

两种木本植物光合作用对油页岩废渣污染的反应

张进忠^{1,3}, 刘楠^{1,3}, 孔国辉^{1*}, 吴彤¹, 林植芳¹, 彭长连^{1,2}

(1. 中国科学院华南植物园, 广东数字植物园重点实验室, 广州 510650; 2. 华南师范大学生命科学学院, 广州 510631;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:比较油页岩污染点(茂名石化公司废渣场)和相对清洁点(茂名市林科所)生长的灌木翅荚决明(*Cassia alata* L.)和乔木乌墨(*Syzygium cumini* (Linn.) Skeels)的光合生理指标的变化。在两个试验点,翅荚决明的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率的绝对值在一天的多数时段均高于乌墨,但与对照点相比,在污染点翅荚决明的净光合速率和水分利用效率的下降幅度却大于乌墨,气孔导度则相反,可能与土壤含水量有关。结果表明乌墨的抗油页岩废渣污染能力强于翅荚决明。

关键词:翅荚决明; 乌墨; 光合作用; 油页岩; 矿山废弃地; 铝污染

中图分类号: Q945.11

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2006)02-0100-07

Responses of Photosynthesis in Two Woody Plants to Oil Shale Residue Pollution

ZHANG Jin-zhong^{1,3}, LIU Nan^{1,3}, KONG Guo-hui^{1*}, WU Tong¹

LIN Zhi-fang¹, PENG Chang-lian^{1,2}

(1. South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangdong Key Laboratory of Digital Botanical Garden, Guangzhou 510650, China; 2. College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Changes in Photosynthetic parameters were examined of *Cassia alata* L. and *Syzygium cumini* (Linn.) Skeels grown on waste residue of oil shale from Maoming Petrochemical Company as polluted site, and at Maoming forestry institute as control site. Results showed that absolute values of net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate in *C. alata*, were higher than those in *S. cumini* at most hours in the daytime at both sites. Reductions in net photosynthetic rate and water use efficiency in *C. alata* were greater than those in *S. cumini*, whereas, stomatal conductance was the contrary, which might be related to the water content in soil at different experimental sites. It was shown that *S. cumini* was more resistant to oil shale pollution than *C. alata*. More comprehensive physiological indexes in selecting pollution-resistant plant species are desirable.

Key words: *Cassia alata* L.; *Syzygium cumini* (Linn.) Skeels; Photosynthesis; Oil shale; Aluminum pollution; Mining wasteland

矿业活动造成空气、水体和土壤污染以及土地荒漠化等一系列问题,严重地威胁着人类的生存^[1]。矿山开采过程中,露天采矿场、排土场、尾矿场、塌陷区以及受重金属污染而失去经济利用价值的土

地称为矿山废弃地^[2]。废弃地中矿石、废渣等固体废物中含酸性、碱性、毒性、放射性或重金属成分,通过地表水体径流、大气飘尘污染周围的土地、水域和大气,其影响面远远超过废弃物堆置场的地域和

收稿日期: 2005-09-27 接受日期: 2005-12-26

基金项目: 中国石化集团茂名石油化工有限公司(1999), 中国石油化工集团公司(2002)和国家自然科学基金(30470282)资助

* 通讯作者 Corresponding author

空间。石油化工厂排出的渣油堆积形成废渣场在自然条件下会产生致癌的多环芳烃气体,污染大气和环境^[9]。由油页岩渣构成的特殊基质,没有土壤结构,易被侵蚀,且保水保肥能力差,这使得植物生长困难^[9]。废渣中还含有多种金属元素,有些是植物生长的必需元素,如 Cu、Zn、Mn 等;而有些是有毒的,如 Pb、Cd、Ni 等。茂名废渣场是比较典型的矿山废弃地,是油页岩开采和炼油生产过程中产生的剥离土和岩灰渣等废弃物的堆放场^[5,6]。

