

黄土高原主要能源林植物水分 生理指标及抗旱力的研究

傅 左 周泽生 王晗生 李 立

(中国科学院
水利部 西北水土保持研究所·陕西杨陵·712100)

摘 要

本文对9种黄土高原能源林植物的水分生理指标及其抗旱能力进行了测定研究,并用主分量分析、聚类分析等方法,对测试树种进行了分类及抗旱性排序,结果表明,耐旱能源植物具有水势低、束缚水自由水含量比值大,蒸腾强度低以及叶片持水力强等特征,其中沙棘、沙柳、山杏、柠条和沙打旺具有较强的抗旱能力,是适应性较强的能源林植物。

关键词 水分生理指标 抗旱能力 主分量分析 聚类分析

在黄土高原地区,水分是影响能源林生长和产量的主要限制因子。为探讨黄土高原地区主要能源林树种在供水不足条件下如何自身调节,适应劣境,并比较它们抗旱性的强弱,我们于1987年8月和1988年8月在宁夏南部山区彭阳县硷沟门试验区对沙棘、柠条等9个树(草)种进行了水分生理的测定研究,现将试验结果分述如下。

1 试验区自然条件

该区为黄土丘陵,气候干旱,年干燥度1.21~1.99,年降水量350~450mm,多集中在7—9三个月,约占全年降水量60%左右。年平均气温5.6~7.2℃,≥0℃的积温3000℃~3200℃,≥10℃的积温2376℃~2581℃;无霜期150~160天。土壤为细黄土,肥力差,有机质含量低(0.7%)。植被为灌丛草原,覆盖度0.4~0.5。海拔高度1500~1700m。

2 试验树(草)种和方法

2.1 试验树、草种

刺 槐 *Robinia pseudoacacia* Linn.

紫穗槐 *Amorpha fruticosa* Linn.

山 杏 *Armeniaca sibirica* (Linn.) Linn.

山 桃 *Amygdalus davidiana* (Carr.) C. de Vos.

沙 棘 *Hippophae rhamnoides* Linn.

杜 梨 *Rhus berulaefolia* Linn.

沙 柳 *Salix mongolica* Siuxov.

沙打旺 *Astragalus adsurgens* Poll.

小叶锦鸡儿 *Cargana Korshinskii* Kom.

2.2 试验方法

试样取树木外侧向阳处成叶,每一重复分上中下 3 个部分取样,重复 3 次。水势测定用带叶枝条。蒸腾强度及水势测定变化,取其平均值。叶片饱和亏及自由水测定上午 10 h 取样。自由水和束缚水量测定用阿贝折射仪法^[1];水分饱和和亏用室内干燥和烘干法^[1];水势用压力室法;^[2]蒸腾强度用快速称重法^[3]。

3 结果与分析

3.1 组织含水量

植物组织含水量的多少在一定程度上反映了树木适应干旱环境的能力。表 1 反映了

表 1 9 种乔灌木的组织含水量 (%)

树 种	刺槐	紫穗槐	山杏	山桃	沙棘	柠条	沙柳	杜梨	沙打旺
1987年 8 月	61.20	56.00	70.00	59.90	66.90	58.96	65.00	60.70	72.70
1988年 8 月	63.50	56.80	71.00	61.40	67.10	60.27	66.10	62.30	74.50
平 均	62.40	56.40	70.50	60.70	67.0	59.60	65.55	61.50	73.60

组织含水量的多少因树种而异。草本沙打旺含水量较木本植物高(平均值 73.60%),木本植物中山杏组织含水量最高(70.50%),柠条最低(59.60%)。

3.2 自由水、束缚水量和束/自比

植物组织自由水和束缚水的含量及其比值,与植物的抗旱性有密切关系。旱生植物有较强的抗旱力,其生理原因之一就是基于旱生植物的束缚水的比率较高^[8]。表 2 列出了九种乔灌木自由水、束缚水含量及其束/自比的测定计算结果,从中可以看出:各植物种在同一生态环境下叶片中自由水、束缚水含量明显不同,山杏、沙棘、沙柳、柠条、山桃和沙打旺的束/自比较大(>1),其抗旱性相对较强;而杜梨、刺槐、紫穗槐的束自比较小(<1),抗旱性较差。

