

# 油页岩废渣地 12 种木本植物光合作用的季节变化

黄娟<sup>1</sup> 吴彤<sup>1</sup> 孔国辉<sup>1\*</sup> 陈志东<sup>2</sup> 张进忠<sup>3</sup>

(1 中国科学院华南植物园 广州 510650) (2 茂名石油化工公司 广东茂名 525011)  
(3 广西农业科学院 南宁 530007)

**摘要** 研究了引种在油页岩工业废渣地 12 种木本植物冬、夏季光合作用特征, 根据此评价引种植物的光合效率, 测定的主要参数包括净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )和气孔导度( $G_s$ )。结果表明: 1) 冬、夏季各项测定指标差异很大,  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  均是夏季高于冬季, 而且, 夏季平均  $P_n$ 、 $T_r$  和  $G_s$  值要比冬季均值分别高 60.9%、77.7% 和 85.7%, 但水分利用效率( $WUE$ )却是冬季高于夏季 26.8%~77.2%。2)  $P_n$  日变化节律冬、夏季有异, 夏季较多的种出现“双峰型”, 而冬季较多出现“单峰型”。但也有例外, 樟树(*Cinnamomum camphora*)冬、夏季均出现“单峰”, 油榄仁(*Terminalia bellirica*)、红胶木(*Tristania conferta*)和柚木(*Tectona grandis*)冬、夏季均出现“双峰”; 海南蒲桃(*Syzygium cumini*)则冬季为“双峰”, 夏季为“单峰”。3) 若某一植物种在冬、夏季都表现出有较高的  $P_n$  日均值, 相对于另一种植物其中有一季有较高的  $P_n$ , 说明前者更适应当地环境生长。据此, 以冬、夏季  $P_n$  日均值的平均值高低排序, 评价参试植物在当地自然光照条件下的光合作用效率高低, 树种的排序为: 大叶相思(*Acacia auriculiformis*)、油榄仁、铁刀木(*Cassia siamea*)、云南石梓(*Gmelina arborea*)、柚木、红胶木、樟树、海南红豆(*Ormosia pinnata*)、铁冬青(*Ilex rotunda*)、海南蒲桃、双翼豆(*Peltophorum pterocarpum*)和海南翅萍婆(*Pterygota alata*)。  
**关键词** 光合日变化 净光合速率 水分利用效率 气体交换特征 油页岩废渣

## SEASONAL CHANGES OF PHOTOSYNTHETIC CHARACTERISTICS IN 12 TREE SPECIES INTRODUCED ONTO OIL SHALE WASTE

HUANG Juan<sup>1</sup> WU Tong<sup>1</sup> KONG Guo-Hui<sup>1\*</sup> CHEN Zhi-Dong<sup>2</sup> and ZHANG Jin-Zhong<sup>3</sup>  
(1 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)  
(2 Maoming Petroleum Chemical Company, Maoming, Guangdong 525011, China)  
(3 Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

**Abstract Background and Aims** Phytoremediation is an important method for restoring bare soil or slag; however, the physiological traits of plants used for revegetation are poorly known, even though such traits are important to successful remediation. This study was carried out on oil shale waste in Maoming City, Guangdong Province to screen for tree species with high photosynthetic potential, appraise the ability of these plants to acclimatize to oil shale waste, and provide valuable information for ecological restoration of similar waste sites.  
**Methods** Diurnal variation of photosynthesis was measured for 12 tree species in summer and winter, using portable photosynthetic equipment (LI-6400, LI-COR, Inc., USA). Other parameters such as transpiration, stomatal conductance, relative humidity, etc. were measured simultaneously, and water use efficiency ( $WUE$ ) was calculated as net photosynthesis divided by transpiration.  
**Key Results** There were large seasonal differences in all parameters, with values of net photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance higher in summer than winter (60.9%, 77.7% and 85.7%, respectively), but  $WUE$  higher in winter than in summer (26.8%–77.2%). Diurnal variation of net photosynthesis also exhibited seasonal differences. Many tree species exhibited a bimodal peak in summer and a unimodal peak in winter; however, *Cinnamomum camphora* was unimodal in both seasons; *Terminalia bellirica*, *Tristania conferta*, and *Tectona grandis* were bimodal in both seasons; and *Syzygium cumini* was bimodal in winter and unimodal in summer. Trees with higher mean net photosynthetic rate in both winter and in summer should be more useful for phytoremediation than species with high net photosynthetic rate in only one season. Accordingly, net photosynthetic rate, which synthesizes all parameters examined, should be considered the most important parameter to appraise the ability of plants to acclimatize.

收稿日期: 2005-09-21 接受日期: 2006-03-05  
基金项目: 中国石化茂名石油化工公司(1999-2003)、中国石化集团(2002-2005)和广东省环保局科技开发项目(2001-07)  
\* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: Konggh@scbg.ac.cn  
E-mail of the first author: huangjuan@scbg.ac.cn

**Conclusions** According to mean net photosynthetic rates in both winter and summer, the sequence of photosynthesis efficiency of the 12 tree species tested was: *Acacia auriculiformis*, *Terminalia bellirica*, *Cassia siamea*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Tristania conferta*, *Cinnamomum camphora*, *Ormosia pinnata*, *Ilex rotunda*, *Syzygium cumini*, *Peltophorum pterocarpum* and *Pterygota alata*.

