

生态脆弱带不同区域近缘优势灌木的生理生态学特性

周海燕^{1,2}, 张景光¹, 李新荣¹, 王新平¹, 赵亮², 龙利群¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头开放试验站, 兰州 730000; 2. 兰州大学干旱农业生态实验室, 兰州 730000)

摘要:小叶锦鸡儿、中间锦鸡儿和柠条锦鸡儿分别为中国北方生态脆弱带典型区域——科尔沁沙地、毛乌素沙地和腾格里沙漠的优势灌木。为了探讨生长在地理位置相距很远的不同气候类型区、但亲缘关系较近的沙漠植物种之间特性的差异及近缘种间引种成功的可能性,对 3 种灌木在原产地和引种地(腾格里沙漠)的气体交换、叶绿素荧光参数、 β 胡萝卜素和脯氨酸累积等特性进行了对比研究,结果显示:各区优势灌木的气体交换特征不同,主要依照区域光照和温湿条件的不同组合而变化,各区域的环境条件组合最利于其建群种的生长;引进种对引种地环境变化的反应调节较乡土种敏感;地理位置相距较近的近缘种间生理特性相近,引种易于成功。

关键词:生态脆弱带;干草原;荒漠草原;草原化荒漠;小叶锦鸡儿;中间锦鸡儿;柠条锦鸡儿;生理生态学特性

Ecophysiological characteristics of kindred dominant shrubs in different areas of ecologically vulnerable zone

ZHOU Hai-Yan^{1,2}, ZHANG Jing-Guang¹, LI Xin-Rong¹, WANG Xin-Ping¹, ZHAO Liang², LONG Li-Qun¹ (1. Shapotou Station of Desert Experimental Research, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Lab. of Arid Agro-Ecology of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 168~175.

Abstract: *Caragana microphylla* Lam, *Caragana intermedia* Kuang et H. C. Fu and *Caragana korshinskii* Komar are dominant shrubs in three typical regions of the ecologically vulnerable zone in northern China—Horqin sandy land, Mu Us sandy land and Tengger desert, respectively. In order to understand the differences in characteristics of desert plant species with close genetic relationship but in different climatic zones that are far away from each other in geographic location and to explore the possibility for successful introduction of kindred species, a comparative study was conducted on gas exchange characters, chlorophyll fluorescent parameters, β carotin content and proline accumulation rate of these three species in their native habitats and introduced area (Tengger desert). The results show that dominant shrubs of different regions had different gas exchange features, which varied with the interplay between light intensity, temperature and humidity of the regions. The environmental conditions specific to each region were most favourable for its dominant shrub. Introduced species were more sensitive to the environmental changes of new place than local species, and kindred species from adjacent distribution regions displayed similar physiological properties and, therefore, can be successfully introduced.

Key words: ecologically fragile zone; semiarid steppe; desertified steppe; steppified desert; *Caragana microphylla*; *Caragana intermedia*; *Caragana korshinskii*; ecophysiological characteristics

文章编号:1000-0933(2005)01-0168-08 中图分类号:Q142,Q945 文献标识码:A

科尔沁沙地、毛乌素沙地和腾格里沙漠分别属于半干旱干草原、半干旱干草原-干旱草原化荒漠过渡地带和草原化荒漠地

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000048704);国家自然科学基金资助项目(90202015)

收稿日期:2003-09-11; **修订日期:**2004-03-25

作者简介:周海燕(1963~),女,内蒙古赤峰市人,博士,研究员,主要从事干旱区、半干旱区植物生理生态学研究。E-mail: Zhouhy@ns.lzb.ac.cn

Foundation item: the State Key Basic Research and Development Plan of China(No. G2000048704); the National Natural Science Foundation of China(No. 90202015)

Received date: 2003-09-11; **Accepted date:** 2004-03-25

Biography: ZHOU Hai-Yan, Ph. D., Professor, mainly engaged in plant ecophysiology in the arid and semiarid areas. E-mail: Zhouhy@ns.lzb.ac.cn

带,豆科锦鸡儿属的小叶锦鸡儿、中间锦鸡儿、柠条锦鸡儿(柠条)分别是各区的优势灌木^[1~5]。它们虽然分别生长在地理位置相距很远的不同气候类型区,但亲缘关系较近^[6],在脆弱生态环境的保护、恢复重建以及脆弱的生态平衡的维持中起着重要的作用。有关这3种灌木气体交换特征的研究已有不少报道^[7~12],但多侧重于植物在原产地生理生态特性的研究,对它们在不同区域间和同一区域内生理生态学特性变化的对比研究未见报道。

科尔沁沙地、毛乌素沙地和腾格里沙漠均为我国北方生态脆弱带的典型区域,对全球气候变化响应敏感,其脆弱的生态环境与不合理的人类活动相互作用极易发生沙漠化^[13]。我国的生物防沙治沙工作已进行多年,虽已取得了显著效果,但固沙植物种类单一,植被稳定性差,缺乏自然更新能力。所以在强调“种树种草”、“适地适树”的同时,对于植物种类稀少的荒漠地区,增加“物种多样性”同等重要。我国治沙工作者总结出了干旱沙漠地区间引种“从西向东引种易于存活”的结论,这个结论是从引进种在成活、生长、开花、结实、固沙、寿命等方面的调查中得出的^[14],很少有人进行成功与失败原因的进一步分析。

由此,对这3种灌木在原产地和引种地(分别进行土壤干旱和灌水处理)的光合作用和蒸腾作用、气孔调节、水势、叶绿素荧光、 β 胡萝卜素和脯氨酸累积等特性的变化进行了对比研究,旨在从机理上探究不同气候类型区锦鸡儿属优势灌木对沙漠环境(包括极端环境条件)的适应能力、种间的差异及产生差异的原因;阐明亲缘关系较近的引进种和乡土种在严酷的环境条件下能否共存的机制,为脆弱生态环境的保护、恢复重建提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区自然概况

