

沙埋对中间锦鸡儿幼苗生长发育的影响

刘海江, 郭 柯*

(中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

摘要:在沙地环境中,沙埋是影响植物幼苗存活的一个重要因素。中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)是浑善达克沙地和毛乌素沙地固定和半固定沙丘上常见的一种沙生灌木。为了研究沙埋对其幼苗存活以及生长的影响,对出土后生长了 1 个月的中间锦鸡儿实生苗进行沙埋实验,实验处理: T_C 为对照, T_1 为沙埋幼苗地上部的 1/3, T_2 为沙埋幼苗地上部的 1/2, T_3 为沙埋到幼苗的近顶端。实验持续 4 周,每周收获 1 次。结果表明: T_C 、 T_1 和 T_2 没有幼苗死亡, T_3 有 20% 的幼苗死亡;沙埋对中间锦鸡儿幼苗的生物量、根冠比、根生物量比和茎生物量比有显著影响,叶片生物量比各处理没有显著差异,沙埋对幼苗的叶面积没有显著影响,在第 1 周 T_2 和 T_3 的小叶片面积显著大于 T_C ,在其余 3 周, T_C 与 T_1 、 T_2 的小叶片面积没有显著差异,与全埋则有显著差异;沙埋对幼苗的相对生长速率(*RGR*)和净同化速率(*NAR*)产生显著影响,实验结束时, T_3 处理幼苗的 *RGR* 和 *NAR* 显著地小于其它 3 个处理。上述结果表明,部分沙埋(T_1 、 T_2)对沙生灌木中间锦鸡儿幼苗的生长发育没有显著的影响,而全部沙埋(T_3)对其幼苗的生长发育产生显著的抑制,中间锦鸡儿是一个比较耐沙埋的物种。

关键词:沙埋;根冠比;相对生长速率;净同化速率;中间锦鸡儿幼苗

文章编号:1000-0933(2005)10-2550-06 中图分类号:Q143,Q145,Q948 文献标识码:A

The impacts of sand burial on seedling development of *Caragana intermedia*

LIU Hai-Jiang, GUO Ke* (Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2550~2555.

Abstract: Sand burial is one of the main factors that affect seedling survival in sand land. *Caragana intermedia* is a psammophilous shrub and one of the commonly occurred species in fixed and semi-fixed sand dunes in the Otindag Sand Land and the Mu US Sand Land. In order to investigate the impacts of sand burial on seedling survival and growth of the species, seed-originated seedlings of *Caragana intermedia* grown in greenhouse for a month were buried by sand with four experimental treatments: T_C , control; T_1 , one third of the above ground section was buried by sand; T_2 , half of the above ground section was buried by sand; and T_3 , all of the above ground section was buried by sand. The growth of the seedlings in different treatments was examined by harvests performed once a week during a period of four weeks. The results showed that: During the four weeks, there was no seedling decease in T_C , T_1 and T_2 , but 20% seedlings died in T_3 . Sand burial had significant effects on biomass accumulation, root/shoot (*R/S*) ratio, root mass ratio and stem mass ratio of seedlings. Root/shoot (*R/S*) ratio and root mass ratio decreased with the increasing of depth of burial. There was no significant difference among leaf mass ratios in the four treatments. Sand burial had not significant effect on leaf area of seedlings. Leaflet area of seedlings was significantly larger in T_2 and T_3 than in T_C at the first harvest. Comparing with control, T_1 and T_2 treatments did not have significantly effect on leaflet area of seedlings, but T_3 treatment did at the other three harvests. Leaflet area of seedlings trended to decrease with age in all four treatments. Sand burial had significant effects on relative growth rate (*RGR*) and net assimilation rate (*NAR*) of seedlings. *RGR* and *NAR* of seedlings were significantly lower in T_3 than in the other three

基金项目:中国科学院知识创新工程重大资助项目(KSCX1-08);国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999043507)