世界各国都非常重视矿山废弃地的植被恢复与重建工作,并为此进行了较多的研究。筛选抗性或耐性较高、吸收或富集能力强的废弃地先锋树种是治理废弃物污染、净化环境的重要手段之一^[1,2,7-10]。然而传统的筛选方法大多是在废弃地栽种、定期观测,再根据其受害情况判断各植物的抗性强弱和适应能力的大小而作出选择^[11-13]。这种方法虽然直接、简便和可靠,但难以阐明植物体抗污染的机理,而且对筛选植物的种类具有一定的局限性。由于光合作用是植物体物质来源的基础,因此,我们通过在矿区废弃地和相对洁净区生长的两种木本植物的光合作用参数的变化,探讨植物体在不同生长条件下生长量的差异与气体交换、光合作用的关系,来探讨植物耐矿渣污染的机理,以便寻找快速的检测和筛选抗污染植物的有效方法,为矿区的恢复生态学研究提供一定的理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

茂名市位于广东省西南部(东经 110°19'–111°41',北纬 21°22'–22°42'),地势北高南低,地貌以山地丘陵为主,兼有平原和沿海滩涂。该地区位于北回归线以南,地处热带向亚热带的过渡地带,属亚热带季风海洋性气候。全年平均气温在 22℃ 以上,年平均降雨量在 1 530–1 770 mm 之间;年日照时数 1 560–2 160 h,日照率 35.6% 以上^[9]。在此气候条件下自然发育的地带性土壤为砖红壤。

对照点位于茂名市林业科学研究所。树木栽种地原为水稻田,后填上当地山岗自然土砖红壤,填土深度超过 1 m。0–25 cm 为黄棕色,40 或 60 cm 以下为黄灰色。质地为中壤至轻粘土,石英砂粒较少。

污染点位于茂名北排油页岩废渣场,土壤主要

由焦渣土、灰渣土组成,并混有碎岩渣和原矿地表层碎土。结构松散,空隙多,雨后含水量较大。土壤中 K 的含量比较充足,除褐色碎小油页岩中含有有机质和有效 N 较多外,其它养分都比较缺乏,属养分贫瘠土壤。废渣场受雨淋后渗出水呈强酸性,pH 3.0–4.0,水中镉含量达 0.015 mg L⁻¹,超出地表水最高允许标准。土壤中重金属元素铜、锌、镍、铅、镉、铬、砷的含量普遍比广东省土壤背景值的中位值高出 2–3 倍,但均未超过国家土壤环境质量二级标准值。硫化物、石油类和芳香烃均有检出^[15]。

两试验地相距约 20 km,两试验地点的土壤都受人为干扰。土壤化学性质和水分状况分析见表 1、2。

表 1 不同试验点土壤化学性质
Table 1 Chemical property of soil at different experimental sites

化学性质 指标 Indexes of chemical property	对照点 Control site	污染点 Polluted site
pH	5.62±0.36*	3.92±0.36*
活性铝 Activated aluminum (g kg ⁻¹)	0.626±0.24*	4.26±1.10*
有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	3.06±0.84*	30.6±24.25**

土壤深度 Soil depth: 10–25 cm ; * n=6; ** n=8; P<0.001

1.2 植物材料

翅荚决明(*Cassia alata* L.)为豆科植物,直立灌木,枝粗壮,绿色。乌墨(*Syzygium cumini* (Linn.) Skeels)属桃金娘科,乔木,嫩枝圆形,叶革质。两种植物在对照点和污染点都已生长 4 a,长势良好。试验时选取当年的成熟叶片进行各项分析测定。被测叶片选自 3 株个体,共测定叶片 3–4 片。

1.3 研究方法

试验选择夏季(2004 年 8 月 14、15 日)和冬季(2003 年 12 月 27、28 日)分别两次进行,使用便携式光合测定系统(Licor-6400, USA),记录茂名地区光合有效辐射的日变化,并对栽种于污染点和对照点的翅荚决明和乌墨的净光合速率(P_n),气孔导度(G_s),蒸腾速率(T_r)进行检测(n>5)。根据测定结果,分别计算两种植物在不同试验点的瞬时水分

表 2 不同试验点土壤含水量 (%)
Table 2 Water content in soils at different sites (%)