(1)科尔沁沙地 试验地选择在内蒙古奈曼旗中国科学院奈曼沙漠化研究站(120°55'E,42°23'N,海拔360m)。奈曼旗位于科尔沁沙地东南部,属半干旱干草原地带。冬春干旱多风,夏季温暖且降雨相对丰富,秋冬短而凉爽。年平均温度6.4℃;年降雨量366mm,季节变化明显,90%集中在4~9月份的植物生长季节。年蒸发量1935mm;无霜期150d。地带性土壤为沙质栗钙土,由于沙漠化的影响在多数地区已退化成风沙土。主要植物种有小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、扁蓿豆(*Melilotus ruthenicus*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)和狗尾草(*Setaria viridis*)等^[2,15]。

(2)毛乌素沙地 试验地选择在内蒙古伊金霍洛旗(109°51'E,39°02'N,海拔1356m),为半干旱干草原地带。年平均温度6.2℃;年降雨量350mm,80%集中在6月中旬到9月中旬。年蒸发量2150mm;无霜期140d。除了仅分布在梁地上的地带性栗钙土(在西部边缘地带为棕钙土)和滩地上的沙质草甸土外,绝大部分地区分布着风沙土。主要植物种有中间锦鸡儿(*Caranaga intermedia*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、牛心朴子(*Cynanchum komarovii*)、蒙古岩黄芪(*Hedysarum mongolicum*)、沙柳(*Salix psammophila*)和旱柳(*Salix matsudana*)(人工种植)^[16~19]。

(3)腾格里沙漠 试验区选择在宁夏中卫县中国科学院沙坡头沙漠试验研究站(104°51'E,37°27'N,海拔1339m)。沙坡头位于腾格里沙漠东南缘,属干旱草原化荒漠地带。年平均温度9.6℃;年降雨量188mm,主要集中在夏季(7~8月份),冬春和秋季偶有降雨或降雪(9月至翌年5月份);年蒸发量3000mm;无霜期185d。土壤基质为流沙,沙层稳定含水量仅2%~3%。主要植物种有柠条锦鸡儿(*Caranaga korshinskii*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、籽蒿(*Artemisia sphaerocephala*)和沙拐枣(*Calligonum arborescens*)等^[20]。

1.2 研究材料

(1)小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.) 灌木,高1~3m;老枝黄灰色或灰绿色,嫩枝被毛,直立或弯曲;小叶5~10对,倒卵形或倒卵状矩圆形,长5~10mm,宽2~8mm,先端锐尖,钝或稍凹,锯短刺尖,幼时被短柔毛;花冠黄色;荚果圆筒形,长4~5cm,宽4~5mm。生于草原地区的固定、半固定沙丘或平坦沙地、山坡灌丛。产于科尔沁沙地、浑善达克沙地。为草原地带优良固沙植物^[5]。

(2)中间锦鸡儿(*C. intermedia* Kuang et H. C. Fu) 灌木,高0.7~2m;老枝黄灰色或灰绿色,幼枝被绢状柔毛;小叶3~8对,椭圆形或倒卵状椭圆形,长3~8mm,宽2~7mm,先端圆或钝,有短刺尖,两端密被绢状柔毛;花冠黄色;荚果条状披针形或短圆状披针形,先端短渐尖,无毛,长2.5~3.5cm,宽5~6mm。生于固定沙丘、平坦沙地或黄土丘陵地。产于内蒙古(锡盟、伊盟和乌盟)、宁夏河东沙地(同心县、盐池县)和陕西北部(榆林)。适于草原和半荒漠固沙和绿化荒山用^[5]。

(3)柠条锦鸡儿(*C. korshinskii* Komar.) 灌木,有时小乔木,高1~4m;老枝金黄色,有光泽,嫩枝被白色柔毛;小叶6~8对,倒披针形或矩圆状披针形,长7~8mm,宽2~3.5mm,先端锐尖,有短刺尖,两面密被伏生绢毛,灰绿色;花冠黄色;荚果扁披针形,长1.5~3.5cm,宽6~7mm。生于荒漠、半荒漠地区的固定沙丘。产于内蒙古(伊盟西北部、巴盟、阿盟)、宁夏西部(陶乐、石嘴山、中宁、中卫、灵武)、甘肃河西走廊,蒙古国也有^[5]。

小叶锦鸡儿引自辽宁章古台,中间锦鸡儿引自陕西榆林,二者均于1982年栽植在腾格里沙漠沙坡头地区有灌溉条件的引种圃内。

1.2 测定方法

原产地的测定地点均选择在半流动沙地,无灌溉条件。

引种圃内的测定分为土壤干旱和湿润两种处理,以连续 2 个月无降雨也无灌溉的土壤含水量条件作为干旱处理,以干旱后进行大水漫灌 4d 后的土壤含水量作为湿润处理。

在植物生长旺季,(7 月 20 日~8 月 5 日),用 LI-6200 便携式光合仪(Li-6200, Li-Cor inc., Lincoln, NE, USA)测定柠条锦鸡儿、小叶锦鸡儿和中间锦鸡儿叶片的光合特性;利用调制式荧光仪测定(PAM 2000, Heinz Walz, Effeltrich, Germany)测定 PS II 光化学效率(F_v/F_m);利用压力室(Model ZLZ-5, 中国兰州大学产)测定当年生新枝的水势(ψ_w)。每种灌木选择 5 个长势良好的植株作为测定株,选择晴天无风日,在树冠上部向阳方向选择充分展开的健康叶片进行测定,从 6:00~19:00 每隔 2h 测定一次作为日进程记录。

土壤含水量用烘干称重法(取样深度为 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 150cm);脯氨酸含量(*Pro*)的测定用比色法^[21];β胡萝卜素(β -Car)的测定用 Arnon 的方法^[22];分析样品采样时间与野外测定时间同步,样品置液氮中固定并保存,室内测定。

