

民勤绿洲荒漠过渡带植物白刺和梭梭光合特性

赵长明¹, 魏小平¹, 尉秋实², 邓建明¹, 程栋梁¹, 王根轩^{1,3*}

(1. 兰州大学干旱与草地生态教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省治沙研究所, 甘肃 武威 733000
3. 浙江大学生命科学院生态研究所, 杭州 310029)

摘要: 研究了民勤绿洲荒漠过渡带两种优势植物白刺(*Nitraria tangutorum*)和梭梭(*Haloxyylon ammodendron*)气体交换特征参数和叶绿素荧光参数的日变化, 结果表明: 梭梭同化枝日均净光合速率(P_n)、蒸腾速率(E)、水分利用效率(WUE)和早晨 PSII 最大光化学效率(F_v/F_m)明显低于白刺叶片; 同时它们在中午都呈现明显的光合“午休”现象。通过气孔限制值(L_s)、胞间二氧化碳浓度(C_i)和叶绿素荧光参数(F_v/F_m)变化趋势分析表明: 梭梭同化枝净光合速率的下降在 9:00~12:00 主要是由于气孔关闭引起的, 而在 12:00~15:00 主要是非气孔因素光抑制的影响; 而白刺叶片光合速率的下降主要是气孔关闭引起的。同时, 梭梭在一天中其同化枝的温度(T_{leaf})高于大气温度尤其在中午差值更大, 而白刺叶片的温度却低于大气温度, 因此说明梭梭同化枝在中午不仅遭受着干旱和强光的胁迫而且面临严酷的高温胁迫。总之, 在绿洲荒漠过渡带生境中白刺比梭梭具有更好的适应性, 这可能是民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭林衰退的重要原因之一。

关键词: 梭梭; 白刺; 过渡带; 气孔限制; 光抑制

文章编号: 1000-0933(2005)08-1908-06 中图分类号: Q142, Q945 文献标识码: A

Photosynthetic characteristics of *Nitraria tangutorum* and *Haloxyylon ammodendron* in the ecotone between oasis and desert in Minqin, Region, Country

ZHAO Chang-Ming¹, WEI Xiao-Ping¹, YU Qiu-Shi², DENG Jian-Ming¹, CHENG Dong-Liang¹, WANG Gen-Xuan^{1,3*} (1. Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology of Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Gansu Desert Control and Research Institute, Wuwei 733000, China; 3. Institute of Ecology College of Life Science, Zhejiang University Hangzhou 310029, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1908~1913.

Abstract: *Nitraria tangutorum* and *Haloxyylon ammodendron* are dominate the ecotone between oasis and desert in Minqin. The artificial *H. ammodendron* communities have degenerated where the water table declined after heavy pumping of the groundwater for agriculture. The diurnal variations of gas exchange and chlorophyll fluorescence of green branches in *H. ammodendron* and leaves of *N. tangutorum* were investigated in the ecotone. Net photosynthetic rate (P_n), Transpiration rate (E), water use efficiency (WUE) and predawn photochemical efficiency of PSII (F_v/F_m) in *H. ammodendron* were lower than in the leaves of *N. tangutorum*, while both species showed midday photosynthetic depression. Stomatal limitations (L_s), intercellular CO₂ concentration (C_i) and F_v/F_m showed that the midday (9:00 to 12:00) photosynthetic depression in *H. ammodendron* was predominantly due to stomatal limitation. By contrast, afternoon (12:00 to 15:00) depression of P_n was caused by non-stomatal limitation, namely, photoinhibition. Photosynthetic depression of *N. tangutorum* was predominantly due to stomatal limitation at all periods of the day. The temperatures of assimilating branches (T_{leaf}) of *H. ammodendron* were higher than the air temperatures (T_{air}) especially at noon, while the T_{leaf} of *N. tangutorum* were lower than T_{air} .