表 2 9 种乔灌木自由水、束缚水含量及其束/自比

树 种	刺槐	紫穗槐	山杏	山桃	沙棘	柠条	沙柳	杜梨	沙打旺
自由水量(%)	34.5	34.1	26.4	27.4	25.4	26.7	26.7	32.3	28.2
束缚水量(%)	26.7	21.9	43.6	32.5	41.5	33.7	38.3	28.4	44.0
束/自	0.77	0.64	1.65	1.19	1.62	1.26	1.43	0.88	1.56

3.3 叶片水分饱和和和持水力

植物的抗脱水能力和保持水分的能力可以用叶片的临界饱和和和叶片的持水力表示。临界饱和和愈大,植物抗脱水能力愈强;叶片的自然失水速度越慢、达到恒重的时间越长,遗留水越多,则抗旱性越强。试验结果(见表 3)表明:沙棘、沙柳、柠条、山桃、山杏、沙打旺的临界饱和和较大,叶片达恒重时间较长,遗留水率较高,刺槐、杜梨次之,紫穗槐三项指标都为最低,抗旱性最弱。

3.4 蒸腾强度

植物蒸腾强度的大小,是衡量植物水分平衡的一个重要生理指标。同一生态环境中的

表 3 9 种乔灌木种的临界饱和亏和持水力

树 种	刺槐	紫穗槐	山杏	山桃	沙棘	柠条	沙柳	杜梨	沙打旺
临 界 (%)	65.1	24.1	55.7	48.3	78.0	67.8	68.4	37.2	59.4
恒 重 (小时)	73	55	94	118	85	73	104	60	64
遗留水 (%)	11.3	10.8	12.7	14.3	13.4	14.6	15.7	11.5	12.4

表 4 9 种植物的蒸腾强度 (单位 $\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$)

树 种	刺槐	紫穗槐	山杏	山桃	沙棘	柠条	沙柳	杜梨	沙打旺
日最小	38.34	28.54	80.71	15.45	14.64	16.81	46.13	44.98	57.27
日最大	163.19	399.68	274.73	447.31	177.21	183.40	364.64	255.19	376.49
日平均	104.62	200.24	172.61	165.29	97.17	100.11	153.09	141.93	251.56

不同植物,其蒸腾强度是不同的(见表4)。草本植物蒸腾强度大于木本植物;紫穗槐、山杏、山桃、沙柳日平均蒸腾强度较大,沙棘蒸腾强度较小。试验结果表明,植物的蒸腾强度随气温和空气中相对湿度(RH)的变化而变化,9种植物的蒸腾强度日进程曲线可分为四种类型:1.马鞍型曲线:如沙打旺、杜梨(图1),早晨随着气温的升高,蒸腾强度增大,在10h左右形成第一个高峰,当中午12~16h气温最高时(37℃~39℃),蒸腾下降,形成低谷。下午16h后气温下降,蒸腾强度再次增大,形成第二个高峰。2.单峰型曲线:紫穗槐在中午12~16h每日气温最高时形成蒸腾高峰(图1),此时已明显看到叶片失水萎蔫。3.平稳型曲线:蒸腾强度随气温的升高而逐渐增大,中午气温最高时,蒸腾强度逐渐下降(图2)沙棘、刺槐、山杏属于这一类。4.双曲线型:蒸腾强度在上午形成一高峰,中午12~16h降低形成低谷,16h后蒸腾强度又有所增加,形成双曲线(图2),沙柳、山桃、柠条属这一类型。同期进行的各植物叶片含水量测定表明:具有马鞍型、双曲线型蒸腾曲线的植物,中午叶片含水量下降较少(7%~10%),稳定型曲线植物,如沙棘中午叶片含水率下降(15%~20%),而单峰曲线植物如紫穗槐中午叶片含水率下降25~37%。表明植物此

