

石灰改良油页岩废渣对 4 种植物叶片光合及有关特性的影响¹

黄娟^{1,2}, 夏汉平², 孔国辉²

1 上海大学环化学院环境污染与健康研究所, 上海 (200072)

2 中国科学院华南植物园生态研究所, 广州 (510650)

E-mail: lotus-hj@shu.edu.cn

摘要: 选取对油页岩废渣有较强适应能力的 4 种植物红胶木(*Tristania conferta*), 红荷木(*Schima wallichii*), 香根草(*Vetiveria zizanioides*)和百喜草(*Paspalum notatum*)为实验对象, 以普通赤红壤作对照, 研究油页岩废渣(岩渣)与添加石灰改良后的岩渣对植物叶片光合及有关特性的影响。研究表明: 在岩渣上生长的 4 种供试植物中, 红荷木、香根草和百喜草的净光合速率较对照相比均急剧下降, 光合潜能减弱; 但红胶木与对照相比, 其净光合速率反而增加, 这是它采取的一种主动抵抗不良环境的手段, 即利用高光合作用来增加同化能力, 以提供更多的能量来弥补胁迫对其产生的危害, 故, 在利用植物修复技术来改良油页岩废渣时, 红胶木应推为首选植物。岩渣经过石灰改良后, 4 种植物在其中生长所受的胁迫均减轻, 尤其是红胶木, 其净光合速率与光合潜能均与对照相差不大; 表明石灰改良岩渣, 能使植物在岩渣中较好的生长, 但植物种类不同, 其生长状况的改善有较大的差异。岩渣中存在多种胁迫或毒害因子, 而强酸胁迫对植物的危害最为明显, 而且强酸环境还能加剧岩渣的铝毒害。故, 在对岩渣进行植物修复时, 改良岩渣性状, 尤其是改良其强酸环境, 应得到足够的重视和加强。总的说来, 4 种供试植物对岩渣的适应能力为: 红胶木 > 百喜草 > 香根草 > 红荷木。

关键词: 油页岩废渣, 光合日变化, 光合潜能, 石灰改良, 土壤酸度

1. 前言

油页岩被开采与提炼后留下大量废渣, 废渣的堆放形成了废渣场。中国石化集团茂名石油化工有限公司就曾以大量开采油页岩来提炼石油, 结果提炼所形成的废渣被堆放在茂名市郊, 形成了南北 2 个巨大的废渣堆放场。其中, 茂名北排土场位于茂名市北郊, 是从 1971 年开始被茂名石化公司用来堆放炼油废渣和剥落土的, 直至 1992 年才停用。20 余年总共堆渣 $1.56 \times 10^8 \text{ m}^3$, 形成了一个面积达 6.7 km^2 的巨大堆放场^[26]。废渣场的土质低劣, 酸度高, 保水性能差, 并在存在一定程度的铝(Al)毒和重金属毒害, 这使得废渣场的生境十分恶劣, 植物很难在其中成活或定居。调查表明, 废渣堆放 10 yr 后, 除自然生长了一些耐旱耐瘠的草本植物, 如画眉草(*Eragrostis spp.*)、竹节草(*Chrysopogon aciculatus*)、雀稗(*Paspalum spp.*)等, 废渣场上不见乔木, 也极少有灌木^[12, 25]。因此, 废渣场自然恢复的难度极大, 即使开展人工恢复, 也要采取一定的基质改良措施^[26]。

对油页岩废渣场的生态恢复是一项相对长期、艰巨的任务。从 1999 年对该废渣场进行植物修复以来, 相关的各项跟踪调查与研究一直在进行。为了筛选适应废渣场生长的优势植物种类, 除了每年对其进行植物形态观察外, 还经常选取一定的树种进行生理生态等方面的观测, 以便为优势植物的生态适应性提供理论依据。例如, 刘惠等^[11]在该废渣场野外测定了 35 个引种植物的叶片光合参数, 并着重研究了青梅(*Vatica nangachapoi*), 海南红豆(*Ormosia pinnata*)和非洲桃花心木(*Khaya senegalensis*)三个树种的光合能力, 结果表明海南红豆和非洲桃花心木比青梅具有更强的生态适应性。张进忠等^[31]也在此对翅荚决明(*Cassia alata*)和乌墨(*Syzygium cumini*)进行了光合日变化和光响应曲线的测定, 并与对照区的同种植

¹本课题是广东省环境保护局科技研究开发项目(2001-07), 并得到中国石化集团茂名石油化工有限公司的资助。

物的光合日变化进行了对比,发现乌墨对油页岩废渣的适应能力要高于翅荚决明。黄娟等^[6]还对在废渣场生长的 13 种植物进行了光合日变化的测定,筛选出一批能较强适应油页岩废渣的优势植物种类。但以上研究都只是从选择适生植物种类来进行观测,并未对恶劣的基质采取任何改良措施,因而很难从根本上达到使废渣场得以生态恢复的目的。

油页岩废渣是一种强酸性基质,而且,其中还含有高浓度的活性铝和其它重金属元素,故其基质组成成分十分复杂^[9, 26]。对土壤中铝^[13]、砷毒害^[19]及 Cu^[14]等金属和非金属影响植物光合特性的研究均有报道,研究酸性环境中植物的光合生理^[22],尤其是现今十分热门的酸沉降及酸雨环境中植物的生理变化有很多报道^[15-17],而对生长在基质成分十分复杂的环境(如油页岩废渣)中的植物及其生理方面的研究,少见报道^[6, 11, 31]。本实验选取对油页岩废渣有较强适应能力的 4 种植物为实验对象,利用石灰作改良剂来改变岩渣的强酸环境,从而探讨石灰对岩渣的改良效果。石灰对油页岩废渣基质的改良已有相关报道^[7],但迄今尚未见到有关石灰改良废渣后植物叶片气体交换特性等生理生态响应。对此,本文在前文(黄娟等, 2007)^[7]基础上,进一步探讨石灰改良的油页岩废渣对植物光合生理特性等方面的影响,以期油页岩废渣场的植物修复理论的生理生态适应机理提供理论依据,也为适生植物种类的筛选提供科学依据。