So the assimilating branches of *H. ammodendron* not only suffered from the drought and strong-light stress but also from

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90102015、30170161)
收稿日期: 2004-09-19; 修订日期: 2005-07-25
作者简介: 赵长明(1978~), 男, 山东嘉祥人, 博士生, 主要从事植物生态学及生理生态学研究. E-mail: chmzhao@163.com
* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wanggx@lzu.edu.cn
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 90102015, 30170161)
Received date: 2004-09-19; Accepted date: 2005-07-25
Biography: ZHAO Chang-Ming, Ph. D. candidate, mainly engaged in plant ecology and ecophysiology. E-mail: chmzhao@163.com

the rigorous high temperature stress compared with *N. tangutorum* at noon. In conclusion, the results of physiological research on photosynthesis suggested that the *N. tangutorum* adapt to the environmental conditions of the ecotone between oasis and desert more than *H. ammodendron*, and this may be one of the important reasons of why the artificial *N. tangutorum* communities in the ecotone between oasis and desert degenerated.

Key words: *Haloxylon ammodendron*; *Nitraria tangutorum*; ecotone; stomatal limitation; photoinhibition

甘肃民勤是我国典型的绿洲型荒漠化地区,它地处石羊河下游的腾格里与巴丹吉林两大沙漠前缘交汇区。绿洲外围天然植被主要是白刺和红柳灌丛;另在一些沙丘、丘间地上,还生长有自20世纪60年代以来栽植的梭梭和沙枣人工林。因此,以沙枣和梭梭人工林和外围的白刺和红柳灌丛构成了民勤绿洲荒漠过渡带主要的植被群落景观。由于民勤绿洲灌溉农业的迅速发展和地下水的过量开采,引起绿洲外围人工植被带的退化和消亡,造成风沙侵入和绿洲萎缩^[1]。虽然许多学者对绿洲荒漠过渡带的水量平衡、土壤结皮、植物水分关系和物种生态位(单一土壤因子)等进行了大量研究^[2~6],但对过渡带植物尤其是衰退植被的光合特性缺乏系统研究,因此本文通过研究绿洲外围过渡带两种主要的植物种白刺和梭梭的光合特性,试图从植物光合生理生态学的角度探讨绿洲荒漠过渡带两种优势植物种对过渡带生境变化的适应性及其群落的演化趋势,为绿洲荒漠化防治工程和过渡带植被衰退机制提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地的生境条件和材料

试验地点位于中国巴丹吉林沙漠南缘的甘肃省治沙研究所沙生植物园外围区域(北纬38°34′,东经102°58′)。在植物园外围主要是以人工植被梭梭(*Haloxylon ammodendron*)为优势种的群落,随着向沙漠腹地的延伸,逐渐被自然植被白刺(*Nitraria tangutorum*)群落代替,过渡带区群落内梭梭和白刺呈镶嵌结构分布,梭梭趋于衰退而白刺长势良好,总盖度约为16.12%,地貌类型为固定和半固定沙丘,土壤类型为灰棕漠土和风沙土,地下水位在17m以下^[7]。实验测定以该区的梭梭和白刺为研究对象。

1.2 实验方法

1.2.1 环境因子和气体交换特征参数的测定 2003年7月底天气晴朗,利用CIRAS-1便携式光合作用测定系统(PP-Systems, UK)测定大气温度(T_{air})和光合作用有效量子通量密度(PPFD)等环境因子,以及梭梭同化枝和白刺叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(E)、气孔导度(G_s)、同化枝或叶片温度(T_{leaf})、胞间二氧化碳浓度(C_i)等指标。从7:00开始至18:00(太阳时,数据作图均采用太阳时),每隔1~2h测量1次,测量时选取植株上层的梭梭同化枝和白刺叶片,每次测量选取3~5个长势一致的同一生长枝。梭梭在适应干旱环境的过程中叶片退化,形成同化枝进行光合作用。梭梭同化枝的面积在测定结束后带回野外实验站根据投影面积计算。利用Berry和Downton的方法^[8]计算气孔限制值(L_s): $L_s = 1 - C_i/C_o$,其中 C_o 为环境周围大气二氧化碳浓度, C_i 为胞间二氧化碳浓度。

