

# 腾格里沙漠沙坡头地区人工植被蒸散 耗水与水量平衡的研究\*

冯金朝 陈荷生 康跃虎 刘元波

(中国科学院兰州沙漠研究所, 兰州 730000)

## 摘要

运用大型称重式电子蒸散系统研究沙坡头地区人工植被蒸散耗水量与水分平衡, 结果表明: 固沙造林初期, 年平均降水量 186.6 mm 能够满足植物正常生长需要, 是保证植物固沙成功的基本条件。正常降水年份, 植物(密度为 75 株/100 m<sup>2</sup>)蒸散耗水量大于降水量。油蒿 (*Artemisia ordosica* Kraschen.) 和柠条 (*Caragana korshinskii* Kom.) 的蒸散量分别占同期降水量的 136.6% 和 131.1%, 两种植物的蒸腾量分别占其蒸散量的 45.6% 和 43.4%。在 100~200 mm 降水范围内, 沙地物理蒸发量与降水量的比值随降水量的减少而增大; 降水量 100 mm 时, 是人工固沙植被所需降水的最低下限。降水的时空分布和地表结皮的形成对人工植被水分平衡与水分利用产生较大的影响。

**关键词** 沙地; 水分平衡; 降水; 人工植被; 蒸散

## STUDY ON WATER BALANCE AND EVAPOTRANSPIRATION OF ARTIFICIAL VEGETATION IN SHAPOTOU AREA, TENGER DESERT

Feng Jin-chao, Chen He-sheng, Kang Yao-hu and Liu Yuan-bo

(Lanzhou Institute of Desert Research, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

## Abstract

Precipitation, the only water resource available for plants, is the main limited factor to plant growth in Shapotou area. After the vegetation protective system is built, the proportion between various components of water balance changes and exerts a great influence on

收稿日期: 1994-01-22 接受日期: 1994-04-15

\* 国家自然科学基金资助课题。

growth and succession of artificial vegetation. By calculation on the basis of water balance using weighing electronic lysimeters, the results showed that the average precipitation (186.6 mm) met the need of plant growth in the earlier stage of sand control. The evapotranspiration of desert plants, of which the density is 75 in 100 m<sup>2</sup> area of the ground, was much more than the annual average precipitation. The ratio of evapotranspiration of *Artemisia ordosica* Kraschen. and *Caragana korshinskii* Kom. to precipitation was 136.6% and 131.1% respectively. The ratio of soil evaporation in the water equilibrium rose as the precipitation decreased in the range of 100 ~ 200 mm. However when precipitation was around 100 mm, which was the lowest limit of precipitation available for artificial vegetation, water was almost solely dependant on the soil ineffective evaporation. The effects of precipitation distribution in time and space and formation of biocrust on the soil surface on water balance and water use in artificial vegetation were highly appraised.

**Key words** Sandy soil; Water balance; Precipitation; Artificial vegetation; Evapotranspiration

宁夏沙坡头地区位于腾格里沙漠东南缘,属草原化荒漠地带,人工植被固沙在这一降水稀少、风沙成灾的地区获得巨大成功为世人瞩目。但是,人工固沙植被的建立和发展,导致了该地区水量平衡各分量之间比例关系的改变,土壤水分条件的恶化又制约着植被的生长与发展。在人工植被的稳定与演变问题的研究中,植物耗水与水分在人工植被生态系统中的变化规律是首先需要解决的关键问题之一,也是治沙造林工作者和荒漠植物生理生态学家普遍关心的焦点<sup>[1~5]</sup>。为此,本文开展了沙地植物的水分平衡研究,并对沙地植物水分平衡各分量的比例关系以及环境条件变化所产生的影响进行了讨论。

## 1 研究 方 法

试验采用中国科学院兰州沙漠研究所研制的称重式电子蒸散系统对固沙植物的蒸散耗水进行定量测定。供试植物种为二年生油蒿(*Artemisia ordosica* Kraschen.)和二年生柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)。

