

鄂尔多斯高原沙柳幼苗对模拟降水量变化的响应

肖春旺¹, 董 鸣¹, 周广胜¹, 刘喜国²

(1. 中国科学院植物研究所植被数量生态学开放研究实验室, 北京 100093; 2. 山西省浑源县城关中学, 037400)

摘要: 鄂尔多斯高原是中国干旱、半干旱沙区典型沙地。随着未来全球变化, 尤其降水变化进一步激烈, 将给这里的陆地生态系统分布格局和生产力带来巨大影响。选择鄂尔多斯高原优势灌木沙柳为研究对象, 人为控制 4 种供水量水平来探讨沙柳幼苗对模拟降水量变化的响应。结果表明, 幼苗净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和荧光效率随着供水的增加而增大, 而供水对幼苗的水分利用效率影响不显著; 不同供水量的沙柳幼苗树高、枝条数、叶数和叶面积生长动态存在明显差异, 随着供水量的增加, 沙柳幼苗树高、基径、枝条数、叶数、叶面积、生物量干重和冠根生物量干重比值均逐渐增大; 供水显著增加了沙柳幼苗总分枝率、各级枝条数、枝条长度和叶面积。

关键词: 模拟降水量; 鄂尔多斯高原; 沙柳幼苗; 半干旱区

Response of *Salix psammophila* seedlings to simulated precipitation change in Ordas plateau

XIAO Chun-Wang¹, DONG Ming¹, ZHOU Guang-Sheng¹, LIU Xi-Guo² (Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany CAS, Beijing 100093, China; 2. School of chengguanzhen, Hunyuan County, Shanxi Province, 037400)

Abstract: Ordas plateau is a typical dry and semi-dry sandland in China. The distribution pattern and productivity of terrestrial ecosystem are greatly affected by the global change, especially the global precipitation change. Response is investigated for seedlings of *Salix psammophila*, a dominant shrub in Ordas plateau, to the global precipitation change by artificially controlling water supply at four levels. The results show that photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and fluorescence efficiency increased as water supply increased, and water use efficiency was not affected by water supply. The growth changes of tree height, branch number, leaf number and leaf area had obviously difference among the four water supply treatments. The growth characters, such as tree height, stem diameter, leaf number, leaf area, dry biomass and value of shoot/root dry biomass, and bifurcation characters, such as bifurcatin ratio, branch number, length, leaf number, leaf area of each order, increased when water supply increased.

Key words: simulatd precipitation; Ordas plateau; *Salix psammophila* seedings; semi-arid area

文章编号: 1000-0933(2001)01-0171-06 中图分类号: Q948.1 文献标识码: A

全球变化已是最为引人注目和关切的环境问题之一, 并已经引起了各国政府、科学界与公众的强烈关注。全球变化研究的核心在于探索由于人类活动引起的全球环境变化对于人类赖以生存和持续发展的陆地生态系统与人类生存环境的作用及其反应, 以期找出应对的科学策略, 最大限度地减少全球变化的不利影响^[1]。其中陆地生态系统变化是全球变化中的重要内容^[2], 有关陆地生态系统对全球变化的反应机制研究, 已做了大量工作, 但大多集中于 CO₂ 浓度增加对植物个体同化过程的直接影响研究^[3~7], 而对 CO₂ 浓

基金项目: 国家重点基础研究专项经费(G1999043407)、中国科学院 95 重大项目 B(KZ951-B1-108)和中国科学院 95 重点项目(KZ952-S1-126)、国家自然科学基金九五重点资助项目(49835010)

收稿日期: 2000-03-12; **修订日期:** 2000-06-21

作者简介: 肖春旺(1969~), 男, 湖南人, 博士, 副研究员。主要从事全球变化研究。

本文得到张新时院士的指导及郑元润、蒋高明博士及内蒙古伊克昭盟林业局广大同志的帮助, 在此一并致谢!