收稿日期:2004-05-23;修订日期:2005-03-10

作者简介:刘海江(1978~),男,内蒙古呼和浩特人,硕士生,主要从事植被生态学研究. E-mail:liuhj@lreis.ac.cn

* 通讯作者 Author for corresponding. E-mail: guoke@ibcas.ac.cn

Foundation item: The project is financially supported by Knowledge Innovation Project of CAS (No. KSCX1-08) and State Key Basic Research Development Planning Project of China (No. G1999043507)

Received date: 2004-05-23; **Accepted date:** 2005-03-10

Biography: LIU Hai-Jiang, Master candidate, mainly engaged in vegetation ecology. E-mail:liuhj@lreis.ac.cn

treatments at the end of experiment, but no significant difference existed among T_C , T_1 and T_2 treatments. These results suggest that partial sand burial of above ground section (T_1 and T_2) may not affect growth and development of *Caragana intermedia* seedlings, whereas full sand burial of above ground section may do. *Caragana intermedia* could be a sand burial tolerant species.

Key words: sand burial; root/shoot ratio; relative growth rate; net assimilation rate; *Caragana intermedia* seedlings

在沙地中,地表基质的不稳定性是对生态系统最具破坏力的因素之一,也是影响沙地植物存活与生长的重要因素^[1]。生长在沙丘迎风坡的植物常遭受风蚀,根系裸露地表,最后由于根系失水而导致植株死亡;而在背风坡的植物会被沙埋,沙埋使得植株光合面积降低,生产能力下降,生长受到影响,甚至导致死亡。沙埋对沙地生态系统的植被分布和物种组成有很大影响,它淘汰不能适应沙埋的物种,减少能够忍受沙埋的物种的多度,增加耐沙埋物种和沙生物种的多度,从而改变沙地植物群落的物种组成以及物种密度^[2];同样,沙埋对植被的演替也会产生影响。Olf 等研究发现,沙子的流动是使得沙地植被早期阶段与演替的一般模式出现偏差的主要原因,但在植被后来的演替阶段,沙埋不再是主要的选择力,沙埋对沙地中植物的种子萌发、幼苗成活以及幼苗地上地下物质分配等方面也有影响,在沙地生态系统中沙埋被认为是一种重要的自然选择力^[2~6]。

中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)是典型草原带和荒漠草原带的沙生旱生灌木,是固定和半固定沙丘上植物群落主要建群种之一^[7],它对沙地环境有很强的适应能力,是一个很好的固沙物种,在沙地植被恢复工程中常作为主要物种进行大面积种植,而且具有较高的饲用价值,可为牲畜提供优良的饲料。许多学者曾经对中间锦鸡儿成年植株或幼苗的光合特征^[8~11]、水分代谢特征^[9]、次生木质部特征^[12]、叶绿素荧光特征^[10]以及地理分布^[13]等方面进行了研究,但是对于中间锦鸡儿如何适应沙埋,尤其是幼苗适应沙埋的特点或方式的研究未见报道。本文目的是应用实验生态学的方法,通过研究中间锦鸡儿幼苗在不同程度沙埋下其生物量、根冠比、生物量分配的变化以及幼苗的生长响应,来探讨幼苗对沙埋的适应性。

1 实验设计

1.1 材料和方法

实验是 2003 年夏天在中国科学院植物研究所植物园温室内进行。育苗:选取大小均匀的中间锦鸡儿种子,用水浸泡后,均匀放置在铺有沙子的育苗盆内,覆盖 3~4cm 厚的沙层,保持湿润,每天记录出苗情况,幼苗出土后生长 2 周。移栽:培养钵(21cm×21cm)里装满经 2mm 土壤筛过滤后的沙子,钵底部的出水孔用尼龙纱堵住,以防沙子流出,预先静置 20d。选取大小一致的幼苗(连续 4d 内出土的幼苗),移栽到培养钵里,浇足量的定根水,加 50ml 营养液,营养液为市场上出售的普通营养液,按说明书的比例(1:500)稀释,生长 2 周后随机取 10 株幼苗进行收获,所得数据作为实验初始数据,剩下的幼苗随机地分成 4 组,进行 4 个沙埋处理: T_C 对照(不埋), T_1 沙埋幼苗地上部高度的 1/3, T_2 沙埋幼苗地上部高度的 1/2, T_3 沙埋除顶端约 1cm 外的植株其余地上部分。 T_C , T_1 , T_2 各有 20 个重复, T_3 有 30 个重复。经检验各处理幼苗的地上部高度没有显著差异。 T_1 , T_2 和 T_3 的幼苗沙埋部分长度分别为 $2.95\pm0.19\text{cm}$, $4.27\pm0.26\text{cm}$, $9.27\pm0.42\text{cm}$ 。实验过程中幼苗定期浇水,保证水分的充足供应。

