

## 兰州九州台 4 种植物的抗旱性指标测定及其相关性评价

李付静<sup>1</sup>, 蒋志荣<sup>1,2\*</sup>, 刘坤<sup>1</sup>, 唐亚梅<sup>3</sup>

1. 甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070
2. 甘肃农村发展研究院, 甘肃 兰州 730070
3. 甘肃农业大学食品科学与工程学院, 甘肃 兰州 730070

**摘要:** 本文通过对兰州九州台 4 种主要绿化树种沙冬青 *Ammopiptanthus mongolicus* (Maxim) Cheng f.、侧柏 *Platycladus orientalis* (L.) Franco、山毛桃 *Prunus davidiana* (Carr) Franch 和沙枣 *Elaeagnus angustifolia* L. 的抗旱性相关的 10 项指标测定, 采用隶属函数法和灰色关联度法对其抗旱性系统评价。结果表明, 夏秋两季 4 种植物的综合抗旱性强弱顺序均为: 沙冬青>侧柏>沙枣>山毛桃。各项抗旱指标与抗旱性的关联顺序夏季表现 Pro>RWC>MDA>Chl(a/b)>SOD>CAT>Chl(a+b)>SS>POD>可溶性蛋白; 秋季表现为: MDA>RWC>SS>Pro>CAT>POD>Chl(a/b)>Chl(a+b)>SOD>可溶性蛋白。以期为甘肃省干旱地区的绿化造林及耐旱树种的筛选提供科学的理论依据。

**关键词:** 沙冬青; 侧柏; 山毛桃; 沙枣; 抗旱性

**中图分类号:** Q945.17

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2324(2015)04-0503-06

## The Determination and Evaluation on the Drought-resistance Indexes and Correlation of Four Kinds of Plants in Jiuzhoutai Lanzhou City

LI Fu-jing<sup>1</sup>, JIANG Zhi-rong<sup>1,2\*</sup>, LIU Kun<sup>1</sup>, TANG Ya-mei<sup>3</sup>

1. College Forestry of Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, China
2. Gansu Rural Development Re-search Institute, Lanzhou 730070, China
3. College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** This paper determined on the drought-resistance ten indexes of *Ammopiptanthus mongolicus* (Maxim) Cheng f, *Platycladus orientalis* (L.) Franco, *Prunus davidiana* (Carr) Franch, *Elaeagnus angustifolia* L, and evaluated on their correlation with the method of subordinate function and the gray correlative analysis. The results were showed that the drought-resistant capability of four plants increased in order of *P. davidiana*, *E. angustifolia*, *P. orientalis* and *A. Mongolicus*. The drought-resistance indexes and their relationship showed an order of Pro> RWC> MDA> Chl(a/b)> SOD> CAT> Chl(a+b)> SS> soluble POD> Protein in Summer and an order of MDA > RWC > Soluble sugar (SS) > Proline (Pro) > catalase (CAT) > Peroxidase (POD) > Chl(a/b) > Chl(a+b) > SOD > soluble protein. Which might provide a theoretical basis for the selection of afforestation and drought-tolerant tree species in arid area of Gansu Province.

**Keywords:** *Ammopiptanthus mongolicus* (Maxim) Cheng f; *Platycladus orientalis* (L.) Franco; *Prunus davidiana* (Carr) Franch; *Elaeagnus angustifolia* L.; drought resistance

干旱、半干旱区土地占全世界土地1/3以上, 干旱不仅是影响干旱区林分分布和生长的主要限制因子<sup>[1]</sup>, 抗旱性更是作为干旱、半干旱区人工林树种配置的首要条件。在可利用水资源不足的兰州市, 天然植被稀疏, 种类贫乏, 结构单一, 长势不良, 为完善我市干旱地区的造林绿化、适地适树、耐旱树种筛选和生态重建工作, 进行多树种抗旱指标评价体系的研究已成为一种客观要求。同时应对林木抗旱指标的季节变化进行评价, 探讨其抗旱能力的季节性差异, 为该地区的植被恢复与重建进程提供理论依据。

