

# 沙拐枣属5种植物抗旱能力评价研究

倪细炉<sup>1\*</sup> 王继飞<sup>2</sup> 李静尧<sup>2</sup>

1. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地 / 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 750021

2. 宁夏贺兰山国家级自然保护区管理局 / 宁夏贺兰山森林生态系统国家定位观测研究站, 宁夏 750021

**摘要:** 本文以沙拐枣属5种植物为研究材料, 采用干旱胁迫模拟实验, 研究沙拐枣属植物抗旱特征及其能力综合评价。结果表明: 在干旱胁迫条件下, 沙拐枣属植物生长量指标都有明显的降低趋势; 除无叶沙拐枣和红果沙拐枣外, 叶绿素含量和光合参数有降低的趋势; 除淡枝沙拐枣外, 保护酶系统的SOD、POD的活性呈增高趋势; 丙二醛含量和叶绿素荧光值也呈增高的趋势。灰色关联度分析可知: 叶绿素荧光和生长量等作为沙拐枣属植物抗旱性鉴定的初级指标, 并结合饱和含水量、POD、鲜重、干重、Chl和SOD等指标综合鉴定。5种植物抗旱性强弱的顺序依次为: 淡枝沙拐枣 > 乔木状沙拐枣 > 红叶沙拐枣 > 无叶沙拐枣 > 头状沙拐枣。

**关键词:** 沙拐枣属; 抗旱; 综合评价; 隶属函数法

## 一、前言

干旱是限制植物生长发育的重要影响因子之一。全球土地有1/3属于干旱或半干旱地区, 在长期进化过程中, 植物为了适应干旱胁迫, 在植物形态结构、生长发育、生理响应、代谢、营养、激素变化、基因等不同层次、不同水平发生了一系列生物学适应机制<sup>[1-5]</sup>, 各种适应方式相互联系、相互制约, 共同调节植物的整体抗旱性, 因此, 植物对干旱胁迫适应性及其抗旱能力的研究具有重要意义。

沙拐枣属 (*Calligonum*) 植物是主要生长于荒漠化或半荒漠化环境的优势灌木资源, 在我国干旱荒漠区广泛分布<sup>[6]</sup>, 多生于流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘、沙地、沙砾质荒漠和砾质荒漠的粗沙积聚处, 是优良的防风固沙先锋植物。具有生长快、易繁殖、抗风蚀、耐沙埋、耐旱的特点, 是该地区最为重要的防风固沙先锋种<sup>[7]</sup>。目前对沙拐枣属植物的研究主要集中在果实形态结构及分类<sup>[8-9]</sup>、种子库及种子萌发<sup>[10]</sup>、生理生态学<sup>[11]</sup>等方面, 而对沙拐枣属植物抗旱能力综合评价的研究却鲜有报道。为此, 我们对5种沙拐枣属植物抗旱特性等进行室内外控制实验, 以期对沙拐枣属植物抗旱能力进行评价, 探讨沙拐枣属植物的抗旱特征以及对干旱胁迫的适应对策。

## 二、材料与方法

### (一) 实验材料

5种沙拐枣属 (*Calligonum*) 植物分别为: 淡枝沙拐枣 (*C. leucocladum*)、红果沙拐枣 (*C. rubicundum*)、乔木状沙拐枣 (*C. arborescens*)、头状沙拐枣 (*C. caput-medusae*) 和无叶沙拐枣 (*C. aphyllum*)。5种植物于2010年年从新疆吐鲁番植物园引种到银川植物园内种植, 2016年11月剪取其枝条在银川植物园内进行扦插繁殖, 2017年4月开始萌芽生长, 5种供试材料均为二年生植物, 同时植于银川植物园内。

### (二) 实验处理

移栽苗经过缓苗期后, 水分梯度试验从2018年8月1号开始, 到2018年9月30号结束。通过人工控制水分设置正常处理 (土壤含水量为田间持水量的70%~80%) 和干旱处理 (土壤含水量为田间持水量的40%~50%)。每梯度处理下各供试品种均设6次重复。每天下午17:00采用称重法控制土壤含水量, 从盆上部加水到设计上限, 补充其水分消耗。实验环境的光照强度为6万~10万lx, 温度为19~33℃, 相对湿度为25%~58%。每次补水时间为近日落时, 以使