2. 实验材料及方法

2.1 供试材料

在油页岩废渣场对 60 多种植物观测 4 年后,选择确定以下 4 种代表性植物为本实验的供试植物:红胶木(*Tristania conferta* R. Br.)、红荷木(*Schima wallichii* Choisy)、香根草(*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash)和百喜草(*Paspalum notatum* Persl.)。其中前两种为木本植物,均为乡土速生种类,常被选为热带与亚热带地区退化生态系统恢复实践中的先锋树种;后两种为草本植物,在油页岩废渣场生长良好,都具有很强的抗逆性和广泛的适应性,较多地被用于水土保持、固土护坡和矿区退化生态系统的植被恢复^[27]。4 种植物在油页岩废渣场均表现出较强的适应性与抗逆性。

试验所用的土壤基质为油页岩废渣和赤红壤。其中岩渣采自茂名北排土场,然后运至中国科学院华南植物园;赤红壤采自华南植物园的“百草园”。它们的基本性状见表 1^[7]。

表1 供试土壤的基本理化性质
Table 1 Basically physical and chemical properties of soil samples

土壤基质 Soil substrate	pH	有机质 Organic matters (g·kg ⁻¹)	水解 N Hydrolytic N (mg·kg ⁻¹)	有效 P Available P (mg·kg ⁻¹)	速效 K Available K (mg·kg ⁻¹)	活性 Al Active Al (g·kg ⁻¹)
岩渣 Oil shale waste	3.72	82.2	27.7	4.23	315.5	3.85
赤红壤(对照) Lateritic soil (CK)	6.32	13.1	57.5	10.7	22.2	0.81

2.2 试验设计与布置

采用盆栽的方法开展实验,在华南植物园的“百草园”内进行。实验用的塑料盆上口径为 31cm,底部内径为 30 cm,高 31 cm。塑料盆摆放在一个挡雨棚内,棚顶用半透明的玻璃瓦覆盖。实验设计 2 个不同基质处理:处理 1 为油页岩废渣(岩渣),处理 2 是施加石灰使 pH

值达到 6 的油页岩废渣。2 个处理都是每盆装岩渣 20 kg, 其中处理 2 是在岩渣中再均匀混合含 0.1 kg 石灰的水溶液而成。经实验室进行多次测定, 每 100 g 岩渣平均添加 0.5 g 石灰可使其 pH 值达到 6, 并能保持平衡稳定, 故每盆装岩渣 20 kg 时添加石灰 0.1 kg。另设 1 个为普通赤红壤的对照基质, 每盆亦装土 20 kg。试验苗木中红荷木、红胶木取自苗圃地当年培育苗, 每盆栽种幼苗 1 株; 香根草和百喜草均取自“百草园”, 种植前二者的根均剪至 5 cm、茎叶亦剪至一定长度, 香根草每盆栽种 3 株, 百喜草每盆 2 株, 浇足定根水。试验全过程各处理管理措施均保持一致, 包括淋水与松土等。所有处理均为 5 个重复, 总计 60 盆 (3 种基质×4 种植物×5 个重复)。

2.3 观测内容与方法

试验于 2004 年 2 月 29 日布置, 6 月底的晴天进行观测。选取植株中上部、南向枝条上部第 3-4 叶位上充分展开的成熟功能叶进行测定^[4]。各测定参数分别选取 4 种苗木各 5 株, 每株记录 5 个观测值, 计算时取平均值。试验测定前一天浇足水, 以减除水分因子影响。

光合作用参数采用美国 Li-cor 公司生产的 Li-6400 便携式光合仪测定, 用红蓝光源控制光合有效辐射强度, 测定如下指标: 净光合速率(Pn), 气孔导度(Gs), 胞间 CO₂ 浓度(Ci), 蒸腾速率(Tr)。光合日进程测定在自然状况下, 从 7:00-19:00, 每隔 2 h 测定一次。光响应曲线测定时, 光量子密度(PFD)梯度为 0、20、40、60、80、100、120、200、500、800、1000、1200、1500、1800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。净光合速率-光响应曲线在低光强下(0-200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)的值进行线性回归, 该直线的斜率即表观量子效率(Apparent quantum yield, AQY), 与 x 轴的交点为其光补偿点(Light compensation point, LCP)^[28]; 在不同光照水平测定中出现的最高 Pn 值为某种植物的最大净光合速率(Maximum net photosynthetic rate, Pmax), 若 Pmax 出现后, 植物的光反应曲线中后续测定的 Pn 值下降, 则可确定此前测定的 Pmax 即为该种植物的光饱和时的 Pn 值, 此时的 PAR 即为光饱和点(Light saturation point, LSP)。空气中的光照强度(PAR), 相对湿度(RH)及大气温度(T)也利用 Li-6400 进行测定。

2.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 11.0 软件进行数据处理及分析。

3. 结果及分析

3.1 气体交换参数日变化

(1) 环境因子与变化

从图 1 可知, 测定日最高气温在中午 13:00-14:00 左右, 达 40 °C 以上; 光合有效辐射的最高值与最高气温同时出现, 在 13:00-14:00 左右时达 1400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上; 空气湿度与二者的变化刚好相反, 即随着光合辐射和气温的升高而下降。一天中清晨的相对湿度最高, 达 66.54%; 午后最低, 15:00 时仅为 28.17%, 而后又有所升高。