每一试验区的测定重复 2d,取平均值。

1.3 统计分析

同种在不同区域或处理间、同一区域或处理在不同种间的差异显著性用单因素方差分析,在 $p=0.05$ 的水平,LSD 检验。室内分析(脯氨酸等)为 21 个数据的平均值,野外测定(光合速率等)为 42 个数据的平均值。

2 结果

2.1 不同区域小环境因子的对比分析

就光合有效辐射(*PAR*)的日变化来看(图 1a),科尔沁沙地由于地理位置偏东而日出早,在 6:00 *PAR* 即可达 1200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,在 9:00~13:00 值较高;腾格里沙漠和毛乌素沙地的日出稍晚,*PAR* 在 11:00~15:00 值较高。

气温(*CT*)的日变化基本跟随 *PAR* 的变化(图 1b),科尔沁沙地高温时段(9:00~15:00)早于腾格里沙漠和毛乌素沙地(13:00~17:00),科尔沁沙地最高温和腾格里沙漠相近(37°C),高于毛乌素沙地(31°C);引种圃内的最高温(干旱处理)可达 45°C。

由图 1c 可见,毛乌素沙地的 *RH* 可在夜间得到很好的恢复,日间保持在 40%以上;科尔沁沙地的 *RH* 虽然在夜间能得到一定的恢复,但日间可降至 21%;干旱引种圃内的 *RH* 在夜间和黄昏恢复不明显,在 15:00~17:00 *RH* 降到了 20%以下;灌水使引种圃的 *RH* 日间有一定的恢复。

图 1d 显示,引种圃灌水后 150cm 土层的土壤含水量大幅度增加,土壤含水量可达 6%,这种土壤含水量可以对深根系的锦鸡儿属灌木供应较充足的水分;干旱处理的土壤含水量仅 1.92%;自然状况下腾格里沙漠、毛乌素沙地和科尔沁沙地的土壤含水量分别为 2.75%、3.49%和 4.2%。

2.2 小叶锦鸡儿引种前后气体交换特征的变化

小叶锦鸡儿在原产地的光合速率(P_n ,图 2a)和气孔导度(g_s ,图 2c)在早 6:00 即达最高值,这与该区较早的日出及当时适宜的温湿条件有关。引种至干旱的腾格里沙漠后,高温、高光辐射叠加低湿,植物小枝水势(ψ_w ,图 2d)整日低下, P_n 、蒸腾速率(E ,图 2b)和 g_s 变得平缓, P_n 、 E 和 g_s 分别下降到了原产地的 23%、49.5% 和 19.7%;土壤含水量的增加可使其 P_n 、 E 和 g_s 分别恢复到原产地的 70%、168% 和 117%,并在日间出现明显的峰值,但由于光照低,尽管早晨温湿条件适宜,也未出现在原产地时早晨 P_n 和 g_s 的峰值。

2.3 中间锦鸡儿引种前后气体交换特征的变化

仅就灌木光合作用而言,毛乌素沙地在测定日的光照和温湿条件是三区内的最佳组合,它使中间锦鸡儿植株体内水分状况较好, ψ_w 较高, g_s 日均值最大,相应的 P_n 和 E 的日均值达最高(图 2a~图 2d,表 1)。引种至腾格里沙漠后,严酷的环境条件使 P_n 、 E 和 g_s 分别降到了原产地的 34.7%、16.8%和 20.6%,光合日变化曲线由原产地的“单峰”型变为“平缓”型;当土壤水分条件好转时, P_n 、 E 和 g_s 可恢复到原产地的 76.7%、48.8% 和 131%; P_n 和 E 的日变化曲线也与原产地相近。

2.4 不同环境条件下柠条锦鸡儿气体交换特征的变化

腾格里沙漠半流动沙地的土壤含水量高于干旱的引种圃,而低于湿润的引种圃,灌木小枝水势呈现相应的变化(图 2d),结合不同的温湿和光照条件, P_n 、 E 和 g_s 亦呈现相应的变化(图 2a,b,c)。其中,干旱处理条件 P_n 、 E 和 g_s 分别降到了流沙区的 85.2%、93.4%和 89.4%;湿润处理条件下各值分别恢复到流沙区的 162%、416%和 261%, E 的大幅度增加使其水分利用效率降低;流沙区和干旱处理的柠条 P_n 和 E 日变化曲线平缓,恢复灌水后日间呈现明显的波动。

2.5 3 种灌木对引种地环境条件的适应性调节

由表 1 和图 2d 可见,小叶锦鸡儿和中间锦鸡儿在原产地的水势相近且高于生长于沙地的柠条锦鸡儿;在土壤极端干旱的引种圃,小叶锦鸡儿和中间锦鸡儿的水势大幅度降低,水势值相近,但仍高于柠条锦鸡儿;恢复灌水后,以中间锦鸡儿的水势最

高,其次为小叶锦鸡儿,柠条锦鸡儿的水势仍为最低。3种灌木水势的日变化均随环境因子而呈现相应的波动,湿润条件下小叶锦鸡儿和中间锦鸡儿日间波动幅度(57%和82%)高于柠条(18%)。

