

# 降水、土壤水分和结皮对人工梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 林的影响

马全林<sup>1,2</sup>, 王继和<sup>1,\*</sup>, 朱淑娟<sup>1</sup>

(1. 甘肃省荒漠化防治重点实验室 & 甘肃省治沙研究所, 武威 733000;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠研究试验站, 兰州 730000)

**摘要:**通过对石羊河下游沙井子地区不同立地类型、不同林龄人工梭梭林的大范围调查和定位观测研究,分析了主要生态因子降水、土壤水分和结皮对人工梭梭种群及其群落的影响。结果表明,梭梭对降水下限要求不严,但对降水上限有较为严格的要求,180mm 降水量是建立人工梭梭林的上限;石羊河流域现存人工梭梭林基本依靠降水生存,但非连续同向的年际降水波动变化,对人工梭梭种群无明显影响,却显著影响梭梭林中草本植物物种组成、种群数量和生物产量。土壤水分是影响人工梭梭林最关键、最直接的生态因子,风沙土土壤含水率低于 0.824%,梭梭死亡,介于 0.824% ~ 1.30% 之间,处于退化状态,高于 1.30%,生长正常;土壤水分限制梭梭生长,而梭梭生长又会进一步加剧土壤水分下降,梭梭造林 8a 后土壤含水率降低到 1.30%,14a 后降至土壤凋萎系数之下,30a 后又恢复到 1.30% 并保持稳定,残存梭梭种群生长趋于正常。结皮在起到固沙和保护梭梭免遭风蚀的同时,明显限制水分下渗并引起土壤干旱,加速了人工梭梭林的退化,破坏结皮后土壤含水率逐渐增加;同时,结皮还改变了 1 年生植物的种类组成及其数量。

**关键词:**人工梭梭林;降水;土壤水分;结皮

文章编号:1000-0933(2007)12-2057-11 中图分类号:Q948 文献标识码:A

## Effects of precipitation, soil water content and soil crust on artificial *Haloxylon ammodendron* forest

MA Quan-Lin<sup>1,2</sup>, WANG Ji-He<sup>1,\*</sup>, ZHU Shu-Juan<sup>1</sup>

1 Gansu Key Laboratory of Desertification Combating & Gansu Desert Control Research Institute, Wuwei 733000, China

2 Shapotou Desert Research and Experiment Station, Cold and Arid Regions and Experimental Sci-Tech Engineer Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5057 ~ 5067.

**Abstract:** Based on the large-scale survey and positioning observation of *Haloxylon ammodendron* forest with various ages growing under different site conditions in Shajingzi region at the downstream of Shiyang River, this paper studied the effects of ecological factors as precipitation, soil water content and soil crust on the artificial *H. ammodendron* population and communities. Result shows that *H. ammodendron* is not restricted by the minimum threshold of precipitation, while restricted by the maximum threshold of precipitation, 180mm. At present, artificial *H. ammodendron* in the downstream of Shiyang River is basically relying on precipitation. However, the annual discontinuous rainfall with similar intensity will not

**基金项目:**国家“十一五”科技攻关资助项目(2006BAD26B0802);中国科学院西部之光人才计划资助项目;甘肃沙漠治理创新团队资助项目

**收稿日期:**2007-03-08; **修订日期:**2007-09-11

**作者简介:**马全林(1974 ~),男,甘肃陇西人,博士生,副研究员,主要从事荒漠植被恢复研究. E-mail: mql@gsdcri.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wjh@gsdcri.com

**Foundation item:** This work was financially supported by National Key Project of Science and Technology (No. 2006BAD26B0802), “West Light” Talent Cultivation Program and Gansu Innovation Team on Desert Control

**Received date:** 2007-03-08; **Accepted date:** 2007-09-11

**Biography:** MA Quan-Lin, Ph. D. candidate, Associate professor, mainly engaged in restoration of desert vegetation. E-mail: mql@gsdcri.com

apparently affect the growth of artificial *H. ammodendron* population, whereas will significantly affect species composition, quantity of plant population and biomass of herbs in *H. ammodendron* forest. Soil water content is the essential ecological factor affecting artificial *H. ammodendron* forest. *H. ammodendron* will die when water content in aeolian sandy soil is less than 0.824%; and degenerate when water content is between 0.824% to 1.30%; and grow normally when water content is above 1.30%. The growth of *H. ammodendron*, restricted by soil water content, will aggravate the loss of soil water. Soil water content reduced to 1.3% after 8 years of afforestation of *H. ammodendron*; reduced to less than the wilting coefficient 14 years later; but increased to 1.30% 30 years later, when the remaining *H. ammodendron* population can grow normally. Soil crust, especially physical crust, played an important role on fixing sand and protecting *H. ammodendron* from erosion, but simultaneously, it restricts infiltration, which will result in soil drought, and accelerate degeneration of artificial *H. ammodendron*. With undermined soil crust, soil water content will increase gradually. Comparing with bare mobile sand dunes, soil crust has significantly changed the composition and the quantity of species in *H. ammodendron* forest.

**Key Words:** artificial *H. ammodendron* forest; precipitation; soil water content; soil crust

梭梭(*Haloxylon ammodendron* Bge), 属亚洲荒漠成分, 广泛分布于中亚荒漠地区<sup>[1~4]</sup>, 具有抗旱、抗寒、耐盐碱、耐瘠薄和喜干燥环境的生态适应特征, 在土质平地(土漠)、砾漠(沙砾质戈壁)、盐漠(干涸湖盆)及沙漠沙丘和丘间低地均有分布<sup>[1,2,4~6]</sup>, 是一种有着“沙漠活煤”之称的优良薪炭材料, 又是药用植物肉苁蓉(*Cistanche deserticola*)寄生植物, 因而遭到大规模的开发利用。长期的土地开垦、过度放牧、过度砍伐和肉苁蓉的大量采收导致天然梭梭种群、面积锐减<sup>[7,8]</sup>, 一度处于渐危状态, 并于1984年被列为国家首批三级保护植物<sup>[2,4,9,10]</sup>。梭梭的强生态适应性、显著的经济利用价值及其在西部环境维持中的重要性<sup>[4,10]</sup>, 引起了国内众多学者的关注, 相继开展的研究可概括为生物学特征与遗传多样性研究<sup>[4,8,11~13]</sup>、以抗旱抗寒机理和光合作用生理特征为主的生理生态学研究<sup>[14~20]</sup>、梭梭群落分布与其生长特征研究<sup>[21~24]</sup>、梭梭育苗与造林技术研究<sup>[4,6,25~27]</sup>、梭梭林地水分平衡研究<sup>[28~30]</sup>、梭梭林衰退原因研究<sup>[31~33]</sup>和不同区域梭梭更新复壮技术研究<sup>[34~37]</sup>等多个方面。这些研究为梭梭的系统进化、种质保护和资源开发利用提供了科学依据, 但前期关于梭梭生长及其衰败的研究, 多围绕梭梭林地土壤水分因子的收支平衡及其动态变化<sup>[28~33]</sup>, 缺乏干旱区降水、土壤结皮对梭梭人工种群生长及其群落结构影响以及土壤水分与人工梭梭林长期相互影响的研究。植物的地理分布、空间结构及其生长发育均受生态因子的控制, 摸清生态因子对梭梭分布及其生长的影响, 将对开展梭梭引种栽培、经营管护以及退化恢复重建具有重要的指导作用。本文在民勤治沙综合试验站(位于民勤县沙井子)多年定位观测的基础上, 研究了降水、土壤水分和结皮对人工梭梭种群生长及其群落结构的影响, 为进一步认识人工梭梭林衰败机制及其恢复重建提供参考依据。