**Key words** Diurnal variation of photosynthesis, Net photosynthetic rate, Water utilization efficiency, Gas exchange, Oil shale waste

在废弃生态系统恢复实践中,植物修复技术是一种十分重要的手段,废弃地生态系统成功恢复与重建极为重要的环节是植被的恢复与重建,植物种类的选择是植被恢复的一个关键环节(宋书巧和周永章,2001)。植物种类的选择是通过其对当地土壤条件的良好适应来作出判断,一般通过其生理状况表现出来,如光合作用、生长速度等。这是因为退化生境环境恶劣,对植物的生长极为不利,而植物的生长速度在退化生态系统的恢复过程中起着重要作用,生长速度快的种类具有很大的优势,对生境的改善作用也更大,而其光合速率是生长速度的一个主要参照指标(刘文彬和管杰,1995),而且光合能力强的树种对即将形成的森林生态系统的贡献也较光合能力弱的种类更大(郭耀纶等,2004)。很多研究亦表明,最先进入退化生境的植物种类,即退化生境中的先锋植物均具有很高的光合能力(Reith *et al.*, 1995; Vera *et al.*, 1999; Krause *et al.*, 2001)。故我们在筛选退化生态系统修复的适生植物种类时,就应充分考虑树种的生长速率及其高的光合能力。本研究中被测树种均是选自通过小规模引种栽培试验,证明能在废渣场的恶劣环境中生长,且较速生的木本植物种类。通过对这些树种冬、夏季的光合作用日变化特征,进一步评价这些树种对环境的适应性,为废岩渣场的生态恢复优良树种的选择提供依据。

## 1 实验地概况和研究方法

### 1.1 实验地概况

茂名市位于广东省西南部,21°25'~22°42' N, 110°21'~111°46' E 间,属亚热带向热带过渡的季风海洋性气候,年平均气温 23.2 °C,1 月平均气温 15.5 °C,极端最低气温 1.7 °C,全年无霜,7 月平均气温 28.4 °C。雨量充沛,年平均降雨量 1 567 mm,其中 4~9 月为雨季,降雨量占全年的 84%,夏秋之间常有台风雨,雨量不均,易出现水涝现象。光照充足,辐射强,年平均日照时数为 1 916 h,最高达 2 237 h。雨热同季,气候条件有利于植物的生长。

实验地在茂名市北郊,距市区 10 km。该废渣

场从 1971 年开始被茂名市石油化工公司用来堆放炼油废渣和剥落土,直到 1993 年才停止堆放。20 余年总堆土  $1.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,形成了一个面积达 6.7 km<sup>2</sup> 的巨大废渣场(夏汉平等,2004)。废渣场的土质低劣,堆置物主要有焦灰渣、灰渣、岩渣和剥离土等,故土壤颗粒大,大于 0.3 mm 的颗粒,在焦灰渣中占 57.24%,在灰渣中占 36%;而且十分贫瘠,除 K 的含量比较高,其它养分都比较缺乏,只有岩渣土中的有机质和有效 N 的含量稍高,废渣的酸度高(pH 值为 3.90~4.59),保水性能极差,并在局部存在一定程度的重金属毒害(刘世忠等,2002)。基质重金属含量如 Cu、Zn、Mn、Ni、Pb、Cd、Cr 等均未超过国家二级标准,但均超过茂名当地土壤环境背景值的中位值,其中 Cd 含量超过了 3.42 倍,而且,由于废岩渣色深容易吸热,夏季在无植被的裸露地面,中午地表温度可达 40 °C(夏汉平等,2000;刘世忠等,2002)。自 1999 年开始对北排废岩渣场进行生态恢复的植物引种试验,先后引种 100 多种原在热带亚热带地区生长较好且具有较强抗旱能力的种类。

### 1.2 研究方法 with 内容

2003 年 12 月下旬(27、28、29 日(冬季))和 2004 年 8 月中旬(14、15 日(夏季))晴朗的天气,对樟树(*Cinnamomum camphora*)、海南翅苹婆(*Pterygota alata*)、铁刀木(*Cassia siamea*)、铁冬青(*Ilex rotunda*)、柚木(*Tectona grandis*)、大叶相思(*Acacia auriculiformis*)、油榄仁(*Terminalia bellirica*)、海南红豆(*Ormosia pinnata*)、双翼豆(*Peltophorum pterocarpum*)、红胶木(*Tristania conferta*)、云南石梓(*Gmelina arborea*)、海南蒲桃(*Syzygium cumini*)等 12 种植物进行光合日变化的测定,测量是选择在晴朗无云日 8:00~17:00 进行,每小时测 1 次。对每种植物随机选择 3~4 株,选择阳生和充分展开的距枝条顶端第四、五片成熟叶进行测定,重复 3~4 次。光合测定仪器采用美国 Li-Cor 公司的 Li-6400 便携式光合测定系统。测定参数主要包括:净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ )、叶温( $T$ )、光合有效辐射( $PAR$ )、大气压( $P_a$ )、大气 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_a$ )以及相对湿度( $RH$ )。用 Microsoft Excel 2002 进行数据统计分

析。

2 结果及分析

2.1 大气主要因子日变化

茂名北排废渣场的环境因子变化在冬季和夏季都有相同的趋势(图1,表1),从早上7:00开始,PAR 迅速升高,夏季测定日在12:00~14:00有一个高峰,PAR 为1 921~1 939  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,13:00有最大值,为1 966  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;冬季测定日的高峰期出现在11:00~13:00,PAR 为1 122~1 224  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,也在13:00有最大值,为1 224  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

$\text{s}^{-1}$ ;一天中 PAR 的最低值均出现在7:00,夏季为199  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,冬季为99  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,而在17:00的 PAR 分别为375  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (夏季)和169  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (冬季)。气温变化在夏季要较冬季慢,测定日夏季的最高温达39.76  $^{\circ}\text{C}$ (14:00),最低温为29.77  $^{\circ}\text{C}$ (17:00);测定日冬季最高温达30.68  $^{\circ}\text{C}$ (13:00),最低温达15.60  $^{\circ}\text{C}$ (7:00)。夏季相对湿度要较冬季高,相对湿度日变化在测定日均是先降后升,夏季最低达42.99%(14:00),冬季最低达16.57%(15:00,气温30.07  $^{\circ}\text{C}$ )。相对湿度在一天中的最低值几乎与气温的最高值同时出现。