植物的抗旱性指标分为形态结构和生理生化方面两方面。其中形态结构指标有叶片的解剖结构形态, 种子, 分布和生物量等。生理生化指标主要是叶片的水分、光合荧光特性、酶活性及渗透调节等。由于植物的抗旱性是由多指标相互作用而构成一个较复杂的综合性状, 其中每一个指标与抗旱性本质之间存在着一定的联系或相关, 任何单项指标的研究都有一定的局限性, 不能准确评价植物抗旱性, 也不能达到抗旱指标筛选的目的。利用多个指标去综合评定植物的抗旱性, 使单个指标

**收稿日期:** 2014-01-10

**修回日期:** 2014-01-18

**基金项目:** 甘肃省教育厅项目(省教技[200831])

**作者简介:** 李付静(1988-),女,硕士研究生,研究方向为干旱植物生理生态研究. E-mail:773770690@qq.com

**\*通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:Jzhirong@gsau.edu.cn.

对评定抗旱性的片面性受到其他指标的弥补与缓和,从而使评定出的结果与实际结果较为接近,这就是所谓的抗旱性多指标评价体系。研究表明,隶属函数和灰色关联度能够定量评价植物对干旱所形成的适应性状和生存对策,这也是植物抗旱性研究的热点之一<sup>[2]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于兰州市北山的九州台山顶(35°58'54"~36°11'20"N, 103°12'47"~103°58'09"E),属典型的黄土高原阶地地区,气候干燥少雨,为暖温带半干旱大陆性季风气候。土壤为黄土母质上发育的灰钙土,有机质含量 0.5~1.5%左右, pH8~9。地带性植被以红砂 *Reaumuria soongorica*、柠条 *Caragana korshinskii*、怪柳 *Tamarix ramosissima* 等灌木及少量毛白杨 *Populus tomentosa* Carr、侧柏 *Platycladus orientalis* (L.) Franco、山毛桃 *Prunus davidiana*(Carr) Franch、沙枣 *Elaeagnus angustifolia* L. 等乔木为主。

采样点的经度、纬度和海拔用 GPS 定位记录。年降水量、年蒸发量和年均气温为 2010、2011、2012 年 3 年的平均气象数据(由相关气象单位提供)。表 1 列出本试验地点主要的生态环境因子。

表 1 采样点环境参数

Table 1 Environmental parameters in sample site

环境参数 Environmental parameters	兰州九州台采样点 Simple site in Jiuzhoutai Lanzhou
光合有效辐射 Photosynthetically active radiation (μmol/m <sup>2</sup> ·s)	1251.29
光合有效辐射最大值 Maximum photosynthetically active radiation (μmol/m <sup>2</sup> ·s)	1800.85
气温 Air temperature (°C)	29.20
气温最大值 Maximum air temperature (°C)	36.73
空气相对湿度 Relative humidity (%)	13.20
空气相对湿度最大值 Maximum relative humidity (%)	19.16
平均土壤含水量 Average soil water content (%)	0.851
年降雨量 Annual mean precipitation (mm)	349.90
年均蒸发量 Annual mean evaporation (mm)	1664.00
年均温 Annual mean temperature (°C)	8.9
海拔 Altitude (m)	2067

### 1.2 测定指标与方法

在兰州市北山的九州台选择同一海拔,坡度相似,树龄相近的沙冬青、侧柏、山桃和沙枣 4 树种。每个树种选择 3 株标准木作为测定对象。每株均选标准木树冠上中下部、向阳、外围发育正常的当年生枝条上的叶片并做标记。土壤含水量的测定采用土样烘干称重法。用土钻分层钻取深度为 0~100 cm 土样,每层为 20 cm。每个样本 3 次重复。土样取回后置于 105 °C 烘箱中烘干至恒重计算含水量。相对含水量(Relative water content, RWC)用烘干称重法,超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性采用抑制 NBT 光还原比色法,过氧化物酶(Peroxide enzyme, POD)活性采用愈创木酚法,过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性采用紫外吸收法,游离脯氨酸(Proline, Pro)含量采用磺基水杨酸提取法,可溶性糖(Soluble sugar, SS)含量采用蒽酮比色法,可溶性蛋白(Soluble protein, SP)含量测定采用考马斯亮蓝 G-250 法,丙二醛含量(Malondehyde, MDA)采用硫代巴比妥酸比色法,叶绿素(Chlorophyll, Chl)相关指标采用体积比法。各项试验重复 6 次,取 P<0.05 为差异显著, P<0.01 为差异极显著。

