西北林学院学报 2019,34(5):79-84
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2019.05.12

# 11种美洲黑杨无性系抗旱性评价

田　星[1],张锦梅[2*],樊军锋[1]

(1.西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100;2.西宁市林业科学研究所,青海 西宁 810000)

**摘　要**:为探究杨树抗旱性的机理,采用石蜡切片法对11个美洲黑杨无性系进行叶片解剖结构观测。通过隶属函数法和灰色关联度法对其叶片厚度、中脉厚度、上表皮厚度、下表皮厚度、上层栅栏组织厚度、下层栅栏组织厚度、CTR等7项指标进行抗旱性综合评价及其相关性分析。结果表明,11个美洲黑杨无性系抗旱性大小依次为:南抗杨>美洲黑杨2号>美洲黑杨3号>08H4-5>08H2-16>03S4-1>69杨>08H11-11>美洲黑杨1号>陕林3号>08H1-6。此外,上下层栅栏组织厚度、叶片厚度等指标与美洲黑杨无性系的抗旱性关联度最高。该研究可为美洲黑杨无性系的遗传育种和高效培育提供科学依据。

**关键词**:美洲黑杨;无性系;解剖结构;抗旱性;评价方法

**中图分类号**:S792.119　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2019)05-0079-06

## Drought Resistance Evaluation of 11 *Populus deltoides* Clones

**TIAN Xing[1],ZHANG Jin-mei[2*],FAN Jun-feng[1]**

(1. *College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *Shaanxi, China*;
2. *Institute of Forestry Chengbei District, Xining City, Qinghai Province, Xining* 810000, *Qinghai, China*)

**Abstract**: In order to explore the mechanism of drought resistance of poplar, the leaf anatomical structures of 11 poplar clones were observed by paraffin section method. Through the membership function method and grey relational degree method in fuzzy mathematics, the drought resistance of 7 indicators were comprehensively evaluated and correlated, including the thicknesses of leaf, midrib, upper epidermis thickness, lower epidermis, upper palisade tissue, lower palisade tissue, and tightness of leaf tissue structure (CTR). The results showed that the order of drought resistance of 11 *Populus deltoides* clones was 'NanKang' poplar > *P. deltoides* No. 2 > *P. deltoides* No. 3 > 08H4-5 > 08H2-16 > 03S4-1 > 69 poplar > 08H11-11 > *P. deltoides* No. 1 > Shanlin No. 3 > 08H1-6. In addition, the thicknesses of upper and lower palisade tissue, leaf thickness and other indicators had the highest correlation with drought resistance of *P. deltoides* clones, which would provide scientific basis for genetic breeding and efficient breeding of *P. deltoides* clones.

**Key words**: *Populus deltoides*; clone; anatomic structure; drought resistance; evaluation method

杨树(*Populus*)是杨属的植物,全属有100多种,杨属共分为青杨派(*Tacamahaca*)、白杨派(*Leuce*)、黑杨派(*Aigeiros*)、胡杨派(*Turanga*)、大叶杨派(*Leucoides*)。美洲黑杨(*Populus deltoides*)是一种在温带地区较为常见的树种,主要分布在美洲地区、中亚热带湿润地区及海拔较高的青藏高原地区,我国境内主要分布在80°－134° E、20°－53° N之间的区域[1]。从美洲黑杨的分布区特点来看,该树种生态幅较为宽泛,生态适应性很强。由于其造林成活率高、抗逆性强、生长迅速、经济价值高等优势,是发展人工速生丰产林的一种主要栽培树种。自20世纪70年代引入中国以来,目前已成功遴选

**收稿日期**:2018-09-14　**修回日期**:2019-02-25
**基金项目**:"十三五"国家重点研发计划林业资源培育及高效技术创新专项(SQ2016YFNC030041)。
**作者简介**:田　星,女,硕士在读,研究方向:林木遗传育种和森林高效培育技术。E-mail:m18821619463@163.com
* **通信作者**:张锦梅,女,高级工程师,研究方向:杨树新品种选育及遗传改良。E-mail:fanjf28@163.com