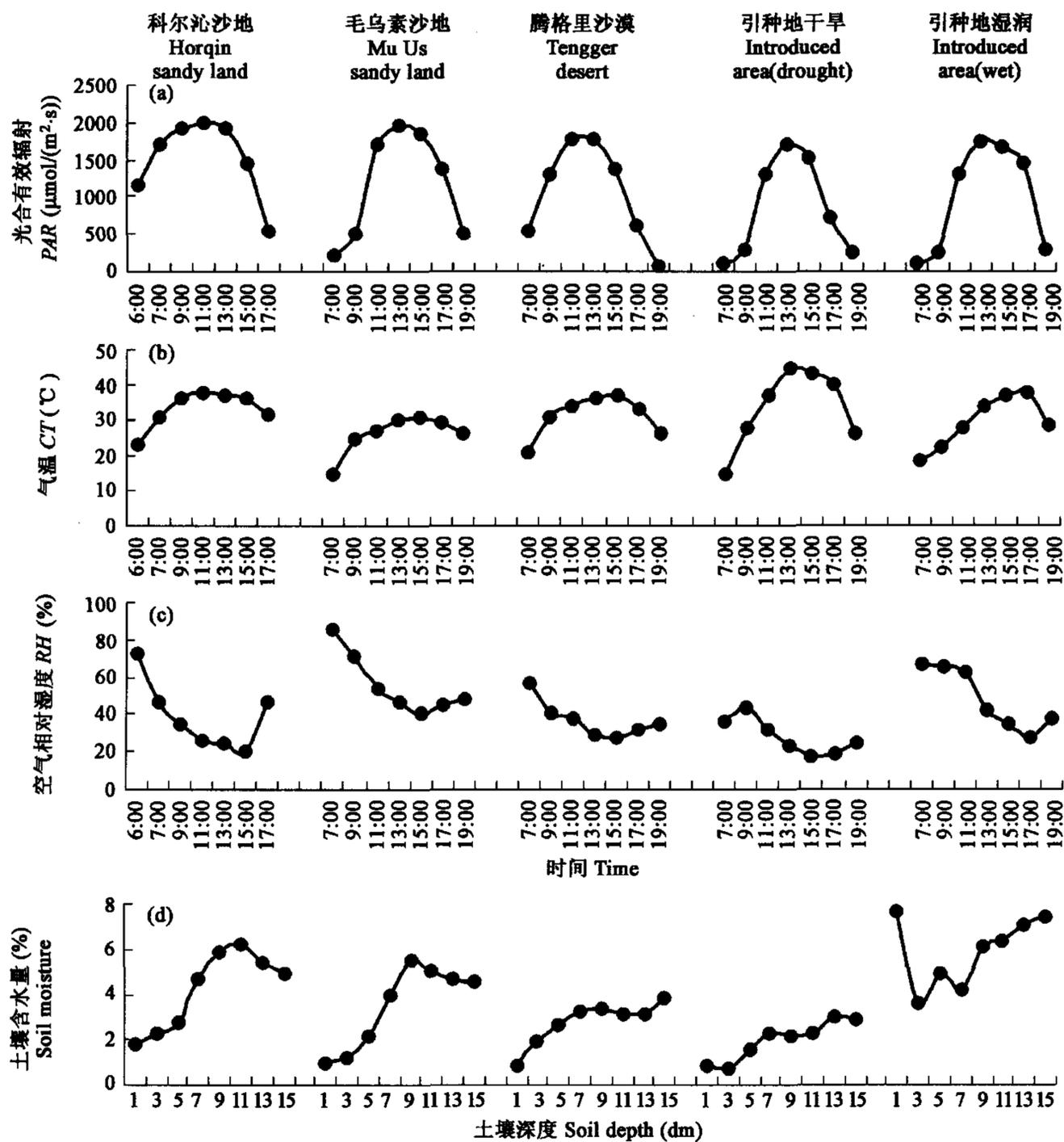


图1 不同区域小环境因子的日变化特征

Fig. 1 Diurnal variation in different regions and treatments

(a) Photosynthetically active radiation(PAR), (b) Air temperature(CT), (c) Air humidity(RH), (d) Soil moisture content

表1和图2e显示,土壤干旱条件下小叶锦鸡儿和中间锦鸡儿的脯氨酸(Pro)累积量高于柠条锦鸡儿,在午后均增加明显;土壤湿润时小叶锦鸡儿和中间锦鸡儿脯氨酸的累积量分别下降到干旱处理时的50%~60%,日间没有明显波动。柠条锦鸡儿的脯氨酸累积特征不同于前两者,无论土壤干旱还是湿润,其累积均在午后呈上升趋势,干湿日均累积量变化幅度在6%左右,无明显差异。由图2f可见,土壤干旱时3种灌木的PS II光化学效率(F_v/F_m)在9:00~17:00较低,说明3种灌木均发生了不同程度光合作用的光抑制,但光抑制可在黄昏得到恢复。土壤湿润时3种灌木的 F_v/F_m 日间无明显变化,光抑制减轻。

从β胡萝卜素(β -Car)的累积特征来看(表1、图2g),土壤干旱时3种灌木的 β -Car的含量日均值总体上高于土壤湿润时,这说明高光辐射并未对3种灌木的β胡萝卜素造成破坏,光抑制的发生只是一种保护性反应。无论土壤干旱还是湿润,中间锦鸡儿的β胡萝卜素含量最高,说明其耗散过量光能的能力即保护光合机构的能力强。

3 讨论

将3种锦鸡儿在其原产地的生理特性及环境因子进行对比,可以发现,毛乌素沙地的土壤含水量较高,一日内光、温、湿状况利于光合,其优势灌木中间锦鸡儿的光合速率和蒸腾速率较高,日变化曲线呈现明显的波动。科尔沁沙地的土壤含水量与毛乌素沙地相近,由于地理位置关系日出较早,在6:00有光、温、湿的最佳组合,因此小叶锦鸡儿的光合速率在6:00出现一日内的峰值,随后急剧降低,日变化曲线呈“凹谷”型。腾格里沙漠的高温、低湿和低的土壤含水量等环境条件则在3区中最为严酷,

1 日内柠条锦鸡儿的光合速率和蒸腾速率值很低,日变化曲线呈“平缓”型。由此可见,虽然科尔沁沙地与毛乌素沙地大的环境条件(如多年平均降雨量、蒸发量和气温等)相近并优于腾格里沙漠,但各地小环境因子又有别于大气候条件,而且地理位置的不同还可造成 1 日内光、温、湿不同组合,植物因之进行相应的调节,光合作用和蒸腾作用等生理过程呈现相应的变化。