1.2.2 叶绿素荧光参数的测定 在测定梭梭和白刺的气体交换特征参数的同时,利用FMS-2便携式荧光仪(Hansatech, UK)测定同化枝或叶片环境光下稳态荧光产量(F_s)和最大荧光产量(F'_m)。同化枝或叶片暗适应15min后,测定其初始荧光产量(F_o)和最大荧光产量(F_m)。光系统Ⅱ最大光化学效率(F_v/F_m)和环境光下实际的光系统Ⅱ光化学效率(Φ_{PSII})利用如下公式计算^[9]:

$$F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m; \Phi_{PSII} = F/F'_m = (F'_m - F_s)/F'_m。$$

2 结果

2.1 绿洲荒漠过渡带光合作用有效量子通量密度(PPFD)和大气温度(T_{air})的日变化特征

绿洲荒漠过渡带光合作用有效量子通量密度(PPFD)日变化趋势呈单峰曲线(图1),随着早晨太阳的升起PPFD迅速变大并在12:00左右达到最大值为1670 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,在9:00~15:00时段维持在1500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上的强辐射。大气温度(T_{air})随着PPFD的上升而上升,但其上升速率较缓慢,并且在15:00左右达到峰值36.3℃,下午的下降也比较缓慢。由图1可知,虽然梭梭植株的高度在1.5~2.0m左右而白刺灌丛的高度一般在0.2~0.4m左右,但是其所处周围生境的PPFD和 T_{air} 并没有显著差异。

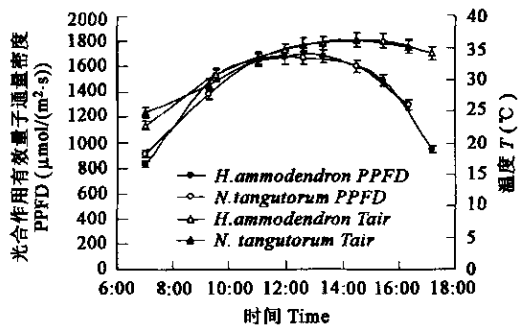


图1 2003年7月31日绿洲荒漠过渡带光合光子通量密度(PPFD)和大气温度(T_{air})的日变化特征

Fig. 1 Diurnal variations of photosynthetic photon flux density (PPFD) and air temperature (T_{air}) on July 31, 2003

2.2 梭梭同化枝和白刺叶片气体交换参数日变化特征

梭梭和白刺的净光合速率日变化特征如图 2a, 二者都出现明显的光合“午休”现象, 且在一天中的任何时段白刺的净光合速率都明显高于梭梭。梭梭的净光合速率在 9:00 左右达到最大, 此时气孔导度也达到最大。随着光强和温度的增加, 其净光合速率、气孔导度和蒸腾速率快速下降, 在 14:00 左右, 由于气孔导度下降到一个极低水平使其蒸腾强度也骤降到较低值。白刺净光合速率和气孔导度在 7:00~11:00 维持很高的水平而此时段蒸腾强度较小, 此时段大气温度和太阳辐射都有利于白刺叶片合成大量有机物, 进行正常的物质和能量代谢。白刺蒸腾速率在 12:00 左右达到最大值, 随后其强度逐渐降低。由图 2(b) 可以看出, 白刺和梭梭的一天中的最大蒸腾速率差别并不大 ($p > 0.5$), 而白刺的净光合速率和气孔导度却明显大于梭梭 (图 2a, c)。

梭梭同化枝和白刺叶片温度随着大气温度的变化而变化, 它们的日变化趋势和大气温度趋势一致 (图 2d)。梭梭同化枝和白刺叶片温度的日变化特征有着明显的区别, 梭梭同化枝温度明显高于大气温度, 而且其温差随着大气温度的上升而增加; 白刺叶片温度却低于大气温度, 在 15:00 左右大气温度达到最高时, 其温差几乎为零。