时间 Time	对照点 Soil depth at control site*			污染点 Soil depth at polluted site**		
	0-10 cm	20-40 cm	60-80 cm	0-10 cm	20-40 cm	60-80 cm
7:00	15.45±0.64	14.13±3.08	19.85±3.67	24.35±0.67	26.20±0.15	26.49±0.29
10:00	14.66±0.48	13.06±1.52	17.98±0.34	24.52±0.36	25.90±0.49	26.63±0.25
13:00	15.07±0.42	12.88±1.75	17.43±1.04	22.45±0.21	25.72±0.69	26.05±0.48
15:00	13.41±3.11	14.30±4.30	17.48±3.43	20.78±0.63	22.59±0.79	26.24±0.37
18:00	14.66±4.91	14.69±3.35	17.94±2.25	21.02±0.89	25.61±0.76	26.27±0.35

* 和 ** 分别表示测定时间为 2004 年 8 月 17 日 (雨后第 1 天) 和 18 日 (雨后第 2 天)。* and ** represent the data were recorded on 17 and 18 August, 2004, respectively, i.e. on the next day and two days after raining.

利用率 $WUE=P_n/T$; 气孔限制值 $L_s=[(C_a-C_i)/C_a]$, (C_a 为空气中 CO_2 的浓度, C_i 为胞间 CO_2 浓度) [6]; 以及污染点表观光量子效率 (ϕ), 即光合速率 - 光强曲线在低光强下 ($0-200 \mu mol m^{-2} s^{-1}$) 呈直线部分的斜率。数据分析与处理采用 Microsoft Excel 和 SPSS 软件。

2 结果和分析

2.1 光照强度的日变化

2004 年 8 月中旬, 茂名地区的光合有效辐射值 (PAR) 的变化趋势如图 1。这段时期内茂名地区主要以晴热天气为主, 其 PAR 的日变化呈明显的单峰曲线。测量从早 7:30 开始, PAR 从 $198.80 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ 缓慢上升, 13:30 达到最大值 $1938.92 \mu mol m^{-2} s^{-1}$, 之后光强逐渐下降, 18:00 降至 $374.29 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ 。

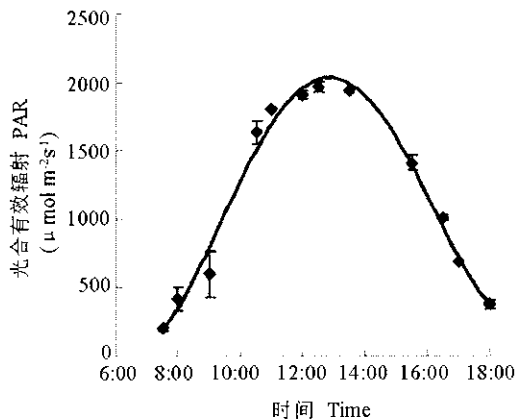


图 1 光合有效辐射的日变化

Fig. 1 Diurnal variations in photosynthetic active radiation (PAR)

2.2 净光合速率

2.2.1 净光合速率的日变化

由图 2 A, B 可以看出, 与对照点相比, 两种植

物在污染区的光合速率均有所下降, 翅荚决明在一天中的平均光合速率下降了 19%, 乌墨则下降了 12%。这表明矿渣废弃物的污染影响了植物体的正常代谢功能, 使其光合能力下降。无论是在对照点还是污染点, 翅荚决明的净光合速率均明显高于乌墨。翅荚决明净光合速率值的日变化幅度也较大, 呈现明显的“双峰”形, 13:00 有“午休”现象出现, 且对照点在午后的峰值高于中午。乌墨的净光合速率在一天内虽有变动, 但变幅相对较小, 午休现象也不明显。

2.2.2 光合速率 - 光响应曲线

图 3 显示两种植物的光饱和点均出现在光合有效辐射达到 $1400 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ 时。翅荚决明的最大光合速率 ($17.70 \mu mol m^{-2} s^{-1}$) 约为乌墨 ($8.57 \mu mol m^{-2} s^{-1}$) 的 2 倍。翅荚决明和乌墨的光量子效率 (ϕ) 分别为 0.05 和 0.03, 暗呼吸值分别为 $1.44 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ 和 $1.39 \mu mol m^{-2} s^{-1}$, 光补偿点分别为 $24.10 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ 和 $31.16 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ 。结果表明, 岩渣污染情况下翅荚决明光能的利用效率的绝对值高于乌墨。