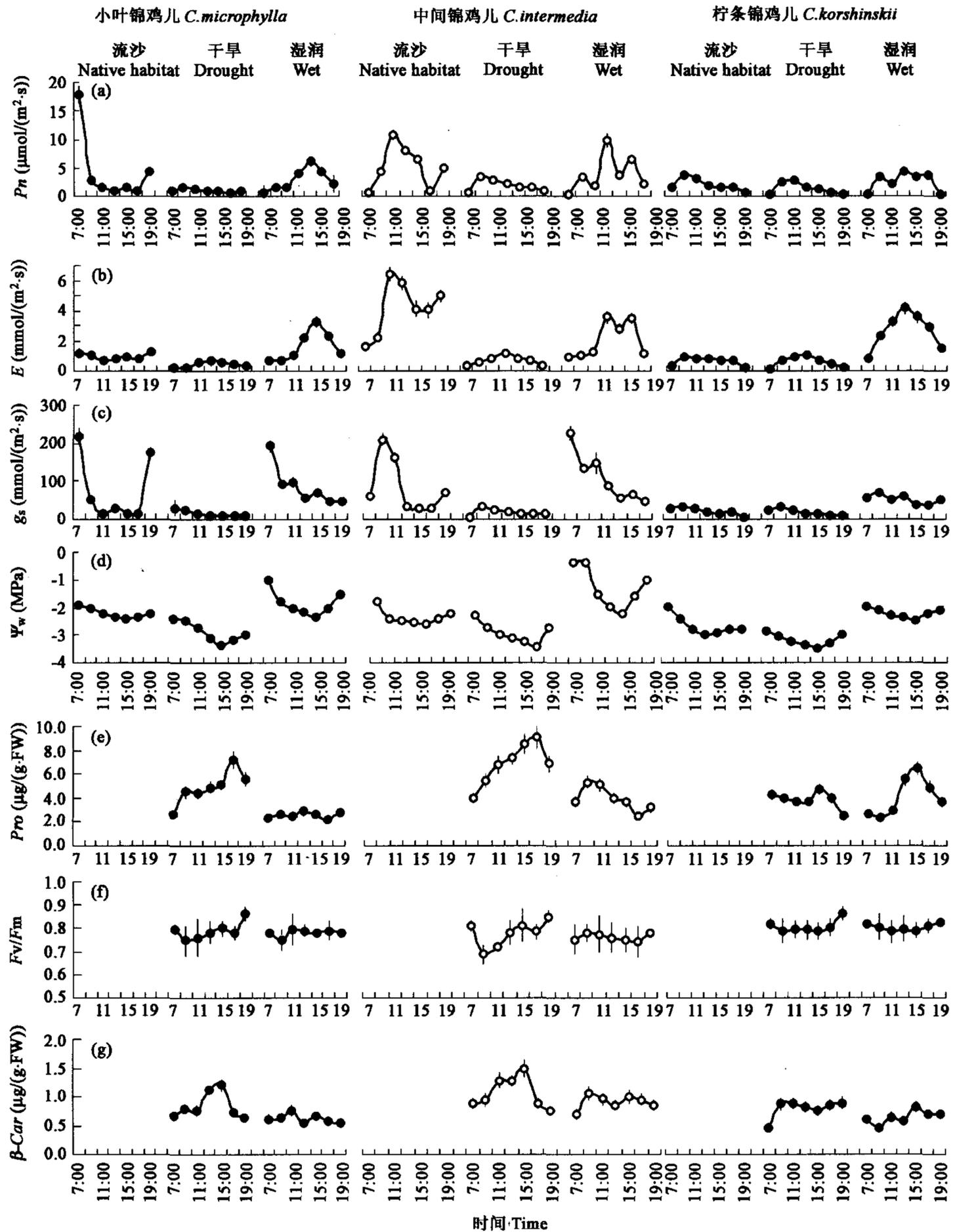


图 2 3 种灌木引种前后气体交换与调节机制的日变化

Fig. 2 Diurnal variation of three shrub species before and after introduction

(a) 净光合速率 Photosynthetic rate (P_n), (b) 蒸腾速率 Transpiration rate (E), (c) 气孔导度 Stomatal conductivity (g_s), (d) 小枝水势 Shoot water potential (ψ_w), (e) 脯氨酸含量 Proline contents (Pro), (f) PS II 光化学效率 PS II photochemical efficiencies (F_v/F_m), (g) β 胡萝卜素含量 β carotin contents ($\beta-Car$), 图内数据为平均值 \pm SE Mean \pm S. E., $n=3\sim 8$

小叶锦鸡儿和中间锦鸡儿引种到属于草原荒漠的腾格里沙漠后,在引种地土壤极端干旱的条件下,其土壤含水量已达该区土壤含水量的下限^[14],测定日的最高气温可达该区的极端高温^[14],应该断定,此时的小环境条件已基本为荒漠草原的极端天

气,这时测得的各生理特征值应为最低,灌木之间的气孔导度和蒸腾速率已无明显差异,说明此时的土壤含水量叠加严酷的小气候条件,严重影响了植物的生理过程(图 2、表 1)。土壤含水量的增加可使引进种的气孔导度恢复或超过了原产地的水平,但光合速率只恢复到原产地的 70%~80%,说明除土壤水分条件外,原产地环境条件的组合最利于其建群灌木的生长。

表 1 3 种灌木引种前后光合速率(P_n),蒸腾速率(E),气孔导度(g_s),小枝水势(ψ_w),脯氨酸含量(Pro),PS II 光化学效率(F_v/F_m)和 β 胡萝卜素(β -Car)的日均值

Table 1 Variations in photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (E), stomatal conductivity (g_s), shoot water potential (ψ_w), proline content (Pro), PS II photochemical efficiency (F_v/F_m) and β carotin content (β -Car) for three shrub species before and after introduction