### 1.3 分析方法

1.3.1 抗旱性综合评价-隶属函数法 根据模糊数学理论,通过隶属函数确定各指标间的模糊关系,对多个指标进行综合评定的一种较简单的评定方法,已广泛使用<sup>[3-7]</sup>。本文运用隶属函数法对各抗旱指标进行综合评价,公式如下:

$$U(x_{ij}) = \frac{X_{ij} - X_{i \min}}{X_{i \max} - X_{i \min}} \quad (1)$$

式中: U(X<sub>ij</sub>)为 i 物种 j 指标的隶属函数值, X<sub>ij</sub>为 i 物种 j 指标的测定值, X<sub>imax</sub>和 X<sub>imin</sub>分别为指

标的最大值和最小值。

如果某一指标与抗旱性成负相关，则用反隶属函数计算公式为：

$$U(X_{ij})=1-\frac{X_{ij}-X_{i\min}}{X_{i\max}-X_{i\min}} \quad (2)$$

运用以上公式求出 4 种树种 10 项抗旱指标的平均隶属函数值，平均隶属函数值越大，则该树种的抗旱性就越强。

1.3.2 灰色关联度分析 灰色关联度是针对一个发展变化的系统动态量化的分析方法，可同时给出质的定性解释和量的确切描述。适用于不同环境条件、处理方法和不同树种的抗旱指标体系，以期选育出适宜当地的抗旱树种。灰色关联度分析可以用来描述各因素之间关系的强弱、大小和次序。如果两因素的变化趋势相一致，则它们的关联度较高；反之，较低<sup>[3-7]</sup>。

设参考数列 X<sub>0</sub>，比较数列 X<sub>i</sub>(i=1, 2...n)，则参考数列 X<sub>0</sub>={X<sub>0</sub>(1), X<sub>0</sub>(2) ...X<sub>0</sub>(n)}，比较数列 X<sub>i</sub>={X<sub>1</sub>(1), X<sub>1</sub>(2) ...X<sub>1</sub>(n)}。

用  $X'_i(k)=\frac{X_{i(k)}-X_i}{S_i}$  对原始数据进行无量纲化处理，X<sub>i</sub>(k)是原始数据，X 和 S<sub>i</sub> 代表同一指标的平均值和标准差。

$$\varepsilon_i(k)=\frac{\min \min \Delta i(k)+\rho \cdot \max \max \Delta i(k)}{\Delta i(k)+\rho \cdot \max \max \Delta i(k)} \quad (3)$$

$$r_i=\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k) \quad (i, k=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中：ε<sub>i</sub>(k)代表关联系数；r<sub>i</sub> 代表灰色关联度；Δi(k)=|X<sub>0</sub>(k)-X<sub>i</sub>(k)|，表示 X<sub>0</sub> 数列与 X<sub>i</sub> 数列在第 k 点的绝对值；minminΔi(k)为二级最小差，maxmaxΔi(k)为二级最大差，ρ为分辨系数，取值范围为 0 到 1，文中试验取值 0.5<sup>[17-19]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 夏秋两季 4 树种的各种抗旱指标值

叶绿素含量的功能主要在光合作用中将光能转化为化学能，它的变化可以确定植物的抗旱性强弱<sup>[15]</sup>，申学圣等人认为，抗旱性强的树种，即使在水分胁迫条件下，也能保持较高的叶绿素含量<sup>[20]</sup>。从表 2 可以看出，随着夏秋季节的更替，植物体内叶绿素(a+b)含量有上升趋势，但叶绿素 (a/b) 含量降低，可能是由于夏季降雨量少，产生水分胁迫，植物体内活性氧积累，进而引发叶绿素的破坏<sup>[21]</sup>。又由于叶绿素 (a/b) 夏季较秋季高，说明通过降低叶绿素含量 b 的含量，增加叶绿素含量 a 的含量的生理反应，是这些树种对干旱环境的一种适应策略。从树种间来看，叶绿素(a+b)总含量的排序为：沙冬青 (4.4 mg/g) >沙枣 (4.15 mg/g) >山毛桃 (3.57 mg/g) >侧柏 (1.63 mg/g)。