## 1 研究区自然概况

研究区选择在石羊河下游的民勤县沙井子, 其位于巴丹吉林沙漠东南缘, 气候为温带大陆性气候, 多年平均气温 7.68℃, 极端最高气温 40℃, 极端最低气温 -28.8℃; 年平均降水量 116.2mm, 年平均蒸发量 2643.9mm, 年平均相对湿度 51%, 干燥度 5.3, 无霜期 175d; 多西北风, 年平均大风日数 26.3d, 沙尘暴日 25d, 扬沙日 37.5d, 浮尘日 29.7d, 年平均风速 2.5m/s。地表水资源由 20 世纪 50 年代的 5.731 亿 m<sup>3</sup> 减少到本世纪初期的 1.0 亿 m<sup>3</sup> 左右; 地下水位由 1961 年的 2.21m 下降到 2001 年的 18.4m, 并仍以 0.50~0.71m/a 的速度下降。土壤多为风沙土, 养分贫瘠且风蚀严重。沙地植被中胡杨(*Populus euphratica* Olivier)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L)已全部枯死, 人工梭梭种群(*H. ammodendron*)和天然红柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb)出现严重衰败, 其他固沙植被如天然白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr)、毛条(*Caragana korshinskii* Kom)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum* Turcz)也出现不同程度的衰败, 土地沙漠化扩展加速, 使得该区域成为我国荒漠绿洲区域生态环境问题最为突出的地区之一。

## 2 研究方法

### 2.1 群落调查

采用样方法,调查不同立地类型(固定沙丘、半固定沙丘、流动沙丘、戈壁和丘间低地)、不同林龄人工梭梭林结构和数量特征。每一立地类型、每一林龄均调查样方 2~3 个,样方大小 20m×20m,灌木进行每木调查,调查指标包括高度、冠幅、新梢和枯梢率;沙米等 1 年生植物在大样方中沿对角线布设小样方进行调查,样方数量 5~10 个,样方大小 2m×2 m,调查指标包括高度、冠幅。

### 2.2 土壤理化性质测定

在开展梭梭林群落调查同时,在靠近梭梭单株位置取样,取样深度 1m,结皮单独取样;土壤样品带回实验室测定机械组成、土壤有机质以及土壤全 N、全 P 等理化指标。

### 2.3 土壤水分测定

在开展梭梭林群落调查同时,在靠近梭梭单株位置取样测定土壤含水率,取样深度 1m,每 20cm 为 1 层,每层重复取样。2001~2003 年,选择 2~31 年生林龄的梭梭林,以空间替代时间法研究人工梭梭林地土壤含水率变化。在靠近梭梭单株的位置取样测定土壤含水率,取样深度 150cm,每 50cm 为一层,每层重复取样。

### 2.4 退化人工梭梭林春季灌水试验

2001 年春季(4 月)开始,选择丘间低地退化梭梭林进行行间开沟,沟口宽 50cm,深度 50cm,每年灌井水 1 次,一次灌水量为 1200~1500m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。2002 年春季(4 月)灌水前,在灌水区 and 对照区随机选择高度 >2m、1~2m 和 <1m 的梭梭各 6 株,标记并测定其高度、冠幅和新梢生长量,9 月底对标记梭梭测定后计算净生长量。

### 2.5 水分下渗试验

在 2003 年 7 月 25 日,在梭梭林地、白刺林地以及流沙沙丘,设置具不同土壤结皮类型但坡度相似固定样点,26 日降水 1.1mm 后 14h,测定固定样点不同土层土壤含水率。2004 年 8 月 11 日降水 11.7mm 后 24h、48h,测定固定样点土壤湿润深度和不同土层土壤含水率。

### 2.6 结皮处理试验

2003 年 4 月选择设置了带状粘土沙障、方格状粘土沙障的人工梭梭林,开展结皮处理试验。两种处理模式:其一,全面模式,即破坏带状粘土沙障和方格状粘土沙障间结皮,将障间结皮加固到沙障上,进一步增加沙障高度和底宽;其二,局部处理模式,即利用土壤结皮建立 10~20m<sup>2</sup>的集流面,并在梭梭植株基部开挖 0.25~0.5m<sup>3</sup>集流坑,2003 年、2004 年底取样测定 0~180cm 土层土壤含水率。

### 2.7 数据分析

调查与实验观测数据分析处理和图形绘制均使用 Microsoft 公司的表格处理软件 Excel 完成。方差分析在 DPS 数据处理系统中进行,多重比较用 Duncan 氏新复极差测验法(取显著度 0.05 和 0.001)。

## 3 结果与分析

### 3.1 降水对梭梭种群分布及其生长的影响

对我国天然梭梭林分布区的降水资料进行统计分析发现,部分梭梭天然分布区多年平均降水量(建站~2001 年)很低,如青海茫崖为 50mm、甘肃敦煌为 39mm、内蒙古额济纳旗为 35mm、新疆若羌为 25mm,而且上述区域的降水年内、年际变异大,个别年份无降水出现,显然低降水量并未限制梭梭的分布,上述区域梭梭林依靠地下水和季节性洪水完成生长发育。但是,同一般植物不同,高降水量对梭梭分布具有明显的限制作用,在甘肃仅分布到降水量 110mm 的民勤县;在内蒙古可分布到降水量 168mm 的磴口县;在新疆可分布到 173mm 的奇台县;在青海分布到降水量 177mm 的都兰县。同时,在甘肃武威(164mm)、景泰(185.7mm)、兰州(312mm)和宁夏沙坡头(186.2mm)引种栽培试验表明,梭梭在年降水量高于 180mm 以上的甘肃古浪、景泰北部荒漠地区以及宁夏沙坡头的造林成活率低(50% 以下),生长较差,易发生白粉病,无法实现自我繁殖且难以成林,进一步证明高降水量对梭梭分布和生长的限制,认为把 180mm 降水上限作为梭梭引种栽培范围

比较合理。

民勤沙井子地区多年平均降水量为 116.2mm,是适宜梭梭生长的区域,在其北部曾有天然梭梭林分布(1994 年民勤县志)。但是,在民勤建立的人工梭梭林能够开花结实,却无法实现自然繁殖。对民勤沙井子地区近 40a 来的降水分配统计发现,年降水量围绕 116.2mm 波动变化,具有年际、年内变率大的特点,主要降水出现在 6~9 月份,占到全年降水量的 58.9%(图 1)。春季降水量多年平均值 20mm,占全年降水总量的 18.0%,其中 1998 年达到 53.3mm,占到全年降水总量的 44%,而 1987 年和 1995 年未出现降水过程。冬季降水量多年平均值 2.7mm,占总降水量 2.6%,其中 1989 年达到 16.3mm,占到年降水总量的 22.2%,但多个冬季未出现降水过程。同周边梭梭天然分布区相比,冬春季降水总量高于新疆吐鲁番、阿克苏,甘肃肃北以及内蒙古额济纳旗、吉兰泰;冬春季降水量比例也高于甘肃肃北以及内蒙古额济纳旗、吉兰泰(表 1,图 1),因此认为所谓“人工梭梭种群无法自然繁殖是春季、冬季降水少的缘故”的论断还有待商榷<sup>[10]</sup>。