种名 Species	区域或处理 Regions or treatments	P_n ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	E ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	g_s (MPa)	ψ_w (MPa)	Pro ($\mu\text{g g}^{-1}\text{FW}^{-1}$)	β -Car ($\mu\text{g g}^{-1}\text{FW}^{-1}$)
小叶 锦鸡儿 C. Micro- Phyla	科尔沁沙地 ^① (半流动沙地) ^②	4.22±0.39 ^{Aa}	0.97±0.15 ^{Aa}	73.27±6.51 ^{Aa}	-2.21±0.08 ^{Aa}		
	引种地 ^③ (干旱) ^④	0.97±0.22 ^{Ba}	0.47±0.11 ^{Ba}	14.41±1.42 ^{Ba}	-2.89±0.09 ^{Ba}	4.91±0.48 ^{Aa}	0.84±0.13 ^{Aa}
中间 锦鸡儿 C. Inter- media	引种地 (湿润) ^⑤	2.95±0.37 ^{Ca}	1.63±0.18 ^{Ca}	85.70±7.20 ^{Ca}	-1.83±0.06 ^{Ca}	2.57±0.27 ^{Ba}	0.62±0.12 ^{Ba}
	毛乌素沙地 ^⑥ (半流动沙地)	4.93±0.51 ^{Ab}	4.04±0.34 ^{Ab}	80.71±7.33 ^{Ab}	-2.36±0.08 ^{Aa}		
柠条 C. kor- shinskii	引种地 (干旱)	1.71±0.24 ^{Bb}	0.68±0.11 ^{Ba}	16.64±1.43 ^{Ba}	-2.94±0.09 ^{Ba}	6.29±0.63 ^{Ab}	1.09±0.13 ^{Ab}
	引种地 (湿润)	3.78±0.39 ^{Cb}	1.97±0.24 ^{Cb}	105.34±9.38 ^{Cb}	-1.29±0.08 ^{Cb}	3.61±0.40 ^{Bb}	0.88±0.09 ^{Bb}
	腾格里沙漠 ^⑦ (半流动沙地)	1.49±0.19 ^{Ac}	0.61±0.15 ^{Ac}	19.66±2.37 ^{Ac}	-2.72±0.08 ^{Ab}		
	引种圃 ^⑧ (干旱)	1.27±0.16 ^{Bc}	0.57±0.09 ^{Aa}	17.37±2.46 ^{Aa}	-3.22±0.09 ^{Bb}	3.76±0.39 ^{Ac}	0.75±0.08 ^{Aa}
	引种圃 (湿润)	2.41±0.26 ^{Cc}	2.54±0.26 ^{Bc}	51.34±4.82 ^{Bc}	-2.26±0.06 ^{Cc}	4.01±0.47 ^{Ac}	0.61±0.09 ^{Ba}

图内数据为平均值±S.E. ($n=21\sim42$); 不同的大写字母表示同种灌木在不同区域或处理条件下有显著差异,不同小写字母表示相同区域或处理条件下不同植物种间有显著差异($P<0.05$, LSD 检验) Values shown are mean ± S.E. ($n=21\sim42$); Different upper-and lowercase letters indicate significant differences between different regions or treatments of the same species ($p<0.05$) and between different species of the same regions or treatments ($p<0.05$), respectively; ①Horqin sandy land, ②Semimobile sand dune, ③Introduced area, ④Drought, ⑤Wet, ⑥MuUs sandy land, ⑦Tengger desert, ⑧Nursery garden

引种地不同的土壤含水量条件首先影响到植物水势的高低,而一日内水势的变化特征则受光、温、湿等小环境因子的作用。随着引种地土壤干湿条件的不同,3 种灌木小枝水势呈现出相应的变化,其中以中间锦鸡儿的变化幅度为最大(128%),小叶锦鸡儿次之(58%);但不论土壤含水量如何变化,柠条锦鸡儿的水势值始终低于小叶锦鸡儿和中间锦鸡儿。在土壤湿润条件下,水势日间波动幅度也是以中间锦鸡儿为最高(82%),小叶锦鸡儿次之(57%)。这在一定程度上说明乡土种对于外部环境的变化已有了长期的适应能力,而引进种则通过机体内部的大幅度调节来适应变化的环境。

脯氨酸的累积利于细胞的渗透调节,解毒贮氮,保护膜代谢功能^[23],而 β 胡萝卜素则参与植物体内耗散过量激发光能的过程,保护光合器官免受强光破坏,增加植物的抗逆性^[24]。中间锦鸡儿在引种地极端干旱条件下的脯氨酸和 β 胡萝卜素累积明显,小叶锦鸡儿的脯氨酸和 β 胡萝卜素含量也有一定的变化调节。可见,引进种为适应引种地的恶劣环境,在内部机制上可做出一定的调节。乡土种柠条的各特征值则无明显变化,原因可能是种间差异所致,也可能是其长期适应严酷环境条件的结果。

对生长在腾格里沙漠东南缘格状沙丘上的中间锦鸡儿进行的调查发现^[25],其成活和生长均良好,只是植株不如原产地高大;4 龄中间锦鸡儿的根系与同龄当地产的柠条锦鸡儿相比,根较深,根的密集度大,说明中间锦鸡儿的根系比柠条还发达,引种算是成功的。从测定结果看,极端条件下中间锦鸡儿光合速率与乡土种柠条相近,并在土壤湿润时得到较好的恢复,同时水分利用效率提高,说明比较适合引种地生长。而对小叶锦鸡儿幼苗根系的生长状况调查显示^[25],小叶锦鸡儿幼苗的根系不具适应严酷生境的特性。研究发现,小叶锦鸡儿在极端条件下光合作用几乎停止,最好的土壤水分条件也不能使光合作用得到较好的恢复,说明小叶锦鸡儿在腾格里沙漠虽然成活,但代价是光合生长的大幅度降低。乡土种柠条在不同土壤水分条件下气体交换特征值无明显的变化则说明,柠条对干旱的环境条件有着较强的适应性,但土壤水分过多则不利于其对水分的经济利用。