度增加而造成的温度、降水等气候变化对植物个体的间接影响报道较少^[8~10]。而气候全球变化必然影响到陆地生态系统分布格局和生产力。

鄂尔多斯高原地处中国北部沙区系列中部,其沙地的发展、历史变迁及现实状况,很大程度代表了我国半干旱、干旱沙区存在的人类活动与自然环境间相互关系中的许多典型问题^[11]。其中水分是该地区最大的限制因子,而鄂尔多斯高原干旱生态系统对全球变化的水热配合格局的变化具有最灵敏的响应^[12]。同时,鄂尔多斯高原沙区生态系统以灌木为主,其中沙柳(*Salix psammophila*)是分布最广的优势灌木^[13],该种的变化必然造成这里的生态系统的变化。过去专对沙柳的研究较少,且大多也是只对沙柳进行光合生理的野外调查,而对该沙区最重要生态因子——水分因子对沙柳的影响未见报道。因此,本研究以沙柳为对象,采用人控供水法,开展沙柳在沙区灌木生长季节内的降水量较现在减少、相当、增多和极增多 4 种条件下的生长模拟实验,进而探讨沙柳的生理、生长和分枝特征等对模拟降水量的响应,同时为全球变化下的沙柳生产力模拟及其对该地区大气、沙地、植物之间的水分平衡研究提供参数,进而为科学地预测鄂尔多斯高原沙地生态系统变化趋势和有效地防止沙漠化等问题提供理论依据。同时也为沙柳幼苗栽培提供理论参考。

1 研究方法

1.1 研究地点与物种

研究地点设在中国科学院植物研究所内蒙古伊克昭盟鄂尔多斯沙地草地生态研究定位站(新站)院内,地理位置 39°29′.66″N, 110°11′.47″E, 海拔 1295m。年均温 6.0~8.5℃,最冷月(1 月份)均温 -10℃,最热月(7 月份)均温 22℃。年降水量 358.3mm,且 2/3 以上的降水集中于 6~9 月。该地区是荒漠-草原、草原-森林过渡地带。土壤以淡栗钙土和沙性淡栗钙土为主。详细资料见张新时^[12]和陈仲新等^[14]。

沙柳(*Salix psammophila*)是杨柳科柳属落叶丛中生性灌木或小乔木,高可达 2~4m,单叶,叶条形。主要分布于在内蒙古、新疆、西藏、陕西,具有良好的防风固沙性能,可作为防护林的重要组成部分,也是供沙地优势灌木物种之一。

1.2 实验材料及其实验设计

1 年生沙柳幼苗来自鄂尔多斯生态站附近沙丘幼苗同生群,1999 年 5 月 3 日,分别选取生长良好、大小一致的 80 株幼苗,后幼苗被随机分成 4 组,每组各 20 株,后将每组幼苗分别植入 4 个装有 60cm 深的沙土的长方体水泥池(每池深 67cm、宽 1.5m、长 2m,其下部有 1 个可控出水管)中。另外留出 4 个池作为对照实验。水泥池是在今年 4 月 26 日被修建在铁架下,其顶部挂有防水布阻碍自然降水,四周通风,以保持其它自然因子接近自然状况。

实验设计是依据鄂尔多斯高原年平均降水量 358.3mm、生长季节平均降水量大约 300mm,加之全球变化可能造成该地区降水量增多或减少等基本条件,研究设计出 157.5、315、472.5 和 630mm 4 种供水量处理,沙柳幼苗在这 4 种水分处理下,培养 105d,即 5 月 24 日开始,至 9 月 5 日结束。4 种水分处理为:每种供水处理的总供水次数均相同、且每次供水均在同一天下午内完成,即从 5 月 24 日 17:00~18:00 时,完成第 1 次供水,后每隔 2 天供 1 次水,累积共供 35 次水,但每次 4 种供水处理的供水量分别为 4.5、9、13.5 和 18mm 水,各处理一共总供水分别为 157.5、315、472.5 和 630mm。以上 4 种供水量处理分别各设一组空沙地,作为对照。实验期间,晴天将防水布全打开,阴天和夜晚将防水布遮盖,以防自然降水,同时进行等质精细管理,并经常除草和防除病虫害。