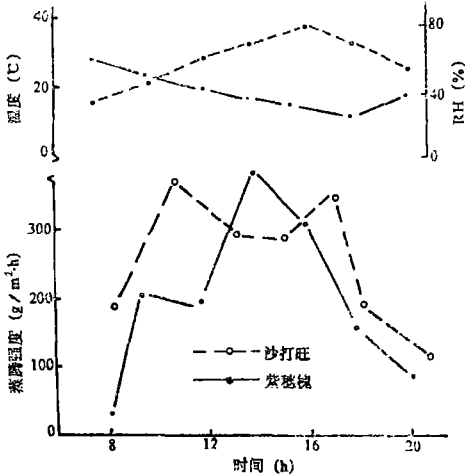


图 1 沙打旺、紫穗槐蒸腾强度日变化。马鞍型,单峰型蒸腾曲线

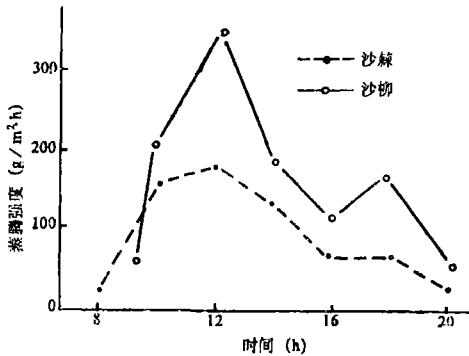


图 2 沙柳、沙棘蒸腾强度日变化。平稳型、双曲线型蒸腾曲线

时失水较多,势必影响植物的生长和光合作用。

3.5 水势

植物的水势因植物种的不同而各异。测定结果表明,在同一时间内和同一生态环境中测定的不同植物的水势,其水势值有很大差异(见表5)。水势值都随温度、蒸腾强度的

表5 9种植物8月份一天中的水势 (单位 -10^5Pa)

树 种	刺槐	紫穗槐	山杏	山桃	沙棘	柠条	沙柳	杜梨	沙打旺
日最大值	15.8	3.0	22.9	20.4	23.1	21.5	13.2	20.1	16.6
日最小值	2.6	1.3	10.0	8.2	5.6	6.4	2.6	5.6	8.2
平均值	17.1	2.2	16.5	14.3	14.4	14.0	7.9	12.9	12.4

变化而变化(参看图3、4)一日中随着温度的升高、蒸腾强度的增强,植物叶片水势逐渐降低,以增加吸水力,至中午达最低,下午16h以后,随着温度的下降,蒸腾的减小,水势值变大。蒸腾曲线呈马鞍型和稳定型的植物(如沙打旺、沙棘)水势日进程曲线基本相同;蒸腾曲线为双曲线的植物(如沙柳、山杏等)水势曲线也为双曲线型(图4),蒸腾曲线为单峰的植物紫穗槐水势曲线平稳,即在植物严重失水的情况下,也不能用水势降低来增加吸水力。一般来说,在无水分亏缺或同一生态环境下,组织水势较低的植物,耐旱性较强。水势的高低与植物吸水力的强弱成反比^[4]。据此,吸水力的强弱可排列为:沙棘(23.1)>山杏(22.9)>柠条(21.5)>杜梨(20.1)沙打旺(16.6)>刺槐(15.8)>沙柳(13.2)>紫穗槐(3.0)。