称重式电子蒸散系统安装在中国科学院沙坡头沙漠试验研究站水分平衡场内。该蒸散系统包括3个直径2.23 m、高2.2 m的圆筒形试验容器。容器内底层填充0.4 m厚的卵石层,上部沙土厚约1.7 m,容器顶部与地面相平,底部设有渗漏排水管口。每个容器重14000 kg左右,系统采用的压力传感器的分辨率为0.38 kg。在蒸散系统的其中2个试验容器内分别栽植油蒿和柠条各3株,该栽植密度(75株/100 m<sup>2</sup>)是按现存固沙区早期采用的人工固沙植物密度而设定的。另一个试验容器内不栽种植物,作为空白对照,用于观测沙地水分的物理蒸发量。在蒸散系统周围栽植着不同密度与配置的油蒿和柠条,可以保护蒸散系统不受风沙影响。

试验采用水分平衡方法进行研究。沙坡头地区沙丘深厚,地下水埋藏很深,植物根系不能吸收利用。沙地储水能力弱,渗漏快,不产生地表径流,因此水分平衡的三大要素之一

——径流在水量平衡方程中被删除。由于沙坡头地区大气凝结水分很少,可以忽略不计,因而该地区沙地水分平衡方程为<sup>[2]</sup>:

$$\Delta W = P - (ET + Q) \quad (1)$$

式中,  $\Delta W$  为土壤储水量变化,  $P$  为降水量,  $ET$  为蒸散量,  $Q$  为土壤渗漏水量。

上述水分平衡方程同样适用于称重式电子蒸散系统。式(1)中的  $\Delta W$  即为蒸散系统试验容器重量在某一时段内的变化, 根据观测的降水量和渗漏水量, 可求得沙地植物的实际蒸散耗水量为:

$$ET = P - Q - \Delta W \quad (2)$$

## 2 结果和讨论

### 2.1 沙地植物的蒸散耗水

油蒿和柠条是沙坡头地区人工固沙植被中的两个主要植物种, 二者生长发育的物候期基本相同, 主要生长期在每年的 4 月份至 10 月份。供试的二年生油蒿和二年生柠条是 1990 年 4 月 2 日移栽至试验容器中的。栽植前, 土壤水分状况较好, 土壤含水量为 3.1%, 移栽后植物不仅存活而且生长状况良好(表 1)。

表 1 油蒿和柠条的生长状况  
Table 1 Growth status of *Artemisia ordosica* and *Caragana korshinskii*

植物种 Species	时间 Time	高度 Height (cm)	冠幅 Size of crown (cm)	盖度 Coverage (%)
油蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	1990. 4	37. 2	34. 1×40. 4	7. 4
	1990. 10	43. 7	59. 8×66. 5	18. 5
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	1990. 4	48. 0	19. 2×18. 9	2. 9
	1990. 10	113. 7	51. 1×42. 5	10. 9

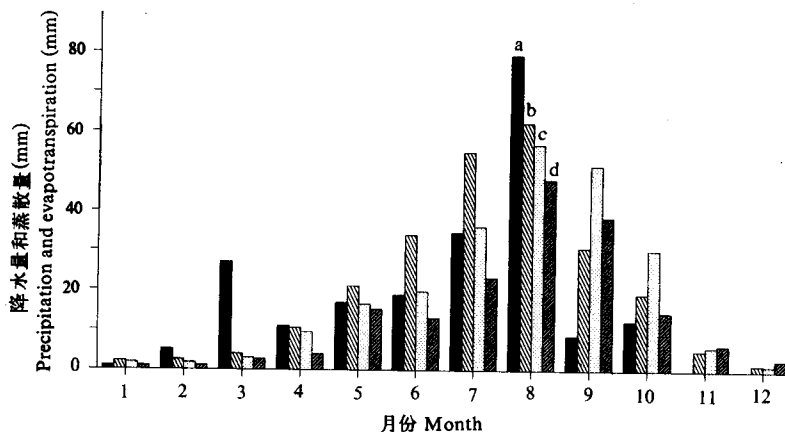


图 1 油蒿、柠条在 1990 年不同月份的蒸散耗水量

a. 降水 b. 油蒿 c. 柠条 d. 沙地

Fig. 1 Evapotranspiration of *Artemisia ordosica* and *Caragana korshinskii* in different months (1990)