除分布区域不同外,3 种锦鸡儿属灌木在外部形态上差别不明显。其中小叶锦鸡儿与中间锦鸡儿和柠条锦鸡儿的差别仅在于荚果的形状和长度,而柠条锦鸡儿与小叶锦鸡儿和中间锦鸡儿的差别仅为树皮的颜色、小叶的形状和被毛^[5,26]。种皮的扫描

电镜观察、解剖结构和花粉分析结果表明^[26~28], 3 个种在系统发育上关系较亲近。其中, 中间锦鸡儿为柠条锦鸡儿和小叶锦鸡儿的中间类型, 是干草原和荒漠草原的沙生旱生灌木^[26], 也就是说在生态类型上中间锦鸡儿是典型草原旱生灌木小叶锦鸡儿和沙漠旱生灌木柠条锦鸡儿的中间类型。但也有不同的研究报道, 认为中间锦鸡儿是柠条锦鸡儿的一个亚种^①, 而毛乌素沙地的锦鸡儿是上述 3 种锦鸡儿的杂种带^[30]。仅就本文所研究的 3 种灌木的生理生态特性来看, 中间锦鸡儿在荒漠极端环境条件下, 表现出类似于柠条的特性, 环境条件好转时又表现出类似于小叶锦鸡儿的特性, 这与周永刚等人的研究结果类似^[6]。也证明即使是近缘种, 也要在地理位置相距较近的条件下引种才容易成功。

References:

- [1] Zhao S Q. *Physical geography in arid zones of China*. Beijing: Science Press, 1985. 1~17.
- [2] Zhao H L, Liu X M, Li S G. The feature and property of fragile eco-environment and cause analysis in Kerqin sandy land. *Journal of Desert Research*, 1998, **18**(supp. 2):10~17.
- [3] Li X R, Liu X M, Yang Z Y. A study on the relation of shrub community and environment in desertified steppe and steppeified desert of Ordos Plateau. *Journal of Desert Research*, 1998, **18**(2):123~130.
- [4] Yan M C, Dong G R, Li B S. A preliminary study on the evolution of southeastern margin in Tengger desert. *Journal of Desert Research*, 1998, **18**(2):111~117.
- [5] Liu Y X, Yang X L, Yao Y Y. *Flora in desert of China*(Vol. 2). Beijing: Science Press, 1987. 228~229.
- [6] Zhou Y G, Wang H X, Hu Z A. Variation of breeding systems in populations of *Caragana intermedia* (Leguminosae) in Maowusu sandy grassland. *Acta Bot. Sin.*, 2001, **43**(12): 1307~1309.
- [7] Jiang G M, He W M. Species- and habitat variability of photosynthesis, transpiration and water use efficiency of different plant species in Maowusu sand area. *Acta Bot. Sin.*, 1999, **41**(10):1114~1124.
- [8] Xiao C W, Zhang X S, Zhao J Z, et al. Response of seedlings of three dominant shrubs to climate warming in Ordos Plateau. *Acta Bot. Sin.*, 2001, **43**(7): 736~741.
- [9] Xiao C W, Dong M, Zhou G S, et al. Response of *Salix psammophila* seedlings to simulated precipitation change in Ordos Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(1): 171~176.
- [10] Zhang L P, Wang X P, Liu L C. Study on gas exchange characteristics of main constructive plants *A. ordosica* and *C. korshinskii* in Shapotou region. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(2):133~137.
- [11] Zhou H Y. Physioecological characteristics of four dominant plant species in Kerqin sandy land. *Chin J. Appl. Ecol.*, 2000, **11**(4):587~590.
- [12] Zhou H Y, Zhao A F. Ecophysiological characteristics and their competition mechanism of the two dominant grasses in Horqin sandy land: *Artemisia halodendron* and *Artemisia frigida*. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(6): 894~900.
- [13] Jing H L, Dong G R, Su Z Z. Reconstruction of spatial patterns of Holocene desert-loess boundary. *Chin. Sci. Bull.*, 2001, **46**(7): 538~543.
- [14] Zhao X L. Establishment of protective system at Zhongwei-Gantang section of Baotou-Lanzhou railway, in: Edited by Shapotou desert research and experiment station, Lanzhou Institute of Desert Research. *Chinese academy of sciences, Sand stabilization principles and measures at Shapotou section of Baotou-Lanzhou railway*. Yinchuan: Ningxia People's Press, 1991. 52~94.
- [15] Cang X L, Zhao A F, Li S G. Responses of species diversity to precipitation change on fixed-dunes of the Naiman banner region. *Acta Phytocol. Sin.*, 2000, **24**(2): 147~151.
- [16] Li B. Zonal vegetation types and their eco-geographical characteristics in Inner Mongolia. *Acta scientiarum naturalium universitatis neimongol*, 1962, (2).
- [17] Li B. *Study in natural resources and environment of Erdos Plateau in Inner Mongolia*. Beijing: Science Press, 1990. 81~107.
- [18] Zhang X S. Principles and optimal models for development of Maowusu sandy grassland. *Acta Phytocol. Sin.*, 1994, **18**(1): 1~16.
- [19] Guo K. Cyclic succession of *Artemisia ordosica* krasch community in the Mu Us sandy grassland. *Acta Phytocol. Sin.*, 2000, **24**(2): 243~247.
- [20] Li X R, Zhang J G, Liu L C, et al. Plant diversity in the process of succession of artificial vegetation types and environment in an arid desert region of China. *Acta Phytocol. Sin.*, 2000, **24**(3): 257~261.
- [21] Zhu G L, Deng X W, Zuo W X. Measurement of proline in plant. *Plant Physiological Communication*, 1984, (1): 35~37.
- [22] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.*, 1949, **24**:1~15.