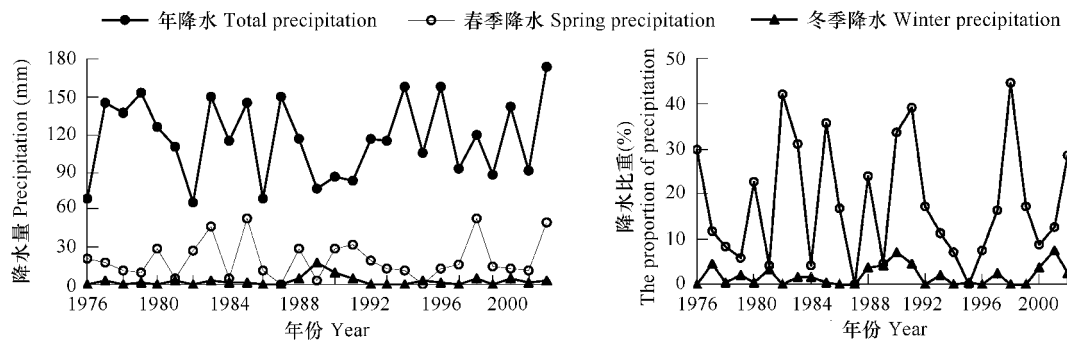


图 1 民勤沙井子地区年降水量及其季节分配

Fig. 1 Annual precipitation and its seasonal allocation in Shajingzi

表 1 民勤沙井子与梭梭天然分布区的年降水量及其季节分配比较

Table 1 Annual precipitation and its seasonal distribution in Shajingzi and regions with nature *H. ammodendron*

| 分布地点<br>Distribution area |                 | 年降水量<br>Annual<br>precipitation<br>(mm) | 春季 Spring                    |                          | 夏季 Summer                    |                          | 秋季 Autumn                    |                          | 冬季 Winter                    |                          |
|---------------------------|-----------------|-----------------------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|
|                           |                 |                                         | 降水量<br>Precipitation<br>(mm) | 百分比<br>Percentage<br>(%) | 降水量<br>Precipitation<br>(mm) | 百分比<br>Percentage<br>(%) | 降水量<br>Precipitation<br>(mm) | 百分比<br>Percentage<br>(%) | 降水量<br>Precipitation<br>(mm) | 百分比<br>Percentage<br>(%) |
| 新疆<br>Xinjiang            | 吐鲁番<br>Tulufan  | 16.4                                    | 2.4                          | 14.7                     | 8.3                          | 50.7                     | 3.1                          | 18.8                     | 2.6                          | 15.8                     |
|                           | 阿克苏<br>Akesu    | 64                                      | 13.6                         | 21.3                     | 36.9                         | 58.3                     | 8.8                          | 13.4                     | 4.7                          | 7.0                      |
| 甘肃<br>Gansu               | 民勤<br>Minqin    | 116.2                                   | 20.0                         | 18.0                     | 69.8                         | 57.9                     | 23.8                         | 20.8                     | 2.7                          | 2.6                      |
|                           | 肃北<br>Subei     | 73.0                                    | 9.6                          | 13.1                     | 50.6                         | 69.3                     | 10.8                         | 14.8                     | 2.0                          | 2.7                      |
| 内蒙古 Inner<br>Mongolia     | 额济纳旗<br>Ejinaqi | 34.7                                    | 2.2                          | 6.5                      | 15.8                         | 45.7                     | 16.0                         | 46.0                     | 0.6                          | 1.9                      |
|                           | 吉兰泰<br>Jilantai | 105.6                                   | 15.3                         | 14.5                     | 70.3                         | 66.6                     | 18.1                         | 17.2                     | 1.9                          | 1.8                      |

截至 2002 年,民勤沙井子地区的地下水位下降到 18m 之下,梭梭已无法利用。同时,1958 年修建红崖山沙漠水库后,地面河水以及季节性洪水也被完全阻断,人工梭梭林生长的主要水分来源成了大气降水,但降水量只能承载密度为 675~900 株/hm<sup>2</sup>的梭梭林<sup>[29]</sup>,不足以维持具备防风固沙功能的梭梭林(>1650 株/hm<sup>2</sup>)。伴随土壤水分消耗,人工梭梭林一般在造林 5~8a 后出现衰亡,梭梭林密度不断降低到降水承载密度之下,其中流动沙丘梭梭林残存密度接近降水承载密度,而带结皮固定沙丘梭梭林残存密度(375~450 株/hm<sup>2</sup>)远低于降水承载密度。人工梭梭林密度降低到降水承载密度后,降水足以维持梭梭种群生长,残存种群外貌逐渐

改观,但种群数量并不增加。灌水试验研究结果表明,灌水后人工梭梭个体生理活动加强,光合作用提高<sup>[18]</sup>,但是形态面貌并未出现明显变化,连续灌水 2~3a 后才会出现明显改观<sup>[37]</sup>,说明梭梭对土壤水分变化的反应迟钝,因此认为非连续同向的年际降水波动变化,对民勤人工梭梭种群的生长不会产生大的影响,但降水量的年际波动变化明显影响梭梭林中五星蒿、碱蓬、沙米等 1 年生植物种群数量及其生物量等(表 2)。因此,认为降水的年际、年内变化主要影响 1 年生植物种群的组成和数量,从而影响人工梭梭林群落的结构特征。

表 2 民勤沙井子流动沙丘梭梭林生长状况与降水的关系<sup>[38]</sup>Table 2 Relationship between the growth of *H. ammodendron* forest and precipitation on mobile sanddune in Shajingzi

| 年份<br>Year | 降水量<br>Precipitation<br>(mm) | 植物种<br>Species                   | 总株数<br>Total number<br>of plant<br>(株) | 总密度<br>Total density<br>(株/m <sup>2</sup> ) | 盖度 Coverage (%)          |             |                            |
|------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------|
|            |                              |                                  |                                        |                                             | 总盖度<br>Total<br>coverage | 灌木<br>Shrub | 一年生植物<br>Annual<br>species |
| 2001       | 90.1                         | 梭梭、白刺、沙米、黄花<br>矾松、碱蓬             | 6907                                   | 7.65                                        | 12.26                    | 4.44        | 7.82                       |
| 2002       | 174.4                        | 梭梭、白刺、沙米、黄花<br>矾松、碱蓬、猪毛菜、五<br>星蒿 | 31666                                  | 35.07                                       | 47.06                    | 4.51        | 42.45                      |

沙米 *Agriophyllum arenarium*, 黄花矾松 *Limonium aureum*, 碱蓬 *Suaeda glauca*, 猪毛菜 *Salsola ikonnikovii*, 五星蒿 *Bassia dasyphylla*

### 3.2 土壤水分对人工梭梭种群生长的影响

通过开展梭梭土壤凋萎系数与不同林龄梭梭林地土壤水分的调查研究,发现风沙土土壤含水率低于 0.824%,梭梭死亡;介于 0.824%~1.30%之间,梭梭处于退化状态;高于 1.30%,梭梭生长正常。