1.2 取样

幼苗每周收获 1 次,共收获了 4 次,从 2003 年 7 月 30 日开始,8 月 26 日结束。 T_C 、 T_1 和 T_2 每个处理随机取 5 个重复, T_3 在前两次取样有 5 个重复,后两次有 7 个重复。每次收获的样品用自封袋封装,在实验室里快速分为根、茎和叶,被沙埋的茎段没有单独分开,统一归为茎,因埋在沙土中变黄的叶片留在茎上。根、茎和叶鲜样在 90℃ 下杀青 30min,70℃ 连续烘 48h 后,用天平(0.001g)称得各部分干重。

1.3 叶面积测定

叶面积数据有两种,其一为中间锦鸡儿羽状复叶的面积,即叶面积;另一个为小叶片面积,就是羽状复叶上的单个小叶片的面积。两种叶面积的测定方法不同,叶面积用扫描方法测定,先用扫描仪扫描叶片,然后在图像处理软件中进行处理。扫描时把羽状复叶上的小叶片摘下,用扫描仪扫描,图片在 Photoshop 中二值化处理后进行直方图分析,可得到叶片面积占整个图片面积的百分数,而图片面积在扫描时已经设定,就可获得羽状复叶的面积即叶面积。小叶片面积则把扫描的图片在 ImageJ 图形处理软件中进行参数设定,然后就可计算单个小叶片的面积。

1.4 数据分析

相对生长速率(*RGR*)表示单位时间单位生物量对应的生物量增量,净同化速率(*NAR*)表示单位时间内单位叶面积所固定的净光合产物^[15],二者的计算公式可以表示为^[16]: $RGR=(\ln m_2-\ln m_1)/t$, $NAR=(m_2-m_1)(\ln A_2-\ln A_1)/t(A_2-A_1)$ 。 m_2 、 A_2 为某次取样的生物量和叶面积, m_1 、 A_1 为前一次取样的生物量和叶面积, t 表示 2 次取样的时间间隔。数据用 SPSS10.0 软件进行 One-way ANOVA 分析和 *LSD*(0.05)多重比较。

2 研究结果

2.1 幼苗的存活及生物量的变化

T_C 、 T_1 和 T_2 没有幼苗死亡, T_3 有6株幼苗死亡,死亡率为20%。在实验第4周,沙埋对中间锦鸡儿幼苗生物量有显著影响($p=0.039$),前3周则没有显著影响。图1为各处理幼苗在不同收获时间的生物量变化曲线,可看出生物量都呈增加趋势,与 T_C 相比, T_1 和 T_2 的幼苗其生物量没有受到沙埋影响, T_C 和 T_1 生物量变化趋势一致,从第3周到第4周, T_2 幼苗的生物量增长率最大(T_C 、 T_1 、 T_2 、 T_3 增长率分别为0.0030g/d、0.0017g/d、0.0070g/d和0.0027g/d),在实验结束时生物量达到最大;而 T_3 幼苗的生物量一直为最小。 $LSD(0.05)$ 多重比较表明在前两周处理间幼苗生物量没有显著差异,第3周 T_3 与 T_C 和 T_1 存在显著差异($p=0.034,0.032$),第4周 T_3 与 T_2 出现极显著差异($p=0.006$),而 T_C 、 T_1 和 T_2 3个处理幼苗的生物量在各收获时间都没有出现显著差异。