出 20 余种适合我国自然环境条件下生长的主栽无性系[2]，其良好的品种优势作为育种亲本在杨树育种研究中起到重要的作用[3-4]。

随着全球气候变化的加剧，干旱已经成为全球性的环境问题之一。在我国北方地区，杨树在生长过程中时常会遇到干旱胁迫，极端干旱的逆境对植物伤害极大，而现在的速生丰产系大部分不耐干旱。为此，探讨杨树的抗旱机理，找到适宜的评价指标和方法，从而筛选出不同抗旱品种，对杨树的引种和栽培具有重要的现实意义。植物的抗旱性与其形态特性、解剖结构特性、生理生化特性等密切相关[5]。在干旱环境中生长的植物，一般存在一种或者多种抗旱机制。相关研究表明，干旱地区的植物叶片结构与其抗旱性密切关系[6]。叶片是植物进行代谢的主要器官，可以通过其解剖结构指标来评价植物的抗旱性[7-8]。因此，筛选出代表性的叶片旱生结构评价指标是评价树种抗旱性的关键。本研究以 11 个美洲黑杨无性系品种为试验材料，通过对叶片结构进行解剖分析，确定出科学合理的叶片旱生结构指标评价方法，为美洲黑杨无性系的良种选育与推广提供基础数据和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

11 个美洲黑杨无性系试验材料均采集于西北农林科技大学渭河试验站（表 1），该试验站位于陕西省周至县富仁镇渭河南岸，总面积近 55 $hm^2$，距西北农林科技大学本部约 20 km。在该试验林中选择 8 个无性系为供试材料，以长期在陕西地区广泛栽培、前期试验已初步证明具有抗旱品质的 69 杨、陕林 3 号、南抗杨为对照品种。

### 1.2 试验方法

2016 年 7 月中下旬，在林龄为 10 a 的美洲黑杨无性系林分中，在每株树木的向阳面于树高 3 m 左右选取短枝的真叶 10 片，每个无性系选取 3 株。采集到叶片后，沿叶片主脉中间处切取 0.5 cm 的小片，采用 FAA（标准固定液，甲醛、冰醋酸、70%酒精的体积比分别为 5%、5%、90%）进行固定。各品种材料经 FAA 固定 2～3 d 后，室温下依次采用 70%、80%、85%、90%、100% 酒精梯度脱水，接着渗蜡，包埋处理后，切片（控制厚度在 6～8 μm 范围内），利用番红固绿染色，选择树胶封片处理；应用 Nikon-Eclipse CI 显微镜观察，并应用 Nikon DS-U3 成像系统拍照，记录叶片的横切面特征。每张切片随机选取 5 处，应用 Image-Pro Plus 6.0 软件进行测量并求出平均值（以靠近上层栅栏组织为上，靠近下层栅栏组织为下）。测量的指标包括中脉厚度、叶片厚度、上表皮厚度、下表皮厚度、上层栅栏组织厚度、下层栅栏组织厚度、下表皮厚度、叶片组织结构紧密度（CTR）等，记录各指标的测量值。

**表 1 试验材料及其遗传背景**

Table 1 Experiment materials and their genetic background

| 无性系 | 来源 |
|---|---|
| 08H11-11 | 渭河试验站杨树种质资源库美洲黑杨天然杂种优良无性系 |
| 08H2-16 | 同上 |
| 08H4-5 | 同上 |
| 08H1-6 | 同上 |
| 美洲黑杨 1 号 | 美国田纳西洲田纳西大学周边采条选择的美洲黑杨优良无性系 |
| 美洲黑杨 2 号 | 同上 |
| 美洲黑杨 3 号 | 同上 |
| 南抗杨 | 中国林业科学研究院林业科学研究所培育的美洲黑杨杂种无性系 |
| 69 杨 | 意大利引进的美洲黑杨无性系 |
| 03S4-1 | 由美洲黑杨‘69’杨中筛选的天然杂种无性系 |
| 陕林 3 号 | 陕西省林业科学研究所培育的美洲黑杨杂种无性系 |

### 1.3 评价方法

1.3.1 *隶属函数法* 通过隶属函数法可以实现对树种多指标的综合评价[9]，如果某个指标和系统的分析情况属于负相关，就要通过反隶属函数实施转换。综合隶属函数值（$\sum T_{ij}$）的计算方法参考相关研究结果[10-12]。

隶属函数：

$$U(x_i)=\frac{X_i-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{1}$$

反隶属函数：

$$U(x_i)=1-\frac{X_i-X_{\min}}{X_{\min}-X_{\max}} \tag{2}$$

式中，$U(x_i)$为隶属函数的大小；$X_i$ 为无性系特定项指标的测定情况；$X_{\min}$、$X_{\max}$为全部参试无性系里某个指标的最高点以及最低点。

1.3.2 *灰色关联度法* 将各个指标看作为灰色系统的一个因素，然后评价各指标和抗旱性之间的关系，对所得测量结果无量纲处理后，确定出关联系数和关联度。

$$\varepsilon(X_i)=\frac{\Delta(\min)+\rho\Delta(\max)}{\Delta i(k)+\rho\Delta(\max)} \tag{3}$$

$$\gamma=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\varepsilon(X_i) \tag{4}$$