对已经退化的人工梭梭林进行春季灌水,灌水后 2d 和年底 0~100cm 土壤含水率分别为 11.94%、5.01%,是对照的 4.2 倍和 1.8 倍,一次春季灌水使退化梭梭林地土壤含水率在全年保持较高值(表 3)。土壤水分提高后,梭梭种群及其群落开始恢复。灌水第 2 年,退化人工梭梭种群年均高生长量达到 38.45cm,是对照的 1.5 倍;年均横向生长量达到 50.17cm,是对照的 1.6 倍;年均新梢生长量达到 29.95cm,是对照的 2.2 倍,灌溉区与对照区梭梭种群生长差异显著。但是,在灌水区 and 未灌水自然对照区,不同高度梭梭种群对水分的响应不同。在自然对照区,梭梭种群高生长表现为植株越低生长越好,横向生长和新梢生长在不同高度植株间差异不显著而灌水区不同高度梭梭种群高生长差异不显著,横向生长和新梢生长差异在 >2m 和 <1m 植株间差异显著(图 2)。另外,一次春季灌水也改变了梭梭的物候期,梭梭种群发芽时间较对照提前 10~15d。同时,退化梭梭林林下植被有快速发展,灌溉区物种数由对照区的 4 种增加到 14 种,林下植被总盖度比对照区高出 27.46%,是对照区的 2 倍。林下优势草本植物种个体冠幅与高度生长量也达到对照区的 2~3 倍;除白茎盐生草(*Halogeton arachnoideus*)外,各草本植物种盖度也均高于对照区(表 4)。

表 3 春季补灌人工梭梭林林地土壤含水率

Table 3 Soil water content in *H. ammodendron* forest with spring irrigation

| 处理<br>Treatment | 时间 Time | 土壤深度层次 Soil layer (cm) |       |       |       |        | 平均值<br>Mean value |
|-----------------|---------|------------------------|-------|-------|-------|--------|-------------------|
|                 |         | 0~20                   | 20~40 | 40~60 | 60~80 | 80~100 |                   |
| 补灌区             | 2d      | 6.36                   | 12.08 | 14.5  | 16.89 | 9.83   | 11.94             |
| Irrigation      | 1a      | 1.40                   | 2.94  | 6.42  | 6.82  | 7.48   | 5.01              |
| 对照区 CK          |         | 1.07                   | 1.78  | 1.23  | 1.50  | 8.66   | 2.85              |

土壤水分下降限制梭梭生长,而梭梭生长又会进一步加剧土壤水分下降。调查发现,梭梭林地土壤水分同梭梭林龄间存在密切的关系,造林密度 1650 株/hm<sup>2</sup>(2m×3m)梭梭林,3a 后林地土壤含水率下降到 2.25%,林分保存密度降低到 1500 株/hm<sup>2</sup>;5a 后土壤含水率降低到 1.55%,8a 后降低到 1.30%,梭梭林生长不良;14a 后已经降至梭梭土壤凋萎系数之下,梭梭种群开始大量死亡;林分密度衰亡到 375~450 株/hm<sup>2</sup>后基本保持稳定,该密度低于理论密度 675~900 株/hm<sup>2</sup><sup>[29]</sup>,土壤水分又开始缓慢恢复,到 30a 后林地土壤含水

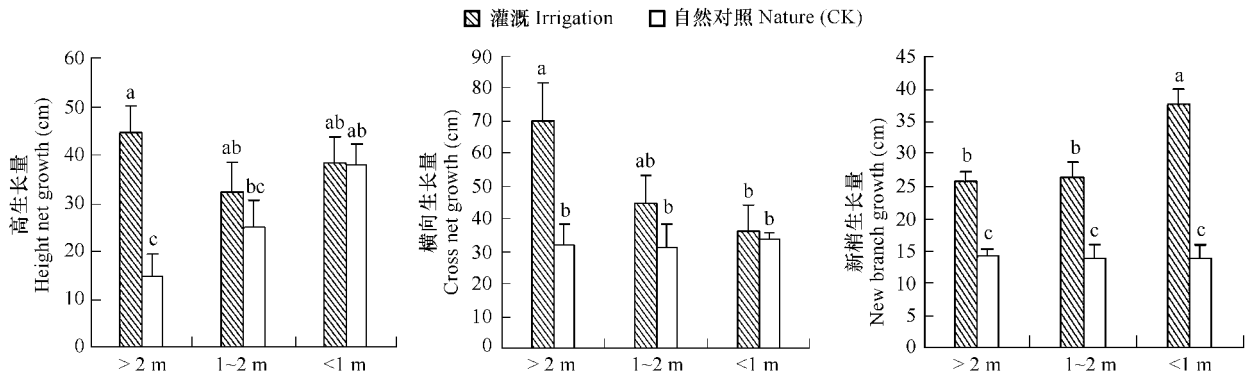


图2 春季补灌对人工梭梭种群生长的影响

Fig. 2 Effect of spring irrigation on the growth of artificial *H. ammodendron* in Shajingzi

表4 春季灌水后退化人工梭梭林中主要草本植物及其生长状况

Table 4 Main herb species and their growth in degraded *H. ammodendron* forest with spring irrigation

| 指标<br>Index         | 类型<br>Type             | 主要草本植物种 Main herb species      |                                 |                                |                                      |                                     |                                     |                                   |                                       | 总盖度<br>Total coverage |
|---------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
|                     |                        | 黄花矶松<br><i>Limonium aureum</i> | 五星蒿<br><i>Bassia dasyphylla</i> | 刺蓬<br><i>Salsola ruthenica</i> | 盐生草<br><i>Halogeton arachnoideus</i> | 甜甘草<br><i>Glycyrrhiza uralensis</i> | 沙米<br><i>Agriophyllum arenarium</i> | 冰草<br><i>Agropyron mongolicum</i> | 虫实<br><i>Corispermum patelliforme</i> |                       |
| 盖度<br>Coverage      | 补灌区<br>Irrigation      | 16.47                          | 12.5                            | 7.8                            | 10.7                                 | 4                                   | 1.87                                | 0.52                              | 0.3                                   | 56.16                 |
|                     | 对照区 CK                 | 2.5                            | 6.5                             | 2.2                            | 17.5                                 |                                     |                                     |                                   |                                       | 28.7                  |
|                     | 补灌/对照<br>Irrigation/CK | 6.59                           | 1.92                            | 3.55                           | 0.61                                 |                                     |                                     |                                   |                                       | 1.96                  |
| 平均高度<br>Mean height | 补灌区<br>Irrigation      | 36.0                           | 33                              | 38                             | 34.5                                 | 49                                  | 20                                  | 41                                | 34                                    |                       |
|                     | 对照区 CK                 | 16                             | 15                              | 11.5                           | 13.6                                 |                                     |                                     |                                   |                                       |                       |
|                     | 补灌/对照<br>Irrigation/CK | 2.25                           | 2.20                            | 3.30                           | 2.54                                 |                                     |                                     |                                   |                                       |                       |
| 平均冠幅<br>Mean canopy | 补灌区<br>Irrigation      | 54.7                           | 21.3                            | 37.5                           | 33                                   | 64.5                                | 47                                  | 25.25                             | 31.5                                  |                       |
|                     | 对照区 CK                 | 17                             | 19.4                            | 18                             | 15.95                                |                                     |                                     |                                   |                                       |                       |
|                     | 补灌/对照<br>Irrigation/CK | 3.22                           | 1.10                            | 2.08                           | 2.07                                 |                                     |                                     |                                   |                                       |                       |