2.2 生物量分配

沙埋对中间锦鸡儿幼苗的根冠比、根生物量比和茎生物量比有显著影响($p=0.011,0.007,0.02$)。经过四周的实验处理,幼苗的根冠比大小顺序为 $T_C>T_1>T_2>T_3$, T_C 和 T_3 有显著差异(表1),根生物量比的大小顺序与根冠比完全一致也为 $T_C>T_1>T_2>T_3$,且 T_3 与 T_C 和 T_1 存在显著差异;幼苗在地上部的生物量大部分分配在茎中,幼苗茎生物量比大小为 $T_C<T_1<T_2<T_3$, T_3 处理的茎生物量比显著大于其它3个处理,叶生物量比在处理间则没有显著差异。

表1 沙埋第4周中间锦鸡儿幼苗的根冠比、根生物量比、茎生物量比和叶生物量比

Table 1 R/S ratio, root mass ratio, stem mass ratio and leaf mass ratio of <i>Caragana intermedia</i> seedlings after four-week's sand burial				
处理 Treatments	根冠比 R/S ratio	根生物量比 Root mass ratio	茎生物量比 Stem mass ratio	叶生物量比 Leaf mass ratio
T_C	0.68 ± 0.099^a	0.40 ± 0.034^a	0.34 ± 0.017^a	0.26 ± 0.037^a
T_1	0.52 ± 0.064^{ab}	0.34 ± 0.028^a	0.37 ± 0.013^a	0.29 ± 0.023^a
T_2	0.50 ± 0.075^{ab}	0.33 ± 0.033^{ab}	0.38 ± 0.024^a	0.29 ± 0.031^a
T_3	0.35 ± 0.019^b	0.26 ± 0.010^b	0.44 ± 0.018^b	0.30 ± 0.023^a

平均值±标准误,同列不同字母表示处理间存在显著差异, LSD 多重比较,显著水平0.05Mean±SE; Within a column, means followed by different letters were significantly different at level of 0.05; LSD multiple comparison tests were used

2.3 叶面积

在各取样时间,沙埋没有对中间锦鸡儿幼苗的叶面积产生显著影响,各处理幼苗的叶面积呈增加趋势, T_3 幼苗的叶面积在各收获时间都比较小,但是处理间没有出现显著性差异;在实验前两周, T_2 和 T_3 的叶面积增长率要快于 T_C 和 T_1 ,因为各处理幼苗的起始叶面积是有差别的, T_C 和 T_1 的初始叶面积为实验开始前获得的叶面积, T_3 的初始叶面积接近为零, T_2 的初始叶面积介于二者之间,若在图上表示,可发现在实验前两周 T_2 和 T_3 的叶面积增长率要大于 T_C 和 T_1 (图2)。沙埋对幼苗的小叶片面积有影响, $LSD(0.05)$ 多重比较表明,第1周 T_2 和 T_3 的小叶片面积显著大于 T_C ,第2周各处理间没有显著差异,第3、4两周, T_C 显著大于 T_3 。各处理幼苗的小叶片面积随收获时间呈现降低趋势(表2),部分沙埋对小叶片面积没有显著影响,全部沙埋对幼苗小叶片面积产生显著影响。

2.4 相对生长速率(RGR)和净同化速率(NAR)

沙埋对幼苗的相对生长速率(RGR)和净同化速率(NAR)有显著影响($p=0.003,0.001$)。 $LSD(0.05)$ 比较显示, T_3 的RGR和NAR显著低于 T_C 、 T_1 和 T_2 , T_C 、 T_1 和 T_2 没有出现显著差异(表3)。