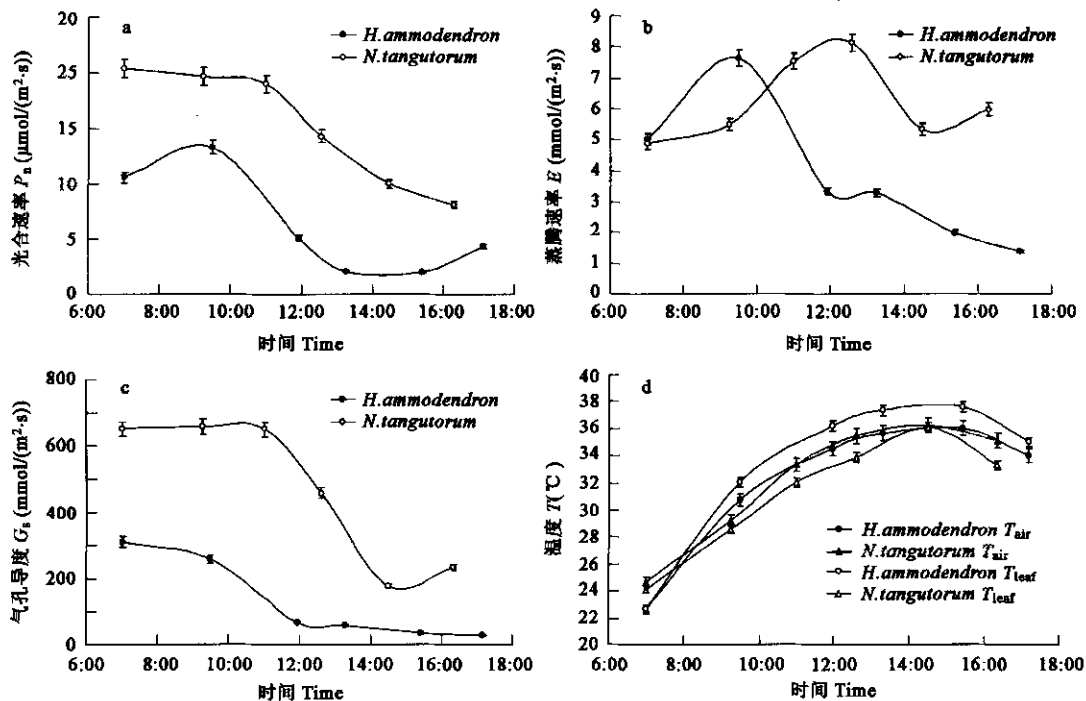


图 2 绿洲荒漠过渡带梭梭同化枝和白刺叶片光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (E)、气孔导度 (G_s) 及叶片温度 (T_{leaf}) 的日变化特征

Fig. 2 Diurnal variations of net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (E), stomatal conductance (G_s) and leaf temperature (T_{leaf}) in the assimilating branches of *Haloxylon ammodendron* and in the leaves of *Nitraria tangutorum* at ecotone between oasis and desert

2.3 梭梭同化枝和白刺叶片光合“午休”特征

梭梭同化枝和白刺叶片在 13:00 左右, 都出现光合速率明显的下降即发生光合“午休”现象 (图 2a)。通过测定其胞间二氧化碳浓度和计算气孔限制值发现 (图 3a, b), 梭梭同化枝在 7:00~12:00 其胞间二氧化碳浓度下降而气孔限制值上升, 在 12:00~15:00 其胞间二氧化碳浓度上升而气孔限制值下降; 相比之下, 白刺叶片在 7:00~13:00 其二参数没有明显变化, 在 15:00 左右两参数有明显相反的最值, 在 17:00 左右都恢复到早晨的水平。梭梭同化枝胞间二氧化碳浓度在一天中的任何时刻都低于白刺叶片, 而气孔限制值恰恰相反。

梭梭同化枝 PSII 最大光化学效率 (F_v/F_m) 在 7:00 为 0.79 低于健康叶片的值 0.83^[10], 其 13:00 左右下降到最低值 0.64, 其后傍晚逐渐恢复但低于早晨的水平 (图 3c); 而白刺叶片最大光化学效率在早晨 0.85 左右, 只在 15:00 左右轻微的下降。一天中白刺叶片的 F_v/F_m 显著高于梭梭同化枝, 与此类似, 一天中白刺叶片的光下 PSII 实际光化学效率 (Φ_{PSII}) 高于梭梭同化枝 (图 3d)。梭梭同化枝和白刺叶片光下实际光化学效率的日变化趋势都是中午低而早晚高。