2.3 气孔导度的日变化

两种植物的气孔导度在一天内也存在一定的波动, 而且翅荚决明的波动幅度和气孔导度的绝对值都比乌墨稍高 (图 2 C, D)。在不同的试验点翅荚决明气孔导度的日变化曲线也都出现了“双峰”, 较高的峰值分别出现在中午 (污染点) 和下午 (对照点)。与对照点相比, 两种植物在污染点的气孔导度值都有所下降, 尤以下午的降幅更显著。翅荚决明在一天中的平均气孔导度下降了 38%, 乌墨则下降了 40%。而二者的气孔限制值的平均值则分别下降了 11% 和 17%。

2.4 蒸腾速率的日变化

蒸腾速率由气孔内外蒸汽压差决定, 受气孔开

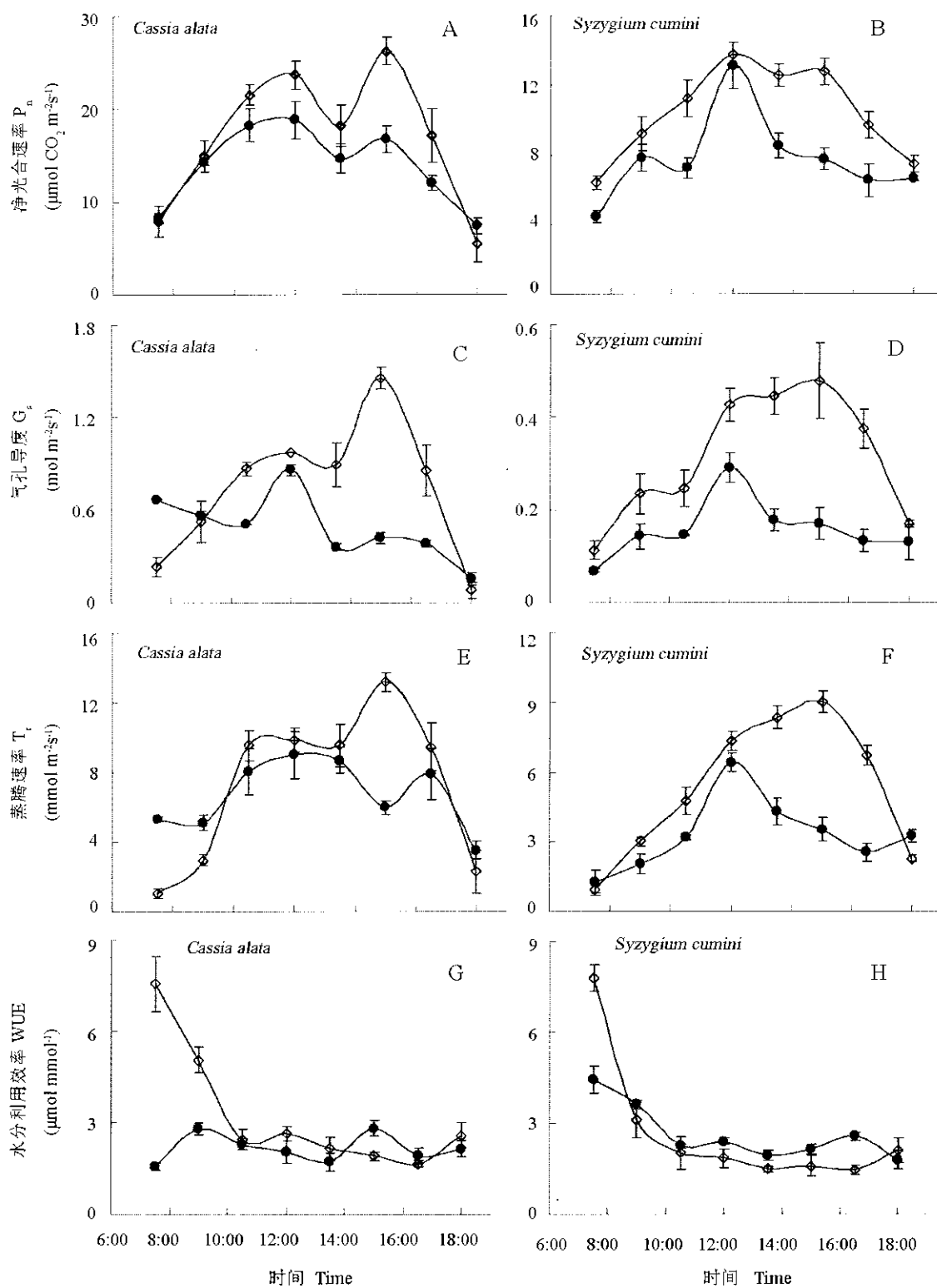


图 2 对照点(◇)和污染点(●)两种植物光合作用的日变化

Fig. 2 Diurnal variations in net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate and water use efficiency in two species grown at control (◇) and polluted (●) sites

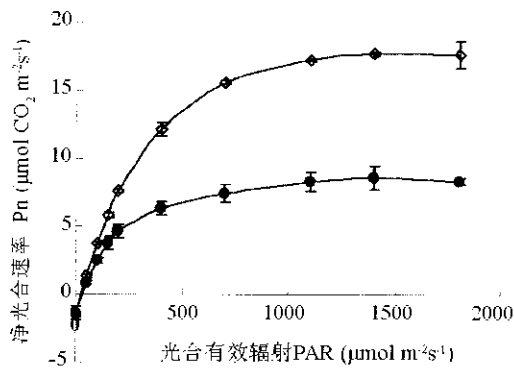


图 3 污染点两种植物的光合速率 - 光响应曲线
Fig. 3 Net photosynthetic rate - light response curves of two species grown at polluted site
◇ 翅荚决明 *Cassia alata*; ● 乌墨 *Syzygium cumini*

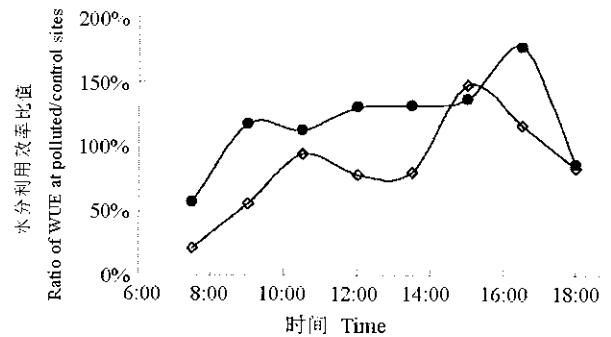