式中，$\Delta_{(\min)}$表示二级最小差的绝对值；$\rho$ 为分辨系数，一般在 0～1 之间，通常取 0.5；$\Delta i(k)$为绝对差。

### 1.4 数据分析

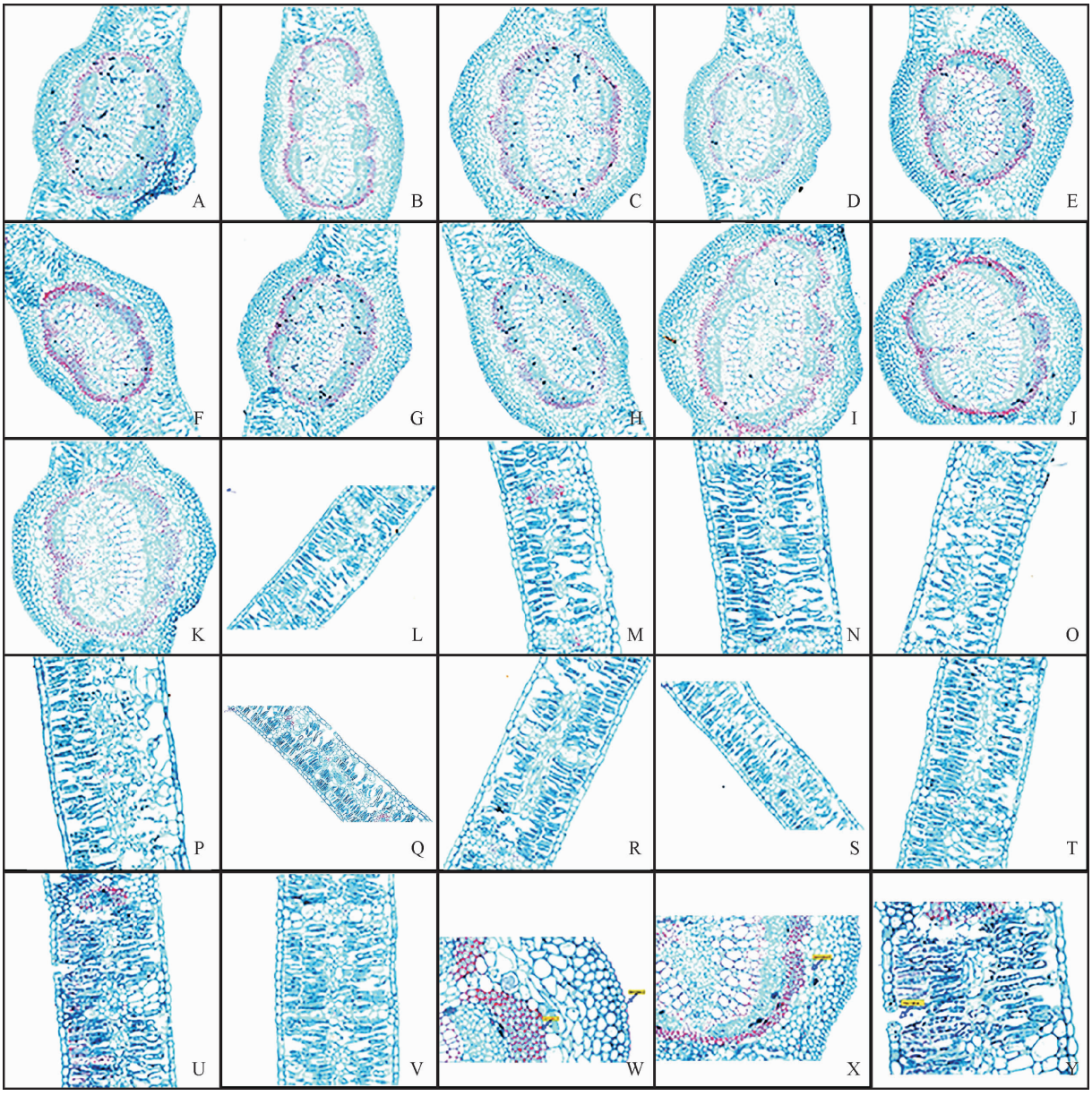
应用隶属函数法评价各无性系的抗旱能力，通

过 SPSS 19.0 统计软件对采集到的相关数据进行分析处理。应用灰色关联分析各指标和抗旱性之间的关系,以相关指标作为子因素,以旱生结构指标的平均隶属函数值作为母因素进行分析,通过 DPS 8.01 统计软件对数据进行分析处理。