1.3 实验沙池内沙基质水分环境条件

在 1999-05-24~1999-09-05 期间,每隔 15d,在每个沙池中抽取沿对角排列成 S 型的 7 个土柱,每土柱至上而下按 15cm 分成 4 层,共计每个沙地抽取 28 个土样,用烘干法测定含水率,后平均得到沙地总体含水率。结果见图 1。从图 1 中是可见,472.5mm、315mm 和 157.5mm 供水的沙基质湿度动态变化趋势大体一致,试验 30d 后达到最大值,分别为 7.37%、6.49%、4.99%,之后一直下降,在 90d 左右达到最小值,分别为 4.34%、2.66%、2.45%。而 630mm 供水的沙基质湿度却在试验 40d 左右达到最大值 9.33%,之后缓慢下降,到 90d 左右达到最小值 7.73%。另外,结束之前,不同供水量处理的湿度都有不同程度增大。试验

期间,随着供水量逐渐增加,沙基质湿度平均值分别为 3.67%、4.56%、5.49% 和 7.74%。

1.4 计测方法

1.4.1 生理特征测定 1999-07-31,每供水处理随机选取 3~5 株幼苗,对其中上位成熟完好叶片 5~6 片进行以下生理特征测定。采用 LCA4 型便携式 CO₂ 分析仪测定幼苗在 7:00 到 18:00 期间每 1h 的净光合速率(P_n , $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)、蒸腾速率(E , $\text{mmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)和气孔导度(g_s , $\text{mmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)。在 1999-07-23 利用英国产荧光仪测得幼苗叶片荧光效率(FV/FM)。

1.4.2 生长特征 在实验期间,从每一供水处理随机选取 10 固定幼苗作为观测株,每隔 15d 测定观测株幼苗树高、基径、枝条数、大于 1cm 叶长的叶片长,记录叶片数。叶面积的测定是随机在非观测选取大小不等的 70 片叶,通过美国产 CI-203 型面积仪测得叶片面积和叶长,再利用叶面积和叶长,根据回归求出 $Y(\text{叶面积}) = 0.4686X(\text{叶长}) - 0.3181 (R = 0.912, N = 70)$ 的线性方程,即可求出全部叶面积。同时,在 1999-09-07,挖取所有幼苗,测定根、茎、叶生物量鲜重和用烘干法测得其干重,其根系按粗根(根径 > 1mm)和细根(根径 < 1mm)分类。

1.4.3 分枝特征 在 1999-09-05~06 期间,测定每一供水处理的各观测株的枝序和每一级枝的枝数、长度、叶数和叶长(枝序按 Strahler 法确定^[15],即由外及内,外层的第一小枝为第一级枝,两个第一级枝相遇即为第二级枝,以此类推。本研究沙柳幼苗只有 2 级分枝。)。根据各级枝数,利用 Whitney^[16]提出,并经 Steingraeber 和 Waller^[17]修改的总体分枝率公式 $R_b = (N_T - N_S) / (N_T - N_1)$,其中, N_T 为所有枝级中枝条的总数, N_S 为最高枝级的枝条数, N_1 为第一级的枝条总数,求出总体分枝率 R_b 。

1.4.4 数据分析 所有数据均利用 SPSS 统计软件进行 ANOVA 方差分析,用 Duncan 法进行多重比较,并用字母法标记^[18]。

2 结果与分析

2.1 不同供水量的沙柳幼苗的生理特征

不同供水量的沙柳幼苗净光合速率(P_n)日平均值有极显著差异($P < 0.01$) (表 1)。157.5mm 供水的 P_n 日平均值为 $10.85 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,随着供水量的增加, P_n 日平均值分别为 $16.42 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $18.85 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $20.87 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,较 157.5mm 供水的 P_n 日平均值分别提高了 1.5、1.7、1.9 倍。表明供水的增加极显著增大了沙柳幼苗净光合作用。

不同供水量的沙柳幼苗蒸腾速率(E)日平均值也有显著差异($P < 0.05$) (表 1)。幼苗 E 日平均值也随供水增加而增大,157.5mm 供水的 E 日平均值为 $9.47 \text{mmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,随着供水量的增加, E 日平均值分别为 $13.64 \text{mmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $14.93 \text{mmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $16.90 \text{mmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,较 157.5mm 供水的 E 日平均值分别提高了 1.4、1.6、1.8 倍。