图 4 两种植物水分利用效率在污染点与对照点比值的日变化
Fig. 4 Diurnal variations in the ratio of WUE at polluted site to that at control site
◇ 翅荚决明 *Cassia alata*; ● 乌墨 *Syzygium cumini*

度和外界环境包括光照、温度和空气湿度等多重因素影响^[7]。图 2 E, F 显示,在不同试验点的翅荚决明蒸腾速率在一天内仍然出现了明显的“双峰”,其蒸腾速率的绝对值也大于乌墨。翅荚决明和乌墨蒸腾速率日均值的下降分别为 7%和 32%。在对照点,翅荚决明和乌墨的变化幅度分别为 1.06–13.18 mmol m⁻²s⁻¹和 0.96–9.03 mmol m⁻²s⁻¹,而在污染点仅为 5.31–8.99 mmol m⁻²s⁻¹和 1.28–6.41 mmol m⁻²s⁻¹。这说明污染点生长的植物对一天中光、温、水等环境条件变化不甚敏感。

2.5 瞬时水分利用效率的日变化

从图 2 G, H 中可以观察到,对照点两种植物的水分利用效率(WUE)出现相同的变化趋势,9:00 之前, WUE 甚高,随着光强的增加,水分利用效率先急剧下降,然后在一天内的多数时间保持在比较平缓的水平。而在污染点两种植物 WUE 的日变化较小。翅荚决明和乌墨在污染点的 WUE 在一天中与对照点的主要差别出现在 10:00 之前,而日均值分别下降了 28%和 9%。此外,当以水分利用效率在污染点与对照点的百分比(污染点水分利用效率 / 对照点水分利用效率 × 100%)为纵坐标作图时(图 4),也可以看出,两种植物在两个试验点的这一比值存在着一定的差异,乌墨的这个比值在一天的多数时间明显高于翅荚决明。这表明与翅荚决明相比,乌墨在污染点环境条件下有更好的同化能力。