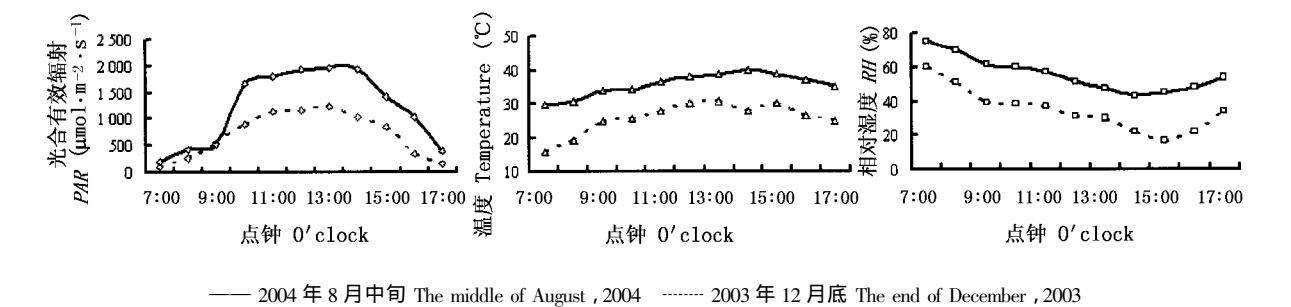


图1 环境因子光合有效辐射、气温及相对湿度的日变化

Fig.1 Diurnal variation of environmental factors, such as photosynthetically active radiation ( PAR ), air temperature ( T ), and relative humidity ( RH )

表 1 油页岩废渣试验地环境参数  
Table 1 Environmental variables on oil shale waste dump

环境参数 Variables	夏季( 8 月中旬 ) Summer ( Middle of August )	冬季( 12 月下旬 ) Winter ( End of December )
光合有效辐射均值 Mean of phobosynthetically active radiation ( PAR )( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1 202	697
最大光合有效辐射 Maximum PAR ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1 966	1 224
气温 Air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	35.60 ± 3.29	25.65 ± 4.65
最高气温 Maximum air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	39.76	30.68
空气相对湿度 Relative humidity ( % )	55.45	34.49
土壤含水量 Soil water content ( % ) ( Mean ± SD )	25.78 ± 0.70	16.55 ± 3.98

2.2 土壤含水量日变化

土壤含水量的变化在雨季和旱季有明显区别(图2,表1),不同时段土壤水分在雨季变化较大,而旱季变化较小,但不同层次土壤的含水量却在雨季变化幅度不大,而旱季变化幅度较大。总得说来,雨季不同时段土壤水分变化不大,含水量在26.25%~25.44%间,7:00与18:00土壤含水量仅差0.81%,旱季一天中的含水量则变动范围更小,在17.63%~18.00%之间,13:00时的含水量最低(17.63%);不同层次土壤含水量变化与季节有关,在雨季各土层

平均含水量的差异不大,为24.61%(10 cm)~29.16%(40 cm),上层(10 cm处)与下层(80 cm,含水量为25.66%)仅差1.05%,旱季各土层的平均含水量变化范围则较大,为7.96%(20 cm)~19.15%(80 cm)。但相对于当地的砖红壤,岩渣的保水性能要较砖红壤好。

2.3 12种引种植物气体交换日变化节律

2.3.1 净光合速率日变化

通过夏、冬两季对植物光合日变化的测定,可以了解植物光合作用的变化规律和对环境的适应情

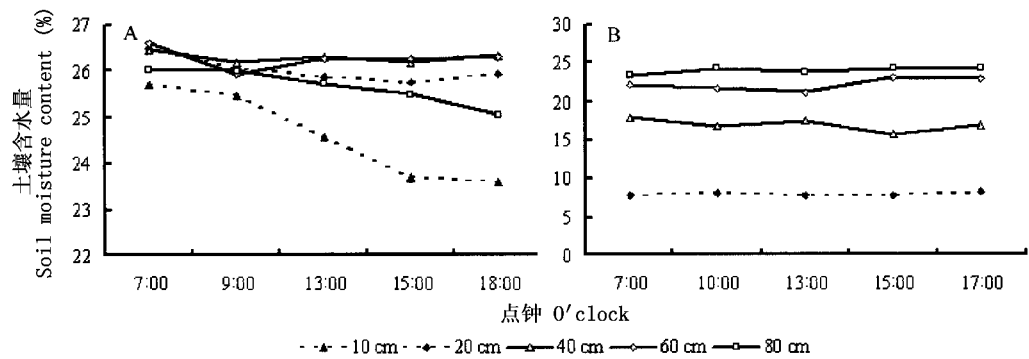


图2 试验地雨季和旱季土壤含水量的日变化

Fig.2 Diurnal variation of soil moisture content in trial place

A 雨季(2004 年 8 月 18 日)含水量 Soil moisture content in rain season( August 18th ,2004) B 旱季(2004 年 12 月 27 日)含水量 Soil moisture content in dry season( December 27th ,2004)

表 2 被试植物在不同季节的净光合速率、水分利用效率及蒸腾速率的日平均值(平均值±标准偏差)

Table 2 Diurnal average value of net photosynthetic rate ( $P_n$ ), water utilization efficiency ( $WUE$ ) and transpiration rate ( $T_r$ ) of plants tested in different seasons (mean ± SD)