2.4 梭梭同化枝和白刺叶片日平均气体交换特征及水分利用效率

梭梭同化枝的日平均光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率都显著低于白刺叶片 (表 1)。白刺叶片单位面积日均同化速率是梭梭同化枝单位面积日均同化速率的 2.45 倍, 其日均水分利用效率是梭梭同化枝的 1.51 倍。

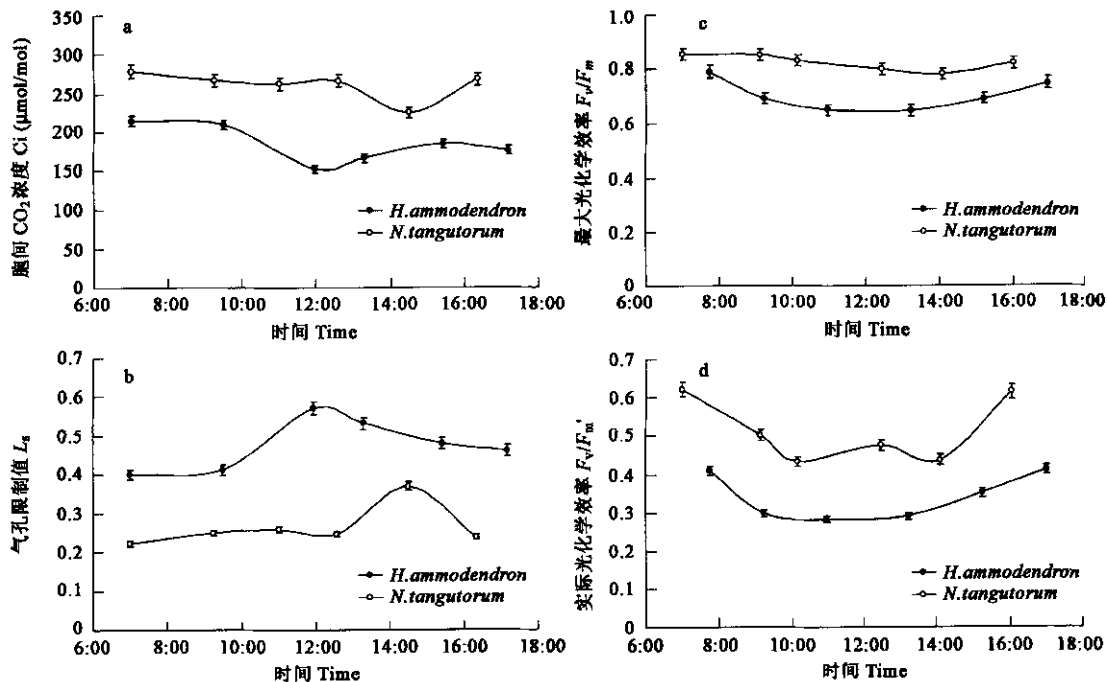


图3 绿洲荒漠过渡带梭梭同化枝和白刺叶片胞间二氧化碳浓度(C_i)、气孔限制值(L_s)、PSII最大光化学效率(F_v/F_m)和PSII实际光化学效率(Φ_{PSII})的日变化特征

Fig. 3 Diurnal variations of intercellular concentration (C_i), stomatal limiting value (L_s), F_v/F_m and Φ_{PSII} in the assimilating branches of *Haloxylon ammodendron* and in the leaves of *Nitraria tangutorum* at ecotone between oasis and desert

表1 绿洲荒漠过渡带梭梭同化枝和白刺叶片日平均光合速率、蒸腾速率、气孔导度及水分利用效率比较

Table 1 The average net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (E), stomatal conductance (G_s) and water use efficiency (WUE) in the assimilating branches of *Haloxylon ammodendron* and in the leaves of *Nitraria tangutorum* at ecotone between oasis and desert

种名 Species	P_n	E	G_s	WUE
	($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	(mmol/mol)
梭梭 <i>H. ammodendron</i>	6.21 ± 1.906	3.77 ± 0.926	126.90 ± 50.59	1.68 ± 0.364
白刺 <i>N. tangutorum</i>	15.23 ± 2.151	6.22 ± 0.537	471.63 ± 89.598	2.55 ± 0.455
差异显著性 Significance	*	*	**	*