3 讨论

本试验所考察的两种植物中,翅荚决明是一种大灌木,枝叶繁茂,在污染点长势一般;乌墨是一种乔木,枝叶繁茂,在污染点长势良好。二者均属于抗酸性岩渣污染能力较强的木本植物。翅荚决明的净光合速率、光量子效率、气孔导度和蒸腾速率的绝对值在对照点和污染点大多都高于乌墨,其日变化的幅度也大于后者。这可能是与部分豆科植物含有的 C₄ 循环 PEPcase 活性高于一般的 C₃ 植物有关^[8, 19]。故光合作用一些生理参数绝对值的大小不能作为筛选植物抗污染能力强弱的唯一指标。

与对照点相比,翅荚决明的平均光合速率在污染点下降的幅度高于乌墨,平均水分利用效率的下降幅度几乎是后者的 3 倍。结果显示在岩渣污染条件下,乌墨仍然能够保持相对较强的光合能力和较高的水分利用效率,更能适应岩渣废弃地的不良环境,因而表现出较翅荚决明更高的抗岩渣污染能力,与从岩渣废弃地实地观测到的两种植物的长势状况是一致的。

多种不利的环境都可以引起光合速率的降低,但其中可能隐藏着不同的机理;对光合作用的限制可能发生在不同的部位,包括气孔限制, RuBP 羧化限制, RuBP 再生限制, 磷再生限制以及光合产物限制^[20]。翅荚决明的光合速率在污染点的降低比乌墨显著,但表观量子效率比乌墨高,其气孔限制值的

下降却小于乌墨,可见岩渣污染造成的这两种植物光合速率的降低原因可能并不一样。翅荚决明的光合速率下降更多是由气孔因素所造成的,而乌墨则相反。污染点土壤含水量明显高于对照点,而两种植物的瞬时水分利用效率在不同试验点(除清晨外)差距不大。污染点土壤中较高的金属离子含量造成土壤浓度升高,限制了植物根部对水分的吸收。生长在污染点的植物的光合和水分代谢参数比对照点低。降低光合速率和水分代谢可能是植物对重金属和铝离子综合胁迫的一种策略或适应。

另据文献报道,铝是限制农作物生长的主要因子之一,但其毒性机理尚未被完全揭示。其中比较一致的观点认为,铝能使植物根延长区细胞生长受抑制^[21,22]。与此同时,铝促进了过氧化物酶的活性,而根受抑制与此有关^[23]。在铝胁迫下,小麦根呼吸速率、线粒体H⁺-ATP酶、Ca²⁺-ATP酶活性受到抑制,呼吸速率下降可能与此有关^[24]。根部受害随后影响到地上部分生长,如在热带酸性土壤中,铝抑制玉米生长,与在不含铝的土壤中生长的植株相比,其叶面积指数、地上部分生物量、籽粒产量分别降低60%、30%和47%^[25]。在活性铝为0.9 g kg⁻¹, pH 5.96的土壤中,大豆光合速率、蒸腾速率、气孔导度均有所下降^[26]。还有人指出,杉木人工林衰退,原因是铝毒害所致,其铝毒害阈值为pH ≤ 4.18, Al³⁺ ≥ 31.66 mg kg⁻¹^[27]。本试验中,岩渣废弃地pH 3.92,活性铝含量高达4.26 g kg⁻¹(表1)。因此,两种植物光合作用降低可能与土壤中低pH值和高活性铝含量有关(浓度梯度试验结果将另文发表)。与对照点相比,翅荚决明在污染点光合速率的降低比乌墨显著,说明前者对铝的毒害更敏感。我们推测,活性铝在低pH条件下对翅荚决明光合作用的影响主要与降低气孔开闭调节能力,以及减少胞间CO₂浓度而限制羧化速率有关,而岩渣污染下乌墨减弱光能利用的效率则可能与光反应活性的限制相关。