\*通讯作者: 倪细炉, 1982年8月, 男, 汉族, 湖北武汉人, 现任宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地副研究员, 博士。研究方向: 植物生态学。

基金项目: 宁夏重点研发项目 (2020BFG03006), 宁夏自然科学基金项目 (2020AAC03107) 和中央引导地方科技发展专项: 气候变化背景下贺兰山生物多样性保育与生态系统服务功能提升。

水分充分渗透到土壤中。待干旱胁迫处理28 d后测定各项指标。

### (三) 实验方法

叶绿素含量采用乙醇浸提比色法<sup>[12]</sup>；质膜透性采用电导率法<sup>[13]</sup>；丙二醛（malondialdehyde, MDA）含量采用硫代巴比妥酸法<sup>[14]</sup>；超氧化物歧化酶（superoxide dismutase, SOD）活性采用氮蓝四唑（nitroblue tetrazolium, NBT）法<sup>[15]</sup>；过氧化物酶（peroxidase, POD）活性采用愈创木酚显色法<sup>[16]</sup>；过氧化氢酶（catalase, CAT）活性采用紫外吸收法<sup>[14]</sup>；鲜重、饱和水重和干重等指标用称重法测定；光合参数（Pn：光合速率，E：蒸腾速率，C：气孔导度）采用GFS-3000光合仪（Heinz Walz GmbH公司，德国）测定；叶绿素荧光值（Chl flu.）采用OS-30P手持式荧光仪进行测定。

植物各指标的耐旱系数（drought-tolerance coefficient, DTC）按照公式计算： $DTC = \text{处理测定值} / \text{对照测定值}$ 。

### (四) 评价方法

#### 1. 评价指标的选取

评价方法中选取了生长指标、光合生理指标及常规生理指标等三大类，对5种沙拐枣属植物进行抗旱性综合分析。这三大类指标分别是：生长指标（叶片鲜重、叶片饱和水重、叶片干重、生长量）、光合生理指标（光合速率、蒸腾速率等）、常规生理指标（叶绿素含量、丙二醛含量、保护酶系统活性和叶绿素荧光值）。

#### 2. 灰色关联度分析法

采用灰色关联分析方法进行抗旱性鉴定指标的排序和筛选，弄清各因素对抗旱性影响的主次关系，对于科学评价植物的抗旱性具有重要意义。

##### (1) 参考数列的构建

灰色关联分析的关键是参考数列的确定，叶绿素荧光（Chl flu.）值是植物逆境下反应最为灵敏的指标之一，因此本文在抗旱系数的选择上采用Chl flu.作为参考数列。

##### (2) 比较数列的构建

在比较数列中必须采用和参考数列具有关联性的数列进行分析。我们选用各指标耐旱系数作为比较数列。

#### 3. 隶属函数分析法

隶属函数分析是在各项生理指标测定的基础上对植物本身特性进行综合评价，将它应用于抗旱植物的筛选和抗旱能力比较是一种可靠的方法，多指标的评价能从不同角度反映植物抗旱特性的实质<sup>[17]</sup>。

隶属函数值计算公式：

$$R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

式中， $X_i$ 为各指标测定值， $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 为所有参试材料某一指标的最小值和最大值。如果某一指标与抗旱能力成负相关，则用反隶属函数进行转换，计算公式为：

$$R'(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

## 三、研究结果

### (一) 干旱胁迫下沙拐枣的生理参数

在干旱胁迫条件下，5种沙拐枣属植物的鲜重、饱和水重、干重、生长量、叶绿素含量、气孔导度和叶绿素荧光值等都有明显的降低趋势；MDA含量、POD和SOD酶活性等呈升高的趋势；红皮沙拐枣、乔木沙拐枣和无叶沙拐枣的净光合速率呈升高的趋势，但白皮沙拐枣和头状沙拐枣的净光合速率呈降低的趋势；红皮沙拐枣、头状沙拐枣和无叶沙拐枣的蒸腾速率呈升高的趋势，但白皮沙拐枣和乔木沙拐枣的蒸腾速率呈降低的趋势（表1）。