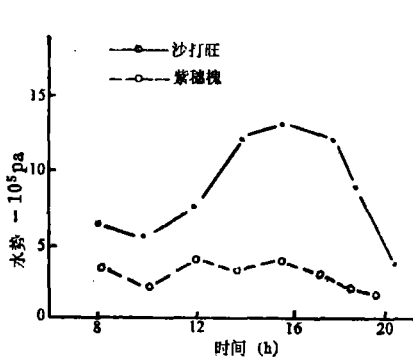


图3 沙打旺、紫穗槐水势日变化

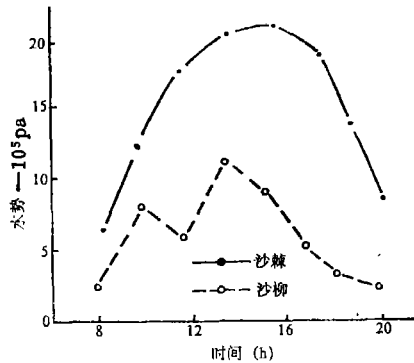


图4 沙柳、沙棘水势

4 数量分析

表示植物抗旱性的水分生理指标较多,而且单位不统一,各指标之间又存在着一定的联系,单凭几个独立的指标很难判定植物在干旱环境中的抗旱能力。为了综合比较上述树种在逆境中抗旱力的强弱,我们试用主分量分析的方法,并用聚类分析和极差排序法进行比较,以期获得较为准确的判定结果。9种植物生理指标测定结果见表6。

4.1 主分量分析

将表5数据输入IBM计算机,经数据转换得出内积矩阵,从而求出8个特征根及相应每一轴所占信息量(见表7)。然后计算出各个特征值相应的特征向量并将其作为变换矩阵U,最后用 $Y=UX$ 计算出9种植物种的主分量坐标。由表7可知第一、二主分量

信息占有量为：64.497 3%，超过总信息量的一半，所以我们只取第一、二主分量（见表8），

表6 9种植物的水分生理指标

项 目	水 势 (-10^6Pa)	组 织 含水量 (%)	束 缚 水 (%)	束/自	临 界 饱和亏 (%)	蒸 腾 强 度 ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	恒 重 时 间 (h)	遗 留 水 (%)
1 柠 条	21.5	59.6	33.7	1.26	67.8	100.11	73	14.6
2 山 桃	20.4	60.7	32.5	1.19	48.3	165.29	118	14.3
3 沙打旺	16.6	73.6	44.0	1.56	59.4	251.56	64	12.4
4 沙 柳	13.2	65.6	38.3	1.43	68.4	153.09	104	15.7
5 刺 槐	15.8	62.4	26.7	0.77	65.1	104.62	73	11.3
6 杜 梨	20.1	61.5	28.4	0.88	37.2	141.93	60	11.5
7 紫穗槐	3.0	56.4	21.9	0.64	24.1	200.24	55	10.8
8 沙 棘	23.1	67.0	41.5	1.62	78.0	91.17	85	13.4
9 山 杏	22.9	70.5	43.6	1.65	55.7	172.61	94	12.7

表7 特征根及相应每一轴所占信息量

项 目	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	合计
特征根	3.8407	1.6305	1.3676	0.7581	0.2938	0.2017	0.0079	0.0031	8.1034
占有信息 (%)	42.3508	22.1465	14.9801	9.3465	3.6060	2.5290	0.0974	0.0230	100.000
累积信息 (%)	45.2598	68.3963	84.3686	93.6951	97.3577	99.8756	99.9730	100.0000	

表8 9种植物对前3个主分量的负荷量表

第一主 分 量	0.3453	-0.4413	-0.0408	-0.1809	-0.4864	-0.5070	-0.6824	1.2864	0.7581
第二主 分 量	1.0516	-0.1211	0.3559	-0.0753	-0.1009	-0.2816	-0.1286	-0.1856	-0.5687
第三主 分 量	-0.2060	0.5485	-0.0543	0.0918	0.4826	-0.3526	-0.3087	0.3671	-0.4634