率恢复到 1.30% 并保持相对稳定,残存梭梭生长趋于正常(图 3)。

### 3.3 土壤结皮对林地水分与梭梭种群生长的影响

土壤结皮包括物理结皮和生物结皮,广泛分布于干旱沙漠地区,有效降低了土壤风蚀,是土壤风蚀沙埋程度的指示标志<sup>[39~42]</sup>。民勤沙井子人工梭梭林存在上述两种结皮,但以物理结皮为主,主要原因是民勤地区梭梭林营造前多设置粘土沙障,沙障粘土颗粒在雨水作用下在障间散布形成土壳。不同类型土壤结皮的颗粒组成成分差异很大,梭梭林生物结皮中粘粒和粉粒均占 4%,与白刺沙包结皮、流动沙丘相似;而物理结皮粘粒和粉粒分别占 28.41% 和 24.35%,远高于白刺沙包结皮、梭梭林生物结皮和流动沙丘(表 5)。不同结皮的有机质和养分也有较大差异,其中梭梭林物理结皮居于

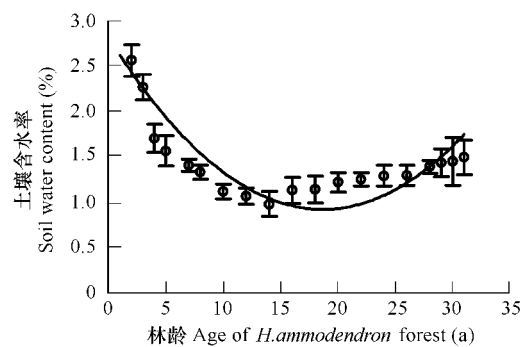


图3 民勤沙井子不同林龄梭梭林地土壤含水率

Fig. 3 Soil water content in *H. ammodendron* forest with different ages in Shajingzi

中间水平(表6)。从结皮的机械组成以及营养成分分析,梭梭林物理结皮更加紧实,也更加贫瘠,因而其降低土壤风蚀和阻止水分下渗的作用更强,实验观测证明也是如此(图5)。

表5 民勤沙井子土壤结皮的机械组成

Table 5 Mechanical composition of different soil crust in Shajingzi

| 类型 Types                                                          | 沙粒 Sand (%) |             | 粉粒 Silt (%) |              | 粘粒 Clay (%)   |       |
|-------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|---------------|-------|
|                                                                   | 1 ~ 0.25    | 0.25 ~ 0.05 | 0.05 ~ 0.01 | 0.01 ~ 0.005 | 0.005 ~ 0.001 | 0.001 |
| 白刺沙包<br><i>N. tangutorum</i> mound *                              | 3.74        | 74.26       | 14          | 2            | 4             | 2     |
| 梭梭林生物结皮<br>Microbiotic crust in<br><i>H. ammodendron</i> forest * | 17.36       | 74.64       | 2           | 2            | 2             | 2     |
| 梭梭林物理结皮<br>Physical crust in<br><i>H. ammodendron</i> forest      | 21.33       | 25.92       | 18.26       | 10.15        | 11.68         | 12.67 |
| 流动沙丘<br>Mobile sanddune                                           | 15.91       | 74.06       | 1.00        | 1.00         | 2.55          | 5.48  |

\* 数据为贾宝全在民勤沙井子的测定数据<sup>[41]</sup> Data was measured by Jia Baoquan at Shajingzi in Minqin county<sup>[41]</sup>

表6 民勤沙井子土壤结皮化学特性

Table 6 Chemical characteristics of different soil crust in Shajingzi

| 类型<br>Types                                                       | 有机质<br>Organic matter<br>(%) | 速效 N<br>Available N<br>(mg/kg) | 速效 P<br>Available P<br>(mg/kg) | 速效 K<br>Available K<br>(mg/kg) | 全 N<br>Total N<br>(%) | 全 P<br>Total P<br>(%) |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 白刺沙包<br><i>N. tangutorum</i> mound *                              | 0.482                        | 23.1                           | 3.647                          | 145.4                          | 0.027                 | 0.038                 |
| 梭梭林生物结皮<br>Microbiotic crust in<br><i>H. ammodendron</i> forest * | 0.151                        | 22.8                           | 2.343                          | 246.2                          | 0.013                 | 0.023                 |
| 梭梭林物理结皮<br>Physical crust in<br><i>H. ammodendron</i> forest      | 0.0723                       | —                              | —                              | —                              | 0.014                 | 0.010                 |
| 流动沙丘<br>Mobile sanddune                                           | 0.07                         | —                              | —                              | —                              | 0.010                 | 0.010                 |

\* 数据为贾宝全在民勤沙井子的测定数据<sup>[41]</sup> Data was measured by Jia Baoquan at Shajingzi in Minqin county<sup>[41]</sup>

一次 11.7mm 降水,24h 土壤湿润深度以纯流动沙丘最大,粘土沙障土壤最小,生物结皮梭梭林地(黑色结皮覆盖度 95%,厚 3~5mm)、物理结皮梭梭林地(结皮 100%,厚 3~5mm)、生物结皮白刺沙包(苔藓结皮 100%,厚 3~4mm)居中,其中物理结皮梭梭林地土壤湿润深度低于生物结皮梭梭林地和生物结皮白刺沙包。全部结皮均对水分下渗产生限制作用,但不同类型土壤结皮间差异显著。降水 24~48h,除生物结皮梭梭林地、粘土沙障土壤外,其它立地条件降水湿润深度差异不显著(图4)。

对于未形成径流降水,表层结皮的影响更为明显。一次 1.1mm 降水,14h 后在流动沙丘的下渗深度为 2.5cm,0~1cm 的土壤含水率由降雨前的 0.616% 增加到 2.074%;而物理结皮梭梭林地下渗深度仅为 1cm,结皮层土壤含水率由降雨前的 1.420% 增加到 4.663%,降水完全滞留于结皮并会很快蒸发。处理梭梭林内结皮,明显增加林地土壤含水率,2a 后 0~180mm 土壤含

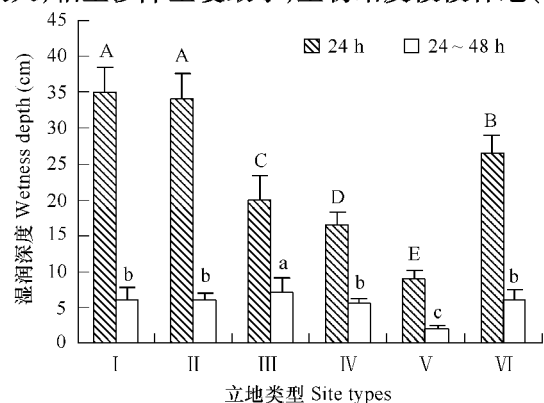


图4 一次降水在不同土壤的湿润深度

Fig. 4 Wetness depth of different type of soil after one precipitation  
I: 流动沙丘 Mobile sanddune, II: 无结皮梭梭林 *H. ammodendron* forest without crust, III: 生物结皮梭梭林 *H. ammodendron* forest with microbiotic crust, IV: 物理结皮梭梭林 *H. ammodendron* forest with physical crust, V: 沙障 Clay sand barrier, VI: 白刺沙包 *N. tangutorum* mound