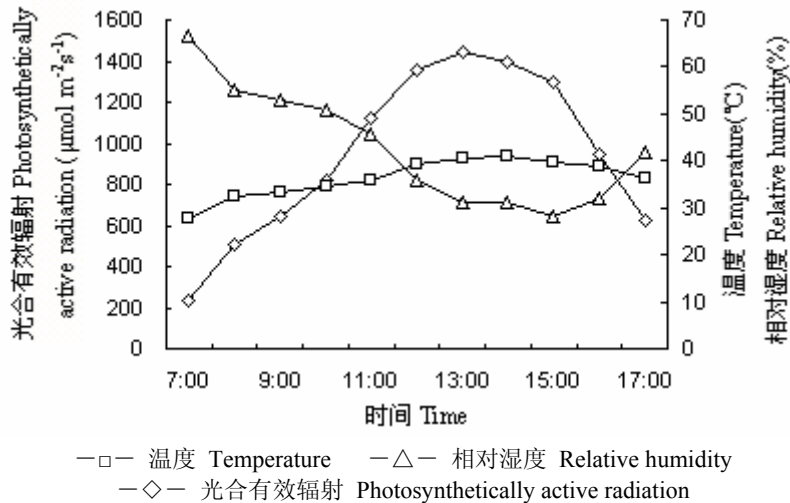


图1 盆栽实验地周围环境因子的日变化
Fig. 1 Diurnal changes of environmental factors in the place for potted plants tested

(2) 净光合速率日变化及变化

从图 2 中可知, 处理 1(岩渣)红胶木的净光合速率(Pn)日变化出现“双峰”变化, 其峰值分别为 13.80 (11:00)和 11.58 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (15:00), 其 Pn 均比处理 2(岩渣+石灰)和 CK (赤红壤)的高; 而处理 2 和 CK 均未见特别明显的双峰变化。红荷木的光合日变化在处理 1 中有明显的“双峰”, 峰值分别为 6.15 (9:00)和 4.29 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (17:00); 而处理 2 和 CK 的光合日变化只在上午 9:00 出现了峰值, 分别为 11.48 和 9.86 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。香根草的光合日变化只在 CK 出现了双峰, 而处理 2 和处理 1 的峰值只有单峰变化(图 2)。至于百喜草的光合日变化, 只有处理 2 出现了“双峰”曲线, 而 CK 与处理 1 中均未见“双峰”变化。

至于供试植物 Pn 的日均值(表 2), 红胶木的 3 个处理呈现为处理 1>CK>处理 2, 而红荷木和香根草均是 CK 最高, 百喜草则是处理 2 最高。图 2 显示, 红胶木和百喜草在处理 2 和 CK 中的净光合日变化曲线较为接近, 但红荷木和香根草却呈现较明显的差异。对 4 种供试植物的光合日均值的比较发现, 岩渣处理的红胶木和百喜草分别均高于相应处理的红荷木与香根草(表 2)。结合这 4 种植物的生长指标及生物量的测定, 进一步证明了在以油页岩废渣为生长基质时, 红胶木是较红荷木更为适宜的种类, 百喜草是较香根草更为适宜的种类^[7]。

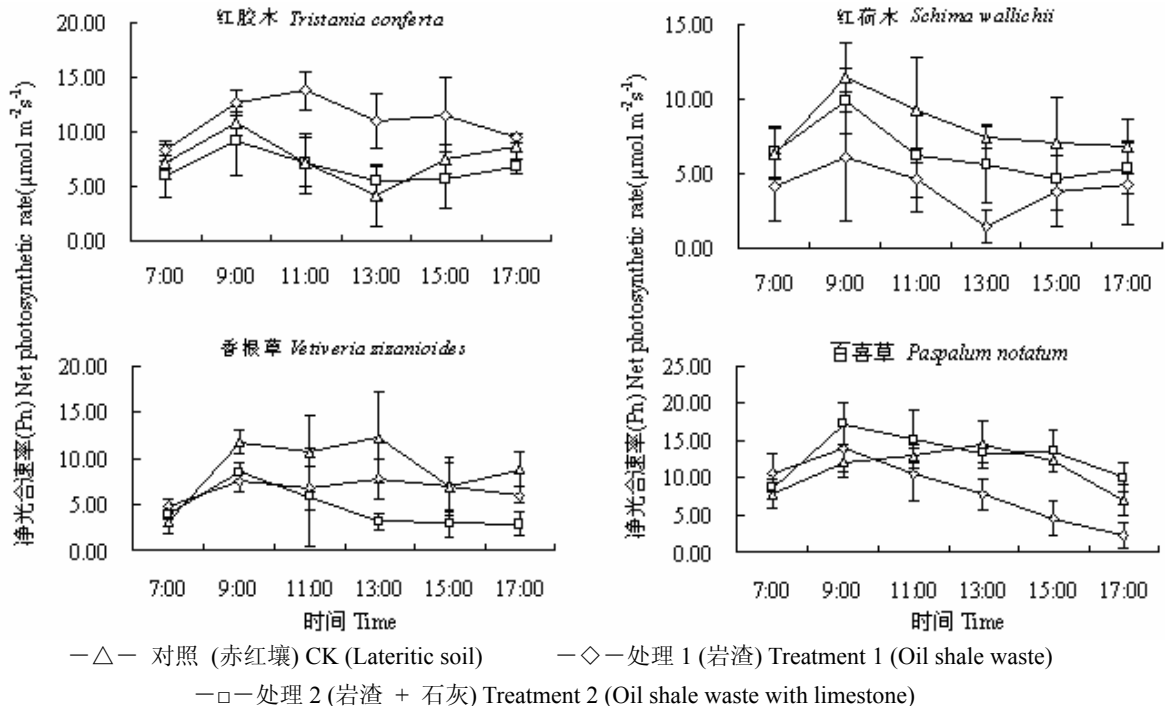


图2 供试植物叶片净光合速率日变化
 Fig. 2 Diurnal courses of net photosynthetic rates in leaves of plants tested

表2 被测植物叶片气体交换参数日变化均值(平均值±标准差)
 Table 2 The average values (Mean ± SD) of gas exchange parameters in leaf of plants tested