### (二) 沙拐枣属植物耐旱系数分析

在干旱胁迫条件下，生长指标耐旱系数（叶片鲜重、叶片饱和水重、植株干重和生长量等）都小于1，表明在干旱胁迫下，5种沙拐枣属植物生长受到抑制，各生长指标呈降低的趋势，其中，乔木沙拐枣降低的幅度最大，淡枝沙拐枣和无叶沙拐枣；无叶沙拐枣叶绿素含量的耐旱系数大于1，其他4种沙拐枣属植物耐旱系数均小于1，其中，头状沙拐枣降低的幅度最大；红果沙拐枣、乔木沙拐枣和无叶沙拐枣光合速率的耐旱系数大于1，但淡枝沙拐枣和头状沙拐枣光合速率耐旱系数小于1；5种沙拐枣属植物MDA耐旱系数均大于1，其中，红果沙拐枣增幅最大，头状沙拐枣和无叶沙拐枣的增幅最小；5种沙拐枣属植物保护酶活性（POD和SOD）和叶绿素荧光值的耐旱系数均大于1，其中，无叶沙拐枣的增幅最大，乔木沙拐枣的增幅最小（表2）。

表1 供试品种生理指标测定

实验处理	植物	叶片鲜重(g)	叶片饱和水重(g)	叶片干重(g)	生长量(mm)	Chl(%)	Pn( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	E( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	C( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	MDA(%)	POD( $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ )	SOD( $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ )	Fv/Fm
CK	白皮沙拐枣	2.30	3.28	1.07	80.33	1.07	1.95	0.50	6.87	0.67	14.78	66.75	0.68
	红皮沙拐枣	1.24	1.48	0.40	101.33	1.07	3.13	1.38	16.33	0.81	28.62	136.02	0.63
	乔木沙拐枣	1.04	1.33	0.39	39.33	1.13	2.37	1.13	12.41	0.66	18.85	57.60	0.63
	头状沙拐枣	1.06	1.76	0.36	36.01	4.80	3.33	1.26	14.55	0.58	20.33	21.39	0.66
	无叶沙拐枣	0.95	1.24	0.23	93.33	1.00	1.86	0.84	10.75	0.61	22.60	54.84	0.72
干旱胁迫	白皮沙拐枣	2.16	3.18	0.86	65.87	0.62	1.89	0.20	3.09	1.09	13.45	178.21	0.77
	红皮沙拐枣	0.83	1.12	0.18	104.37	0.62	4.88	1.59	17.47	1.58	50.37	195.87	0.66
	乔木沙拐枣	0.58	0.90	0.17	15.73	0.69	2.80	1.07	10.05	1.07	21.87	132.48	0.66
	头状沙拐枣	0.61	1.58	0.14	13.32	2.59	3.10	0.88	10.33	0.83	25.41	18.39	0.74
	无叶沙拐枣	0.91	1.19	0.18	88.67	1.51	3.09	0.89	10.22	0.92	31.42	120.09	0.86

表2 供试品种各指标的耐旱系数

植物	叶片鲜重	饱和水重	植株干重	生长量	Chl	Pn	E	C	MDA	POD	SOD	Fv/Fm
淡枝沙拐枣	0.94	0.97	0.80	0.82	0.58	0.97	0.41	0.45	1.63	0.91	2.67	1.13
红果沙拐枣	0.67	0.76	0.45	1.03	0.58	1.56	1.15	1.07	1.96	1.76	1.44	1.05
乔木沙拐枣	0.56	0.68	0.44	0.40	0.61	1.18	0.94	0.81	1.61	1.16	2.30	1.05
头状沙拐枣	0.57	0.90	0.40	0.37	0.54	0.93	0.70	0.71	1.42	1.25	0.86	1.11
无叶沙拐枣	0.96	0.96	0.76	0.95	1.51	1.66	1.05	0.95	1.50	1.39	2.19	1.20