表 2 4 种植物在夏秋季节的抗旱指标值

抗旱指标 Drought-resistance index	夏季 Summer				秋季 Autumn			
	山毛桃	沙枣	沙冬青	侧柏	山毛桃	沙枣	沙冬青	侧柏
相对含水量 Relative water content (RWC)(%)	70.56	69.65	79.23	75.58	78.59	82.55	87.31	80.56
过氧化氢酶 POD(U/g)	230.38	211.22	234.33	156.51	210.28	142.36	174.47	119.12
超氧化物歧化酶 SOD(FW) (U/g)	422.37	326.73	380.25	290.41	328.77	304.57	311.42	194.52
过氧化物酶 CAT(U/g)	288.66	261.17	305.23	231.24	221.26	208.17	256.58	170.24
脯氨酸 Pro(ug/g)	20.24	199.90	303.63	19.43	14.08	80.15	195.15	2.43
可溶性糖 Soluble sugar (SS)(%)	0.21	0.16	0.13	0.09	0.15	0.10	0.09	0.07
可溶性蛋白质 Soluble protein (FW) (mg/g)	0.98	1.41	0.58	0.62	0.78	1.25	0.29	0.34
丙二醛 MDA(μmol/g)	30.33	33.28	38.25	30.24	20.53	28.68	30.15	23.28
叶绿素 a+b Chl(a+b)(mg/g)	1.02	1.87	1.92	0.64	2.55	2.28	2.48	0.99
叶绿素 a/b Chl(a/b)	2.32	3.19	3.08	2.73	1.68	1.52	2.76	1.95

SOD、POD 和 CAT 作为植物体抗氧化的酶促防御系统中的三种保护酶，在干旱胁迫下，保护酶活性升高，能及时有效地清除活性氧自由基，降低了自由基的积累<sup>[5,22]</sup>。从表 1 可以看出，各树种在夏季的超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (POD)、过氧化物酶 (CAT) 均高于秋季，这可能

与夏季降雨稀少有关。MDA 作为判断膜脂过氧化作用的一种主要指标<sup>[23]</sup>。在本实验中表现为夏季高于秋季。说明夏秋季节的变化对 MDA 的积累也有影响。

有研究表明,在干旱胁迫下,脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白等物质会主动积累,降低植物体内渗透势,使其从外界水势低的环境中继续吸收水分,防止脱水,以增强植物的抗旱性<sup>[24]</sup>。也有研究表明抗旱能力强的树种具有较高的可溶性糖<sup>[21]</sup>和游离脯氨酸含量<sup>[25]</sup>。本研究结果为夏季脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白均高于秋季,这与北方地区夏季少雨而秋季多雨有一定的关联。

干旱胁迫强烈影响林木叶片的水分供应状况<sup>[26,27]</sup>,大量研究表明,随着干旱胁迫程度的加剧和胁迫时间的延长,林木叶片 RWC 明显下降,不同林木树种 RWC 下降幅度有较大的差异;RWC 下降幅度反映叶片保水能力,RWC 下降幅度越小,叶片保水能力越强,林木的抗旱性越强<sup>[28]</sup>。从表 1 可以看出,RWC 的下降幅度从大到小依次为沙枣(12.9%)>山毛桃(8.03%)>沙冬青(7.08%)>侧柏(4.98%),依据 RWC 来判断,4 种树种的抗旱性顺序为:侧柏>沙冬青>山毛桃>沙枣。