植物种类 Species	处理 Treatment	净光合速率 Pn ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 Gs ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Tr ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	水分利用效率 WUE ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	净光合速率与气孔导度的相关性 Correlations between Pn and Gs
红胶木 <i>Tristania conferta</i>	对照 CK	7.57±2.17	0.05±0.05	1.32±0.96	8.09±5.12	0.47
	岩渣 Oil shale waste	11.13±2.03	0.13±0.06	3.43±1.59	4.30±2.63	0.45
	岩渣+石灰 Waste with limestone	6.73±1.40	0.05±0.04	1.55±0.9	10.06±14.74	0.64
红荷木 <i>Schima wallichii</i>	对照 CK	8.07±1.95	0.10±0.03	2.44±1.00	4.53±3.46	0.78
	岩渣 Oil shale waste	4.08±1.51	0.06±0.02	1.53±0.62	3.34±2.43	0.88**
	岩渣+石灰 Waste with limestone	6.36±1.82	0.09±0.02	2.31±0.7	3.34±2.13	0.92**
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	对照 CK	8.86±3.46	0.10±0.03	3.09±1.56	3.55±1.78	0.93**
	岩渣 Oil shale waste	6.62±1.10	0.04±0.02	1.50±0.71	6.77±1.74	-0.42
	岩渣+石灰 Waste with limestone	4.52±2.20	0.06±0.01	2.28±1.16	2.50±1.71	0.58
百喜草 <i>Paspalum notatum</i>	对照 CK	8.27±4.32	0.06±0.03	1.92±1.17	5.25±3.15	0.95**
	岩渣 Oil shale waste	11.10±2.98	0.07±0.01	2.28±0.67	5.16±1.09	0.10
	岩渣+石灰 Waste with limestone	12.99±3.17	0.09±0.03	2.95±1.19	5.07±2.04	0.68

**极显著相关性($p < 0.01$)。Correlation is significant at $P = 0.01$ level ($n = 6$)

处理 1 的生长基质为未添加石灰的油页岩废渣, 其 pH 值特别低, 且活性铝含量高(表 1), 对植物的生长存在较大的潜在胁迫, 故生长在岩渣中的植物, 净光合值应较低, 如香根草和红荷木。但红胶木在处理 1 中的光合速率值却最高, 百喜草在处理 1 中的也较高, 只是

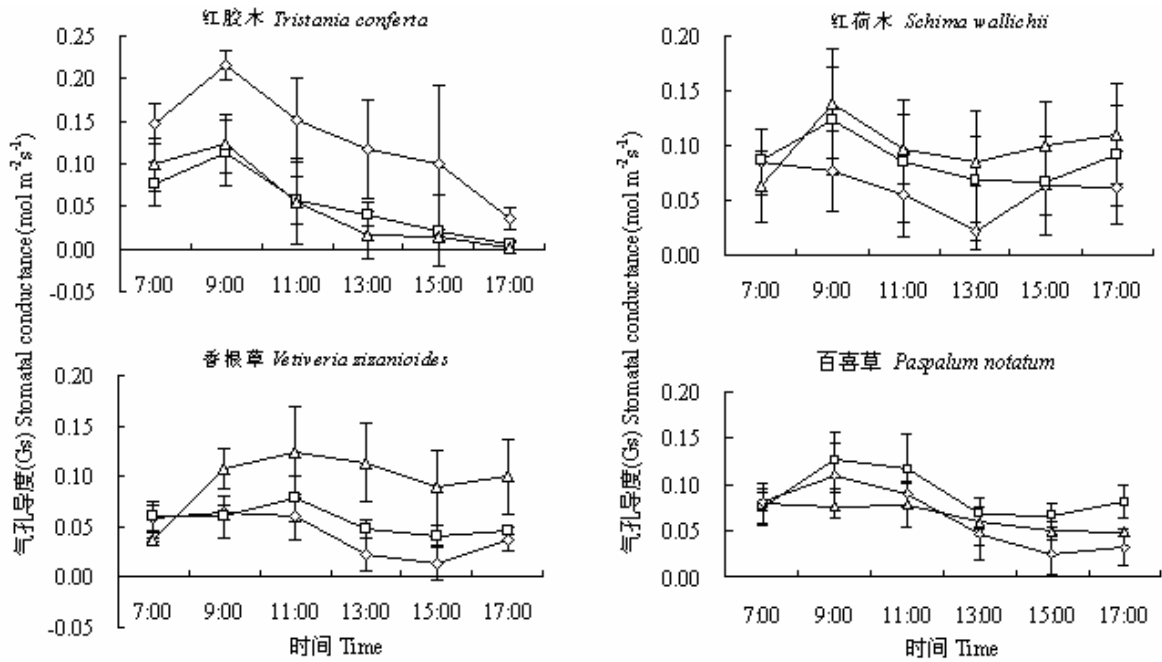
稍低于处理 2, 表明它们的光合作用没有受到抑制。另外, 植物的生长指标表明, 红胶木和百喜草在岩渣中的生长要明显较红荷木和香根草好^[7], 这可能与前两者抵抗胁迫的能力更强有关, 而其更高的光合能力来合成更多的同化物, 提供更多的能量来弥补胁迫对其产生的危害。Sierra 等人^[23]的研究也表明, 当植物在遭受铝毒胁迫中, 其根部最先受害, 但为了获得相对较高的产量, 其地上部分的器官呈现出很高的适应能力, 从而维持其有很高的同化能力和营养水平, 这也是为了弥补其根部的损失。处理 2 为石灰改良的油页岩废渣, 废渣中的 pH 值已接近中性, 消除了酸性毒害对植物产生的影响, 但其中活性铝的胁迫危害仍然存在^[7]。因此, 与普通赤红壤(CK)相比, 石灰改良后的岩渣仍不十分适合于植物生长, 但不同植物, 其所受的影响不尽相同。如红荷木和香根草在处理 2 中仍受胁迫, 其净光合日均值都比 CK 的低。从表 2 可算出, 红荷木在处理 2 中的净光合均值较 CK 下降 21.13%, 香根草下降了 25.30%; 红胶木仅下降 11.13%, 而百喜草反而较 CK 有显著增加, 达 56.98%。