## 2　结果与分析

### 2.1　叶片解剖结构特点

供试的 11 个无性系具有叶的模式结构[13],即由表皮、叶肉、叶脉构成,均为背腹型叶。图 1A-K 中叶片结构由上而下依次分化为上表皮细胞、上下层栅栏组织、下表皮细胞等,为等面叶。图 1L-V 中栅栏组织在上下两面都有分布,上层和下层的栅栏组织细胞的形态存在一定差异性,前者为长柱形,后者为短柱形;下层栅栏组织的排列疏松。其中,南抗杨无性系下层栅栏组织分化不明显。主脉均为周韧维管束,叶脉的厚角组织、厚壁组织均很发达,承担着增加机械强度和水分输送的功能。此外,在 08H4-5 无性系的主脉和侧脉维管束周围发现了明显的晶细胞分布(图 1X),形状与周围细胞略有不同。一般认为,细胞内所含的晶体都是由于植物代谢所产生的有机酸中和而生成的,且与植物的抗旱性具有相关性,因此可通过晶细胞的分布和数量来判断植物的抗旱能力[14-16]。从分化特征上来看,叶片结构具有角质膜(图 1W,以 08H2-16 为例),中脉处尤为显著。上表皮细胞排列整齐紧密,为长矩形或矩圆形,鲜有气孔分布;下表皮细胞小,排列整齐,有气孔分布(图 1Y,以 08H2-16 为例)。




注:图中 A-K 为各无性系的中脉;L-V 为各无性系上下层栅栏组织;W 为角质膜和厚壁组织;X 为晶细胞;Y 为气孔。

**图 1　11 种美洲黑杨无性系叶片解剖结构**

Fig. 1　Leaf anatomical structure of 11 *Populus deltoides* clones

### 2.2 叶片旱生解剖结构测定及分析

由表 2 可知，叶片厚度变化为 180～249.89 μm；中脉厚度、上表皮厚度、上层栅栏组织厚度、下层栅栏组织厚度、下表皮厚度、CTR 的变化依次为 576.47～894.73、11.92～22.02、55.15～86.55、66.10～129.68、9.97～14.54 μm 和 0.307～0.359 μm。叶片厚度大小排列顺序为美洲杨 2 号、美洲杨 3 号、南抗杨、08H4-5、03S4-1、08H11-11、69 杨、美洲黑杨 1 号、08H2-16、陕林 3 号和 08H1-6，各无性系之间差异较为显著。上表皮厚度排列顺序为 08H2-16、南抗杨、03S4-1、美洲黑杨 3 号、美洲黑杨 2 号、08H1-6、美洲黑杨 1 号、陕林 3 号、08H4-5、08H11-11、69 杨，其中 08H2-16 相较其他无性系具有更好的保持、储水功能；上层栅栏组织厚度位于首位的是南抗杨，其他依次为美洲黑杨 3 号、美洲黑杨 2 号、08H4-5、08H11-11、03S4-1、69 杨、美洲黑杨 1 号、08H2-16、陕林 3 号和 08H1-6，上层栅栏组织之间差异极其显著。而承担水分运输和增加机械强度的中脉，其厚度大小排在前 4 位的是美洲黑杨 2 号、美洲黑杨 3 号、08H4-5、南抗杨，这 4 种无性系其中脉厚度大小明显差异与 08H2-16、08H11-11、03S4-1 和陕林 3 号。

**表 2 各无性系叶片旱生结构指标测定结果**

Table 2 Measurement results of leaf xerophytic structure indices of poplar clones