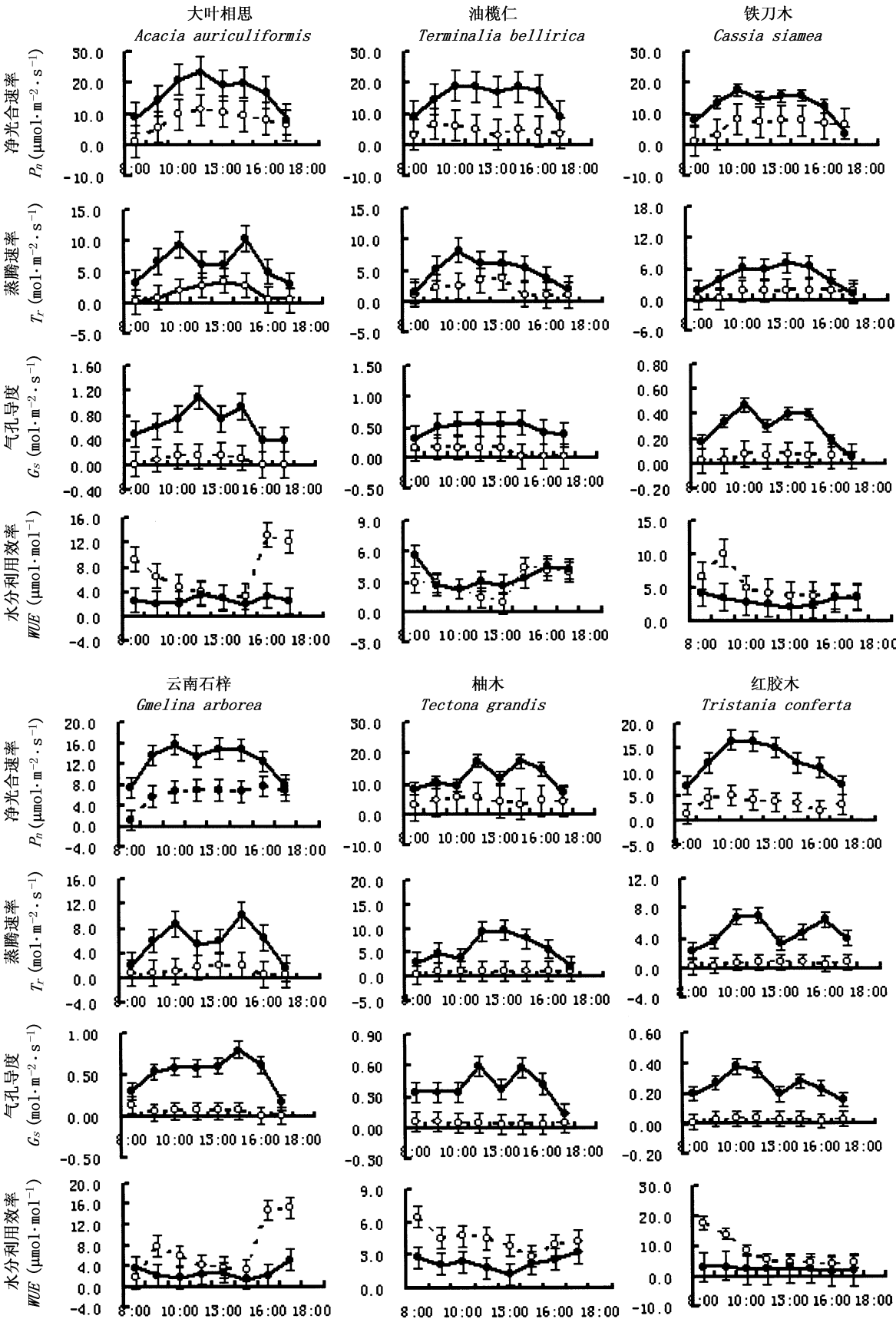
植物种类 Species	净光合速率 $P_n(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$		水分利用效率 $WUE(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$		蒸腾速率 $T_r(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	
	夏季 Summer	冬季 Winter	夏季 Summer	冬季 Winter	夏季 Summer	冬季 Winter
大叶相思 <i>Acacia auriculiformis</i>	16.45 ± 5.25	7.58 ± 2.67	2.71 ± 0.59	8.42 ± 4.18	6.33 ± 2.47	1.33 ± 1.04
油榄仁 <i>Terminalia bellirica</i>	15.50 ± 3.87	4.45 ± 1.53	3.60 ± 1.05	2.78 ± 1.25	4.87 ± 2.08	1.99 ± 1.13
铁刀木 <i>Cassia siamea</i>	12.86 ± 4.38	5.89 ± 2.23	3.10 ± 0.66	4.70 ± 2.19	4.55 ± 2.11	1.41 ± 0.59
云南石梓 <i>Gmelina arborea</i>	12.64 ± 2.95	6.46 ± 1.32	2.65 ± 1.13	9.84 ± 4.89	5.84 ± 2.75	0.92 ± 0.61
柚木 <i>Tectona grandis</i>	12.19 ± 4.00	4.51 ± 0.91	2.31 ± 0.61	4.41 ± 1.03	5.88 ± 2.87	1.07 ± 0.26
红胶木 <i>Tristania conferta</i>	11.40 ± 3.40	3.40 ± 1.35	2.48 ± 0.53	6.31 ± 3.16	4.80 ± 1.68	0.58 ± 0.22
樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	11.28 ± 4.16	2.18 ± 0.84	2.79 ± 0.79	5.47 ± 3.51	4.52 ± 2.21	0.46 ± 0.18
海南红豆 <i>Ormosia pinnata</i>	10.23 ± 1.85	2.07 ± 1.18	3.32 ± 0.46	6.52 ± 2.51	3.15 ± 0.80	0.40 ± 0.28
铁冬青 <i>Ilex rotunda</i>	10.05 ± 3.56	4.66 ± 1.12	1.98 ± 0.63	3.35 ± 1.09	5.72 ± 2.40	1.46 ± 0.42
海南蒲桃 <i>Syzygium cumini</i>	9.49 ± 3.34	5.20 ± 1.92	2.85 ± 1.55	5.38 ± 3.25	4.05 ± 1.84	1.15 ± 0.50
双翼豆 <i>Peltophorum pterocarpum</i>	9.20 ± 3.25	4.70 ± 2.05	2.31 ± 0.79	3.38 ± 0.52	4.67 ± 2.16	1.45 ± 0.68
海南翅萍婆 <i>Pterygota alata</i>	8.45 ± 1.82	3.49 ± 1.16	2.98 ± 2.82	4.36 ± 2.06	4.38 ± 2.23	0.90 ± 0.36