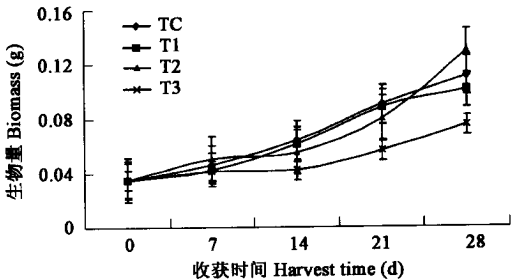


图1 中间锦鸡儿幼苗在不同收获时间的生物量

Fig. 1 Biomass of *Caragana intermedia* seedlings at different harvests

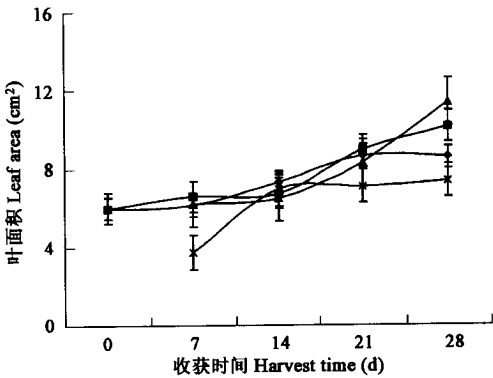


图2 中间锦鸡儿幼苗在不同收获时间的叶面积

Fig. 2 Leaf area of *Caragana intermedia* seedlings at different harvests

表 2 不同处理时间下中间锦鸡儿幼苗的小叶片面积(cm²)

Table 2 Leaflet area of <i>Caragana intermedia</i> seedlings at different length of treatment time.				
处理 Treatments	收获时间(d) Harvest time			
	7	14	21	28
T _C	0.208±0.007 ^a	0.211±0.006 ^a	0.205±0.007 ^a	0.203±0.006 ^a
T ₁	0.222±0.008 ^{ab}	0.209±0.007 ^a	0.201±0.005 ^a	0.193±0.005 ^{ab}
T ₂	0.243±0.011 ^b	0.197±0.006 ^a	0.198±0.005 ^{ab}	0.191±0.004 ^{ab}
T ₃	0.234±0.007 ^b	0.191±0.009 ^a	0.184±0.004 ^b	0.180±0.004 ^b

平均值±标准误, 同列不同字母表示处理间存在显著差异, *LSD* 多重比较, 显著水平 0.05 Mean±SE; Within a column, means followed by different letters were significantly different at level of 0.05; *LSD* multiple comparison tests were used

表 3 经过 4 周沙埋后中间锦鸡儿幼苗的生长响应

Table 3 Growth response of <i>Caragana intermedia</i> seedlings after four-week's sand burial				
生长指标 Growth index	处理 Treatments			
	T _C	T ₁	T ₂	T ₃
相对生长速率 <i>RGR</i> (g/g·d))	0.043±0.0040 ^a	0.039±0.0045 ^a	0.048±0.0038 ^a	0.019±0.0064 ^b
净同化速率 <i>NAR</i> (g/(m ² ·d))	6.15±0.66 ^a	4.15±0.72 ^a	5.58±0.55 ^a	2.01±0.71 ^b

平均值±标准误, 同列不同字母表示处理间存在显著差异, *LSD* 多重比较, 显著水平 0.05 Mean±SE; Within a column, means followed by different letters were significantly different at level of 0.05; *LSD* multiple comparison tests were used

3 讨论

在植物整个生活史过程中,刚出土的幼苗自身生产能力弱,养分储备少,主要依靠种子储存的养分进行生长,相对于种子和成年植株来说是最为敏感脆弱的时期;在相同的环境胁迫下,虽然成年植株和幼苗可能会表现出相似的响应方式,但由于幼苗植株体内有限的养分储备从而使其适应能力下降,导致存活率下降^[4],而幼苗存活率的高低对于植物种群的延续、更新有着重要意义。本文结果表明:不同程度沙埋对中间锦鸡儿幼苗的存活率、生物量积累、分配、叶面积、相对生长速率以及净同化速率有不同程度的影响,与对照处理相比较,全部沙埋(T₃)对幼苗的上述指标产生了显著性的影响,抑制了幼苗的正常生长,且有 20% 的幼苗死亡;而部分沙埋(T₁和 T₂)则对幼苗的上述指标没有产生显著影响,没有幼苗死亡。