数据为平均值±标准误, $n \geq 6$, * 为 $p < 0.05$, ** 为 $p < 0.01$, NS 为无显著差异 Values are given as mean ± SE, $n \geq 6$, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, NS: Non-Significance

3 讨论

植物光合作用的运转状况决定着植物的生存与繁殖,决定着植被的健康状况,同时也决定着生态系统的初级生产力。绿洲荒漠过渡带植物的光合作用运转状况决定绿洲荒漠过渡带植被的健康状况。民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭林和自然群落白刺在防止民勤绿洲荒漠化和绿洲衰退过程中起着决定性作用^[11,12]。但是由于民勤绿洲灌溉农业的迅速发展大量抽取地下水和石羊河上游水分供给量下降,导致绿洲及绿洲边缘地带地下水位的迅速下降^[13,14]。这种地下水位的下降和绿洲水分水平供给的差异,导致了绿洲荒漠过渡带原有人工栽培植物梭梭的衰退和更适应干旱环境的白刺繁盛。通过分析它们的光合生理特性发现,梭梭同化枝的日均光合速率、蒸腾速率和水分利用效率明显低于白刺叶片(表1和图2)。许多研究表明,健康(非胁迫)的植物叶片PSII最大光化学效率(F_v/F_m)的量子效率指标是比较稳定的,一般在0.83左右;而当植物遭受逆境胁迫(如:干旱、温度、强光)时,其值变小^[10,15]。过渡带梭梭同化枝的 F_v/F_m (图3c)在早晨却低于正常值,说明梭梭在过渡带生境下,受到了环境因子的胁迫,发生了长期的光抑制现象,这种长期光抑制即光破坏是伴随着PSII反应中心的D1蛋白的净降解,从而降低其光合活性^[16],而白刺叶片却没有明显的受到环境因子胁迫。这些结果表明白刺比梭梭更适应于旱化的环境。

在绿洲荒漠过渡带干旱胁迫同时,当地强烈太阳辐射也变成了一个重要的胁迫因子。高强度($1500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上)的太阳辐射在一天中维持很长的时间(9:00~15:00)(图1),而这一时段也是植物一天中受大气和土壤干旱胁迫最严重的时段。进而通过两种植物的气体交换参数也可以看到,白刺和梭梭在中午都出现光合“午休”现象,对光合午休现象的气孔限制分析通

常利用 Berry 和 Downton 的方法,结合图 3(a, b)可以得出,梭梭在 12:00 以前的光合速率的下降主要是气孔关闭引起的,而在 12:00 以后随着同化枝胞间二氧化碳浓度的上升和气孔限制值下降判定此时的光合速率的下降主要是非气孔限制的影响。为了判定梭梭非气孔限制的影响因素,测定梭梭同化枝的叶绿素荧光的变化,梭梭同化枝 PSII 最大光化学效率在 13:00 左右最低比早晨下降了 18.2%,而此时 PSII 实际光化学效率也处于一个极低的水平,说明梭梭在中午发生明显的光抑制现象。而白刺在 15:00 以前发生光合速率的下降时,胞间二氧化碳浓度下降而气孔限制值上升,因此主要是气孔关闭引起的;其 PSII 最大光化学效率在 15:00 时与早晨相比只下降了 8.7%,并且其 PSII 实际光化学效率也维持一个较高的水平。因而梭梭中午光抑制程度明显高于白刺,并且在傍晚很难恢复到早晨水平,这也表明白刺对干旱、强光环境的忍耐性优于梭梭。

通过对比两种植物的同化枝(叶片)温度与大气温度的差值也可以看到(图 2d),梭梭同化枝的温度高于大气温度尤其在中午差值更大,与张利平等曾报道沙坡头人工固沙区植物油蒿和柠条的叶片温度在 8:00~18:00 始终高于大气温度一致^[17],而白刺叶片的温度却低于大气温度与邓雄等策勒绿洲荒漠过渡带 4 种植物(胡杨、疏叶骆驼刺、头状沙拐枣、多枝柽柳)的研究结果一致^[18]。这也从另一个侧面表明,梭梭所受的水分胁迫高于白刺。此外,白刺叶片有浓密的表皮毛和较厚的角质层^[19~21],可以较好的适应强烈的太阳辐射,反射过多的光能,从而减少叶片吸收的光能,同时,叶片的表皮毛也起着“遮光板”作用,使叶肉组织免受高温的灼伤。因此绿洲荒漠过渡带梭梭在中午不仅遭受着水分和强光的胁迫,而且还面临着比环境温度高的高温胁迫。