污染点被测植物的光合作用、气孔导度和蒸腾速率绝对值在一天中的多数时间段都较对照点小,而在早晨或傍晚,气孔导度和蒸腾速率的绝对值则相反,污染点稍高于对照点,其中翅荚决明的情况更为突出。这可能是由污染点不同深度的土壤含水量均明显高于对照点,在温度适宜的夏季早晨和傍晚,气孔开度较大造成的。结果表明,翅荚决明对不同的土壤水分条件更为敏感,乌墨对环境的适应能

力更强。

植物对污染物的抵抗和耐受的机理是多方面的,本项研究所涉及的生理参数仅仅反映了植物体光合能力对污染物耐受的敏感程度,其中光合速率和水分利用效率的相对变化与植物对逆境的响应比较一致,因此可能作为筛选抗性植物重要指标。在很多情况下,以叶片在短期内获得的生理指标的差异与污染条件下观察到的植物生长情况常常并不完全相同^[28]。因此,研究植物的抗污染能力时,应该进行较长时间和更全面、更合理的结构与功能的检测与比较,包括植物的形态结构特征,根茎叶长势,物候期,吸收与代谢污染物的能力,以及亚细胞器线粒体和叶绿体的超微结构等在逆境处理前后的变化^[29]。这些方法的使用可以进一步丰富和完善对植物抗逆能力及其机理的研究,从而找到更有效和简便可行的鉴定抗逆性指标,以选择和培养具高抗逆性的植物种类。

参考文献

- [1] Wei Z Z (卫智军), Li Q F (李青士), Jia X Y (贾鲜艳), et al. Vegetation recovery on industrial mining disposal site [J]. *J Soil Water Conserv* (水土保持学报), 2003, 17(4):172-175. (in Chinese)
- [2] Li Y G (李永庚), Jiang G M (蒋高明). Ecological restoration of mining wasteland in both China and abroad: an over review [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2004, 24(1): 95-100. (in Chinese)
- [3] <http://www.cigem.gov.cn>
- [4] Redente E F, Hower J M, Barnhisel R I. Reclamation of oil shale [A]. *Reclamation of Drastically Disturbed Lands* [C]. Madison: Agronomy Monograph, 2000. 775-799.
- [5] Liu S Z (刘世忠), Xia H P (夏汉平), Kong G H (孔国辉), et al. The soil and vegetation of oil shale dump in Maoming city, Guangdong Province [J]. *Ecol Sci* (生态科学), 2002, 21(1):25-28. (in Chinese)
- [6] Xia H P (夏汉平), Kong G H (孔国辉), Ao H X (敖惠修), et al. Comparison of four herbaceous plants in Pb and Cd uptake from oil shale residue derived soil [J]. *Rural Eco Environ* (农村生态环境), 2000, 16(4):28-32. (in Chinese)
- [7] Gu J F (谷金锋), Cai T J (蔡体久), Xiao Y (肖洋), et al. Vegetation restoring of desert land in industrial mining area [J]. *J Northeast For Univ* (东北林业大学学报), 2004, 32(3):19-22. (in Chinese)
- [8] Sahadeb D, Arup K M. Reclamation of mining-generated wastelands at Alkusha-Gopalpur abandoned open cast project, Raniganj Coalfield, eastern India [J]. *Environ Geol*, 2002, 43:39-47.
- [9] Shu W S (束文圣), Zhang Z Q (张志权), Lan C Y (蓝崇钰). Strategies for restoration of mining wastelands in China (I) [J].