况。被试植物的净光合速率有明显的季节变化和种间差异(图3,图4,表2)。在夏季,被试植物的净光合速率日变化大部分出现“双峰”现象,除樟树和海南蒲桃为“单峰”外,夏季的峰值要较冬季来的早,而冬季大部分被测树种的 $P_n$ 日变化为“单峰”,但油榄仁、红胶木、柚木、海南蒲桃出现“双峰”,但“双峰”并不太明显。夏季的净光合值均要比冬季高出许多,这与植物的生长节律有很大关系,因为夏季是植物生长的旺季,而且水分也起着重要的作用。水分是光合作用的原料之一,水分缺乏会导致光合速率下降(潘瑞炽和董愚得,1984)。

在被测试的12种植物中,夏季和冬季的 $P_n$ 日平均高的种有大叶相思(16.45  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (夏季),7.58  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (冬季,下同))、云南石梓(12.64  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、6.46  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )、铁刀木

(12.86  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、5.89  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )、柚木(12.19  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、4.51  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )和油榄仁(15.50  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、4.45  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。同种植物夏季和冬季 $P_n$ 值差异比较,季节变化较大的种有:油榄仁(夏季比冬季高11.05  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,以下同)、樟树(9.1  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )、大叶相思(8.87  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )、海南红豆(8.16  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )、红胶木(8.10  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )、柚木(7.68  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),其中油榄仁的 $P_n$ 值冬季(4.45  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )明显低于夏季(15.50  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。夏季与冬季 $P_n$ 值变化较小的种有:海南蒲桃(4.28  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )、双翼豆(4.50  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )、海南翅萍婆(4.96  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )和铁冬青(5.39  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。

$P_n$ 日平均值高的种,其 $P_n$ 峰值亦高,按夏季和



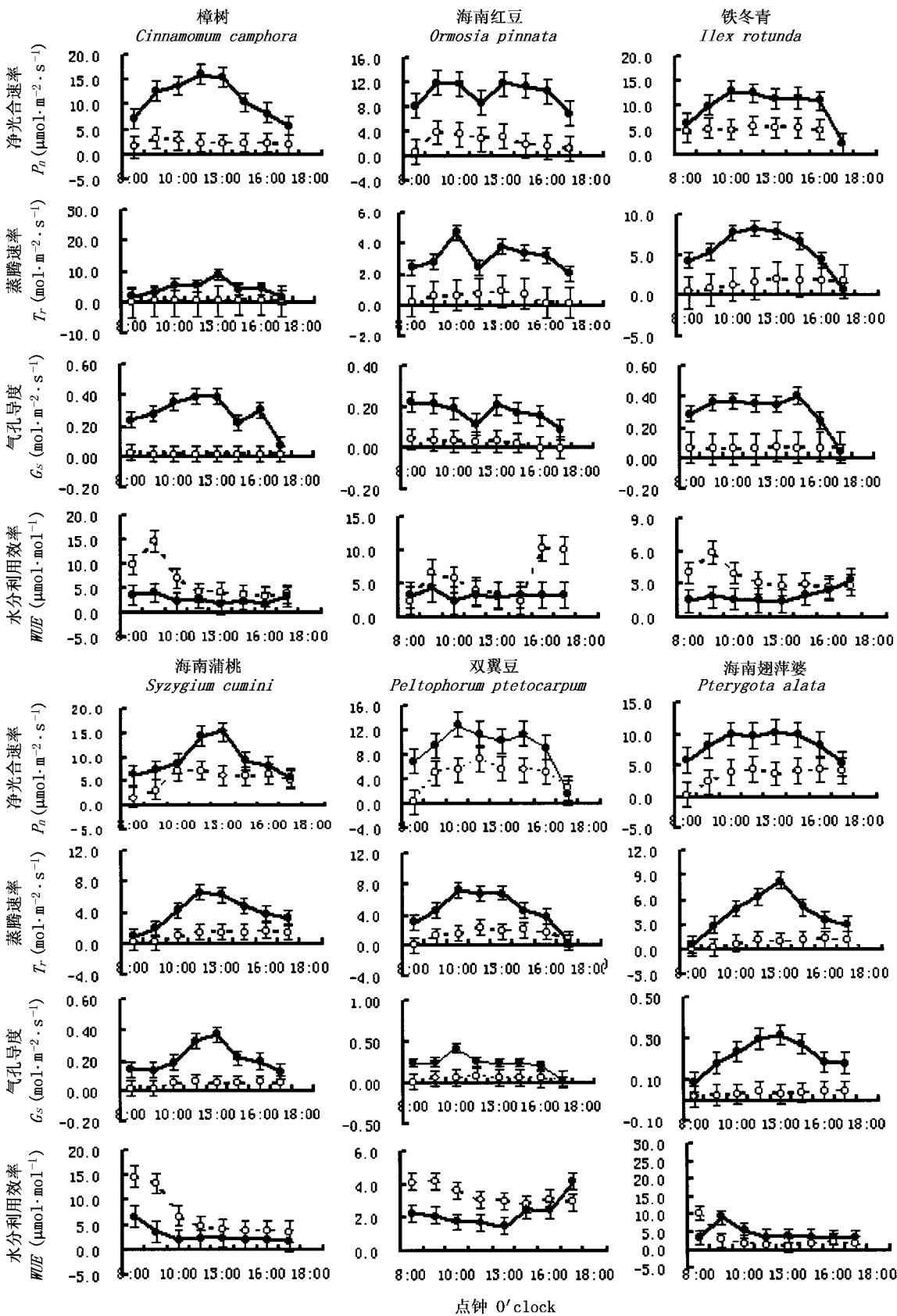


图 3 12 种木本植物的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和水分利用效率的日变化曲线

Fig.3 The curves of diurnal variation of net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), transpiration rate ( $T_r$ ), and water utilization efficiency ( $WUE$ ) of 12 species trees