(3) 气孔导度日变化的变化

植物的气孔开闭对其光合作用有重要的影响, 当气温升高, 光合辐射增强时, 气孔就完全打开, 以达到最优化状态进行光合作用。供试植物的气孔导度(Gs)日变化与其 Pn 有密切关系, 但它们的变化在不同植物与不同基质处理间并不完全一致。如红荷木和百喜草 Gs 的峰值几乎与 Pn 的峰值同时出现, 而红胶木要较其 Pn 峰值提前, 香根草的则是落后 Pn 峰值(图 3)。Pn 值越高, 植物的 Gs 也越高, 如红胶木的 Gs 均值在处理 1 和处理 2 分别为 0.06 和 0.09 mol m⁻²s⁻¹(表 2), 二者与其对应的 Pn 均有极显著相关, 相关系数分别为 0.88 和 0.92(p<0.01); 香根草和百喜草在赤红壤中的 Gs 均值与其对应的 Pn 均值也有极显著相关(表 2)。

(4) 光响应曲线

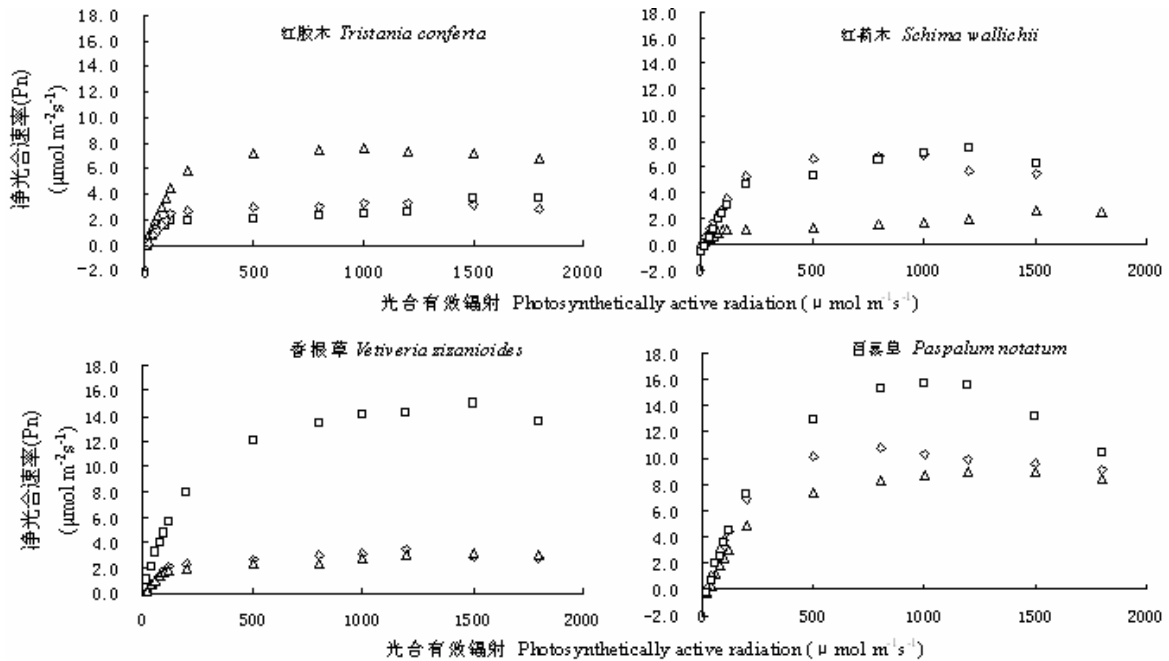
植物对光强的响应在一定程度反映了其对环境适应的光合潜能。故测定植物对光强变化的生理反应可以了解其对生态环境条件的适应性^[24]。由图 5 可知, 除红胶木外, 红荷木、百喜草和香根草在处理 1(岩渣)中的光合能力较 CK(赤红壤)急剧下降; 百喜草和香根草甚至在处理 2(岩渣 + 石灰)中的光合作用较也较其 CK 的弱; 特别使香根草, 在处理 1 和处理 2 中的光响应曲线几乎重叠, 并且明显低于 CK。红胶木与红荷木在两种岩渣中的光响应曲线与 CK 相差不太大, 只是红胶木的光合能力要较 CK 的高, 而红荷木的较 CK 稍低(图 4)。这一现象也可从它们的 Pmax 值看出, 红荷木在改良岩渣中的 Pmax 为 6.95 μmol·m⁻²·s⁻¹, 而其在赤红壤中的为 7.45 μmol·m⁻²·s⁻¹(表 3)。而且, 红胶木和百喜草的光饱和点随着胁迫的加重有显著下降的趋势, 但红荷木和香根草则并未见如此变化。



—△— 对照 (赤红壤) CK (Lateritic soil) —◇— 处理1 (岩渣) Treatment 1 (Oil shale waste)
 —□— 处理2 (岩渣 + 石灰) Treatment 2 (Oil shale waste with limestone)

图3 供试植物叶片气孔导度日变化

Fig. 3 Diurnal courses of stomatal conductance in leaves of plants tested



□ 对照 CK △ 处理1 (岩渣) Treatment 1 (Waste) ◇ 处理2 (岩渣 + 石灰) Treatment 2 (Waste with limestone)

图4 供试植物的光响应曲线

Fig. 4 The light curves responses of plants grown in oil shale waste under different treatment

表3 供试植物叶片光响应曲线的光合参数 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
Table 3 Photosynthetic parameters about light response curves of leaves in plant species tested