(三) 5种沙拐枣属植物抗旱指标进行排序和筛选

采用灰色关联度分析的方法对沙拐枣属5种植物12个抗旱性鉴定指标进行了分析和筛选。灰色系统理论将5个供试品种的抗旱系数及各指标的变化率视为一个整体，即灰色系统。首先将数据标准化处理，计算得出抗旱系数与其他性状的关联系数，计算抗旱系数与各性状的灰色关联度。从而建立一个优化的指标体系。

1. 标准化处理和绝对值差

将数据进行标准化处理(表略)，并根据标准化处理结果求参考数列( $X_0$ )与比较数列( $X_i$ )标准化结果的绝对值。得到的矩阵如下(表3)。

表3 干旱胁迫下各树种的指标矩阵

指标	淡枝沙拐枣	红果沙拐枣	乔木状沙拐枣	头状沙拐枣	无叶沙拐枣
$X_1$	1.352	0.745	0.469	0.449	2.118
$X_2$	1.335	0.480	0.392	0.066	2.141
$X_3$	1.347	0.617	0.671	0.402	2.233
$X_4$	0.068	1.906	0.037	1.109	0.693
$X_5$	0.852	0.435	0.563	1.795	1.942
$X_6$	1.267	1.774	0.737	1.201	2.446
$X_7$	1.885	1.888	1.281	0.675	1.960
$X_8$	1.862	2.020	1.033	0.657	1.848
$X_9$	0.374	2.511	0.915	0.964	2.088
$X_{10}$	1.629	2.367	0.542	0.132	1.148
$X_{11}$	0.418	2.515	0.739	1.085	1.752

说明： $X_1$ ：叶片鲜重， $X_2$ ：叶片饱和水重， $X_3$ ：植株干重， $X_4$ ：生长量， $X_5$ ：Chl， $X_6$ ：Pn， $X_7$ ：E， $X_8$ ：C， $X_9$ ：MDA， $X_{10}$ ：POD， $X_{11}$ ：SOD。

2. 关联系数与关联度分析

根据公式 $R_i = 1/N \sum \lambda_i (K)$ 分别求出各指标变化率( $X_i$ )与( $X_0$ )的关联度，并按照关联度大小进行排序(表

3), 以反映各指标在耐旱性评价的强弱。结果表明, 在干旱处理下, 生长量、饱和含水量、POD、鲜重、干重、Chl和SOD等指标的变化与抗旱系数相关度较大。而E、Pn、C、MDA指标的变化与抗旱系数的相关度较小(表4)。

表4 各鉴定指标的耐旱系数与参考数列关联度及关联序

指标	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>
关联度	0.24	0.36	0.24	0.45	0.23	0.16	0.16	0.16	0.20	0.28	0.21

3. 抗旱性鉴定指标体系的建立

沙拐枣属植物密切相关的抗旱指标中, 首先可以将叶绿素荧光和生长量等作为抗旱性鉴定的初级指标; 其次可以按照植株形态、生理、生化等次级指标的测定。如: 饱和含水量、POD、鲜重、干重、Chl和SOD等多项指标综合鉴定。

(四) 沙拐枣属植物抗旱能力综合评价

多指标综合评价方法是把多个被评价事物不同方面且量纲不同的统计指标, 转化成无量纲的相对评价价值, 并综合这些评价价值以得出对该事物一个整体评价的方法。

1. 耐旱指标的无量纲化处理

根据各植物正常供水和干旱处理下各生理指标的变化率来评价植物抗旱的大小, 5种植物形态、生理指标的无量纲化处理可用以下公式进行计算(表5)。计算公式:  $\Delta \Psi = X_{ij} / X_{imax}$

表5 沙拐枣属5种植物耐旱指标无量纲化

植物	叶片鲜重	饱和水重	植株干重	生长量	Chl	Pn	E	C	MDA	POD	SOD
淡枝沙拐枣	0.979	1.000	1.000	0.863	0.384	0.584	0.357	0.421	0.832	0.517	1.000
红果沙拐枣	0.698	0.784	0.563	1.084	0.384	0.940	1.000	1.000	1.000	1.000	0.539
乔木状沙拐枣	0.583	0.701	0.550	0.421	0.404	0.711	0.817	0.757	0.821	0.659	0.861
头状沙拐枣	0.594	0.928	0.500	0.389	0.358	0.560	0.609	0.664	0.724	0.710	0.322
无叶沙拐枣	1.000	0.990	0.950	1.000	1.000	1.000	0.913	0.888	0.765	0.790	0.820