| 无性系 | 中脉厚度/μm | 叶片厚度/μm | 上表皮厚度/μm | 上层栅栏组织厚度/μm | 下层栅栏组织厚度/μm | 下表皮厚度/μm | CTR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 08H11-11 | 655.63±6.46ab | 211.23±7.61bc | 12.10±0.49a | 74.73±3.35def | 74.32±3.55ab | 11.05±0.41ab | 0.354±0.007cd |
| 08H2-16 | 661.27±7.78ab | 195.91±16.28ab | 22.02±14.26b | 64.98±7.64bc | 71.60±0.35ab | 14.54±1.20d | 0.331±0.020abcd |
| 08H4-5 | 755.10±9.59abc | 235.83±4.20cd | 13.16±0.97a | 76.52±5.36def | 85.55±6.55abc | 12.99±0.88bcd | 0.324±0.019abc |
| 08H1-6 | 662.17±5.75ab | 180.00±8.71a | 13.60±0.71a | 55.15±2.15a | 66.10±6.67a | 12.36±1.51bc | 0.307±0.008a |
| 南抗杨 | 720.53±4.63abc | 242.99±31.13d | 15.83±0.60ab | 86.55±5.61g | 129.68±6.40d | 12.65±2.39bcd | 0.359±0.029d |
| 03S4-1 | 590.60±5.28a | 211.53±8.74bc | 14.85±1.06ab | 73.29±6.54cdef | 84.60±3.01abc | 12.10±0.95bc | 0.347±0.028bcd |
| 69 杨 | 686.17±5.51ab | 201.88±11.40ab | 11.92±0.02a | 70.55±4.90bcde | 76.48±7.78ab | 12.21±0.58bc | 0.349±0.006bcd |
| 陕林 3 号 | 576.47±2.69a | 195.21±4.49ab | 13.23±0.07a | 62.77±2.77ab | 70.22±2.72ab | 13.71±0.03cd | 0.321±0.007abc |
| 美洲黑杨 1 号 | 710.27±8.72abc | 199.81±8.97ab | 13.31±0.94a | 68.43±6.10bcd | 76.89±4.78ab | 9.97±0.40a | 0.343±0.002bcd |
| 美洲黑杨 2 号 | 894.73±8.96c | 249.89±8.75d | 14.21±0.94ab | 79.56±4.40efg | 100.91±4.87c | 12.13±1.01bc | 0.318±0.016ab |
| 美洲黑杨 3 号 | 806.63±9.76bc | 244.73±3.39d | 14.73±0.87ab | 81.19±5.17fg | 87.84±5.16bc | 10.91±0.96ab | 0.332±0.021abcd |

注：不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)，下同。

### 2.3 美洲黑杨无性系抗旱性综合评价

选择出一个无性系样板之后，对其全部抗旱指标的隶属度进行累加，然后求出均值，此数值的大小可以反映出抗旱能力的强弱。由表 3 可知，根据隶属函数法，11 种美洲黑杨无性系抗旱性大小为：南抗杨＞美洲黑杨 2 号＞美洲黑杨 3 号＞08H4-5＞08H2-16＞03S4-1＞69 杨＞08H11-11＞美洲黑杨 1 号＞陕林 3 号＞08H1-6。

**表 3 11 种美洲黑杨无性系抗旱性综合评价**

Table 3 The comprehensive evaluation drought resistance of 11 *P. deltoides* clones

| 无性系 | 中脉厚度/μm | 叶片厚度/μm | 上表皮厚度/μm | 上层栅栏组织厚度/μm | 下层栅栏组织厚度/μm | 下表皮厚度/μm | CTR | 隶属函数和 | 平均函数和 | 排名 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 08H11-11 | 0.248 7 | 0.446 8 | 0.017 8 | 0.623 6 | 0.129 3 | 0.236 3 | 0.903 8 | 2.606 3 | 0.372 3 | 8 |
| 08H2-16 | 0.266 4 | 0.227 6 | 1 | 0.313 1 | 0.086 5 | 1 | 0.461 5 | 3.355 1 | 0.479 3 | 5 |
| 08H4-5 | 0.561 3 | 0.798 8 | 0.122 8 | 0.680 6 | 0.305 9 | 0.660 8 | 0.326 9 | 3.457 1 | 0.493 9 | 4 |
| 08H1-6 | 0.269 3 | 0 | 0.166 3 | 0 | 0 | 0.523 | 0 | 0.958 6 | 0.136 9 | 11 |
| 南抗杨 | 0.452 6 | 0.901 3 | 0.387 1 | 1 | 1 | 0.586 4 | 1 | 5.327 4 | 0.761 1 | 1 |
| 03S4-1 | 0.044 4 | 0.451 1 | 0.290 1 | 0.577 7 | 0.291 0 | 0.466 1 | 0.769 2 | 2.889 6 | 0.412 8 | 6 |
| 69 杨 | 0.344 7 | 0.313 1 | 0 | 0.490 4 | 0.163 3 | 0.490 2 | 0.807 7 | 2.609 4 | 0.372 8 | 7 |
| 陕林 3 号 | 0 | 0.217 6 | 0.129 7 | 0.242 7 | 0.064 8 | 0.818 4 | 0.269 2 | 1.742 4 | 0.248 9 | 10 |
| 美洲黑杨 1 号 | 0.420 4 | 0.283 4 | 0.137 6 | 0.422 9 | 0.169 7 | 0 | 0.692 3 | 2.126 3 | 0.303 8 | 9 |
| 美洲黑杨 2 号 | 1 | 1 | 0.226 7 | 0.777 4 | 0.547 5 | 0.472 6 | 0.211 5 | 4.235 7 | 0.605 1 | 2 |
| 美洲黑杨 3 号 | 0.723 2 | 0.926 2 | 0.278 2 | 0.829 3 | 0.341 9 | 0.205 7 | 0.480 8 | 3.785 3 | 0.540 8 | 3 |