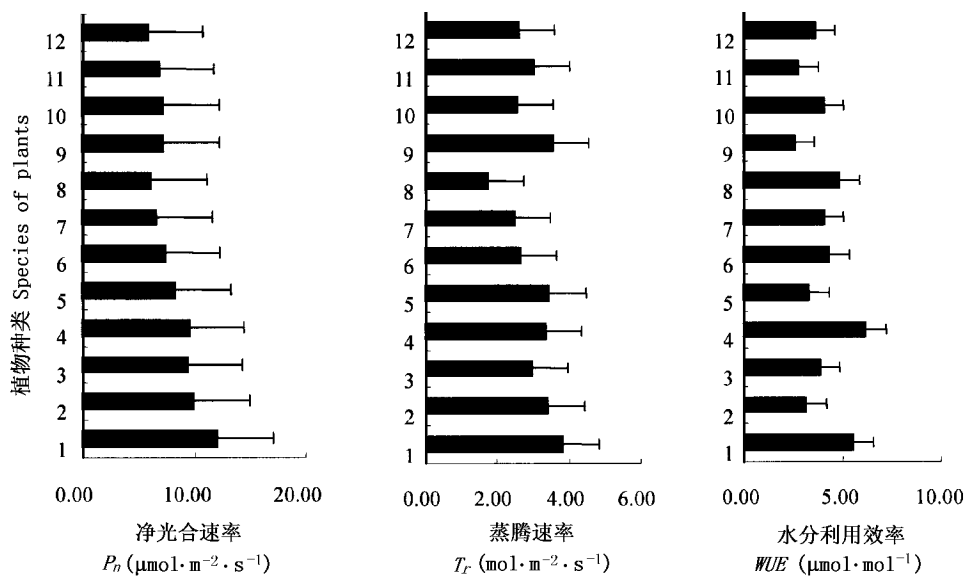


图 4 植物冬夏季净光合速率、水分利用效率及蒸腾速率的均值

Fig.4 The mean values of net photosynthetic rate ( $P_n$ ), water use efficiency ( $WUE$ ), and transpiration rate ( $T_r$ ) of plants in winter and summer  
1 大叶相思 *Acacia auriculiformis* 2 油榄仁 *Terminalia bellirica* 3 铁刀木 *Cassia siamea* 4 云南石梓 *Gmelina arborea* 5 柚木 *Tectona grandis*  
6 红胶木 *Tristania conferta* 7 樟树 *Cinnamomum camphora* 8 海南红豆 *Ormosia pinnata* 9 铁冬青 *Ilex rotunda* 10 海南蒲桃 *Syzygium cumini*  
11 双翼豆 *Peltophorum pterocarpum* 12 海南翅萍婆 *Pterygota alata*

冬季的平均值计算,各被测种  $P_n$  峰值排序,依次为:大叶相思( $23.20\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (夏季), $11.54\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (冬季)以下同),铁刀木( $17.78\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),油榄仁( $18.96\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $6.76\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )云南石梓( $15.78\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $7.75\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )柚木( $17.57\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $5.50\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )红胶木( $16.63\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $5.34\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )双翼豆( $12.87\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $7.29\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )樟树( $16.18\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $3.37\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )铁冬青( $12.93\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $5.91\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )海南红豆( $12.03\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $3.54\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )海南蒲桃( $15.40\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $7.28\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )和海南翅萍婆( $9.72\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $4.40\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。被测植物具有较高的  $P_n$  日平均值及峰值,一方面是与植物种本身特性有关,另一方面亦表明这些种在油页岩废渣基质的恶劣环境中生长具有较强的适应能力。

按照冬、夏两季测定的  $P_n$  日平均值高低来排序,依次为:大叶相思( $12.02\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )油榄仁( $9.98\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )云南石梓( $9.55\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )铁刀木( $9.38\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )柚木( $8.35\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )红胶木( $7.40\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )铁冬青

( $7.36\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )海南蒲桃( $7.35\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )双翼豆( $6.95\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )樟树( $6.73\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )海南红豆( $6.15\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )和海南翅萍婆( $5.97\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) (图 3,图 4)。

具有较高  $P_n$  值和峰值的树种可能与其生物气候适应特性有关。试验地地处热带北缘,属热带季雨林区生物气候带,来自原产地或广泛分布于生物气候特点与试验地气候相似的种,能保持较高的  $P_n$  值。如大叶相思原产澳洲较干热地区,铁刀木原产印度南部及菲律宾,柚木原产纬度  $8^{\circ}45'\sim 25^{\circ}33'$  的爪哇岛及印度中部和缅甸北部(陈存及和陈伙法,2000),广泛分布于世界热带地区。同时也说明这些树种对油页岩废渣为基质的恶劣环境具有较强的适应能力。

2.3.2 水分利用效率日变化

$WUE$  是指植物消耗单位水分所生产的同化物质的量,本文采用瞬时水分利用效率即净光合速率与蒸腾速率的比值来求得。植物冬季的  $WUE$  值均要高于夏季,显示植物在冬季的水分利用效率要高于夏季(表 2,图 3,图 4)。被测植物  $WUE$  一天中的变化节律,以夏季为例,可分为 4 种类型(图 3,图 4,表 3)。