据此绘出二维坐标图(为方便作图,将 y_1 、 y_2 值各放大10倍取整,同时用距离聚类法分组(见图5)。从图5可以看出沙棘、山杏为第一组,柠条、沙打旺为第2组,其余树种为3组。而前两组能源林植物在实际生长过程中都表现出较强的抗旱性。

我们根据主分量轴所含信息量和各树种在此轴上的坐标计算出各树种的 $\sum_{i=1}^4 y_i \lambda_i$ 值(见表9)其中 λ_i 为 ii 分量轴所含信息的百分比, y_i 为相应的坐标值。从表9可以看出,综合各项生理指标所得出的9种能源林植物的抗旱能力强弱顺序依次为:沙棘、柠条、山杏、沙打旺、沙柳、山桃、刺槐、杜梨、紫穗槐。

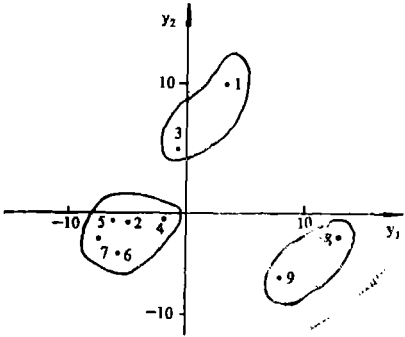


图5 9种能源林植物的PCA二维排序图

4.2 聚类分析

4.2.1 数据标准化

对原始数据(表6)用极差标准化转化得表10。

表9 9种能源林植物抗旱性排序

编 号	8	1	9	3	4	2	5	6	7
植物名称	沙 棘	柠 条	山 杏	沙打旺	沙 柳	山 桃	刺 槐	杜 梨	紫穗槐
$\sum_{i=1}^4 y_i \lambda_i$	0.6228	0.3351	0.1075	0.1100	-0.1256	-0.1272	-0.1782	-0.3378	-0.3650

表10 9种植物水分生理指标极差标准化后数值矩阵

项	目	水 势 (-10 ⁵ Pa)	组 织 含水量 (%)	束 缚 水 (%)	束/自	临 界 饱和亏 (%)	蒸腾强 度(g· m ⁻² ·h ⁻¹)	恒重时间 (h)	遗留水 (%)
1	柠 条	0.6221	1.000	1.000	0.9353	0.223	0.6068	0.0338	0.4520
2	山 桃	1.0000	0.5108	0.1173	0.0971	0.9101	0.1071	0.2023	0.2205
3	沙打旺	0.7248	0.4267	0.6050	0.8014	0.3262	0.0212	0.0206	0.3211
4	沙 柳	0.2507	0.7120	0.3023	0.2043	1.000	0.3078	0.0621	0.2310
5	刺 槐	0.9887	0.6614	0.1486	0.9274	0.4032	0.1062	0.0804	0.0000
6	杜 梨	0.4766	0.2114	0.0142	0.0703	0.0000	0.1353	0.0437	0.0235
7	紫穗槐	0.5305	0.4714	0.0000	0.0000	0.0934	0.0000	0.0000	0.0641
8	沙 棘	0.5653	0.0378	0.5040	0.0000	0.8911	0.9085	0.0000	1.0000
9	山 杏	0.0000	0.0000	0.4124	0.7400	0.6152	1.0000	0.6590	0.0547

4.2.2 计算聚类系数

采用欧氏距离计算种间聚类系数,用组平均法进行逐步聚合,最后将全部树种合为一组,得到9种能源林植物聚合树状图(见图6)。

植物种间距离用平均欧氏距离:

$$d_{hk} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p (X_{hj} - X_{kj})^2}$$