① 徐朗然. 中国植物学会 55 周年学术论文摘要. 1989, 188

- [23] Liu Y L. *Adverse Physiology on Plant Water Regime*. Beijing: Agriculture Press, 1992, 70~80.
- [24] Willeken H, Camp W V, Montagu M V, et al. Sulfur dioxide and ultraviolet-B have similar effects on mRNA accumulation of antioxidant genes in *Nicotiana plumbaginifolia* L. *Plant Physiology*, 1994, **106**: 1007~1014.
- [25] Liu Y X, Li Y J, Yang X L. Root systems of psammophytes, in Edited by Shapotou desert research and experiment station, Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences, Research in moving sand control, Yinchuan, Ningxia People's Press, 1991. 185~209.
- [26] Fu J Q. *Caragana* genus. Flora in Neimenggu (Vol. 3). Huhehaote: Neimenggu People's Press, 1989. 215~238.
- [27] Zang X F. Study in species of *Caragana* for sand fixation. *Journal of Desert Research*, 1992, **12**(2): 39~46.
- [28] Yan L, Li H, Liu Y. The anatomical ecology studies on the leaf of 13 species in *Caragana* genus. *Jouranal of Arid Resources and Environment*, 2002, **16**(1): 100~106.
- [29] Jia L, Qu S Z. The study progress on the genus *Caragana* fabr. *Bulletin of Botanical Research*, 2001, **21**(4): 515~518.
- [30] Wang H X, Hu Z A, Zhong M, et al. Seed protein diversity of *Caragana* population in Maiwusu sandy grassland and its biological implication. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, **14**(4): 366~371.

参考文献:

- [1] 赵松乔. 中国干旱区自然地理. 北京: 科学出版社, 1985. 1~17.
- [2] 赵哈林, 刘新民, 李胜功. 科尔沁沙地脆弱生态环境的基本属性特征和成因分析. *中国沙漠*, 1998, **18**(增刊 2): 10~17.
- [3] 李新荣, 刘新民, 杨正宇. 鄂尔多斯高原荒漠化草原和草原化荒漠灌木类群与环境关系的研究. *中国沙漠*, 1998, **18**(2): 123~130.
- [4] 阎满存, 董光荣, 李保生. 腾格里沙漠东南缘沙漠演化的初步研究. *中国沙漠*, 1998, **18**(2): 111~117.
- [5] 刘焯心, 杨喜林, 姚育英. 中国沙漠植物志(第 2 卷). 北京: 科学出版社, 1987. 228~229.
- [6] 周永刚, 王洪新, 胡志昂. 毛乌素沙地中间锦鸡儿群体繁育系统的变化. *植物学报*, 2001, **43**(12): 1307~1309.
- [7] 蒋高明, 何维明. 毛乌素沙地若干植物光合作用、蒸腾作用和水分利用效率种间及生境间差异. *植物学报*, 1999, **41**(10): 1114~1124.
- [8] 肖春旺, 张新时, 赵景柱, 等. 鄂尔多斯高原 3 种优势灌木幼苗对气候变暖的响应. *植物学报*, 2001, **43**(7): 736~741.
- [9] 肖春旺, 董鸣, 周广胜, 等. 鄂尔多斯高原沙柳幼苗对模拟降水量变化的响应. *生态学报*, 2001, **21**(1): 171~176.
- [10] 张利平, 王新平, 刘立超. 沙坡头主要建群植物油蒿和柠条的气体交换特征. *生态学报*, 1998, **18**(2): 133~137.
- [11] 周海燕. 科尔沁沙地主要植物种的生理生态学特性. *应用生态学报*, 2000, **11**(4): 587~590.
- [12] 周海燕, 赵爱芬. 科尔沁草原主要牧草冷蒿和差不嘎蒿的生理生态学特性与竞争机制. *生态学报*, 2002, **22**(6): 894~900.
- [13] 靳鹤龄, 董光荣, 苏志珠. 全新世沙漠-黄土边界带空间格局的重建. *科学通报*, 2001, **46**(7): 38~543.
- [14] 赵兴梁. 包兰铁路中段防护体系建立. 见: 兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所编. 包兰铁路沙坡头段固沙原理与措施. 宁夏: 宁夏人民出版社, 1991. 52~94.
- [15] 常学礼, 赵爱芬, 李胜功. 科尔沁沙地固定沙丘植被物种多样性对降水变化的响应. *植物生态学报*, 2000, **24**(2): 147~151.
- [16] 李博. 内蒙古地带性植被的基本类型及其生态地理规律. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 1962, (2).
- [17] 李博. 内蒙古鄂尔多斯高原自然资源与环境研究. 北京: 科学出版社, 1990. 81~107.
- [18] 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设原则与优化模式. *植物生态学报*, 1994, **18**(1): 1~16.
- [19] 郭柯. 毛乌素沙地油蒿群落的循环演替. *植物生态学报*, 2000, **24**(2): 243~247.
- [20] 李新荣, 张景光, 刘立超, 等. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究. *植物生态学报*, 2000, **24**(3): 257~261.
- [21] 朱广廉, 邓兴旺, 左卫线. 植物体内游离脯氨酸的测定. *植物生理学通讯*, 1984, **1**: 35~37.
- [23] 刘有良. 植物水分逆境生理. 北京: 农业出版社, 1992. 84~90.
- [25] 刘焯心, 李玉俊, 杨喜林. 沙生植物的根系. 见: 兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所编. 流沙治理研究. 宁夏: 宁夏人民出版社, 1991. 185~209.
- [26] 富家乾. 锦鸡儿属. 内蒙古植物志. 第 2 版, 第 3 卷. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1989. 215~238.
- [27] 张秀伏. 固沙常见锦鸡儿属植物的研究. *中国沙漠*, 1992, **12**(2): 39~46.
- [28] 燕玲, 李红, 刘艳. 13 种锦鸡儿属植物叶的解剖生态学研究. *干旱区资源与环境*. 2002, **16**(1): 100~106.
- [29] 贾丽, 曲式曾. 豆科锦鸡儿属植物研究进展. *植物研究*. 2001, **21**(4): 515~518.
- [30] 王洪新, 胡志昂, 钟敏, 等. 毛乌素沙地锦鸡儿种群形态变异. *生态学报*, 1994, **14**(4): 366~371.