A:平缓起伏,峰谷不明显。如云南石梓、大叶相思、海南红豆、红胶木和樟树,前两者冬季在 12:00

后均明显升高。除樟树外,冬夏季  $WUE$  日平均值居 12 种树种中的前列,分别为 6.25、5.56、4.92 和 4.40  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

B:起伏大,峰谷明显。7:00~8:00 和 14:00~18:00 出现峰值,11:00~13:00 时有明显低谷。如柚木、橄榄仁,其冬夏季  $WUE$  日平均值较低,分别为 3.36 和 3.19,但有较高的冬夏季  $P_n$  日平均值,分别为 8.35 和 9.98  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

C:渐降型。一天中以 7:00~8:00 时的  $WUE$  值最高,以后逐渐降低,如海南蒲桃(4.12  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )、铁刀木(3.90  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )和海南翅萍婆(3.67  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )。

D:渐升型。一天中自 7:00~8:00 时开始, $WUE$  逐渐升高,至 18:00 达最高值,如双翼豆(2.85  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )和铁冬青(2.67  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),冬夏季  $WUE$  日平均值在 12 种中居最低值,其冬夏季  $P_n$  日平均值也较低,分别为 6.95 和 5.97  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 3 讨 论

#### 3.1 冬、夏季气体交换特性差异原因

被试植物均是初步筛选能适应废渣场恶劣环境的种类,比较它们不同季节的光合日变化发现,光合参数均有很大的季节差异。被试植物  $WUE$  值均是夏季低于冬季,而  $P_n$ 、 $T_r$  和  $G_s$  则是夏季显著高于冬季,并且大部分树种这三者之间有相似的变化,只有云南石梓冬季的  $G_s$  和  $T_r$  在上午出现了峰值,与  $P_n$  不相吻合。而且,夏季大部分植物的  $P_n$  日变化均出现“双峰”,但樟树和海南蒲桃为“单峰”,而在冬季,被试植物  $P_n$  日变化一般为“单峰”,也有一些例外,如橄榄仁、红胶木和柚木  $P_n$  日变化为“双峰”,与夏季相同,而海南蒲桃在冬季却为“双峰”,与夏季相反。这些植物如海南蒲桃, $P_n$  日变化是废渣场的恶劣环境因素的影响,还是测定时的天气情况影响?也可能与树种有关,但不能明确,还有待做进一步的研究。

#### 3.2 对引种种光合特性的综合评价

在选择废弃地生态恢复的先锋树种时,人们不再仅仅考虑废弃地的物理因素以及气候因子对选择树种的限制,也考虑当地人们对树种的喜好程度以及该树种的经济价值。Kabir 和 Webb(2005)等就把这些选择树种的因子分别归结为树种的生物物理适应性和社会适应性。这些先锋树种的进一步筛选,还要参考其生长指标和生理指标。但是,现今在评价树种的适应性时,一般只把树种的生长测定指标

来作为评价参数,如树高、基径、胸径、生物量等(Kumar *et al.*, 1995; Jha, 1992; Singh & Singh, 1999),而光合参数则很少作为重要的考虑因子,可能是树种的光合测定比较麻烦,而且也不容易,特别是在恢复较好的生态系统中,要测定那些高大的乔木的光合参数可得要花费一番很大的精力和功夫,但是,光合指标却简单明确,而且能较迅速得出结果,相对于测定植物的生物量来说,对其破坏和所消耗的劳动量均较少,故可作为树种评价的一个值得重视的参数。而在作物选种方面,光合参数则很受重视,如人们对水稻的选种时,不但考虑生长率、干物质产量,还常考虑光合能力、各生长时期的光合速率(匡廷云, 2004)。本试验就是从经过生长指标初步筛选能适应油页岩废渣场的恶劣环境、并生长较好的植物种类中,通过光合测定来进一步筛选高光合能力的树种。

这些供试植物在废渣场恶劣的环境中,均表现出较强的光合能力和较高的净光合速率。从它们夏、冬两季的气体交换指标可以得出,夏季植物的  $P_n$  值较高,因夏季为植物生长旺季,所以把被试植物夏季的  $P_n$  均值排序为:大叶相思、橄榄仁、铁刀木、云南石梓、柚木、红胶木、樟树、海南红豆、铁冬青、海南蒲桃、双翼豆和海南翅萍婆。其中,豆科植物大叶相思,在冬季和夏季均具有最高的  $P_n$ ,而且其  $WUE$  也较高,故可认为大叶相思为当地最适生的树种,此外,云南石梓、铁刀木、红胶木同时亦具有较高的  $P_n$  和  $WUE$ ,海南红豆和海南蒲桃在 12 种植物中  $P_n$  虽较高,但有较高的  $WUE$ ,表明它们较耐旱,适应在干旱的废岩渣地生长。

#### 3.3 岩渣地适生树种综合评价的指标分析

油页岩废渣环境十分恶劣,要评价那些能适应于废渣场的树种来说,仅仅看其生长指标和光合指标还是远远不够的。人们利用植物修复废渣场达到 3 个主要目的,一是改变恶劣的景观,二是要净化改良污染的基质环境,三是能为当地人们带来一定的经济效益。因此,首先要求引种植物能生长发育正常,能在恶劣基质环境中持续生长,还具速生特性使其能快速有效地改良恶劣环境的各项综合指标,其次考虑当地人们对树种的喜好及树种能创造的经济价值。如本试验植物中的外来种大叶相思,虽木材弯曲,木质不便加工,其生长旺盛期仅约 20 年,但因为它生长迅速这一优点,被选为矿区迅速复绿的优良先锋树种。如以树型外观的优美、主干明显、速生来评价引种植物,海南红豆、红胶木、海南蒲桃和