水率同对照存在显著差异,但是同流动沙丘土壤含水率仍存在显著差异,从而进一步证明结皮对水分下渗的限制作用(表 7)。

表 7 处理结皮对梭梭林地土壤含水率的影响  
Table 7 Effect of undermined crust on soil moisture in *H. ammodendron* forest

| 年限<br>Year | 降水量<br>Precipitation<br>(mm) | 带状粘土沙障<br>Strip clay sand barrier |                      | 方格状粘土沙障<br>Checkboard clay sand barrier |                      | 流动沙丘<br>Mobile<br>sanddune |             |
|------------|------------------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------------|----------------------|----------------------------|-------------|
|            |                              | 全部处理<br>Full destruction          | 对照<br>No destruction | 全部处理<br>Full destruction                | 对照<br>No destruction |                            |             |
|            |                              |                                   |                      |                                         |                      |                            |             |
| 2003       | 151                          | 0.77(0.12)e                       | 0.65(0.11)e          | 1.41(0.10)c                             | 1.77(0.15)b          | 0.98(0.08)d                | 2.32(0.32)a |
| 2004       | 110.5                        | 1.04(0.13)d                       | 0.66(0.13)e          | 1.60(0.11)b                             | 1.95(0.31)b          | 1.03(0.09)d                | —           |

不同的字母 a,b,c,d,e 表示平均值差异显著,下表同 The different letters ( a,b,c) denote that means are significantly different at  $p=0.05$ , the same below

梭梭林内土壤结皮一方面通过降低土壤风蚀保护梭梭免遭风蚀危害,由于梭梭耐风蚀能力极强,根系外露 1m 或倒伏沙面依然能正常生长,从而使土壤结皮对梭梭的保护作用显得无足轻重;第二,林内土壤结皮限制了水分下渗,从而加速土壤干旱,也加速了梭梭种群衰败过程;第三,林内土壤结皮影响了一年生植物的定居和个体生长,尽管结皮梭梭林内物种数同流动沙丘无显著差异,但是物种类型明显不同,沙米不再出现,流动沙丘没有的五星蒿、画眉草 (*Eragrostis pilosa*) 等入侵。同时总密度低于流动沙丘,与流动沙丘差异显著(图 5)。

4 结论与讨论

降水是影响植物地理分布、生长发育最重要的生态因子之一,不同降水下发育不同类型的陆地植被<sup>[43]</sup>。梭梭分布与生长是否受降水限制,现有看法不尽相同。刘家琼、张鸿铎和邹受益认为梭梭为一种吸地下水植物或称潜水湿生植物,多依靠地下水生存,生境地下水位一般埋深 1~5m<sup>[31,35,44]</sup>;陈广庭则认为如果地下水较深,时而有洪水过境,梭梭也能生长<sup>[10]</sup>;而张克斌认为地下水位下降并不影响整个梭梭林,不能把梭梭衰败归结为地下水位下降,梭梭完全可以依靠降水生存<sup>[45]</sup>。通过对天然梭梭林分布区气候和人工引种栽培资料的分析,认为干旱、极端干旱区降水仅能维持低密度的梭梭生长,天然分布区的梭梭林多依靠地下水位和过境径流生长,引种到民勤、武威等地建立的人工梭梭林在现阶段依靠降水生存,但是降水的季节分配和年际波动对退化人工梭梭种群影响不明显,而对梭梭林内草本植物的生长影响显著。另外,与一般植物不同,梭梭分布和生长存在降水上限,多年平均降水量超过 180mm 地区,梭梭生长不良,因此建议梭梭引种造林在年降水量低于 180mm 的地区开展,而汉昶、王维邦提出梭梭在多年平均降水量 312mm 的兰州引种成功<sup>[46]</sup>,认为结论是不准确的。

根据史料记载,石羊河下游民勤西北部曾经有较大面积的天然梭梭林分布,证明石羊河下游是梭梭林生长的适宜地区,但是人工梭梭却无法实现自然繁衍,这也是众多学者所忽视的与梭梭林衰亡密切相关的重要原因。就其原因,普遍认为是春季、冬季降水少的缘故<sup>[10]</sup>。对石羊河下游 30a 气象资料统计分析发现,石羊河下游地区冬春季降水(雪)量低于新疆梭梭天然分布区,但高于内蒙古、甘肃西部天然分布区,认为降水季节分配不均并非梭梭无法自然繁衍的关键因素,其可能与梭梭成熟期、土壤质地等其它因素有关。

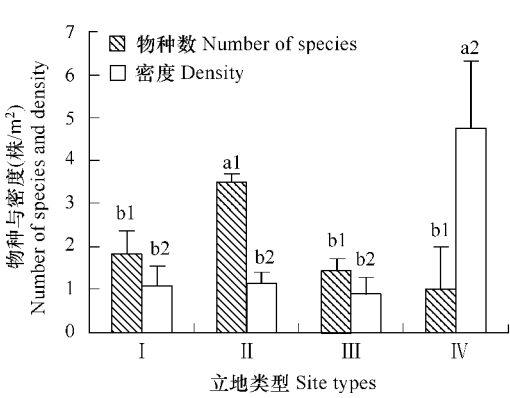


图 5 土壤结皮对梭梭林内 1 年生植物生长的影响

Fig. 5 Effect of soil crust on the growth of annual species in *H. ammodendron* forest

I: 未灌溉生物结皮梭梭林 *H. ammodendron* forest with microbiotic crust and without irrigation, II: 灌溉生物结皮梭梭林 *H. ammodendron* forest with microbiotic crust and irrigation, III: 物理结皮梭梭林 *H. ammodendron* forest with physical crust, IV: 流动沙丘 Mobile sanddune

土壤水分作为土壤的重要组成部分,是植物生存的重要条件,也是引起梭梭林退化的直接因素<sup>[31~33]</sup>,降水、地下水位和土壤结皮对梭梭生长的作用主要通过影响土壤含水率来实现的。在风沙土上,土壤含水率低于 0.824%,梭梭死亡;0.824%~1.30%之间,梭梭处于退化状态;高于 1.30%,梭梭生长正常。同时,人工梭梭林也影响林地土壤含水率,造林密度为 1650 株/hm<sup>2</sup>梭梭林,3a 后林地土壤含水率降低到 2.25%,5a 后降低到 1.55%,8a 后降低到 1.30%,14a 后降至梭梭凋萎系数之下,大量梭梭种群衰亡,之后土壤含水率又开始缓慢恢复,30a 后恢复到 1.30%左右并保持相对稳定。另外,对已退化人工梭梭林进行连续两年 1 次春季灌水后,尽管不同高度梭梭种群生长不同,但灌水区梭梭种群高生长、横向生长和新梢生长与对照区差异显著,是对照的 1.5~2.2 倍。灌水特别对林中草本植物的影响更为显著,从而进一步证明土壤水分对人工梭梭种群及其群落的重要作用。

土壤结皮一般可分为物理结皮和生物结皮两种,其中物理结皮是在雨滴的打击压实下,土壤的团聚体分散而形成的;生物结皮主要是在生物作用下,由生物体与土壤形成的复合的生物土壤层<sup>[39,40]</sup>。在人工梭梭林中,土壤结皮对梭梭的影响包括正反两个方面,一方面能提高梭梭林内起沙风速,保护梭梭免遭风蚀;另一方面,改变了土壤的水文、化学和生物过程,引起土壤干旱,加速了梭梭种群的衰败,因而是一个典型的矛盾体。目前,物理结皮降低入渗、增加径流,增加侵蚀,已成定论;生物结皮对入渗的影响还存在争议,是增加还是降低有不同的说法<sup>[39,42]</sup>。为充分发挥结皮固定流沙和保护梭梭种群免遭风蚀危害的生态功能,弱化结皮限制土壤水分下渗而引起土壤旱化的副作用,对梭梭林林内结皮进行全部或局部处理,再配以集流坑,不仅发挥了土壤结皮的固沙作用,还充当了集流面的作用,土壤含水率不断恢复,从而逐渐恢复残存的人工梭梭林。