### 2.2 不同树种抗旱性定量评价

以相对含水量、叶绿素含量、丙二醛、脯氨酸和可溶性糖等 10 个指标为依据,计算各个指标的平均隶属函数值,并进行抗旱能力综合评价。从表 3 可以看出,秋季 4 种树种平均隶属函数值从大到小依次为:沙冬青(0.617)>侧柏(0.582)>沙枣(0.570)>山毛桃(0.518);夏季 4 种树种平均隶属函数值从大到小依次为沙冬青(0.562)>侧柏(0.544)>沙枣(0.535)>山毛桃(0.528)。经多重比较得出,夏季和秋季不同树种的平均隶属函数值差异显著( $P<0.05$ ),且 4 种树种在夏季的平均隶属函数值均小于秋季,差异显著( $P<0.005$ )。夏秋季节变化对 4 种树种的抗旱性顺序没影响,均为沙冬青>侧柏>沙枣>山毛桃。

表 3 4 树种生理指标平均隶属值及抗旱性排序

抗旱指标 Drought-resistance index	夏季 Summer				秋季 Autumn			
	山毛桃	沙枣	沙冬青	侧柏	山毛桃	沙枣	沙冬青	侧柏
过氧化氢酶 POD	0.501	0.523	0.655	0.516	0.558	0.536	0.578	0.612
超氧化物歧化酶 SOD	0.511	0.533	0.589	0.506	0.524	0.529	0.543	0.536
过氧化物酶 CAT	0.930	0.870	0.820	0.860	0.732	0.551	0.852	0.578
丙二醛 MDA	0.475	0.860	0.688	0.492	0.527	0.533	0.583	0.562
脯氨酸 Pro	0.333	0.508	0.830	0.820	0.533	0.527	0.511	0.533
可溶性糖 Soluble sugar (SS)	0.511	0.517	0.564	0.617	0.527	0.522	0.647	0.549
可溶性蛋白 Soluble protein	0.498	0.513	0.548	0.521	0.500	0.587	0.500	0.608
叶绿素 a+b Chl(a+b)	0.558	0.448	0.444	0.565	0.455	0.488	0.386	0.435
叶绿素 a/b Chl(a/b)	0.493	0.534	0.532	0.481	0.488	0.578	0.619	0.501
相对含水量 Relative water content (RWC)	0.371	0.397	0.506	0.443	0.438	0.501	0.400	0.528
平均隶属函数值 Mean subordinate function values	0.518	0.570	0.617	0.582	0.528	0.535	0.562	0.544
抗旱性顺序 Drought resistance order	4	3	1	2	4	3	1	2

### 2.3 抗旱性与抗旱指标的相关关系评价—灰色关联度分析

将 4 种树种夏秋两季各抗旱指标的平均隶属函数值与 10 个抗旱指标看作一个灰色系统,前者作为参考数列  $X_0$ ,  $X_{0秋}=(0.518, 0.570, 0.617, 0.582)$ ;  $X_{0夏}=(0.528, 0.535, 0.562, 0.544)$ , 相对含水量、叶绿素含量、丙二醛、脯氨酸和可溶性糖等 10 个抗旱指标作为比较数列  $X_i$ , 即  $X_{i秋}$  相对含水量 $=(78.59, 82.55, 87.31, 80.56)$ ,  $X_{i夏}=(70.56, 69.65, 79.23, 75.58)$ ;  $X_{i秋 MDA}=(20.53, 28.68, 30.15, 23.28)$ ,  $X_{i夏 MDA}=(30.33, 30.28, 38.25, 30.24)$ ;  $\dots\dots X_{i秋 Chl(a+b)}=(2.55, 2.28, 2.48, 0.99)$ ,  $X_{i夏}=(1.02, 1.87, 1.92, 0.64)$ 。对夏秋两季的数据分别进行标准化无量纲处理后,在 DPS 软件中,用公式(3)和(4)计算出各抗旱指标与平均隶属函数值的关联度,并按关联度大小进行排序。关联度大小可表明某一项抗旱性指标对干旱的敏感程度,关联度越大则相似程度越高,反之则越低。计算出的关联系数和灰色关联度  $R(k)$  结果如表 4 所示。