a. Precipitation b. *A. ordosica* c. *C. korshinskii* d. Sand ground

根据 1990 年沙坡头站水分平衡观测场内称重式电子蒸散系统的统计资料,在植物的整个生长发育过程中,油蒿的蒸散耗水量(包括土壤蒸发量和植物蒸腾量)为 218.0 mm,柠条的蒸散耗水量为 209.3 mm(图 1)。

4~6 月是植物的快速生长阶段,植物萌发新枝的生长速度较快,相应的蒸散耗水量也逐步递增。该阶段油蒿的蒸散耗水量为 55.6 mm,占全部生长期蒸散耗水量的 25.5%。柠条的蒸散耗水量为 40.8 mm,占全部生长期蒸散耗水量的 19.5%。随着植物的生长发育,7~9 月,植物进入旺盛生长阶段,叶面积和覆盖度逐渐达到最大,与之相应的植物蒸散耗水量也逐渐达到高峰。该阶段中油蒿的蒸散耗水量为 138.0 mm,占其全部生长期蒸散耗水量的 63.3%。柠条的蒸散耗水量为 132.1 mm,占其全部生长期蒸散耗水量的 63.1%。10~11 月,植物生长停止,生理活动减弱,根系吸水减少,植物的蒸散耗水量也随之降低。该阶段中油蒿的蒸散耗水量为 24.4 mm,占其全部生长期蒸散耗水量的 11.2%。柠条的蒸散耗水量为 36.4 mm,占其全部生长期蒸散耗水量的 17.4%。上述观测统计结果较好地反映了人工固沙初期植物正常生长条件下的蒸散耗水特性和耗水规律。

## 2.2 沙地植物的水分收支关系

沙坡头地区自然环境条件与土壤条件特殊,沙地植物水分平衡主要划分 3 大分量:降水量、蒸散量与渗漏量。称重式电子蒸散系统的观测统计资料结果(表 2)表明,1990 年降水量为 205.8 mm,属正常降水年份(图 1)。两种供试植物在生长发育过程中所消耗的水量均大于同期降水量和年降水量,油蒿和柠条的蒸散量分别占同期降水量的 136.6%和 131.1%,占年降水量的 105.9%和 101.7%。由于栽植前 3 月份降水量为 27.2 mm,因而栽植初期仍有少量水分渗漏,油蒿和柠条试验容器所渗漏的水量分别占年降水量的 10.3%和 14.9%。裸露沙地(对照试验容器)的蒸发(散)量小于降水量,其年蒸发总量为 124.7 mm,占年降水量的 60.6%。同年,裸露沙地的渗漏水量很大,年总量为 99.6 mm,占年降水量的 48.4%。

表 2 沙地植物的水量平衡

Table 2 Water balance between desert plants and sandy ground

类型 Type	时间 Time	降水 Precipitation (mm)	蒸散 Evapotranspiration (mm)	渗漏 Leakage (mm)
油蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	1990.4~11	159.6	218.0	21.2
	1991.4~11	81.5	110.5	0.0
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	1990.4~11	159.6	209.3	30.6
	1991.4~11	81.5	166.1	0.0
裸露沙地 Sandy ground	1990.4~11	159.6	118.5	96.6
	1991.4~11	81.5	79.0	18.1

沙坡头地区气候干燥,沙地表面常形成一定厚度(年平均厚度为 6.7 cm)的干沙层<sup>[2]</sup>,有效地阻止了深层土壤水分蒸发。在试验观测过程中,蒸散系统 3 个试验容器内地

表干沙层形成厚度基本是一致的,因此可以认为三者地表物理蒸发量是相近的。据此,可由植物蒸散总量减去对照裸露沙地的物理蒸发量求得植物蒸腾失水量的近似值。1990年油蒿的年蒸腾量为 99.5 mm,柠条的年蒸腾量为 90.8 mm,二者蒸腾量分别占其蒸散耗水量的 45.6%和 43.4%。