沙柳幼苗水分利用效率(WUE)是净光合速率与蒸腾速率之比值。虽然不同供水量的幼苗 WUE 日平均值有一定变化,但没有达到统计学水平($P > 0.05$),故供水对沙柳幼苗水分利用效率影响不显著(表 1)。

气孔导度反映了叶片气孔的开度和气孔阻力的大小,进而影响叶片的光合作用和蒸腾作用。在本研究中,供水显著影响了沙柳幼苗气孔导度(g_s)日平均值($P < 0.01$) (表 1)。157.5mm 供水的幼苗 g_s 为 $0.84 \text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,而随供水量的增加, g_s 日平均值分别提高到 $1.46 \text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 、 $1.77 \text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 和 $2.13 \text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,较 157.5mm 供水的 g_s 日平均值分别提高了 1.7、2.1 和 2.5 倍。显然,157.5mm 的供水量明显抑

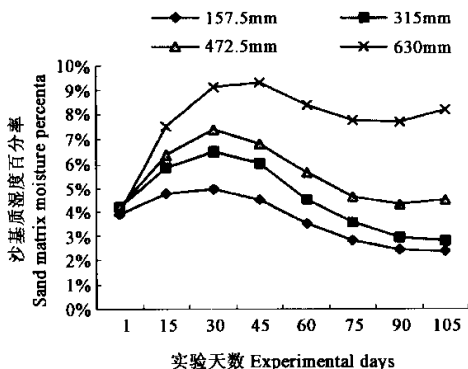


图 1 1999-05-24~1999-09-05,不同供水量的沙柳幼苗生长池内沙基质湿度的动态变化

Fig. 1 The changes of sand matrix moisture percentage in sand pools of *S. psammophila* seedlings grown under four water supply treatments from May 24 to Sept. 5, 1999

制了沙柳幼苗气孔开度,而增加供水量能极显著提高沙柳幼苗的 g_s 。

表 1 不同供水量的沙柳幼苗在 1999-08-11 的生理特征

Table 1 The physiological characters o of *S. psammophila* seedlings under different water supply treatments on August 11, 1999

供水量	净光合速率 P_n	蒸腾速率 E	水分利用效率 WUE	气孔导度 g_s	荧光效率
Water supply	($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	($\text{mmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	($\mu\text{mol}/\text{mmol}$)	($\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	Fluorescence efficiency
157.5mm	10.85±1.52 ^b	9.47±0.99 ^b	1.13±0.15	0.84±0.16 ^c	0.6820±0.0078 ^c
315.0mm	16.42±2.02 ^{ab}	13.64±1.73 ^{ab}	1.23±0.13	1.46±0.14 ^b	0.7424±0.0091 ^b
472.5mm	18.85±2.16 ^a	14.93±1.96 ^a	1.34±0.16	1.77±0.18 ^{ab}	0.8220±0.0155 ^a
630.0mm	20.87±2.33 ^a	16.90±2.06 ^a	1.27±0.12	2.13±0.22 ^a	0.8483±0.0031 ^a
ANOVA	* *	*	Ns	* *	* *

表中数据为平均值±标准误差。Duncan 多重比较表明,具有相同字母的处理没达到显著性差异($P<0.05$)。Ns、*、* * 分别代表 $P>0.05$ 、 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 。Data of table represent Average value±Standard error. Treatments with the same letters are not significantly different ($P<0.05$) according to Duncan multiple range test. Ns, * and * * symbols represent significant level $P>0.05$, $P<0.05$, $P<0.01$, respectively

不同供水量的沙柳幼苗荧光效率具有明显差异($P<0.01$)(表 1)。157.5mm 供水的幼苗的荧光效率为 0.6820。随着供水量的增加,荧光效率分别增大到 0.7424、0.8483、0.8220,比较 157.5mm 供水的荧光效率日平均值分别提高了 1.09、1.21 和 1.24 倍。显然供水增加能显著增大沙柳幼苗荧光效率。