植物种类 Species	处理* Treatment	最大净光合速率 Pmax	光饱和点 LSP	光补偿点 LCP	表观量子效率 AQY
红胶木 <i>Tristania conferta</i>	对照 CK	3.72	1500	19.88	0.02
	处理 1 Treatment 1	7.46	1000	---	0.04
	处理 2 Treatment 2	3.21	1200	---	0.02
红荷木 <i>Schima wallichii</i>	对照 CK	7.45	1200	17.98	0.03
	处理 1 Treatment 1	7.51	2000	2.12	0.03
	处理 2 Treatment 2	6.95	1000	5.82	0.03
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	对照 CK	14.97	1500	---	0.04
	处理 1 Treatment 1	3.46	1200	15.61	0.02
	处理 2 Treatment 2	3.10	1500	---	0.02
百喜草 <i>Paspalum notatum</i>	对照 CK	15.67	1000	30.39	0.05
	处理 1 Treatment 1	8.99	1200	37.06	0.04
	处理 2 Treatment 2	10.83	800	21.41	0.05

*处理 1: 岩渣, 处理 2: 岩渣+石灰. Treatment 1: oil shale waste, treatment 2: Waste with limestone

4. 讨论和结论

4.1 植物的光合作用下降的原因

本次测定的香根草的光合速率值较低, 其光合潜能也较小。香根草为一种须根系强大的草本植物, 根系可达 2~3 m, 甚至 5 m, 而盆栽的空间较小, 对其根系发展极为不利, 从而使得植物的生长受到巨大限制^[7]。这可能是造成其净光合值偏低的一个主要原因。

植物在胁迫环境中生长, 其光合作用一般会受到抑制, 主要是胁迫因子限制了植物叶片气孔的活动, 从而使其光合作用受到一定程度的抑制或损伤, 其体内的光化学能力减弱, 对碳的吸收能力减少, 结果是植物碳同化大大下降^[10]。油页岩废渣中存在多种胁迫因子, 其中最显著的为铝毒和强酸环境, 而强酸环境会进一步增加废渣中铝的毒性。强酸和铝毒胁迫均能抑制植物的光合作用, 在本研究中如红荷木和百喜草。植物的气孔导度、光合作用与铝毒等胁迫因子存在某种直接或间接的联系。虽然有研究表明在酸性土壤中, 植物的气孔导度下降, 这并不是土壤中 Al^{3+} 对植物的毒害直接产生的, 而是由于其他原因^[30], 但它却是间接原因。铝毒胁迫下, 植物的光合作用也会下降, 但具体的机理还不是十分明了。Akaya & Takenaka^[1]认为, Al 胁迫导致植物的光合作用下降与土壤中高含量的 Al, 是通过影响植物激素、抗氧化代谢等方式而致使植物营养缺乏或根的功能障碍而引起其地上部分的生长下降来实现, 与植物叶片中的矿质营养缺乏和植物根部吸附能力下降没有直接的联系。要明确解释植物在油页岩废渣和改良后的油页岩废渣中光合作用下降的原因, 还需进行更多的试验和测定, 这些指标包括植物激素含量, 根的形态, 植物的 N 素水平, Ca、Mg 含量等。

4.2 植物增强光合作用来有效的抵抗胁迫

然而, 本研究发现, 红胶木在胁迫环境(岩渣)中生长, 其净光合速率较对照反而大大增强(图2), 光响应曲线测定也表明其光合潜能要较对照的高(图5), 这表明其光合能力在胁迫环境中反而得到了提高, 但其生物量和其它生长指标(株高、基径)的测定均较对照显著下降^[7]。另有研究表明, 在盐胁迫环境中, 植物同化 CO_2 产物减少的可能原因是盐胁迫使其固定碳的生化机制发生了改变^[18]。植物将其同化的碳不是用于生长, 而是用来合成其他物质来

帮助其抵御胁迫,如异戊二烯等一些挥发性有机物^[20,21]或有机酸^[5]等,因为植物在强酸胁迫或Al毒环境下易产生活性氧(ROS),带来脂质过氧化,而异物二烯可以有效的清除活性氧或OH⁻。为了更好地抵抗这些有毒有害物质的产生与积累,植物不得不消耗更多的所固定的碳同化产物。由此可以推测,红胶木通过光合作用可能将碳同化产物合成那些有利于植物解毒的物质。但这还需进一步的试验来证明。

4.3 石灰对油页岩废渣的改良效果

经过石灰改良的油页岩废渣对植物生长的不利影响显著较未经石灰改良的要小,这可从植物净光合值得到证明。而且,植物种类不同,其对改良废渣的适应能力也有较大差异。例如,红胶木在改良废渣中的 Pn 值与 Gs 与对照的没有显著差异,而与在岩渣中的则有极显著差异(Pn 之间的 P = 0.002; Gs 之间的 P = 0.001)(表 4),表明石灰改良后的岩渣对红胶木的生长十分有利。而对于红荷木来说,其在改良过的岩渣中的 Pn 与对照的相比有极显著差异(P = 0.010),其 Gs 与对照相比有显著差异(P = 0.027),表明石灰改良后的岩渣对红荷木来说,效果较差(表 4)。

油页岩废渣中的强酸胁迫对植物的生长影响甚大,而且还能加剧其中的铝毒害。故对于油页岩废渣的植物修复来说,添加一些改良剂(如石灰)不但能显著减轻强酸胁迫,还在一定程度上大大缓解铝毒害,从而达到双重改良效果。另外,施加肥料还可进一步增强植物抵抗胁迫的能力,因肥料可提高植物叶氮的含量,从而增强植物的光合作用^[2-3,8],并可促使植物快速生长。故,在探讨油页岩废渣的修复时,做一些改良废渣基质的研究很有必要。

表4 添加石灰的岩渣处理与赤红壤和岩渣处理t-Test结果*

Table 4 The analytic results of t-Test between the treatment of oil shale waste mixed with limestone and other two treatments (waste and lateritic soil)

植物种类 Species	处理Treatment	Pn	Gs	WUE
红胶木	岩渣 Oil shale waste	0.002	0.001	0.299
<i>Tristania conferta</i>	赤红壤 Lateritic soil	0.167	0.793	0.056
红荷木	岩渣 Oil shale waste	0.010	0.007	0.989
<i>Schima wallichii</i>	赤红壤 Lateritic soil	0.010	0.027	0.052
百喜草	岩渣 Oil shale waste	0.032	0.016	0.732
<i>Paspalum notatum</i>	赤红壤 Lateritic soil	0.087	0.022	0.870
香根草	岩渣 Oil shale waste	0.065	0.045	0.003
<i>Vetiveria zizanioides</i>	赤红壤 Lateritic soil	0.024	0.024	<0.001

* P 值。*P values.