1991年降水量为 96.5 mm,属干旱年份。由于1990年两种供试植物的大量耗水,沙地水分入不敷出,土壤含水量减少,因此该年内植物的蒸散耗水量均下降。其中油蒿的蒸散耗水量与1990年相比,年较差 107.5 mm,但其蒸散总量仍大于降水量,分别占同期降水量和年降水量的 135.6%和 114.5%,这个比例关系与1990年的比值基本相同。油蒿蒸腾失水量为 31.5 mm,占其蒸散量的 28.5%,较1990年所占比例减小。柠条的蒸散耗水量较1990年有所减少,但其占同期降水量和年降水量的比值增大,分别为 203.8%和 172.1%。柠条的蒸腾失水量为 87.1 mm,占其蒸散量的 52.4%。1991年裸露沙地的年蒸发(散)量为 90.3 mm,占年降水量的 93.6%,说明降水几乎全部被地表蒸发所消耗而成为无效降水。

上述研究结果表明,油蒿的蒸散耗水量与降水量有着密切关系,无论是正常降水年份还是干旱年份,其蒸散量与降水量的比例关系基本保持一致。柠条则不同,降水减少时其蒸散量与降水量的比值增大,植物蒸腾失水量受降水变化的影响较小,从而反映出两种植物对降水补给和土壤水分的利用方式存在着较大差异。油蒿为水平根系,主要利用浅层土壤水分,受降水变化的影响很大;柠条为垂直根系,能够随着根系的向下延伸生长,利用较深土层的土壤水分,在栽植初期受降水影响较小。然而,两种植物的蒸散耗水量均大于降水量,这样势必造成土壤水分含量的持续降低,土壤水分亏缺是制约植物生长与蒸散耗水的主要原因。

此外,从裸露沙地和油蒿的水分平衡各分量的变化关系可知,在 100~200 mm 降水范围内,随着降水量的减少,消耗于沙地物理蒸发的水量与降水量的比值增大。降水量为 100 mm 时,水分几乎全部用于土壤无效蒸发,因此,这是沙坡头地区人工固沙植被所需降水的最低下限。

根据蒸散系统渗漏排水的观测,栽植油蒿的试验容器在1990年7月水分渗漏停止,栽植柠条的试验容器在1990年9月水分渗漏停止,之后二者再没有发生过水分渗漏现象。说明两种植物的栽植密度(75株/100 m<sup>2</sup>)偏大,土壤水分被大量消耗,降水不足以补偿植物的蒸散耗水。

### 2.3 影响沙地植物水分平衡的因素

**2.3.1 降水的时空分布** 根据沙坡头地区多年降水统计资料和距平曲线变化<sup>[6]</sup>,50年代至60年代,年均降水量为 195.9 mm,降水量年变幅大,水量偏多、偏少、正常变化每3年交替出现1次。至80年代,平均降水量为 165.6 mm,减少了 15%,而且出现了降水偏少持续发展的情况,旱象严重。

降水量的年内分配变化可用向量法比较直观地反映其变化特征,以简明的数据来反映降水在年内各阶段的集中程度和最大降水出现的时段,即用降水的集中度和集中期表示。

将每月降水作为矢量,各月份为矢量方向,月降水量为矢量大小,则集中度为各月降

水水平分量与垂直分量的合成量,用下式计算:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

式中,水平分量  $R_x = \sum_{i=1}^{12} R_i \cdot \cos \alpha_i$ ; 垂直分量  $R_y = \sum_{i=1}^{12} R_i \cdot \sin \alpha_i$

$\alpha_i$  为各月月中所代表的角度值,如表 3 所示。

表 3 月降水矢量角度值  
Table 3 Monthly vector angles of precipitation

月份 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
角度值 Angle	15°	44°	74°	104°	134°	184°	194°	224°	254°	284°	314°	344°