T₁ 处理为沙埋幼苗地上部高度的 1/3,为 2.95±0.19cm,在实验中发现中间锦鸡儿幼苗第 1 片真叶距离沙土表面比较高,约有 3cm,实际上 T₁ 处理的幼苗没有叶片被沙埋掉,叶面积没有减小,与 T_C 没有差别,因此 T_C和 T₁ 幼苗的生物量变化趋势基本一致(图 1);而 T₃ 处理的幼苗地上部分全部被埋,仅顶端露出,有效光合面积显著减少,物质生产受到严重制约,生物量积累缓慢(图 1)。而其他一些研究表明某些植物幼苗的地上部被沙埋掉,能够增强幼苗的活力,萌发更多的分枝及叶片,促进幼苗生长^[17~21]。

趋利弊害是生物适应环境的本能,当植物受到环境条件的胁迫时一般会调整物质分配来尽量减少环境条件对其生长发育造成的影响。一些研究表明,当某些环境因子成为影响植物生长发育的限制性因素时,例如养分胁迫、光照胁迫、水分胁迫以及沙埋造成的光合面积的降低等,植物为了保证其正常的生长不受制约,会调整物质分配比例,改变根冠比以及各部分物质分配的比例^[22~28]。在正常情况下,中间锦鸡儿苗期地上部分生长缓慢,根系则生长迅速,幼苗把更多的物质和能量投入到根系的发展上,植株根冠比较大,这是它长期适应沙地环境的结果^[29]。本文中幼苗的根冠比和根生物量比的大小顺序都为:T_C>T₁>T₂>T₃(表 1),随着沙埋程度增加而降低,这说明沙埋使得中间锦鸡儿幼苗的生物量从地向下向地上部转移,而且沙埋程度越厉害转移量越大。生物量在地上部的分配中,更多的物质用于茎的生长,T₃ 幼苗的茎生物量比显著大于其余 3 个处理,叶片生物量比则没有显著差异(表 1),因为只有茎伸长了,才能够萌发新的叶片,用来弥补由于沙埋造成的叶面积损失,增大光合面积,增加物质生产,尽快摆脱沙埋的胁迫。在其它研究论文中也发现过这种现象, Brown 1997 年对 3 种沙地植物进行的沙埋实验结果表明,其中有两种植物的地上生物量主要分配在茎中,但是叶片生物量分配在各处理间没有出现显著差异。

植物是一个功能平衡体,各功能单位(根、茎和叶)的大小与整个植株是相互协调的,比如要维持一个一定大小的植株其正常生长,所需的叶面积或者根、茎、叶所占的生物量是有一定比例的,比例失调会对植物的正常生长不利^[30]。假设在某个特定时间段维持中间锦鸡儿幼苗正常生长所需的叶面积是一个固定值,则小叶片数量与其面积之间存在一个动态的消长关系,当幼苗小叶片数比较少时,比如实验的第 1 周,小叶片面积就增大;当小叶片比较多时,其面积就会减小,所以单个小叶片面积会随实验时间而降低。*RGR* 和 *NAR* 分别表示植物生产新物质的效率和光合器官生产物质的效率,它们可以作为评价植物生产能力高低的指标,本文结果显示沙埋对中间锦鸡儿幼苗的 *RGR* 和 *NAR* 有显著的影响,T₃ 的 *RGR* 和 *NAR* 显著低于其余 3 个处理