2.2 不同供水量的沙柳幼苗生长特征

不同供水量的沙柳幼苗树高、枝条数、叶数和叶面积生长动态存在明显差异(图 2)。从图 2 中可以看出,以上指标在试验前 45d 生长均缓慢,4 种供水处理之间差异不大,这可能与幼苗较小,气温较低所致。但 45d 后,630mm、472.5mm 和 315mm 供水的幼苗生长明显加快,尤其以 630mm 和 472.5mm 供水的幼苗生长更为迅速,而 157.5mm 供水的幼苗生长仍十分缓慢。比较 1999-09-05 的不同供水量的幼苗树高、基径、枝条数、叶数和叶面积,除 630mm 和 472.5mm 供水的幼苗之间差异不显著外,大体随着供水量的增加而显著增大($P<0.05$)。以上结果明了,在 157.5mm 供水量下,造成沙地含水量减少,沙柳幼苗受到明显的水分胁迫作用,致使幼苗叶片光合能力的下降,使得生长受阻。而随着供水量的增加,使得沙地含水量增加,相对满足了幼苗的蒸腾耗水,使得叶细胞活性提高,光合能力的增加,进而促进幼苗的生长。同时,不同供水量的沙柳幼苗叶、枝和根生物量干重存有极显著差异($P<0.01$)。157.5mm 供水严重影响了沙柳幼苗生物量干重的累积,而随着供水量的增加,幼苗生物量干重显著得到提高。但 472.5mm 供水的幼苗与 630mm 供水的幼苗的生物量干重没有显著性差异,进一步表明 472.5mm 供水量已达到了充分状态。沙柳幼苗的冠根比值也受到供水量的明显影响($P<0.01$)。另外,随着供水量的增加,冠根比值逐渐增大,其中 630mm、472.5mm 和 315mm 供水的幼苗的冠根比值之间差异不大,但 630mm 和 472.5mm 供水的幼苗却显著高于 157.5mm 供水的幼苗冠根比值($P<0.05$)。

2.3 不同供水量的沙柳幼苗分枝特征

不同供水量显著影响沙柳幼苗的总分枝率、总枝条长度、及其各级分枝上的枝条数、长度、叶数、叶面积。总体来看,沙柳幼苗的以上指标在 630mm、472.5mm 和 315mm 供水量之间差异不明显,但都显著高于 157.5mm 的幼苗($P<0.05$),表明 157.5mm 的供水量严重阻碍了沙柳幼苗的枝条分枝和生长能力以及叶片的生长,而随着供水量的增加,能显著提高幼苗的分枝能力、枝条长度、叶片数量和叶面积。尽管第 2 级枝条数在 4 种供水量处理之间没达到显著性差异,但 Ducan 多重比较法表明了 630mm 供水的幼苗第 2 级枝条数却显著大于 157.5mm 供水的幼苗。