4 结论

通过研究民勤绿洲荒漠过渡带人工植被梭梭同化枝和白刺叶片的光合生理生态学特性,得出以下结论:

(1)白刺叶片光合器官适应过渡带环境的能力要明显优于梭梭同化枝,其光合速率和水分利用效率高于梭梭同化枝,而且其光合午休的主要原因是气孔关闭引起的;梭梭同化枝碳固定能力的下降不仅由于气孔关闭引起的而且还发生明显的光抑制现象,包括长期光抑制和动态光抑制。

(2)民勤绿洲荒漠过渡带现有人工植被梭梭严重遭受着干旱、强光和高温的胁迫,相比之下白刺基本不受这些环境因子的胁迫,具有更高的竞争力和适应能力。这可能是近年来民勤绿洲边缘人工梭梭林迅速衰退而白刺群落成为该区优势群落的一个重要原因。民勤梭梭作为外来固沙种,在绿洲荒漠过渡带进行引种造林,由于气候变化和人类活动的影响,其不能适应过渡带的严酷生境,必将衰退。

References:

- [1] Wang J H, Ma Q L. Study on restoration strategies characteristics and status of degenerated artificial *Haloxylon ammodendron* communities at the edge of Minqin oasis. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, **23**(12):2107~2112.
- [2] Wang B, Cui X H. Researches on laws of water balance at transitional zone between oasis and desert in Minqin. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(2):235~240.
- [3] Jia B Q, Zhang H Q, Zhang Z Q, *et al.* The study on the physical and chemical characteristics of sand soil crust in the Minqin County, Gansu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(7):1442~1448.
- [4] Li X Y, Zhang X M, He X Y, *et al.* Water relation characteristics of four perennial plant species growing in the transition zone between oasis and open desert. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(6):1164~1171.
- [5] Zhang L J, Yue M, Zhang Y D, *et al.* Analysis on the Niche of the Main Plant Species of Oasis-desert Ecotone in Fukang of Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(6):969~972.
- [6] Jia B Q, Ci L J, Cai T J, *et al.* Preliminary research on changing soil water characters at ecotone between oasis and desert. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, **26**(2):203~208.
- [7] Wei X P, Zhao C M, Wang G X, *et al.* Estimation of above and below-ground biomass of dominant desert plant species in oasis-desert ecotone of Minqin, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, **29**(5).
- [8] Berry J A, Downton W J S. Environmental regulation of photosynthesis. In: Govindjee eds. *Photosynthesis*, Vol. New York: Academic Press, 1982. 263~343.
- [9] Genty B, Briantais J M, Baker N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica Biophysica Acta*, 1989, **990**:87~92.
- [10] Maxwell Kate, Johnson N Giles. Chlorophyll fluorescence- a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 2000, **51**(345):659~668.
- [11] Ma Q L, Wang J H, Ji Y F, *et al.* Photosynthesis-physiological characteristics of *Haloxylon ammodendron* under different soil moisture grades. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, **23**(12):2120~2126.

[12] Yang Z H, Gao Z H. Impact of precipitation and underground water level in the edge of oases on growth and decline of *Nitraria tangutorum* community. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(6):923~926.

[13] E Y H, Yan P, Zhong S N,*et al.* Study on the unnerground water variation of Shajingzi region in Minqin country. *Journal of Desert Research*, 1997, **17**(1):70~76.

[14] Ma X W, Li B G, Wu CR, *et al.* Predicting of temporal spatial change of groundwater table resulted from current land use in Minqin oasis. *Advances in Water Science*, 2003, **14**(1):85~90.