4.4 红胶木是适应油页岩废渣的最佳植物种类

从植物的日平均净光合速率均值(表 2)和其光响应曲线测定的最大净光合速率值(表 3)可知,红胶木和百喜草的光合速率值均较红荷木和香根草高,而且,3个处理分别比较,百喜草的日平均净光合速率值和最大净光合速率值均要高于红胶木,是否就以此来判断百喜草的适应较红胶木好?根据生物量的测定结果,以岩渣处理的红胶木,其生物量较对照下降了43.5%,而相应处理的百喜草较对照相比下降了68.14%;在经过石灰改良的废渣中,红胶木的生物总量不但没有降低,反而较对照增加了311%,而百喜草下降了31.1%^[7]。光合能力和生物量均是评价植物生长的重要指标,但生物量指标更能显示植物光合作用所形成的化合物

的最终归宿。所以,可判断红胶木是较百喜草更好的适应油页岩废渣环境的植物种类,4种供试植物对油页岩废渣的适应能力排序为:红胶木 > 百喜草 > 香根草 > 红荷木。这个结果还有待结合野外的测定进行调整和肯定。

参考文献

- [1] Akaya M, Takenaka C. 2001. Effects of aluminum stress on photosynthesis of *Quercus glauca* Thumb. *Plant and Soil*, 237: 137-146
- [2] Clearwater M-J, Meinzer F-C. 2001. Relationships between hydraulic architecture and leaf photosynthetic capacity in nitrogen-fertilizer *Eucalyptus grandis* trees. *Tree Physiology*, 21: 683-690
- [3] Cordell S-G, Godlstein G, Meinzer F-C, et al. 2001. Morphological and physiological adjustment to N and P fertilization in nutrient-limited *Meterosideros polymorpha* canopy trees in Hawaii. *Tree Physiology*, 21: 43-50
- [4] Guo Q-R (郭起荣), Yu Z-X (俞志雄), Shi J-M (施建敏). 2003. A physio-ecological study on photosynthesis of *Sinomanglietia glauca* and two species in *Manglietia* Bl. *Acta Agriculture Universitatis Jiangxiensis* (江西农业大学学报), 25(5): 645-651 (in Chinese)
- [5] Huang J(黄娟), Kong G-H(孔国辉), Xia H-P(夏汉平). 2005. Aluminum toxicity and its relationship with organic acids and phosphorus. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 11(4): 498-503 (in Chinese)
- [6] Huang J (黄娟), Wu T (吴彤), Kong G-H (孔国辉), et al. 2006. Seasonal changes of photosynthetic characteristics in 12 tree species introduced onto oil shale waste. *Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 30(4): 666-674 (in Chinese)
- [7] Huang J(黄娟), Xia H-P(夏汉平), Kong G-H(孔国辉). 2007. Effects of oil shale waste on growth of plants and benefits of limestone to ameliorate it. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 26(1): 9-15 (in Chinese)
- [8] Jose S, Merritt S, Ramsey C-L. 2003. Growth, nutrition, photosynthesis and transpiration responses of longleaf pine seedlings to light, water and nitrogen. *Forest Ecology and Management*, 180: 335-344
- [9] Kong G-H(孔国辉), Liu S-Z(刘世忠), Chen Z-D(陈志东), et al. 2006. Ecological effect of phytoremediation on oil shale waste dumps. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*(热带亚热带植物学报), 14(1): 61-68 (in Chinese)
- [10] Lawlor D-W. 2002. Limitation to photosynthesis in water-stressed leaves: stomata vs. metabolism and the role of ATP. *Annals of Botany*, 89: 871-885
- [11] Liu H (刘惠), Zhao P (赵平), Cai X-A (蔡锡安), et al. 2003. Stomatal gas exchange in leaves of major trees on the oil shale residue in Maoming, Guangdong. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 11(1): 41-46 (in Chinese)
- [12] Liu S-Z (刘世忠), Xia H-P (夏汉平), Kong G-H (孔国辉), et al. 2002. The soil and vegetation of oil shale dump in Maoming city, Guangdong Province. *Ecological Science* (生态科学), 21(1): 25-28
- [13] Masayuki, A., Chisato, T. Effects of aluminum stress on photosynthesis of *Quercus glauca* Thumb. *Plant and Soil*, 2001, 237(1), 137-146.
- [14] Perales-Vela, H., González-Moreno, S., Montes-Horcasitas, C., Cañizares-Villanueva, R.O. Growth, photosynthetic and respiratory responses to sub-lethal copper concentrations in *Scenedesmus incrassatulus* (Chlorophyceae). *Chemosphere*, 2007 (in press)
- [15] Qi Z-M(齐泽民), Wang X-D(王玄德), Song G-Y(宋光煜). 2004. The research progress of the effect of acid rain on plant. *World Sci-Technology Research & Development* (世界科技研究与发展), 26 (2) : 36 - 41 (in Chinese)
- [16] Qiu D-L(邱栋梁), Liu X-H(刘星辉). 1999. Advances in the injury mechanism of acid rain on horticultural plants. *Journal of Fujian Agricultural University*(福建农业大学学报), 28 (1) : 28 - 32 (in Chinese)
- [17] Qiu D-L(邱栋梁), Liu X-H(刘星辉), Guo S-Z(郭素枝). 2002. Effects of simulated acid rain stress on gas exchange and chlorophyll a fluorescence parameters in leaves of longan. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 26 (4) : 441 - 446. (in Chinese)
- [18] Ramani B, Reeck T, Debez A, et al. 2006. *Aster tripolium* L. and *Sesuvium portulacastrum* L. two halophytes, two strategies to survive in saline habitats. *Plant Physiology and Biochemistry*, 44: 395-408
- [19] Rahman, M.A., Hasegawa, H., Rahman, M.M., Islam, M.N., Miah, M.A.M., Tasmen, A. 2007. Effect of arsenic on photosynthesis, growth and yield of five widely cultivated rice (*Oryza sativa* L.) varieties in Bangladesh. *Chemosphere*, 67, 1072-1079.
- [20] Sharkey T-D, Loreto F. 1993. Water stress, temperature, and light effects on the capacity for isoprene emission and photosynthesis of kudzu leaves. *Oecologia*, 95: 328-333