各项抗旱指标与抗旱性的关联顺序秋季为:MDA>RWC>SS>Pro>CAT>POD>Chl(a/b)>Chl(a+b)>SOD>可溶性蛋白质。夏季为 Pro>RWC>MDA>Chl(a/b)>SOD>CAT>Chl(a+b)>SS>POD>可溶性蛋白。

其中,关联度在0.7以上的指标:秋季有MDA和RWC;夏季有Pro、RWC和MDA。关联度在0.6~0.7之间的指标:秋季有SS、Pro和CAT;夏季有Chl(a/b)、SOD和CAT。关联度在0.5~0.6之间的指标:秋季有POD、Chl(a/b)、Chl(a+b)和SOD;夏季有Chl(a+b)、SS、POD和可溶性蛋白。关联度在0.6以下的指标:秋季有可溶性蛋白质;夏季没有。这说明不同季节,各抗旱指标与抗旱性的关

表4 4种植物的抗旱性与抗旱指标的灰色关联系数和关联度

Table 4 The gray correlation coefficients and degree of drought resistance indexes of four plants

抗旱指标 Drought-resistance index	夏季 Summer						秋季 Autumn					
	山毛桃	沙枣	沙冬青	侧柏	关联度	排序	山毛桃	沙枣	沙冬青	侧柏	关联度	排序
过氧化氢酶 POD	0.892	0.591	0.449	0.435	0.592	6	0.659	0.625	0.525	0.337	0.536	9
超氧化物歧化酶 SOD	0.520	0.695	0.487	0.340	0.511	9	0.788	1.000	0.425	0.405	0.654	5
过氧化物酶 CAT	0.365	0.840	0.884	0.393	0.621	5	0.602	0.802	0.692	0.374	0.618	6
丙二醛 MDA	0.572	0.582	1.000	0.955	0.778	1	0.728	0.614	0.940	0.522	0.701	3
脯氨酸 Pro	0.498	0.945	0.699	0.536	0.669	4	0.823	0.959	0.828	0.488	0.775	1
可溶性糖 Soluble sugar (SS)	0.884	0.957	0.463	0.473	0.694	3	0.722	0.736	0.402	0.398	0.565	8
可溶性蛋白 Soluble protein	0.377	0.335	0.705	0.570	0.497	10	0.469	0.445	0.566	0.531	0.503	10
叶绿素 a+b Chl(a+b)	0.491	0.730	0.536	0.340	0.524	8	0.610	0.689	0.594	0.398	0.573	7
叶绿素 a/b Chl(a/b)	0.453	0.447	0.671	0.768	0.585	7	0.676	0.614	0.488	0.845	0.656	4
相对含水量 Relative water content (RWC)	0.660	0.948	0.723	0.756	0.772	2	0.724	0.615	0.856	0.708	0.726	2

联度存在差异。在秋季,MDA和RWC两个指标对所选4种树种的抗旱能力影响最大,可作为首要的抗旱适应性鉴定指标;SS、Pro和CAT三个指标对所选4种树种的抗旱能力的影响次之,可作为重要的抗旱适应性鉴定指标;POD、Chl(a/b)、Chl(a+b)和SOD四个指标可作为次要的抗旱适应性鉴定指标;而可溶性蛋白质在秋季对树种抗旱性影响相对较弱。在夏季,Pro、RWC和MDA对所选4种树种的抗旱能力最大,可作为首要的抗旱适应性鉴定指标;Chl(a/b)、SOD和CAT对所选4种树种的抗旱能力影响次之,可作为重要的抗旱适应性鉴定指标;Chl(a+b)、SS、POD和可溶性蛋白这四个指标可作为次要的抗旱适应性鉴定指标。

### 3 讨论

叶绿素作为植物光合作用的色素,直接影响植物的生长发育。陈少裕等认为:在缺水状态下,植物通过抑制细胞内蛋白质的合成,减弱叶绿素的生物合成,并且会发生叶绿素的降解,降低叶绿素的含量<sup>[29]</sup>。本实验研究发现,随着夏秋季节的更替,4种树种叶绿素(a+b)的含量都有下降趋势,这可能是由于兰州秋季少雨,空气干燥,导致植物水分亏缺而叶绿素含量降低。根据4种树种叶绿素(a+b)含量分析表明4种树种的抗旱性顺序为:沙冬青>沙枣>山毛桃>侧柏。