油榄仁则更为可取,柚木、双翼豆速生、主干明显,也是岩渣地优质的材用树种。先锋树种对环境的适应能力和净化能力至关重要,也是评价树种的第一指标,只有在植物能适应恶劣环境生长的基础上,才兼而考虑筛选具有更多种用途的树种。

#### 4 结 论

1) 光合速率能显示植物的光合能力,即在相同条件下,高光合速率的植物有更强的光合能力和对环境的适应能力。故以净光合速率的高低来筛选树种,根据冬夏季净光合速率日均值排序,依次为:大叶相思、油榄仁、云南石梓、铁刀木、柚木、红胶木、铁冬青、海南蒲桃、双翼豆、樟树、海南红豆和海南翅萍婆。

2) 水分利用效率显示植物有效利用水分的能力,即在相同条件下,水分利用效率高的植物的抗旱能力强。故以冬夏季水分利用效率日均值的高低来为供试植物排序:云南石梓、大叶相思、海南红豆、红胶木、樟树、海南蒲桃、铁刀木、海南翅萍婆、柚木、油榄仁、双翼豆和铁冬青。

对于废渣场的树种筛选来说,那些既有高的光合速率又有高的水分利用效率的种类才是最佳选择。但因为该油页岩废渣场的保水性较好,对土壤水分测定,废渣的贮水、保水性能力均比当地的砖红壤强。所以在筛选树种时,应着重考虑光合能力高的种类,其次才是水分利用高的种类。

#### 参 考 文 献

Chen CJ(陈存及), Chen HF(陈伙法) (2000). *Broadleaved Tree Species Planting* (阔叶树种栽培). Chinese Forestry Publishing House, Beijing, 315. (in Chinese)

Guo YL(郭耀纶), Fan KX(范开翔), Huang CW(黄慈薇), Li YP(李彦屏), Wu HL(吴惠纶), Cai RF(蔡瑞芬) (2004). Gas exchange potential in sun-exposed leaves of 30 broadleaf tree species in Taiwan. *Taiwan Scientia Silvae Sinicae* (台湾林业科学), 19, 375 – 386. (in Chinese with English abstract)

Jha AK (1992). Evaluation of coal mine spoil as a medium for plant growth in a dry tropical environment. *Indian Forester*, 118, 909 – 916.

Kabir ME, Webb E (2005). Productivity and suitability analysis of social forestry woodlot species in Dhaka Forest Division, Bangladesh. *Forest Ecology and Management*, 212, 243 – 252.

Kuang TY (匡廷云) (2004). *Photosynthetic Efficiency of Crops and Its Regulations* (作物光能利用效率与调控). Shandong

Science and Technology Press, Jinan, 306 – 311. (in Chinese)

Kumar S, Bisht NS, Bao RN (1995). Afforestation of lateritic pans of Goa-a case study. *Indian Forester*, 121, 176 – 178.

Krause GH, Koroleva OY, Dalling W, Winter K(2001). Acclimation of tropical tree seedlings to excessive light in simulated tree-fall gaps. *Plant, Cell and Environment*, 24, 1345 – 1352.

Liu SZ(刘世忠), Xia HP(夏汉平), Kong GH(孔国辉), Deng ZP(邓钊平), Ke HH(柯宏华), Li LH(李丽华), Tan P(谭鹏) (2002). The soil and vegetation of oil shale waste dump in Maoming city, Guangdong Province. *Ecologic Science* (生态科学), 21, 25 – 28. (in Chinese with English abstract)

Liu WB(刘文彬), Guan J(管杰) (1995). A physio-ecological study on three typical plants in the restoration process of a degraded ecosystem. *Proceedings of the First National Symposium on the Conservation and Sustainable Use of Biodiversity* (首届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集). Chinese Scientific and Technology Press, Beijing. (in Chinese with English abstract)

Pan RC(潘瑞炽), Dong YD(董愚得) (1984). *Plant Physiology* (植物生理学) 2nd edn. Higher Education Press, Beijing, 73 – 111. (in Chinese)

Reith PB, Ellsworth DS, Uhl C(1995). Leaf carbon and nutrient assimilation and conservation in species of differing status in an oligotrophic Amazonian forest. *Functional Ecology*, 9, 65 – 76.

Schulze ED, Hall AE (1982). Stomatal responses, water loss and CO<sub>2</sub> assimilation rates of plants in contrasting environments. In: Lange OL, Nobel PS, Osmond CB, Ziegler H eds. *Physiological Plant Ecology II*. *Encycle Plant Physiol(NS)* Vol 12B. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 181 – 230.

Singh AN, Singh JS (1999). Biomass, net primary production and impact of bamboo plantation on soil redevelopment in a dry tropical region. *Forest Ecology and Management*, 119, 195 – 207.

Song SQ(宋书巧), Zhou YZ(周永章) (2001). Mining wasteland and its ecological restoration and reconstruction. *Conservation and Utilization of Mineral Resources* (矿业保护与重建), 5, 43 – 49. (in Chinese with English abstract)

Vera NE, Finegan B, Newton AC(1999). The photosynthetic characteristics of sapling of eight canopy tree species in a disturbed neotropical rain forest. *Photosynthetica*, 36, 407 – 422.

Xia HP(夏汉平), Huang J(黄娟), Kong GH(孔国辉) (2004). Ecological restoration of oil shale waste dumps. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 24, 2887 – 2893. (in Chinese with English abstract)

Xia HP(夏汉平), Kong GH(孔国辉), Ao HX(敖惠修), Liu SZ(刘世忠) (2000). Comparison of four herbaceous plants in Pb and Cd uptake from oil shale waste residual derived soil. *Rural Eco-Environment* (农村生态环境), 16(4), 28 – 32. (in Chinese with English abstract)