3 结论与讨论

(1)不同供水量对鄂尔多斯高原沙柳幼苗沙基质湿度大小具有明显的影响。随着供水量的增加,沙基

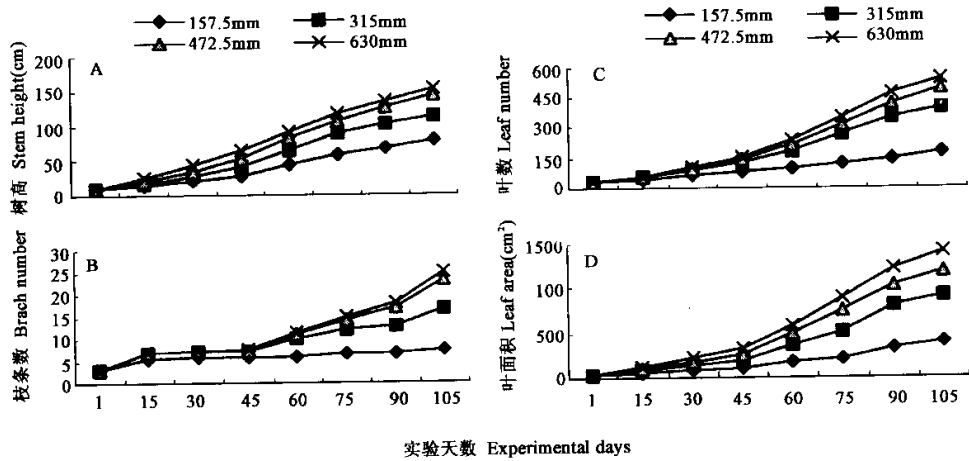


图 2 不同供水量的沙柳幼苗生长动态 A、B、C、D 分别代表树高、枝条数、叶数和叶面积
Fig. 2 The growth changes of *S. psammophila* seedlings under different water supply treatments
A, B, C and D Stand for Tree height, branch number, leaf number and leaf area, respectively

质湿度逐渐增大,造成了不同供水量下的幼苗对沙基质水分有效性的不同利用,进而影响幼苗生理、生长和分枝特征。

(2)在本研究中,供水量的增加有利于提高幼苗的气孔导度,进而增大幼苗光合和蒸腾速率,但二者之间的比值,即水分利用效率却没有受到供水量的显著影响。同时,沙柳幼苗的荧光效率随着供水的增加而升高从机理上解释了沙柳幼苗净光合作用随供水变化的行为。因为荧光效率增高,表明光能向光系统Ⅱ反应中心的传递能力和光系统Ⅱ反应中心的原初光能转换效率也均较高^[9]。

(3)不同供水量明显影响沙柳幼苗树高、枝条数、叶数和叶面积生长动态。在少量供水下,沙柳幼苗受到明显的水分胁迫,致使幼苗枝叶生长受阻。而当供水量的增多时,幼苗生长迅速,幼苗枝多叶茂。同时,供水也显著影响沙柳幼苗、枝和根产量。随着供水的增加,幼苗生物量干重显著得到提高。这些结果反映了增大供水有效促进了沙柳幼苗生长。另外,沙柳幼苗的冠根比值随着供水量的增加而增大,表明幼苗生物量分配对不同给水条件的反应是敏感的。当给水充足时,幼苗将生物量干重相对多地分配到地上叶和枝的生长上,以便有利于幼苗分配更多的资源去捕获更多的光能,提高光合能力,已满足植物本身消耗和生长的需要;而当幼苗水分缺少时,幼苗将更多的资源分配到根系生长,以适应在水分胁迫下吸收更多的水分和营养物质,提高竞争生长能力。很多植物受到资源胁迫时都会改变地上地下生物量分配比例^[20,21]。

(4)分枝格局是植物构型研究中的重要内容。目前关于分枝格局中的种内、个体内和枝内 3 个层次是否具有稳定性特点,已作了大量讨论^[22,23]。在本研究中,沙柳幼苗总分枝率和各级枝叶生长随供水量的增加而显著提高,这不仅表明供水的增加有利于改善沙柳幼苗枝叶空间分布格局,以便捕获更多的光能和吸收更多的 CO₂,同时也表明了不同供水量的沙柳幼苗分枝格局在个体层次上不具有稳定性。

(5)从以上结果可知,供水量的增多对沙柳幼苗在生长、分枝特征、光合蒸腾速率、荧光效率及其生物量分配格局等多个层次上具有明显正效应。同时,沙柳幼苗是通过总体协调利用水资源来对不同供水量作出响应的。在水分胁迫下,幼苗叶片气孔变小,光合速率下降,进而降低生长速度,且相对增加根系生长,以此减少组织的损失速率、降低对水资源的消耗需求,同时最有效的利用和吸收有限的水资源,以取得体内平衡而维持生命存在。许多植物对资源限制都做出了类似的反应^[24~26]。而在水资源充足时,叶片气孔打开,光合作用加强,幼苗生长迅速,且相对增加枝叶生长,以捕获更多的光合,满足幼苗迅速生长的需要。总之,随着全球降水变化日益加剧,未来的鄂尔多斯高原沙柳生态系统必将发生巨大变化。