其中 X_{hj} 为数据矩阵中第 h 个样品的第 j 个变量; X_{kj} 为数据矩阵中第 k 个样品第 j 个变量。据此计算出距离矩阵 D :

$$D = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 0 & 1.72 & 0.98 & 1.53 & 1.68 & 1.66 & 1.65 & 1.75 & 1.68 \\ & 0 & 1.10 & 0.84 & 0.42 & 1.12 & 0.99 & 1.81 & 1.71 \\ & & 0 & 1.14 & 1.32 & 1.11 & 1.10 & 1.63 & 1.52 \\ & & & 0 & 0.82 & 1.22 & 1.11 & 1.76 & 1.39 \\ & & & & 0 & 1.20 & 1.09 & 1.90 & 1.65 \\ & & & & & 0 & 0.33 & 2.06 & 1.56 \\ & & & & & & 0 & 2.16 & 1.73 \\ & & & & & & & 0 & 1.20 \\ & & & & & & & & 0 \end{pmatrix}$$

类与类之间的距离用最短距离法,即递推公式,它等于两类最近样品的距离。

$$D_{gh} = \min(D_{gh}, D_{gk})$$

其中 $DL_j = dl_j$

根据计算结果,若按距离系数为 1.20 划分,则各树种分类为:沙棘、山杏为第 1 组,柠条、沙打旺为第 2 组,其余树种为第 3 组,其组的划分与主分量分析相同。

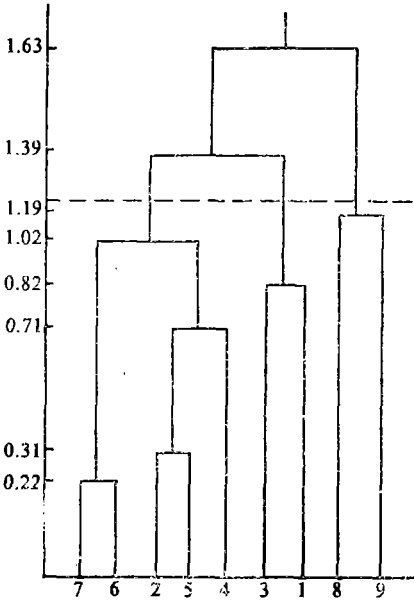


图 6 9 种植物聚合树状图

4.3 极点排序法

由相似系数矩阵中选择相似系数最大的紫穗槐和沙棘作为抗旱性强弱的排序 X 轴上的极点,令紫穗槐在 X 轴上的极点位

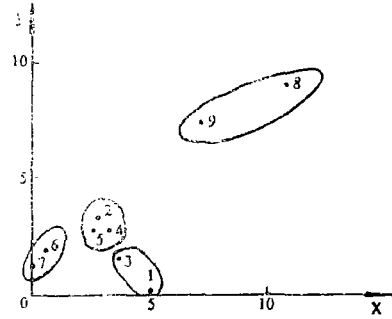


图 7 9 种植物的二维极点排序

置为 0,沙棘在排列轴上的极点位置为 2.16。用下列公式计算其它植物在选定的抗旱排序 x 轴上的相对位置,选与 x 轴偏离值最大的树种柠条为 y 轴端点,与柠条相异系数最大

$$X = \frac{L^2 + D_a^2 - D_b^2}{2L} \quad (L = 2.16)$$

的沙棘为另一端点,用下式计算并绘出 x、y 二维坐标图。(各数值 $\times 5$),并用距离聚类法分

$$y = \frac{L^2 + D_a^2 - D_b^2}{2L} \quad (L = 1.75)$$

组,见图 7。从图 7 中看出沙棘和山杏为第 1 组,柠条、沙打旺为第 2 组,沙柳、山桃、刺槐为第 3 组,杜梨、紫穗槐为第 4 组。与聚类分析结果相同,比主分量分析较细,多分出 1 组。