- [21] Sharkey T-D, Chen X, Yeh S. 2001. Isoprene increases thermo-tolerance of fosmidomycin-fed leaves. *Plant Physiology*, 125: 2001-2006
- [22] Sierra, J., Noel, C., Dufour, L., et al. 2003. Mineral nutrition and growth of tropical maize as affected by soil acidity. *Plant and Soil*, 252(2), 215-226.
- [23] Sierra J, Ozier-Lafontaine H, Dufour L. 2006. Nutrient and assimilate partitioning in two tropical maize cultivars in relation to their tolerance to soil acidity. *Field Crops Research*, 95: 234-249
- [24] Sun G-C (孙谷畴), Zhao P (赵平), Zeng X-P (曾小平), et al. 2002. Changes of leaf photosynthetic parameters in leaves of *Woonyoungia septentrionalis* and *Tsoongiodendron lotungensis* under different growth- irradiation. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 26(3): 355-362
- [25] Xia H-P (夏汉平), Kong G-H (孔国辉), Ao H-X (敖惠修), et al. 2000. Comparison of four herbaceous plants in Pb and Cd uptake from oil shale residue derived soil. *Rural Eco-Environment* (农村生态环境), 16(4): 28-32
- [26] Xia H-P (夏汉平), Huang J (黄娟), Kong G-H (孔国辉). 2004. Ecological restoration of oil shale waste dumps. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 24(12): 2887-2893 (in Chinese)
- [27] Xia H-P. 2004. Ecological rehabilitation and phytoremediation with four grasses in oil shale mined land. *Chemosphere*, 54: 345-353
- [28] Xu D-Q (许大全). 2002. Photosynthesis efficiency. Shanghai: Shanghai Science and technology Press. (in Chinese)
- [29] Yu C-L (岳春雷), Liu Y-Q (刘亚群). 1999. Preliminary studies on physiological ecology of photosynthesis of an endangered plant- *Cimicifuga nanchuanensis*. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 23(1): 71-75 (in Chinese)
- [30] Yoshida K, Shibasaki R, Takami C, et al. 2004. Response of gas exchange rates in *Abies firma* seedlings to various additional stresses under chronic acid fog stress. *Journal of Forest Research*, 9: 195-203
- [31] Zhang J-Z (张进忠), Liu N (刘楠), Kong G-H (孔国辉), et al. 2006. Responses of photosynthesis in two woody plants to oil shale residue pollution. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 14(2): 100-106 (in Chinese)
- [32] Zhang Z-B (张正斌), Shan L (山仑). 1997. Research development in estimation models of crop water use efficiency and transpiration and evaporation. *Agricultural Research in the Arid Areas*(干旱地区农业研究), 15(1): 73-78 (in Chinese)
- [33] Zhang S-R (张守仁). 1999. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学通报), 16(4): 444-448 (in Chinese)

EFFECTS OF OIL SHALE WASTE AMENDED WITH LIMESTONE ON PHOTOSYNTHESIS AND RELATED CHARACTERISTICS OF FOUR PLANT SPECIES

Huang Juan^{1,2}, Xia Hanping², Kong Guohui²

1 Institute of Environmental Pollution and Health, School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai, China (200072)

2 South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong, China (510650)

Abstract

It is very difficult for plants to grow well in oil shale waste duo to strong acidity, aluminum toxicity, and other some adverse factors. Limestone is a very good ameliorant to acidic soil, but there has been poorly documented on efficiency of limestone amending oil shale waste. Four plants species, *Tristania conferta*, *Schima wallichii*, *Vetiveria zizanioides* and *Paspalum notatum*, which were all strongly adaptable to oil shale waste dump, were screened to test their photosynthesis and related characteristics in leaves when grown in oil shale waste with or without limestone, compared with the control, lateritic soil. It aimed at investigating the effects of oil shale waste on plants and the benefits of limestone ameliorating oil shale waste, and finding the best ameliorating measure and plant species for rehabilitation of oil shale waste. When grown in oil shale waste, four plant species were all suffered severe stress. And the net photosynthetic rates of *S. wallichii*, *V. zizanioides* and *P. notatum* were sharply reduced, their photosynthetic potential was weakened, but the net photosynthetic rate of *T.*

conferta increased compared with the CK. It showed that *T. conferta* had an active means to resist the adverse environment; that is to say, *T. conferta* enhanced its photosynthesis to compensate the loss resulted from the severe stress in oil shale waste. So, *T. conferta* was the first choice when oil shale waste dumps were restored by use of phytoremediation. In the oil shale waste amended with limestone, the stresses of four species suffered were greatly mitigated; especially for *T. conferta*, its net photosynthetic rate and photosynthetic potential were not very different from its values in CK. It inferred that limestone was a good choice to meliorate oil shale waste, because limestone could made the oil shale waste became more suitable to grow for plants, but the plants growth had varied for different plant species in ameliorative oil shale waste. On the whole, the decreasing order of the adaptability of four plant species to oil shale waste was: *T. conferta* > *P. notatum* > *V. zizanioides* > *S. wallichii*.

Keywords: oil shale waste; diurnal course of photosynthesis; photosynthetic potential; limestone amelioration; soil acidity

作者简介: 黄娟, 女, 1980年生, 博士生, 研究方向: 大气环境污染。已发表论文7篇。