2. 权重值的分配

5种植物各个生理生化指标的贡献是不均等的, 因此应赋予不同的权重(加权赋值)才符合实际, 计算出权重系数, 最后得出各性状的加权关联度。权重值的计算公式为:  $W_j = \gamma_j / \sum_{j=1}^n \gamma_j$ ;

其中:  $W_j$ 为第j个指标的权重,  $\gamma_j$ 为各指标关联度的大小。各指标的权重值如表6所示。

表6 各指标的权重值

指标	鲜重	饱和水重	干重	生长量	Chl	Pn	E	C	MDA	POD	SOD
权重值(%)	8.92	13.38	8.92	16.73	8.55	5.95	5.95	5.95	7.43	10.41	7.81

3. 隶属函数值计算

表7 沙拐枣属5种灌木各指标的隶属函数值

植物	淡枝沙拐枣	红果沙拐枣	乔木沙拐枣	头状沙拐枣	无叶沙拐枣
鲜重	0.08	0.06	0.05	0.05	0.09
饱和水重	0.13	0.10	0.09	0.12	0.13
干重	0.07	0.04	0.04	0.04	0.07
生长量	0.14	0.17	0.07	0.06	0.16
Chl	0.05	0.05	0.05	0.05	0.13
Pn	0.06	0.09	0.07	0.06	0.10
E	0.02	0.07	0.06	0.04	0.06
C	0.03	0.06	0.05	0.04	0.06
MDA	0.12	0.15	0.12	0.11	0.11
POD	0.09	0.18	0.12	0.13	0.14
SOD	0.21	0.11	0.18	0.07	0.17
隶属函数值	1.01	1.09	0.89	0.76	1.21
排序	3	2	4	5	1

根据隶属函数或反隶属函数的公式干旱胁迫下各指标进行隶属函数的计算,从而评价5种沙拐枣属5种植物的抗旱能力大小。

由表7可知,淡枝沙拐枣的各指标隶属值最大,说明它是抗旱性较强的品种,头状沙拐枣的各指标隶属值最小,说明它是抗旱性较弱的品种。沙拐枣属5种植物按照平均隶属函数值大小反映了其抗旱性强弱的顺序,依次为:无叶沙拐枣>红果沙拐枣>淡枝沙拐枣>乔木沙拐枣>头状沙拐枣。

#### 四、讨论

植物生长量是植物获取能量能力的主要体现,对植物的发育和结构的形成具有十分重要的影响,干旱胁迫下,苗木的生长对水分很敏感<sup>[18-19]</sup>。在生长发育中,植物要不断调整其生长和干重的分配策略来适应环境变化,植物通过调整生物量分配将逆境伤害降低到最小来适应环境胁迫<sup>[20]</sup>。植物具有最大的生产力是抗旱育种的根本目的,高生长量是树木抗旱育种的重要选择指标。本研究中,5种沙拐枣属植物在干旱胁迫下的生物量都呈降低的趋势,表明水分胁迫显著抑制了5种苗木的生长,根据耐旱系数来判断这5种苗木的抗旱生产力,则大小顺序是无叶沙拐枣>淡枝沙拐枣>红果沙拐枣>头状沙拐枣>乔木沙拐枣。

叶绿素含量是评价植物抗旱能力的重要生理指标之一<sup>[21]</sup>。逆境胁迫使叶绿素的合成受阻,叶绿素含量下降,叶绿体超微结构及精细结构的形成受阻。张景云等<sup>[22]</sup>认为胁迫对叶绿体的膜系统产生伤害,片层逐渐解体,外形轮廓发生变化,内部片层排列方向发生改变,基粒数目减少,内部结构趋向简单,以至瓦解,最终导致叶绿素含量下降。本试验中淡枝沙拐枣、红果沙拐枣、头状沙拐枣和乔木沙拐枣的叶绿素含量都呈降低的趋势,但无叶沙拐枣的叶绿素含量呈增高的趋势,表明无叶沙拐枣在干旱胁迫下叶绿体膜系统没有受损。

