯树叶绿素荧光参数比较

Table 4 Comparison of chlorophyll fluorescence parameters in five sampling points of *Jatropha curcas*

采样点 Sampling site	初始荧光 F_0	PS II 原初光能转化率 F_v/F_m	PS II 潜在活性 F_v/F_0
许妹 (Xumei)	0.107±0.023ab	0.725±0.005c	2.633±0.071c
喜朝 (Xichao)	0.104±0.016b	0.749±0.011b	2.975±0.183b
孔索 (Kongsuo)	0.121±0.016ab	0.753±0.009b	3.052±0.135b
里外 (Liwai)	0.131±0.025a	0.763±0.006a	3.211±0.104a
沙坝 (Shaba)	0.101±0.016b	0.751±0.008b	3.021±0.140b

表 5 5 个取样点油桐叶绿素荧光参数比较

Table 5 Comparison of chlorophyll fluorescence parameters in five sampling points of *Vernicia fordii*

采样点 Sampling site	初始荧光 F _o	PS II 原初光能转化率 F _v /F _m	PS II 潜在活性 F _v /F _o
许妹 (Xumei)	0.107±0.010ab	0.593±0.013c	1.450±0.072c
喜朝 (Xichao)	0.121±0.026ab	0.719±0.016b	2.564±0.191b
孔索 (Kongsuo)	0.127±0.023a	0.721±0.005b	2.584±0.069b
里外 (Liwai)	0.124±0.018a	0.736±0.004a	2.798±0.068a
沙坝 (Shaba)	0.101±0.008b	0.725±0.005b	2.630±0.062b

表 6 相同采样点麻疯树与油桐叶、茎热值 (J·g⁻¹)Table 6 *Jatropha curcas* and *Vernicia fordii*'s leaf and stem calorific values (J·g⁻¹) in the same sampling points

采样点 Sampling sites	叶 Leaf		茎 Stem	
	麻疯树 <i>J. curcas</i>	油桐 <i>V. fordii</i>	麻疯树 <i>J. curcas</i>	油桐 <i>V. fordii</i>
许妹 (Xumei)	14917.00±578.29c	15565.33±734.50c	12472.00±991.00b	14259.67±615.01a
喜朝 (Xichao)	15623.33±117.72c	16297.67±445.53bc	12500.67±162.00b	14618.50±569.22a
孔索 (Kongsuo)	15867.00±496.77bc	16464.27±346.37b	14136.27±103.92a	14108.33±657.50a
里外 (Liwai)	16105.33±234.15bc	17512.75±835.13a	14285.00±540.00a	14475.36±718.27a
沙坝 (Shaba)	15435.75±739.20c	15575.67±498.00c	12720.33±918.72b	15036.50±46.50a

et al., 2011; 吴沿友等, 2011; Sinha *et al.*, 2011; Noronha-Sannervik *et al.*, 2003), F_v/F_o 与 F_v/F_m 呈现出一致的变化, 这正印证了两者共同反映光系统 II 潜在的光量子效率的说法。另外, 从表 4、表 5 中看出, 同一地区生长的麻疯树均比油桐拥有更高的 F_v/F_m、F_v/F_o, 说明麻疯树抗低磷胁迫与重碳酸盐胁迫的能力要强于油桐。

2.4 不同生长地区油桐、麻疯树叶、茎中热值的变化

从表 6 中可以看出, 麻疯树与油桐叶热值均比茎热值高。叶片为植物主要光合作用器官, 不同地区麻疯树与油桐叶热值大小表明, 土壤磷含量高, 高重碳酸盐含量低, 则叶片热值大。孔索、里外叶热值高于许妹、喜朝和沙坝, 其中孔索、里外与许妹、沙坝地区植物叶热值的变化趋势与其净光合速率的变化趋势一致。Whittaker(1975)研究认为世界陆生植物的平均去灰分热值为 17790.5J·g⁻¹, 而表中显示麻疯树与油桐的热值均低于陆生植物的平均水平, 说明两者的生长受到低磷和高重碳酸盐胁迫的抑制。

麻疯树叶、茎热值稍低于油桐, 这与其光合、荧光参数均比油桐高的结果相反。虽然麻疯树的抗逆性强于油桐, 但随着土壤磷含量的降低和 HCO₃⁻ 含量的升高, 即随着胁迫的加重, 麻疯树与油桐的生长受到严重抑制, 已不能表现出自身抗逆的优势, 两者的生长完全受到环境的制约。因为随着胁迫的加重, 植物吸收到的营养匮乏, 各项生理功能受到抑制, 营养不能被运输到植物叶片, 从而影响叶片的正常生长, 进而表现出光合能力的减弱, 固定太阳能的