5 小 结

植物的水分生理指标是判别植物是否耐旱的重要依据,耐旱植物具有水势低、束/自比值较大,蒸腾强度较小,水势值较低、叶片持水力强的特点。因为植物种类不同,其水分生理指标也有差异,所以单凭一二个指标来比较、判定植物的抗旱性是困难的,但是,利用植物的多项水分生理指标,对同一生态环境中的不同植物的抗旱性进行综合比较,可以得出较为满意的结果。实验结果表明:沙棘、山杏、沙打旺、柠条、沙柳、山桃、刺槐的束/自比较高,持水力较强,而杜梨、紫穗槐这两项指标差、抗旱力较弱。蒸腾强度和水势的测定表明:蒸腾强度日进程曲线呈马鞍型、双曲线型的植物如沙打旺、沙柳、山桃、柠条、它们的气孔调节能力较强,在气温过高的中午,通过气孔调节,降低蒸腾速率,减少水分丢失,并维持较低的水势(沙打旺: $-16.6 \times 10^5 \text{ Pa}$, 柠条: $-21.5 \times 10^5 \text{ Pa}$, 沙柳: $-13.2 \times 10^5 \text{ Pa}$),增强吸水力。具有平稳型曲线的植物,如山杏、沙棘、刺槐,根系吸水力较强,在气温

高、日照强的中午仍维持一定的蒸腾速率,并利用大幅度降低水势来增加吸水力,(沙棘: $-23.1 \times 10^5 \text{Pa}$ 、山杏: $-22.9 \times 10^5 \text{Pa}$ 、刺槐: $-15.8 \times 10^5 \text{Pa}$)以保证植物体内代谢活动和光合作用的正常进行。但由于土壤中可利用水有限,这类植物的蒸腾强度在下午呈降低趋势。具有以上三类蒸腾曲线的植物有较强的抗旱性。而蒸腾曲线呈单峰的植物如紫穗槐,气孔调节力较差,以至中午蒸腾速率过大,造成叶片组织含水量下降过多(25%~37%),形成萎蔫,这类植物抗旱性较差。

利用主分量、聚类、排序分析的方法,对9种能源林植物的水分生理指标进行综合分析比较,可将9种植物归为4组。第1组的沙棘、山杏和第2组的柠条、沙打旺各项抗旱性水分生理指标都较高,(见表6),具有较强的抗旱力。第3组的沙柳、山桃、刺槐的抗旱能力次之,第4组的杜梨、紫穗槐抗旱能力较差。

综合各项生理指标所得出的9种能源林植物的抗旱能力强弱顺序依次为:沙棘、山杏、柠条、沙打旺、沙柳、山桃、刺槐、杜梨、紫穗槐。此结果与实际观察较一致。

参 考 文 献

- [1] 西北大学生物系. 植物生理实验指导. 1980年
- [2] 上海植物生理研究所. 植物生理实验手册. 科学出版社, 1986年
- [3] B·斯拉维克著, 张崇浩等译. 植物水分关系研究法. 科学出版社, 1985
- [4] Larcher W "Physiological Plant Ecology", Translated by M A Biederman Thorson, Printed in New York, 1975
- [5] 阳含熙等. 植物生态学的数量分类方法. 科学出版社, 1981

THE STUDY ON THE WATER PHYSIOLOGICAL INDEX AND DROUGHT RESISTANCE OF MAIN ENERGY- FOREST PLANTS IN THE LOESS PLATEAU

Fu Zuo Zhou Zesheng Wang Hansheng Li Li

(Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, the
Chinese Academy of Sciences and the Ministry of Water
Conservancy Yangling·Shaanxi·712100)

Abstract

This article has studied the water physiological index and drought resistance of a energy-forest plants in the loess plateau. Using the principal component analysis and the cluster analysis, we placed the plants in order of their drought resistance. The result shows: dry resistance plants have the characteristics, lower water potential, higher ratio of bound water and free water, lower transpiration rate and better leaf water holding power. Plants with better drought resistance, such as *Hippophae rhamnoides* Linn., *Armeniaca sibirica* Linn., *Cargana Korshinskii* Kom., *Slaix mongolica* siuxov., etc., are the energy-forest plants with strong adaptability in arid area.

Key words water physiological index drought resistance
principal component analysis cluster analysis