[15] Hall D O,Rao K K. *Photosynthesis*. (Sixth edition). Landon: Cambrige University Press, 1999. 175~177.

[16] Osmond C B. What is photoinhibition? Some insights form comparisons of shade and sun plants. In: Baker NR, Bowyer JR, eds. *Photoinhibition of photosynthesis: from molecular mechanisms to the field*. Oxford: Bios Scientific Publishers, 1994. 1~24.

[17] Zhang L P, Wang X P, Liu L C, *et al.* Study on gas exchange characteristics of main constructive plants *A. ordosica* and *C. korshinskii*. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(2):133~137.

[18] Deng X, Li X M, Zhang X M, *et al.* Relationship between gas exchange of four desert plant and environmental factors in Taklamaka. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2002,**8**(5):445~452.

[19] Lee Z L, Li R A. Anatomical observation of assimilating branches of nine xerophytes in Gansu, *Acta Botanica Sinica*, 1981, **23**(3):181~185.

[20] Zhao C X, Huang Z S. A preliminary study of xeromorphism of some important xerophytes growing in Tungeli desert. *Acta Botanica Sinica*, 1981, **23**(4):278~283.

[21] Deng Y B, Jiang Y C, Liu J. The xeromorphic and salinemorphic structure of leaves and assimilating branches in ten Chenopod iacea species in Xinjiang. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1998, **22**(2):164~170.

参考文献:

[1] 王继和,马全林. 民勤绿洲人工梭梭林退化现状、特征与恢复对策. 西北植物学报, 2003, **23**(12):2107~2112.

[2] 王兵,崔向慧. 民勤绿洲-荒漠过渡区水量平衡规律研究. 生态学报,2004, **24**(2):235~240.

[3] 贾宝全,张红旗,张志强,等. 甘肃省民勤沙区土壤结皮理化性质研究. 生态学报,2003, **23**(7):1442~1448.

[4] 李向义,张希明,何兴元,等. 沙漠-绿洲过渡带四种多年生植物水分关系特征. 生态学报,2004, **24**(6):1164~1171.

[5] 张林静,岳明,张远东,等. 新疆阜康绿洲荒漠过渡带主要植物种的生态位分析. 生态学报,2002, **22**(6):969~972.

[6] 贾宝全,慈龙骏,蔡体久,等. 绿洲-荒漠交错带土壤水分变化特征初步研究. 植物生态学报, 2002, **26**(2):203~208.

[7] 魏小平,赵长明,王根轩,等.民勤绿洲荒漠过渡带优势植物地上和地下生物量的估测模型. 植物生态学报,2005,**29**(5).

[11] 马全林,王继和,纪永福,等. 固沙树种梭梭在不同水分梯度下的光合生理特征. 西北植物学报, 2003, **23**(12):2120~2126.

[12] 杨自辉,高志海. 荒漠绿洲边缘降水和地下水对白刺群落消长的影响. 应用生态学报, 2000, **11**(6):923~926.

[13] 俄有浩,严平,仲生年,等. 民勤沙井子地区地下水动态研究. 中国沙漠, 1997, **17**(1):70~76.

[14] 马兴旺,李保国,吴春荣,等. 民勤绿洲现状土地利用模式影响下地下水位时空变化的预测. 水科学进展, 2003, **14**(1): 85~90.

[17] 张利平,王新平,刘立超,等. 刘新民沙坡头主要建群植物油蒿和柠条的气体交换特征研究. 生态学报,1998, **18**(2):133~137.

[18] 邓雄,李小明,张希明,等. 塔克拉玛干 4 种荒漠植物气体交换与环境因子的关系初探. 应用与环境生物学报, 2002, **8**(5):445~452.

[19] 李正理,李荣敖. 我国甘肃九种旱生植物同化枝的解剖观察. 植物学报, 1981, **23**(3): 181~185.

[20] 赵翠仙,黄子琛. 腾格里沙漠主要旱生植物旱性结构的初步研究. 植物学报, 1981, **23**(4):278~283.

[21] 邓彦斌,姜彦成,刘健. 新疆 10 种藜科植物叶片和同化枝的旱生和盐生结构的研究. 植物生态学报, 1998,**22**(2):164~170.