- Ecol Sci (生态科学), 2000, 19 (2):24–29. (in Chinese)
- [10] Yang X (杨修), Gao L (高林). A study on re-vegetation in mining wasteland of Dexing copper mine, China [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 2001, 21(11):1932–1940. (in Chinese)
- [11] Bhatia N P, Adholeya A, Sharma A. Biomass production and changes in soil productivity during longterm cultivation of *Prosopis juliflora* (Swartz) DC inoculated with VA mycorrhiza and *Rhizobium* spp. in a semi-arid wasteland [J]. Biol Fert Soils, 1998, 26:208–214.
- [12] Jian S G (简曙光), Yang Z Y (杨中艺), Jian W J (简伟军). The effects of nutrition polybag on the growth, N-fixation and heavy metal accumulation of *Sesbania rostrata* grown on Pb/Zn tailings [J]. J Trop Subtrop Bot (热带亚热带植物学报), 2003, 11(1):34–40. (in Chinese)
- [13] Xue S G, Chen Y X, Reeves R D, et al. Manganese uptake and accumulation by the hyperaccumulator plant *Phytolacca acinosa* Roxb. (Phytolaccaceae) [J]. Environ Pollut, 2004, 131:393–399.
- [14] <http://www.mmw.cc>
- [15] Deng Z P (邓剡平), Li L H (李丽华), Liang C (梁朝). Experimental investigation on the reuse of resource in Maoming, Guangdong, oil shale disposal [J]. Ecol Sci (生态科学), 2000, 19(4):57–61. (in Chinese)
- [16] Berry J A, Downton W J S. Environmental regulation of photosynthesis [A]. In: Govindjee. Photosynthesis Vol. II [C]. New York: Academia Press, 1982. 263–343.
- [17] Pan R C (潘瑞焜), Dong Y D (董愚得). Plant Physiology [M]. Beijing: High Education Press, 1995. 16–22 (in Chinese)
- [18] Niu S L (牛书丽), Jiang G M (蒋高明). Effect of elevated CO₂ on legume plants with nitrogen fixation [J]. Acta Phytoecol Sin (植物生态学报), 2003, 27 (6):844–850. (in Chinese)
- [19] Niu S L (牛书丽), Jiang G M (蒋高明), Li Y G (李永庚). Environmental regulations of C₃ and C₄ plants [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 2004, 24(2):308–314. (in Chinese)
- [20] Shen Y G (沈允钢), Shi N J (施教耐), Xu D Q (许大全). Dynamic Photosynthesis [M]. Beijing: Science Press. 1998. 126–138 (in Chinese)
- [21] Bennet R J, Breen C M. The aluminum signal: new dimensions to mechanisms of aluminum tolerance [J]. Plant Soil, 1991, 134:153–166.
- [22] Kochian L V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plant [J]. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 1995, 46:237–260.
- [23] Tamás L, Huttová J, Mistrik I. Inhibition of Al-induced root elongation and enhancement of Al-induced peroxidase activity in Al-sensitive and Al-resistance barley cultivars are positively correlated [J]. Plant Soil, 2003, 250:193–200.
- [24] He L F (何龙飞), Liu Y L (刘友良), Shen Z G (沈振国), et al. Effects of aluminum on respiratory rate and some mitochondrial enzymes activities of wheat roots [J]. Acta Agr Sin (作物学报), 2001, 27 (6):857–861. (in Chinese)
- [25] Sierra J, Noël C, Dufour L, et al. Mineral nutrition and growth of tropical maize as affected by soil acidity [J]. Plant Soil, 2003, 252:215–226.
- [26] Ying X F (应小芳), Liu P (刘鹏). Effects of aluminum stress on photosynthetic characters of soybean [J]. Chin J Appl Ecol (应用生态学报), 2005, 16(1):166–170. (in Chinese)
- [27] Luo C D (罗承德), Zhang J (张健), Liu J L (刘继龙). Researches on the threshold of aluminum toxicity and the decline of Chinese fir plantation in hilly area around the Sichuan basin [J]. Sient Silv Sin (林业科学), 2000, 36(1):9–14. (in Chinese)
- [28] Liu N (刘楠), Wen X (温学), Kong G H (孔国辉), et al. Preliminary selection of plants with high resistance to SO₂ for urban greening [J]. J Trop Subtrop Bot (热带亚热带植物学报), 2003, 11 (4):364–371. (in Chinese)
- [29] Ni C Y (倪才英), Chen Y X (陈英旭), Luo Y M (骆永明), et al. Response of Chinese Milkvech (*Astragalus sinicus* L.) to heavy metals coercion [J]. Chin Environ Sci (中国环境科学), 2003, 23 (5):503–508. (in Chinese)