马成仓等通过研究甘蒙锦鸡儿时发现,丙二醛作为脂质过氧化的产物之一,在干旱环境下含量更高<sup>[30]</sup>;王金龙等也认为植物所处生境水分胁迫的程度,直接决定了丙二醛的含量<sup>[31]</sup>。本研究发现4种树种丙二醛含量秋季高于夏季,且4种树种夏秋季节的总含量为:沙冬青>沙枣>侧柏>山毛桃。

俞靓等人认为,渗透调节物质含量在同一种群内存在“互补”现象,某一些渗透调节物质含量相对较低时其他渗透调节物质含量则较高<sup>[32]</sup>,本研究发现,脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白随着季节的更替都有不同程度的升高。冯祥元等通过研究10个彩叶树种抗旱性,表明干旱胁迫时,植物体内SOD、POD、CAT活性会增强<sup>[33]</sup>;但俞靓等人的研究,并没有发现酶活性与生境所受的水分胁迫的程度有关<sup>[32]</sup>。本研究结果与冯祥元等的结果相似,4种树种的酶活性随着夏秋季节的更替均有不同程度的增强。

由此可见,不同树种有着不同的抗旱机制,相同的抗旱树种在不同的生长季节,其抗旱能力和方式也不尽相同,而且不同生理指标在植物抗旱性水平上表现的敏感度不同。运用模糊数学中的隶属函数法和灰色关联度法对树种抗旱性进行综合评价,能够避免单一指标的评价的片面性<sup>[34,35]</sup>。

### 4 结论

不同生理指标对不同树种抗旱性的敏感程度不同,单个生理指标很难准确反应树木的抗旱性本质,通过对各指标的综合评价表明:4种树种在夏秋季节的抗旱性强弱顺序均为沙冬青>侧柏>沙枣>山桃。运用灰色关联度分析表明,10项指标在夏秋季节对所选树种抗旱性影响程度和贡献程度有所

差异, 关联度在 0.6 以上的夏季有 MDA、RWC、SS、Pro、CAT, 秋季有 Pro、RWC、MDA、Chl(a/b)、SOD、CAT。说明各项抗旱指标随着季节的差异, 对树种抗旱性的影响程度不同, 在今后树种抗旱性的研究中, 可以根据季节的不同, 优先选取关联度较大的生理指标。