(表 3),说明幼苗全部沙埋会对其生产能力造成严重影响,而部分沙埋则没有显著影响。

不同植物对沙埋的适应特点和耐受能力是有差异的。本文中只有全埋处理造成中间锦鸡儿幼苗死亡。张称意等^[18]对羊柴(*Hedysarum leave* Maxim.) 1 周和 2 周大的幼苗沙埋实验发现,幼苗部分沙埋,不会对其造成死亡,全埋则有 30% 的幼苗存活。Zhang 等^[17]对生长 1 周和 2 周的 *Agropyron psammophilum* 幼苗沙埋其地上部的 25%,50%,75%,100% 和 120%,结果表明一周大的幼苗沙埋高度为 75% 时,50% 的幼苗死亡,两周大的幼苗在 25%、50%、75% 3 个处理下,死亡率分别为 0、13%、75%,而沙埋高度为 100% 和 120% 时,幼苗全部死亡。本实验为单因素控制性实验,利用形态指标来评价中间锦鸡儿幼苗对沙埋的适应能力,而它在自然环境中对沙埋的形态、生理方面的响应特点及其在个体、种群、群落和生态系统不同尺度下的适应特点有待于进一步研究。

References:

- [1] Avinoam Danin. *Plants of Desert Dunes*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1996. 21~24.
- [2] Maun M A. Adaptation enhancing survival and establishment of seedlings on coastal dune systems. *Vegetation*, 1994, **111**: 59~70.
- [3] Maun M A & Lapierre J. Effects of burial by sand on seed germination and seedling emergence of four dune species. *American Journal of Botany*, 1986, **73** (3): 450~455.
- [4] Freas K E & Kemp P R. Some relationships between environmental reliability and seed dormancy in desert annual plants. *Journal of Ecology*, 1983, **71**: 211~217.
- [5] Maun M A. Adaptations of plants to burial in coastal sand dunes. *Can. J. Bot.*, 1998, **76**: 713~738.
- [6] Jun Ren, Ling Tao & Xin-Min Liu. Effect of sand burial depth on seed germination and seedling emergence of *Calligonum* L. species. *Journal of Arid Environments*, 2002, **51**: 603~611.
- [7] Edition Committee of Inner Mongolia Flora. *Flora Intramongolica* (Second Edition). Huhhort: The People's Press of Inner Mongolia, 1989, **3**: 236~238.
- [8] Zhou H Y, Zhang J G, Long L Q, *et al.* Photosynthesis of Several Dominant Shrubs of Genus *Caragana* L. in Ecotone. *Journal of Desert Research*, 2001, **21** (3): 227~231.
- [9] Ma C C, Gao Y B, Liu H F, *et al.* Interspecific Transition Among *Caragana microphylla*, *C. davazamcii* and *C. korshinskii* Along Geographic Gradient II. Characteristics of Photosynthesis and Water Metabolism. *Acta Botanica Sinica*, 2003, **45** (10): 1228~1237.
- [10] Xiao Chunwang and Zhou Guangsheng. Effect of simulated precipitation change on growth, gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Caragana intermedia* in Maowusu Sandland. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2001, **12** (5): 692~696.
- [11] Zhou H Y, Zhang J G, Zhao L, *et al.* Gas exchange characteristics and regulation mechanism of several *Caragana* shrubs under wet condition. *J. Desert Research*, 2002, **22** (4): 316~320.
- [12] Cao W H, Zhang X Y. The secondary xylem anatomy of 6 desert plants of *Caragana*. *Acta Botanica Sinica*, 1991, **33**(3): 181~187.
- [13] Ma C C, Gao Y B, Liu H F, *et al.* Interspecific Transition Among *Caragana microphylla*, *C. davazamcii* and *C. korshinskii* Along Geographic Gradient I. Ecological and RAPD Evidence. *Acta Botanica Sinica*, 2003, **45** (10): 1218~1227.
- [14] Olff H, Huisman J. and van Tooren B F. Species dynamics and nutrient accumulation during early succession in coastal sand dunes. *J. Ecol.*, 1993, **81**: 693~706.
- [15] He W M, Zhong Z C. Morphological and growth responses of the climbing plant, *Gynostemma Pentaphyllum* seedlings to varying light intensity. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24** (3): 375~378.
- [16] Hughes A P, Freeman P R. Growth analysis using frequent small harvests. *J. Appl. Ecol.*, 1967, **4**: 553~560.
- [17] Zhang J H & Maun M A. Effects of sand burial on seed germination, seedling emergence, survival and growth of *Agropyron psammophilum*. *Can. J. Bot.*, 1990, **68**: 304~310.
- [18] Zhang C Y, Yu F H, Dong M. Effects of sand burial on the survival, growth, and biomass allocation in semi-shrub *Hedysarum leave* seedlings. *Acta Botanica Sinica*, 2002, **44** (3): 337~343.
- [19] Cheplick G P & Grandstaff K. Effects of sand burial on purple sandgrass (*Triplasis purpurea*): the significance of seed heteromorphism. *Plant Ecology*, 1997, **133**: 79~89.
- [20] Zhang J H. Interactive effects of soil nutrients, moisture and sand burial on the development, physiology, biomass and fitness of *Cakile edentula*. *Annal of Botany*, 1996, **78**: 591~598.
- [21] Greipsson S & Davy A J. Sand accretion and salinity as constraints on the establishment of *Leymus arenarius* of land reclamation in Iceland. *Annals of Botany*, 1996, **78**: 611~618.
- [22] Hirose T. A vegetative plant growth model: adaptive significance of phenotypic plasticity in matter partitioning. *Funct. Ecol.*, 1987, **1**: 195~202.