效率降低, 植物叶片热值的减小。但是油桐能够在光合能力以及抗胁迫能力低于麻疯树的情况下, 产生较高于麻疯树的能值, 这或许与其拥有较高的水分利用效率有关, 每消耗单位水分的同时能够同化更多二氧化碳, 产生更多有机质, 积累更多能量。

3 讨论

5 个采样点的土壤磷和 HCO₃⁻ 含量各不同, 土壤磷含量的大小顺序为: 许妹 < 沙坝 < 喜朝 < 孔索 < 里外; 土壤 HCO₃⁻ 含量大小顺序为: 许妹 > 喜朝 > 里外 > 孔索 > 沙坝。其中, 沙坝土壤 pH=7.54, 而其他 4 个地区的 pH 均大于 8。结果显示: 在偏碱性土壤中, 随着土壤磷含量的升高, 麻疯树与油桐的 P_n 均呈逐渐增大趋势, 且差异显著; 同一地区的麻疯树光合能力高于油桐, 且具有更好的抗低磷胁迫的能力。相反地, 随着土壤 HCO₃⁻ 含量的升高, 麻疯树与油桐的 P_n 基本呈下降趋势, 高 HCO₃⁻ 含量下, 麻疯树光合能力与抗胁迫能力也高于油桐。

麻疯树与油桐叶与茎的热值均比正常生长条件下的热值有所降低, 无论麻疯树还是油桐, 热值的变化趋势为随土壤磷含量升高而增加, 随土壤 HCO₃⁻ 含量降低而减小。同等条件下, 虽然油桐抗逆性差于麻疯树, 但其茎叶积累热值高于后者。

总体看来, 土壤磷含量的降低, HCO₃⁻ 含量的升高都会抑制麻疯树和油桐的光合能力, 同时麻疯树表现出相对较好的光合能力, 且麻疯树对低磷和

高重碳酸盐的抗性强于油桐,同时油桐因为光合产能较高,能够产生较多的能值,所以两者都更适合在喀斯特地区种植,并为当地带来较高经济价值。这不仅为实验模拟喀斯特地貌低磷高重碳酸盐特性,研究麻疯树和油桐的抗胁迫能力提供参考,还可以为在贵州省内种植能源植物麻疯树和油桐的经济可行性提供理论依据。

参考文献:

- Cavalli G, Riis T, Beattrup-Pedersen A. 2011. Bicarbonate use in three aquatic plants[J]. *Aquat Bot*, **12**(7):57-60
- Chen X(陈训), Long CC(龙成昌). 2006. Ecological restoration of the karst areas and the strategy of "Establishing Province by Ecological Way"(贵州喀斯特生态恢复与生态立省)[J]. *Guizhou For Sci Tech* (贵州林业科技), **34**(1):27-30
- Gao S(高晟), Wang L(王磊), Xue JH(薛建辉), et al. 2012. The relationship between coverage of herbaceous vegetation communities and soil nutrients in the karst area of Guizhou Province(贵州喀斯特地区草本植被盖度与土壤养分的相互关系)[J]. *J Nanjing For Univ; Nat Sci Edit*(南京林业大学学报·自然科学版), **36**(1):79-83
- Golley FG. 1961. Energy values of ecological materials[J]. *Ecology*, **42**(4):753-757
- He X(何晓), Bao WK(包维楷), Gu B(辜彬), et al. 2007. The characteristic of gross caloric values of higher plants in China(中国高等植物干质量热值特点)[J]. *Ecol Environ*(生态环境), **16**(3):973-981
- Huang FC(黄福长). 2011. Current status of *Vernicia fordii* development at home and abroad(国内外油桐发展现状)[J]. *J Foshan Univ; Nat Sci Edit*(佛山科学技术学院学报·自然科学版), **29**(3):83-87
- Högland M, Hanslin HM, Mortensen LM. 2011. Photosynthesis of *Lolium perenne* L. at low temperatures under low irradiances[J]. *Environ & Exp Bot*, **70**(2-3):297-304
- Jiang YL(姜运力), Wang J(王进), Ding FJ(丁访军), et al. 2006. Study on the plant community in the karst rocky desertification areas in Puding County of Guizhou Province(贵州省普定县喀斯特石漠化地段的植物群落研究)[J]. *Guizhou For Sci & Tech* (贵州林业科技), **34**(1):55-59
- Liu C(刘灿), Li H(李宏). 2012. Comparison of caloric values and ash contents in the four *Populus* L. species(四种杨属植物的热值及灰分含量的比较)[J]. *J Centr S Univ For & Tech*(中南林业科技大学学报), **30**(10):24-28
- Long FL. 1934. Application of calorimetric methods to ecological research[J]. *Plant Physiol*, **9**(2):323-327
- Maes WH, Achten WMJ, Reubens B. 2009. Plant-water relationships and growth strategies of *Jatropha curcas* L. seedlings under different levels of drought stress[J]. *J Arid Environ*, **73**(10):877-884
- Noronha-Sannervik A, Kowalik P. 2003. Annual variations in the solar energy conversion efficiency in a willow coppice stand[J]. *Biom & Bioen*, **25**(3):227-233
- Pan XJ(潘学军), Li DY(李德燕), Zhang WE(张文娥). 2011. Analysis of habitat soil factor of wild *Vitis* plants originated in karst regions in Guizhou Province(贵州喀斯特山区野生葡萄原生境土壤因子分析)[J]. *J Yunnan Agri U*(云南农业大学学报), **26**(4):535-542
- Rao AVRK, Wani SP, Singh P. 2012. Water requirement and use by *Jatropha curcas* in a semi-arid tropical location[J]. *Biom & Bioen*, **39**:175-181
- Shi LR(时丽冉), Cui XG(崔兴国). 2010. Study on photosynthetic properties and water utilization ratio change of *Rudbeckia Hirta* under NaCl stress(NaCl胁迫下地被菊光合生理特性及水分利用率的变化)[J]. *Hubei Agri Sci*(湖北农业科学), **49**(11):2822-2824
- Sinha PG, Saradhi PP, Uprety DC, et al. 2011. Effect of elevated CO₂ concentration on photosynthesis and flowering in three wheat species belonging to different ploidy levels[J]. *Agr Ecosyst & Environ*, **142**(3-4):432-436
- Tang SY(唐仕云), Yang LT(杨丽涛), Li YR(李杨瑞). 2012. Correlation between changes of photosynthetic characteristics of different sugarcane varieties and their cold tolerance under low temperature(低温胁迫下不同甘蔗品种(系)光合特性的变化及其与耐寒性的关系)[J]. *Guihaia* (广西植物), **32**(5):679-685
- Wang CY(王程媛), Wang SJ(王世杰), Rong L(容丽). 2012. The effects of nutrient stress on chlorophyll fluorescence characteristics of *Diplazium pinfaense* (营养胁迫对薄叶双盖蕨叶绿素荧光特征的影响)[J]. *Earth & Environ*(地球与环境), **40**(1):23-29
- Wang R, Song BA, Zhou WW, et al. 2011. A facile and feasible method to evaluate and control the quality of *Jatropha curcas* L. seed oil for biodiesel feedstock: gas chromatographic fingerprint[J]. *Appl Energy*, **88**(6):2064-2070
- Whittaker RH. 1975. *Communities and Ecosystems*[M]. New York: Macmillan; 385
- Wu WG(吴伟光), Huang JK(黄季焜). 2010. Economic feasibility analysis of planting forestry biodiesel raw material *Jatropha Curcas* (林业生物柴油原料麻疯树种植的经济可行性分析)[J]. *Chin Rur Econ* (中国农村经济), **7**:56-63
- Wu YY(吴沿友), Liang Z(梁铮), Xing DK(邢德科). 2011. Comparison of the physiological characteristic paper mulberry (*Broussonetia papyrifera*) and mulberry (*Morus alba*) under simulated drought stress(模拟干旱胁迫下构树和桑树的生理特性比较)[J]. *Guihaia* (广西植物), **31**(1):92-96
- Xing DK, Wu YY. 2012. Photosynthetic response of three climber plant species to osmotic stress induced by polyethylene glycol (PEG) 6000[J]. *Acta Physiol Plant*, **34**(5):1659-1668
- Zhang TS(张天顺), Zhang RK(张汝坤), Xuan WD(玄伟东), et al. 2010. Analysis and research on the preparation of biodiesel from Tungoil (桐油转化生物柴油工艺技术分析与研究)[J]. *J Anhui Agri Sci*(安徽农业科学), **38**(15):8202-8203, 8255