## 参考文献

- [1] 黎燕琼, 郑绍伟, 陈泓, 等. 林木抗旱性研究及其进展[J]. 世界林业研究, 2007, 20(1): 10-15
- [2] 刘家琼, 丘明新. 我国荒漠特有的常绿植物—沙冬青的生态生理及解剖学特征[J]. 植物学报, 1982, 24(6): 568-574
- [3] 种培芳, 苏世平, 李毅. 4个地理种群红砂的抗旱性综合评价[J]. 草业学报, 2011, 20(5): 26-33
- [4] 冯祥元, 种培芳, 于柱英. 10个彩叶树种抗旱性指标测定分析及其综合评价[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5): 30-35
- [5] 申学圣, 宫渊波, 陈林武, 等. 岷江上游干旱河谷 4 个乡土树种的抗旱生理指标主成分分析[J]. 贵州林业科技, 2012, 40(4): 1-6
- [6] 何开跃, 李晓储, 黄利斌, 等. 干旱胁迫对木兰科 5 树种生理生化指标的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2005, 13(4): 20-23
- [7] 李禄军, 蒋志荣, 李正平, 等. 3 树种抗旱性的综合评价及其抗旱指标的选取[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 253-254
- [8] 张世虎, 宁宝山. 兰州北山绿化区植被种类组成数量特征初探[J]. 甘肃林业科技, 2012, 36(4): 1-6
- [9] 马维伟, 王辉, 马小强. 兰州市九州台区不同海拔高度人工林群落物种多样性[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 187-191
- [10] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 173-174
- [11] Ingram J, Bartels D. The molecular basis of dehydration tolerance in plants[J]. Annual review of plant biology, 1996, 47(1): 377-403
- [12] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 101-108
- [13] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. Plant and Cell Physiology, 1981, 22(5): 867-880
- [14] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 110-111
- [15] 黄颜梅, 张健, 罗承德. 树木抗旱性研究[J]. 四川农业大学学报, 1997, 15(1): 49-54
- [16] Mao Z, Jiang H, Wang Y, et al. Water balance of birch and larch leaves and their resistance to short and progressive soil drought[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2004, 51(5): 697-701.
- [17] 孟林, 毛培春, 张国芳. 不同居群马蔺抗旱性评价及生理指标变化分析[J]. 草业学报, 2009, 18(5): 18-24
- [18] Wang R Z, Gao Q. Photosynthesis, transpiration, and water use efficiency in two divergent *Leymus chinensis* populations from Northeast China[J]. Photosynthetica, 2001, 39(1): 123-126
- [19] 田民, 刘思峰, 卜志坤. 灰色关联度算法模型的研究综述[J]. 统计与决策, 2008, 1: 24-27
- [20] 王新建, 何威, 杨淑红, 等. 干旱胁迫下 4 种楸树嫁接苗叶绿素含量的变化[J]. 经济林研究, 2008, 26(1): 20-24
- [21] 邹春静, 韩士杰, 徐文铎, 等. 沙地云杉生态型对干旱胁迫的生理生态响应[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1446-1450
- [22] 王娟, 李德全. 逆境条件下植物体内渗透调节物质的积累与活性氧代谢[J]. 植物学通报, 2001, 18(4): 459-465
- [23] 曹艳平, 朱立新, 贾克功. 叶水势, 丙二醛含量及保护酶活性与桃砧木抗旱性的关系[J]. 北京农学院学报, 2007, 22(3): 7-11
- [24] 韩瑞宏, 田华, 高桂娟. 干旱胁迫下紫花苜蓿叶片水分代谢与两种渗透调节物质的变化[J]. 华北农学报, 2008, 23(4): 140-144
- [25] 李吉跃. 太行山区主要造林树种耐旱特性的研究[J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(2): 230-279
- [26] 叶金山, 王章荣. 干旱胁迫对杂种马褂木与双亲重要生理性状的影响[J]. 林业科学, 2002, 38(3): 20-26
- [27] Bogeat-Triboulot M B, Brosché M, Renaut J, et al. Gradual soil water depletion results in reversible changes of gene expression, protein profiles, ecophysiology, and growth performance in *Populus euphratica*, a poplar growing in arid regions[J]. Plant Physiology, 2007, 143(2): 876-892
- [28] 唐承财, 钟全林, 王健. 林木抗旱生理研究进展[J]. 世界林业研究, 2008, 21(1): 20-26
- [29] 陈少裕, 刘杰. 水分胁迫对甘蔗叶片线粒体膜流动性的影响及其与膜脂过氧化的关系[J]. 植物生理学报, 1991(3): 285-289
- [30] 马成仓, 高玉葆, 李清芳, 等. 内蒙古高原不同生境条件下甘蒙锦鸡儿水分调节特性和抗逆性的比较研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(2): 187-191
- [31] 王金龙, 赵念席, 徐华, 等. 不同地理种群大针茅生理生化特征的研究[J]. 草业学报, 2011, 20(5): 42-48
- [32] 俞靓, 吴艳芹, 魏琳, 等. 黄土高原半干旱区不同本氏针茅种群抗旱性研究[J]. 草地学报, 2012, 20(6): 1065-1071
- [33] 冯祥元, 种培芳, 于柱英. 10 个彩叶树种抗旱性指标测定分析及其综合评价[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5): 30-35
- [34] 张孝仁, 徐先英. 沙拐枣属种间抗干旱抗风蚀性比较试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 1992, 6(4): 55-62
- [35] 梁旭婷. 兰州市干旱地区六种灌木的抗旱性研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008