集中期为各月降水垂直分量和与水平分量和之比正切角的度数,用下式计算:

$$D = \tan^{-1}(R_y/R_x)$$

由此得出降水的集中度和集中期在 50 年代至 60 年代分别为 60.4% 和 190°, 在 80 年代分别为 50.2% 和 213°。结果表明沙坡头地区 80 年代降水的集中度降低,即降水的年内分配较 50 年代趋向均匀。降水集中期的变化不大,即最大降水出现的时段在时间上稍错后。

根据沙地水分平衡各分量的变化关系,降水量的减少和降水年内分配均匀的变化将使沙地土壤蒸发所占比例增大,植物可利用的降水补给量减少,这一点对现存固沙区中油蒿和柠条的生长与繁衍不利,对降水在沙地中的再分配和不同植物种对降水补给的利用有较大影响。

**2.3.2 地表结皮的影响** 人工植被建立后,由于大气尘埃在地表累积,植物凋落物腐解,加之微生物活动与其它环境条件的综合作用,固沙区沙地表面形成了生长有苔藓等植物的生物结皮。与沙土相比较,生物结皮的持水能力大大增加,根据冯金朝等试验结果<sup>[7]</sup>,人工植被固沙区生物结皮多年平均厚度为 2.4 cm,其持水量可达 5.0 mm,相当于 7.4 cm 厚干沙层的持水量。由此可见,生物结皮的形成增加了地表对降水的截留,因而也就增大了土壤无效蒸发在沙地水分平衡中所占的比例,使人工植被可利用的水量减少。

### 3 结 论

1. 沙坡头地区人工植物固沙初期,年平均降水量 186.6 mm 能够满足油蒿和柠条正常生长的耗水需要,这是保证该地区固沙造林成功的基本环境条件。2. 固沙造林初期,营林密度不宜过大。营林密度为 75 株/100 m<sup>2</sup> 时,植物的蒸散耗水量大于降水量,植物生长要消耗大量土壤原有储存水分。土壤水分亏缺会反过来制约植物生长,对人工植被的发展起反馈调节作用。3. 在 100~200 mm 降水范围内,随着降水量的减少,沙地水分物理蒸发在水量平衡中所占的比例增大。降水量为 100 mm 时,水分几乎全部用于土壤无效蒸发,因此这是沙坡头地区人工固沙植被所需降水的最低下限。4. 降水量趋向减少,降水年内分配趋向均匀的变化特点与生物结皮的形成导致了降水在沙地中的分配浅层化,因而对根系浅层分布的植物生长与水分利用有利,这是人工植被中柠条衰退、油蒿得以生存的主要原因之一。但是,这些环境条件的变化结果使得土壤无效蒸发所占比例增大,植物可

利用水量减少。这一点,从长远来看,对油蒿的生长与繁衍将是不利的,应当引起足够重视。

### 参 考 文 献

- 1 陈文瑞. 沙坡头地段铁路两侧 29 年人工植被区的水量平衡. 见: 中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头科学研究所编著. 流沙治理研究(二). 银川: 宁夏人民出版社, 1991. 66~75
- 2 陈荷生, 康跃虎, 冯金朝. 腾格里沙漠沙坡头地区植物生长与水分平衡的初步研究. 中国沙漠, 1991. 11(2): 1~9
- 3 Bavel C H M. Lysimeter measurement of evapotranspiration rates in the eastern U. S. *Soil Sci Soc Proc*, 1961, 25: 138~141
- 4 Federer C A. A soil-plant-atmosphere model for transpiration and availability of soil water. *Water Resource Res.* 1979, 15: 555~562
- 5 William A D. A weighing lysimeter for evapotranspiration and root measurement. *Agron J.* 1985, 77: 821~825
- 6 李金贵. 沙坡头降水特点分析. 中国沙漠, 1991. 11(1): 44~49
- 7 冯金朝, 陈荷生. 沙生植物对降水资源的利用及其生理生态特性的研究. 见: 刘家琼主编. 中国科学院沙坡头沙漠试验研究站年报(1991~1992). 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993. 264~269