#### References:

- [1] Hu S Z. *Haloxylon ammodendron* Bunge desert in western China. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1963, 1(1-2): 81—109.
- [2] Liu Y X. *Flora of desert from China*. Beijing: Science Press, 1985. 1: 342—343.
- [3] Zhao X L, translation. *A study on global sand Seas*. Yinchuan: Ningxia People's Press, 1993. 440—441.
- [4] Zhang L Y. *Haloxylon ammodendron* Bunge and *H. Persicum* Bunge ex Boiss in Xinjiang desert (Part I). *Plants*, 2002, 21(4): 4—6.
- [5] Tobe K, Li X M, Omasa K. Effects of sodium chloride on seed germination and growth of two Chinese desert shrubs, *Haloxylon ammodendron* and *H. persicum* (Chenopodiaceae). *Aust J Bot*, 2000, 48: 455—460.
- [6] Jia Z Q, Lu Q. *Haloxylon ammodendron* Bunge. Beijing: China Environmental Science Press, 2005. 1—8, 61—118.
- [7] Zhang L Y. *Haloxylon ammodendron* Bunge and *H. Persicum* Bunge ex Boiss in Xinjiang desert (Part II). *Plants*, 2002, 21(5): 4—5.
- [8] Sheng Y, Zheng W H, Pei K Q, et al. Population genetic structure of a dominant desert Tree, *Haloxylon ammodendron* (Chenopodiaceae), in the southeast Gurbantungut desert detected by RAPD and ISSR markers. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(6): 675—681.
- [9] Jia Z Q, Lu Q, Guo B G, et al. Progress in the study of psammophyte-*Haloxylon*. *Forest Research*, 2004, 17(1): 125—132.
- [10] Cheng G T. *Protective technology for sand damage*. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 96—98.
- [11] Georgievskii A B, Khodzhamkulyev A. The fruiting of the *Haloxylon ammodendron* communities in the Repetek reservation. *Botanicheskii Zhurnal*, 1977, 62(8): 1169—1176.
- [12] Sheng J H, Qiao Y X, Liu H Y, et al. A study on the root system of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge. *Acta Agrestia Sinica*, 2004, 12(2): 91—94.
- [13] Zhang P, Dong Y Z, Wei Y, et al. ISSR Analysis of genetic diversity of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge in Xinjiang. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(7): 1337—1341.
- [14] Hou T Z, Liang Y Q. Research on physiological ecology of photosynthesis and water relation of saxaul forests in Ganjiahu area of Xinjiang. *Acta Phytocologica Sinica*, 1991, 15(2): 140—150.
- [15] Su P X, Yan Q D. Photosynthetic characteristics of C<sub>4</sub> desert species *Haloxylon ammodendron* and *Calligonum mongolicum* under different moisture conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 75—82.
- [16] Pyankov V I, Black Jr. C C, Artyusheva E G. Features of photosynthesis in *Haloxylon* species of Chenopodiaceae that are dominant plants in central Asian deserts. *Plant Cell Physiol*, 1999, 40: 125—134.
- [17] Wang T R, Zhang L X, Bi Y R, et al. Effects of water stress on gas exchange characteristics of *Haloxylon ammodendron* leaves. *Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition)*, 2001, 36(6): 57—62.

- [18] Ma Q L, Wang J H, Ji Y F, *et al.* The photosynthesis-physiological characteristics of *Haloxylon ammodendron* Bge under the different soil moisture grades. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(12): 2120—2126.
- [19] Chang X X, Zhao W Z, Zhang Z H. Water consumption characteristic of *Haloxylon ammodendron* for sand binding in desert area. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1826—1837.
- [20] Kalenov G S. Ecological features of *Haloxylon ammodendron* in the areas of tectonic deformations in Turan Province (Uzbek SSR and Kazakh SSR, USSR). *Ekologiya*, 1996, (1): 7—12.
- [21] Liu X Y, Liu S. Study on ecosystem of *Haloxylon ammodendron*. *Journal of Desert Research*, 1996, 16(3): 287—291.
- [22] Oxlovsky N, Birbaum E. Geographical distribution and ecological conditions of *Haloxylon* species growing. *Problems of Desert Development*, 1999, (5): 16—29.
- [23] Li J G, Nin H S, Liu B. Study on character structure and distribution pattern of *Haloxylon ammodendron*. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2003, 26(3): 51—54.
- [24] Guo Q S, Wang C L, Guo Z H, *et al.* Geographic distribution of existing *Haloxylon* desert vegetation and its patch character in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(5): 2—7.
- [25] Guo S H, Zhang H, Song Y X. Study on seeding technique of xerophytes *Haloxylon Ammodendron* (C. A. M) Bge. *Journal of Agricultural Sciences*, 2005, 26(3): 51—54.
- [26] Wei Y, Wang X Y. Role of winged perianth in germination of *Haloxylon* (*Chenopodiaceae*) seeds. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4014—4018.
- [27] Lalymenko N K, Lalymenko L. A. Growing saxaul seedlings in sheltered ground. *Problems of Desert Development*, 1996, (1): 70—77.
- [28] Li Y F, Yang G. Studies on the moisture balance of *Haloxylon ammodendron* sand-break forest I. the moisture state of *Haloxylon ammodendron* autumn irrigated sand-break forest. *Arid Zone Research*, 1996, 13(2): 44—49.
- [29] Li A D, Zhao M, Wang Y L, *et al.* Research on water balance of *Haloxylon ammodendron* forest with different ages in Minqin area. In: Wang J H ed. *Gansu desert control theories and practices*. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1999. 78—83.
- [30] Liu F M, Zhang Y H, Wu Y Q, *et al.* Soil water regime under the shrubberies of *Haloxylon ammodendron* in the desert regions of the Heihe River watershed. *Arid Zone Research*, 2002, 19(1): 27—31.
- [31] Liu J Q. Research on degenerate reason of *Haloxylon ammodendron* Bge in Minqin. *Journal of Desert Research*, 1982, 2(2): 44—46.
- [32] Ding S H, Wang J H. Preliminary research on degenerate reason of sand-fixation forest of *Haloxylon ammodendron* Bge in Minqin area. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 1985, 10(3): 56—59.
- [33] Dong Z Y, Yao Y F, Han Y W. Study on the photosynthetic eco-physiological characteristics of degenerated *Haloxylon ammodendron* Bge in Jilantai. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1997, 11(Supp.): 66—74.
- [34] Chang J B, Fang T Z. An optimization for artificial reforestation technique of cackayr forest. *Journal of Inner Mongolia Forestry College*, 1995, 17(2): 128—140.
- [35] Zou S Y, Chang J B, Yang M X, *et al.* The study on repair engineering of cackayr forest. *Journal of Inner Mongolia Forestry College*, 1995, 17(2): 9—16.
- [36] Ma Q L, Wang J H, Zhao M, *et al.* Research on restoration technology of degenerated artificial *Haloxylon ammodendron* forest. *Forest Research*, 2006, 19(2): 151—157.
- [37] Zhang K J, Wang J H, Ma Q L, *et al.* Research on recovery of degenerate *Haloxylon ammodendron* by irrigation. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(Supp.): 134—137.
- [38] Chang Z F, Zhao M. Research on Minqin desert ecology. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 2006. 168.
- [39] Li X R, Jia Y K, Long L Q, *et al.* Advances in microbiotic soil crust research and its ecological significance in arid and semiarid regions. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(1): 4—10.
- [40] Yang X H, Zhang K B, Zhao Y J. Microbiotic soil crust — a research forefront in desertification-prone areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3): 474—480.
- [41] 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.
- [42] Hu X, Cai Q G, Liu L Y, *et al.* Development of soil crust through simulated rainfall in laboratory. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 504—507.
- [43] Li B. Ecology. Beijing: Higher Education Press, 2000. 33—37.
- [44] Zhang H D. The forest type and its characteristics of the *Holoxylon* in Junggar basin in Xinjiang. *Journal of Desert Research*, 1990, 10(1): 41—49.