[23] Robinson D, Rorison I. Plasticity in grass species in relation to nitrogen supply. *Funct. Ecol.* , 1988, **2**: 249~257.

[24] Fakhri A. Bazzaz, John Grace. *Plant resource allocation*. San Diego: Academic Press, 1997. 1~9.

[25] Blackman G E & Black J N. Physiological and ecological studies in the analysis of plant environment Ⅺ. a further assessment of the influence of shading on the growth of different species in the vegetative phase. *Annals of Botany*, 1959, **23**: 51~63.

[26] Guo K. Seedling performance of dominant tree species in Chinese beech forests. PhD Thesis, Universiteit Utrecht, 1999, 33~46.

[27] Kozlovski T T. *Growth and development of trees. 1 Seed germination, ontogeny, and shoot growth*. New York and London:Academic Press, 1971.

[28] Cannell MGR and Dewar RC. Carbon allocation in trees: a review of concepts for modeling. *Adv. Ecol. Res.* , 1994, **25**: 59~104.

[29] Chen S H, *et al.* *Root system of grassland plants in north of China*. Changchun:Jilin University Press, 2001. 150~151.

[30] Stuart Chapin F Ⅲ, Ernst-Detlef Schulze, Harold A Mooney. The ecology and economics of storage in plants. *Annu. Rev. Ecol Syst.* , 1990, **21**: 423~447.

参考文献:

[7] 内蒙古植物志编委会. 内蒙古植物志(第 2 版). 呼和浩特:内蒙古人民出版社, 1989. **3**: 236~238.

[8] 周海燕, 张景光, 龙利群, 等. 脆弱生态带典型区域几种锦鸡儿属优势灌木的光合特征. 中国沙漠, 2001, **21**(3): 227~231.

[10] 肖春望, 周广胜. 毛乌素沙地中间锦鸡儿幼苗生长、气体交换和叶绿素荧光对模拟降水量变化的响应. 应用生态学报, 2001, **12** (5): 692~696.

[11] 周海燕, 张景光, 赵亮, 等. 湿润条件下几种锦鸡儿属灌木的气体交换特征及调节机制. 中国沙漠, 2002, **22** (4): 316~320.

[12] 曹宛虹, 张新英. 锦鸡儿属 6 种沙生植物次生木质部解剖. 植物学报, 1991, **33** (3): 181~187.

[15] 何维明, 钟章成. 攀援植物绞股蓝幼苗光照强度的形态何生长反应. 植物生态学报, 2000, **24** (3): 375~378.

[29] 陈世 , 等. 中国北方草地植物根系. 长春:吉林大学出版社, 2001. 150~151.