对 7 项旱生结构指标数据进行无量纲化处理后（表 4），对数据进行灰色关联度分析。由分析结果可知，抗旱性指标与旱生胁迫能力之间关联度位于第 1 位的是下层栅栏组织厚度，关联度最小的为CTR。

**表 4　7 项旱生结构指标数据无量纲化处理**

Table 4　Non-dimensional quantities of 7 xeromorphic indices

| 无性系 | 中脉厚度/μm | 叶片厚度/μm | 上表皮厚度/μm | 上层栅栏组织厚度/μm | 下层栅栏组织厚度/μm | 下表皮厚度/μm | CTR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 08H11-11 | 0.044 5 | 0.260 1 | 0.117 8 | 0.585 5 | 0.011 9 | 0.431 3 | 2.112 6 |
| 08H2-16 | 0.797 3 | 1.169 7 | 2.252 5 | 1.157 9 | 1.243 3 | 1.546 2 | 0.541 7 |
| 08H4-5 | 0.713 5 | 0.454 6 | 0.705 0 | 0.018 2 | 0.033 7 | 0.099 7 | 1.458 9 |
| 08H1-6 | 0.859 8 | 0.225 3 | 1.248 0 | 0.164 5 | 0.650 2 | 1.648 5 | 0.001 8 |
| 南抗杨 | 1.282 7 | 0.750 1 | 0.833 8 | 0.651 6 | 0.644 4 | 1.764 7 | 1.096 8 |
| 03S4-1 | 0.970 5 | 0.010 8 | 0.106 3 | 0.444 7 | 0.085 3 | 0.096 7 | 1.180 7 |
| 69 杨 | 0.538 1 | 0.233 5 | 0.756 6 | 0.041 1 | 0.140 4 | 0.045 1 | 0.426 0 |
| 陕林 3 号 | 0.096 9 | 0.198 1 | 0.772 9 | 0.112 6 | 0.361 6 | 2.557 8 | 0.511 4 |
| 美洲黑杨 1 号 | 1.180 4 | 0.130 9 | 0.122 7 | 0.300 4 | 0.100 8 | 0.837 6 | 1.100 6 |
| 美洲黑杨 2 号 | 0.777 6 | 0.372 2 | 1.305 6 | 0.533 8 | 0.177 2 | 1.225 2 | 0.656 2 |
| 美洲黑杨 3 号 | 0.198 5 | 0.430 7 | 0.571 0 | 0.056 3 | 0.516 8 | 1.541 9 | 1.575 9 |

各抗旱指标的关联度大小分别为:下层栅栏组织厚度(0.812 3 μm)、上层栅栏组织厚度(0.804 4 μm)、叶片厚度(0.791 3 μm)、中脉厚度(0.684 6 μm)、上表皮厚度(0.664 3 μm)、下表皮厚度(0.616 6 μm)、CTR(0.610 4)。

## 3　结论与讨论

干旱胁迫是自然界中最主要的非生物胁迫之一,它和林木生长之间存在着密切关系。作为植物形态结构中重要组成部分的植物叶片,在干旱胁迫中表现出了极强的敏感性。植物叶片具有较厚的角质层,表皮有附属物,栅栏组织发达,维管组织和导管发达,富有黏液细胞和含晶细胞等可以作为耐旱的形态评价指标[17]。植物可以通过改变叶片结构来适应干旱胁迫,高度发达的栅栏组织既可以避免植物叶肉细胞受强光损伤,又可以使叶片充分利用衍射光进行光合作用。干旱条件下,植物叶片的栅栏组织厚度、紧密度等指标越大就表明其抗旱性越强[18]。胡营等[19]研究发现扁蓿豆干旱胁迫时,叶片厚度增加,这样组织的致密性也就提高,而海绵组织厚度减小,叶脉凸起度增加;杨淑红等[20]研究发现,土壤干旱胁迫和复水后,杨树叶片内物质含量均发生了适应性变化;石丽丽等[21]研究发现,沙冬青属植物叶片栅栏组织厚度与叶片厚度显著正相关,即沙冬青属植物叶片的加厚主要通过栅栏组织的加厚实现。董蕾等[22]分析出与楸树无性系抗旱性相关的指标为叶片厚度、栅栏组织厚度、气孔密度以及叶片游离脯氨酸变化量。通过对不同源的小叶杨进行叶片解剖结构观察并分析其抗旱特征,发现大部分供试小叶杨叶片的栅栏厚度＜海绵厚度。本试验结果与以上研究基本一致。基于叶片解剖法的植物抗旱性评价可以直观地反映出叶片内的组织结构特征,但由于缺乏与叶片内物质含量等理化指标的结合,因此对植物的抗旱性机理解释不足。