- [45] Zhang K B, Luo Y X. The investigation on the artificial regeneration of *Haloxylon ammodendron* and the approach of its rational density in Minqin region, Gansu Province. *Journal of Beijing Forestry University*, 1984, 6(1): 1—10.
- [46] Han J, Wang W B. Introduction of *Haloxylon ammodendron* achieved a bit of success at primary stage in Lanzhou region. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 1986, 11(3): 37—38.

#### 参考文献:

- [1] 胡式之. 中国西北地区的梭梭荒漠. 植物生态学与地植物学丛刊, 1963, 1(1-2): 81~109.
- [2] 刘瑛心. 中国沙漠植物志(第一卷). 北京: 科学出版社, 1985. 342~343.
- [3] 赵兴梁译. 世界沙海的研究. 银川: 宁夏人民出版社, 1993. 440~441.
- [4] 张立运. 新疆荒漠中的梭梭和白梭梭(上). 植物杂志, 2002, 21(4): 4~6.
- [6] 贾志清, 卢琦. 梭梭. 北京: 中国环境科学出版社, 2005. 1~8, 61~118.
- [7] 张立运. 新疆荒漠中的梭梭和白梭梭(下). 植物杂志, 2002, 21(5): 4~5.
- [9] 贾志清, 卢琦, 郭宝贵, 等. 沙生植物——梭梭研究进展. 林业科学研究, 2004, 17(1): 125~132.
- [10] 陈广庭. 沙害防治技术. 北京: 化学工业出版社, 2004. 96~98.
- [12] 盛晋华, 乔永祥, 刘宏义, 等. 梭梭根系的研究. 草地学报, 2004, 12(2): 91~94.
- [13] 张萍, 董玉芝, 魏岩, 等. 利用 ISSR 标记对新疆梭梭遗传多样性的研究. 西北植物学报, 2006, 26(7): 1337~1341.
- [14] 侯天侦, 梁远强. 新疆甘家湖梭梭林的光合、水分生理生态的研究. 植物生态学报, 1991, 15(2): 140~150.
- [15] 苏培玺, 严巧娣. 荒漠植物梭梭和沙拐枣在不同水分条件下的光合作用特征. 生态学报, 2006, 26(1): 75~82.
- [17] 江天然, 张立新, 毕玉蓉, 等. 水分胁迫对梭梭叶片气体交换特征的影响. 兰州大学学报, 2001, 36(6): 57~62.
- [18] 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.
- [19] 常学向, 赵文智, 张智慧. 荒漠区固沙植物梭梭(*Haloxylon ammodendron*)耗水特征. 生态学报, 2007, 27(5): 1826~1837.
- [21] 刘晓云, 刘速. 梭梭荒漠生态系统. 中国沙漠, 1996, 16(3): 287~291.
- [23] 李建贵, 宁虎森, 刘斌. 梭梭种群性状结构与空间分布格局的初步研究. 新疆农业大学学报, 2003, 26(3): 51~54.
- [24] 郭泉水, 王春玲, 郭志华. 我国现存梭梭荒漠植被地理分布及其斑块特征. 林业科学, 2005, 41(5): 2~7.
- [25] 郭生虎, 张浩, 宋玉霞, 等. 旱生树种梭梭育苗技术研究. 农业科学研究, 2005, 26(3): 51~54.
- [26] 魏岩, 王习勇. 果翅对梭梭属(*Haloxylon*)种子萌发行为的调控. 生态学报, 2006, 26(12): 4014~4018.
- [28] 李银芳, 杨戈. 梭梭固沙林水分平衡研究(梭梭柴秋灌固沙林的水分状况). 干旱区研究, 1996, 13(2): 44~49.
- [29] 李爱德, 赵明, 王耀林, 等. 民勤地区不同林龄梭梭林地水分平衡研究. 见: 王继和主编. 甘肃治沙理论与实践. 兰州: 兰州大学出版社, 1999. 78~83.
- [30] 刘发民, 张应华, 作彦卿, 等. 黑河流域荒漠地区梭梭人工林地土壤水分动态研究. 干旱区研究, 2002, 19(1): 27~31.
- [31] 刘家琼, 黄子琛, 鲁作民, 等. 民勤梭梭死亡原因的研究. 中国沙漠, 1982, 2(2): 44~46.
- [32] 丁声怀, 王继和. 民勤地区梭梭固沙林衰亡原因的初步研究. 甘肃林业科技, 1985, 10(3): 56~59.
- [33] 董占元, 姚云峰, 韩伟伟, 等. 乌兰泰地区梭梭林退化死亡原因的生态生理学研究. 干旱区资源与环境, 1997, 11(增刊): 66~74.
- [34] 常金保, 方天纵. 梭梭林人工更新技术优化研究. 内蒙古林学院学报, 1995, 17(2): 128~140.
- [35] 邹受益, 常金保, 杨美霞. 梭梭林修复工程研究. 内蒙古林学院学报, 1995, 17(2): 9~16.
- [36] 马全林, 王继和, 赵明, 等. 退化人工梭梭林的恢复技术研究. 林业科学研究, 2006, 19(2): 151~157.
- [37] 詹科杰, 王继和, 马全林, 等. 退化梭梭林补灌恢复试验研究. 中国沙漠, 2004, 24(增刊): 134~137.
- [38] 常兆丰, 赵明. 民勤荒漠生态研究. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2006. 168.
- [39] 李新荣, 贾玉奎, 龙利群, 等. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展. 中国沙漠, 2001, 21(1): 4~10.
- [40] 杨晓晖, 张克斌, 赵云杰. 生物土壤结皮——荒漠化地区研究的热点问题. 生态学报, 2001, 21(3): 474~480.
- [41] 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.
- [42] 胡霞, 蔡强国, 刘连友, 等. 人工降雨条件下几种土壤结皮发育特征. 土壤学报, 2005, 42(3): 504~507.
- [43] 李博. 生态学. 北京: 高等教育出版社, 2000. 33~37.
- [44] 张鸿铎. 准噶尔盆地梭梭林型及其特点. 中国沙漠, 1990, 10(1): 41~49.
- [45] 张克斌, 罗毓玺. 甘肃民勤地区梭梭林调查及合理密度的探讨. 北京林学院学报, 1984, 6(1): 1~10.
- [46] 汉隰, 王维邦. 兰州地区梭梭初获成功. 甘肃林业科技, 1986, 11(3): 37~38.