参考文献

- [1] 张新时,周广胜,高琼,等. 中国全球变化与陆地生态系统关系研究. 地学前缘,1997,4(1~2):137~143.
- [2] 张志强,孙成权. 全球变化研究十年新进展. 科学通报,1999,44:464~477.
- [3] Lemon ER. CO₂ and plants: The response of plants to rising levels of atmospheric carbon dioxide. Colorado: Westview Press, 1983.
- [4] Bazzaz FA. The response of natural ecosystems to the rising global CO₂ levels. *Ann Env Ecol System*, 1990, 21: 167~196.
- [5] Arp WJ, Drake BG. Increased photosynthetic capacity of *Scirps olneyi* after 4 years of exposure to elevated CO₂. *Plant, Cell and Environment*, 1991, 14: 1004~1008.
- [6] Bunce JA. Stomatal conductance, photosynthesis and respiration of temperate deciduous tree seedlings growth outdoors at an elevated concentration of carbon dioxide. *Plant, Cell and Environment*, 1992, 15: 541~549.
- [7] Rogers HH, Dahlman RC. Crop responses to CO₂ enrichment. *Vegetatio*, 1993, 104/105: 117~131.
- [8] Dahlman RC. Modelling needs for prediction responses to CO₂ enrichment: Plants, communities and ecosystems. *Ecol. Modell.*, 1985, 29: 77~106.
- [9] Dahlman RC. CO₂ and plants: Revisited. *Vegetatio*, 1993, 104/415: 339~355.
- [10] Malanson G P. Comment on modelling ecological response to climatic change. *Climatic Change*, 1993, 23: 95~109.
- [11] 姚洪林,魏成泰,廖茂彩. 内蒙古毛乌素沙地开发整治研究中心概况. 见:王家祥主编. 毛乌素沙地开发整治研究中心研究文集(第1集). 呼和浩特:内蒙古出版社, 1992. 1~7.
- [12] 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式. 植物生态学报, 1994, 18: 1~16.
- [13] 董学军,张新时,杨宝珍. 依据野外的蒸腾速率对几种沙地灌木水分平衡的初步依据. 植物生态学报, 1997, 21: 208~225.
- [14] 陈仲新,谢海生. 内蒙古毛乌素沙地主要景观生态类型灌丛生物多样性初步研究. 生态学报, 1994, 14: 345~354.
- [15] McMahon TA, Kronauer RE. Tree structures: Deducing the principle of Mechanical design. *J. Theor. Biol.*, 1976, 59: 443~466.
- [16] Whitney GG. The bifurcation ratio as an indicator of adaptive strategy in woody plant species. *Bull. Torrey Bot. Club.*, 1976, 103: 67~72.
- [17] Steigraeber DA, Waller DM. Non-stationary of tree branching pattern and bifurcation ratios. *Proc. R. Soc. Lond. B.*, 1986, 228: 187~194.
- [18] 卢纹岱,等. SPSS for windows 从入门到精通. 北京:电子工业出版社, 1997.
- [19] 郝乃斌,等. 大豆育种应用基础与技术研究进展. 南京:江苏科学出版社, 1990. 28~35.
- [20] 肖春旺,刘玉成. 不同光环境的四川大头茶幼苗的生态适应. 生态学报, 1999, 19(3): 422~426.
- [21] 董鸣,等. 根茎禾草沙鞭的克隆基株及分株种群特征. 植物生态学报, 1999, 23: 302~310.
- [22] 黎云祥,等. 四川大头茶分枝率和顶芽动态. 生态学报, 1998, 22: 309~314.
- [23] 孙书存,陈灵芝. 不同生境辽东栎的构型差异. 生态学报, 1999, 23: 359~364.
- [24] Lauenroth W K, Dodd J L, Sims P L. The effects of water and nitrogen induced stresses on plant community structure in a semi-arid grassland. *Oecologia*, 1978: 211~222.
- [25] Chapin F S, Shaver G R. Individualistic growth response of tundra plant species to environmental manipulations in the field. *Ecol.*, 1985. 564~576.
- [26] Bloom A J, Chapin III Mooney H A. Resource limitation in plant an economic analogy. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1985. 363~392.