树木的抗旱性能和所处环境之间存在一定的交互性,是植物在进化过程中形成的一种综合遗传特性。其影响因素很复杂,主要和植物的叶片解剖结构特征、环境条件等存在一定相关性,因而单纯通过某一种特性不能对植物的抗旱性进行全面判断,而需要综合考虑。从这个角度上来说,本次试验虽能为美洲黑杨抗旱性品种选择和评价体系提供一定的借鉴,但仍具有一定的局限性。例如,缺乏高渗浓度模拟土壤干旱条件从而对氧化酶、代谢产物等生理生化指标测定;缺乏大田试验;缺乏生长的长期观察等。因此,从分子水平上加强抗旱性的相关研究,选育出抗旱性强并能更好适应干旱环境的品种,可为杨树栽培育种提供科学依据和实践指导。例如,近年来迅速发展的分子遗传学为杨树抗旱性研究提供了有力工具,QTL 的发展对植物抗旱性研究也有积极的作用[23]。有的学者从微观方面对植物抗旱性的生理机制做了研究,且通过基因工程技术来确定出此类植物的抗旱基因。例如,J. Y. Zhang 等[24]将 *WXP1* 基因转入紫花苜蓿可以激活其蜡质产生,使转基因植株表皮蜡增加,显著减少了水分的损失,增加了植物的抗旱性。目前,美洲黑杨的抗旱基因研究相对滞后,可能与其性状由多基因控制有关,通过基因技术手段可以为林木抗旱性的研究带来新的视野。

本研究表明,南抗杨的抗旱性显著高于其他无性系;美洲黑杨 2 号和美洲黑杨 3 号其抗旱性也较强;08H4-5、08H2-16、03S4-1 这 3 个无性系的抗旱性介于优良无性系 69 杨与南抗杨之间,08H11-11 其抗旱性介于 69 杨和陕林 3 号之间,这可能是因为不同品种(系)在干旱环境中采取的抗旱机制不

同[25]。通过不断的选育,以上品种都可以作为杨树栽培过程中的良好选育材料和推广品种。此外,在灰色关联的分析中,如果检测数列和参考数列的关联度大,则可判断二者之间的关系更密切,情况相反的则说明关系不紧密。据此可判断出栅栏组织厚度、叶片厚度等可作为美洲黑杨无性系的主要抗旱性评价指标,而下表皮厚度和 CTR 可以作为次要评价指标,但以上评价指标的合理性仍需要结合生化指标进一步验证。

## 参考文献:


[1] 史刚荣,汤盈,张铮.淮北相山恢复演替群落优势树种叶片的生态解剖[J].植物生态学报,2006,30(2):314-322.

[2] 张绮纹,苏晓华,李金花,等.美洲黑杨基因资源收存及其遗传评价的研究[J].林业科学,1999,35(2):34-40.

[3] 李文文,黄秦军,丁昌俊,等.南方型和北方型美洲黑杨幼苗光合作用的日季节变化[J].林业科学研究,2010,23(2):227-233.

[4] 韩一凡,吴明荪,王宗汉.中国杨树资源及其利用的研究[J].林业科技通讯,1990(1):1-3.

[5] 李欢,樊军锋,高建社,等.黑杨叶片旱生结构的比较[J].西北林学院学报,2013,28(3):113-118.
LI H,FAN J F,GAO J S,*et al*. Comparison on drought resistance on anatomical structures of black poplar leaf[J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(3):113-118. (in Chinese)

[6] ZHAO C X,HUANG Z S. A preliminary study of xeromorphism of some important xerophytes growing in Tungeli desert [J]. Journal of Integrative Plant Biology,1981,23(4):278-283.

[7] 崔宏安,刘莉丽,陈铁山,等.葛藤不同类型叶耐旱结构的比较解剖学研究[J].西北植物学报,2003,23(12):2211-2215.

[8] 燕玲,李红,刘艳.13 种锦鸡儿属植物叶的解剖生态学研究[J].干旱区资源与环境,2002,16(1):100-106.
YAN L,LI H,LIU Y. The anatomical ecology studies on the leaf of 13 species in *Caragana* genus[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment ,2002,16(1):100-106. (in Chinese)

[9] 郑书星,樊军锋,苏晓华.欧洲黑杨无性系抗旱性综合鉴定研究[J].西北林学院学报,2005,20(1):57-64.
ZHENG S X,FAN J F,SU X H. Study on comprehensive judgement of drought resistance of *Populus nigra*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2005,20(1):57-64. (in Chinese)

[10] 朱栗琼,李吉跃,招礼军.六种阔叶树叶片解剖结构特征及其耐旱性比较[J].广西植物,2007,27(3):431-434.

[11] 王情世,樊军锋,周永学,等.2 个杨树新无性系叶片的旱生结构研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(5):45-49.
WANG Q S,FAN J F,ZHOU Y X,*et al*. Research on drought resistance on anatomical structure of leaves of two new poplar clones[J]. Journal of Northwest A&F University:Nat. Sci. Ed. ,2012,40(5):45-49. (in Chinese)

[12] 潘存娥,田丽萍,李贞贞,等.5 种杨树无性系叶片解剖结构的抗旱性研究[J].中国农学通报,2011,27(2):21-25.

[13] 杨秀平,周玮,李煜,等.杜仲无性系叶片解剖结构及抗旱性评价[J].西北林学院学报,2016,31(1):119-125.
YANG X P,ZHOU W,LI Y,*et al*. Drought resistance and leaf anatomical structure of *Eucommiaulmoides* clones[J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(1):119-125. (in Chinese)

[14] 李正理.旱生植物的形态和结构[J].生物学通报,1981,16(4):9-12.

[15] 马骥,王勋陵,王燕春.骆驼蓬属营养器官的旱生结构[J].西北植物学报,1997,17(4):478-482.

[16] 苏培玺,安黎哲,马瑞君,等.荒漠植物梭梭和沙拐枣的花环结构及 C4 光合特征[J].植物生态学报,2005,29(1):1-7.

[17] 田英,倪细炉,于海宁,等.6 种抗旱灌木叶片形态解剖学特征[J].中国农学通报,2010,26(22):113-117.

[18] 杨森,张晓飞,高新生,等.5 个品系橡胶树叶片解剖结构及其抗旱性分析[J].热带生物学报,2017,8(3):301-306.
YANG S,ZHANG X F,GAO X S,*et al*. Leaf anatomical structure and drought resistance analysis of 5 rubber clones (*Hevea brasiliensis*)[J]. Journal of Tropical Biology,2017,8(3):301-306. (in Chinese)

[19] 胡营,楚海家,李建强.4 个花苜蓿居群叶片解剖结构特征及其可塑性对不同水分处理的响应[J].植物科学学报,2011,29(2):218-225.

[20] 杨淑红,宋德才,刘艳萍,等.土壤干旱胁迫和复水后 3 个杨树品种叶片部分生理指标变化及抗旱性评价[J].植物资源与环境学报,2014,23(3):65-73.

[21] 石丽丽,蒋志荣,方向文.新疆沙冬青(*Ammopiptanthus nanus*)和蒙古沙冬青(*Ammopiptanthus monglicus*)叶片解剖特征及抗旱性[J].中国沙漠,2018,38(1):157-162.
SHI L L,JIANG Z R,FANG X W. Leaf eco-anatomical characteristics of *Ammopiptanthus nanus* and *Ammopiptanthus monglicus*[J]. Journal of Desert Research,2018,38(1):157-162. (in Chinese)

[22] 董蕾 ,陈博 ,李吉跃,等.5 个楸树无性系抗旱性的综合评价[J].中南林业科技大学学报,2014,34(4):30-35.

[23] 张义,王得祥,宋彬,等.基于叶片解剖结构的西宁市 11 种城市森林植物抗旱性评价[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(8):86-92.

[24] ZHANG J Y,BROECKLING C D,BLANCAFLOR E B,*et al*. Overexpression of wxpl,a putative *Medicago* truncatula AP2 domain-containing transcription factor gene,increases cuticular wax accumulation and enhances drought tolerance in transgenic alfalfa (*Medicgo sativa*) [J]. Plant Journal,2005,42:689-707.

[25] 郭素娟,武燕奇.板栗叶片解剖结构特征及其与抗旱性的关系[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2018,46(9):51-59.
GUO S J,WU Y Q. Leaf anatomical structure characteristics and drought resistance of Chinese chestnut[J]. Journal of Northwest A&F University:Nat. Sci. Ed. ,2018,46(9):51-59. (in Chinese)