丙二醛含量的变化可以作为衡量植物在盐胁迫下受伤害程度的重要指标,盐碱胁迫导致植物中MDA含量增加的报道已有很多,其含量越高,表明植物受伤害的程度就越大<sup>[23]</sup>,这与本实验结果一致,表明本试验中5种沙拐枣属植物在干旱胁迫下的细胞膜系统受到一定的破坏。

水分胁迫会扰乱植物体内活性氧产生和清除的平衡,引起活性氧的积累,造成植物细胞受到伤害。细胞内广泛存在清除活性氧的保护酶系统,它们的协调作用可以清除过剩的氧自由基,防止细胞受到伤害。干旱胁迫下保护酶对植物的保护作用已经有了大量的研究:Dhindsa等发现苔藓耐旱品种在缓慢干旱和快速干旱过程中SOD和CAT活性上升,而不耐旱品种活性下降<sup>[24]</sup>。王宝山等发现小麦无论在轻度 and 严重干旱胁迫下,POD和CAT活性均呈上升趋势,抗旱品种上升幅度大<sup>[25]</sup>。本研究结果表明:5种沙拐枣属植物POD和SOD活性都呈升高的趋势,无叶沙拐枣的增幅最大,头状沙拐枣的增幅最小。从这一结果看,本研究结果与前人的结果一致。应该看出在胁迫的条件下,保护酶活性增加是植物适应水分胁迫条件下O<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O等增多、维持细胞内活性氧累积与清除系统平衡的一种适应性调节,是减轻细胞伤害的一种反馈性代谢变化。

光合作用是干物质生产的主要途径,与生长的关系十分密切。在干旱、半干旱地区,干旱是植物生长和光合能力的限制因子。叶片光合产物是各器官生长的物质基础。在一定的环境条件下,林木光合生产量取决于叶片吸收的光合有效辐射和叶片的光合特性。研究在不同水分条件下的植物光合作用变化对于了解植物的耐旱性能有一定的帮助<sup>[26]</sup>。本实验中,无叶沙拐枣、红果沙拐枣和乔木沙拐枣的光合速率增高,表明这3种沙拐枣属植物抗旱能力较强,而淡枝沙拐枣和头状沙拐枣抗旱能力较弱。

隶属函数分析是在各项生理指标测定的基础上对植物本身特性进行综合评价,将它应用于抗盐植物的筛选和抗盐能力比较是一种可靠的方法<sup>[27]</sup>,多指标的评价能从不同角度反映植物抗盐特性的实质,本实验四种盐生植物抗盐能力依次为:无叶沙拐枣>红果沙拐枣>淡枝沙拐枣>乔木沙拐枣>头状沙拐枣。

#### 五、结论

第一,在干旱胁迫条件下,沙拐枣属植物生长量指标(叶片鲜重、叶片饱和水重、植株干重和生长量等)都有明显的降低趋势;初无叶沙拐枣和红果沙拐枣外,叶绿素含量和光合参数有降低的趋势;除淡枝沙拐枣外,保护酶系统的SOD、POD的活性呈增高的趋势;丙二醛含量也呈增高的趋势;5种沙拐枣属植物的叶绿素荧光值呈增高的趋势。

第二,沙拐枣属植物密切相关的抗旱指标中,可将叶绿素荧光和生长量等作为抗旱性鉴定的初级指标;并结合饱和含水量、POD、鲜重、干重、Chl和SOD等多项指标进行综合鉴定。

第三,沙拐枣属5种植物抗旱性强弱的顺序依次为:淡枝沙拐枣>乔木沙拐枣>红果沙拐枣>无叶沙拐枣>头

状沙拐枣。

参考文献:

- [1]Breshears D D, McDowell N G, Dayem K E, et al. Foliar absorption of intercepted rainfall improves woody plant water status most during drought. *Ecology*, 2008,89(1):41-47.
- [2]Yang H, Wu M, Liu W, et al. Community structure and composition in response to climate change in a temperate steppe. *Global Change biology*, 2011,17(1):452-465.
- [3]Salve R, Sudderth E A, Clair S B S, et al. Effect of grassland vegetation type on the responses of hydrological processes to seasonal precipitation pattern. *Journal of hydrology*. 2011,410(1/2):51-61.
- [4]孙岩,何明珠,王立.降水控制对荒漠植物群落物种多样性和生物量的影响. *生态学报*, 2018,38(7):2425-2433.
- [5]任磊,赵夏陆,许靖,张宏毅,郭彦宏,郭福龙,张春来,吕晋慧.4种茶菊对干旱胁迫的形态和生理响应[J]. *生态学报*, 2015,35(15):5131-5139.
- [6]解婷婷,苏培玺,周紫鹏,等.荒漠绿洲过渡带沙拐枣种群结构及动态特征[J]. *生态学报*, 2014,34(15):4272—4279.
- [7]时永杰.沙拐枣属植物的种类分布及其在生态环境建设中的作用[J]. *中国兽医医药杂志*, 2003(S1):37—39.
- [8]古丽努尔·沙比尔哈孜,潘伯荣,尹林克.不同居群塔里木沙拐枣(*Calligonum roborowskii*)果实形态变异研究[J]. *植物研究*, 2010,30(1):65—69.
- [9]古丽努尔·沙比尔哈孜,潘伯荣,段士民.塔里木盆地塔里木沙拐枣群落特征[J]. *生态学报*, 2012,32(10):3288—3295.
- [10]Clobert J, Danchin E, Dhondt AA, et al. *Dispersal*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2001.
- [11]赵丁洁,纪永福,张莹花,等.沙拐枣幼苗生理特性对风速变化的响应[J]. *干旱区资源与环境*, 2019,33(9):196-201.
- [12]李志丹,韩瑞宏,廖桂兰,张美华.植物叶片中叶绿素提取方法的比较研究[J]. *广东第二师范学院学报*, 2011,31(3):80—83.
- [13]Su LY, Dai ZW, Li SH, Xin HP. A novel system for evaluating drought-cold tolerance of grapevines using chlorophyll II fluorescence[J]. *BMC Plant Biology*, 2015,82(15):1—12.
- [14]Tauqeer H M, Ali S, Rizwan M, Ali Q, Saeed R, Iftikhar U, Ahmad R, Farid M, Abbasi G H. Phytoremediation of heavy metals by *Alternanthera bettzickiana*: growth and physiological response[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016,126:138—146.
- [15]李合生.植物生理生化试验原理和技术[M].北京:高等教育出版社, 2000.
- [16]Guo T R, Zhang G P, Zhou M X, Wu F B, Chen J X. Effects of aluminum and cadmium toxicity on growth and antioxidant enzyme activities of two barley genotypes with different Al resistance[J]. *Plant and Soil*, 2004,258(1):241—248.
- [17]仝倩,施明,贺建勋,徐美隆.5种葡萄砧木耐旱性评价及鉴定指标的筛选[J]. *核农学报*, 2018,32(09):1814—1820.
- [18]宇万太,于永强.植物地下生物量研究进展[J]. *应用生态学报*[J]. 2001,12(6):927-932.
- [19]Zhaner R. Water deficits and growth of trees[C]. In *Water Deficit and Plant Growth*. (T. T. Kozlowski, ed). 1968,2:191-254.
- [20]谢会成,朱西存.水分胁迫对栓皮栎幼苗生理特性及生长的影响[J]. *山东林业科技*, 2004,(2):6-7.
- [21]克热木,侯江涛,买合木提,等.盐胁迫对扁桃光合特性和叶绿体超微结构的影响[J]. *西北植物学报*, 2006,26(11):2220-2226.
- [22]张景云,吴凤芝.盐胁迫对黄瓜不同耐盐品种叶绿素含量和叶绿体超微结构的影响[J]. *中国蔬菜*, 2009(10):13-16.
- [23]DEM IY, KOCACALISKAN I. Effect of NaCl and proline on bean seed-lings cultured in vitro[J]. *Biologia Plantarum*, 2002,45(4):597-599.
- [24]Dhinds RS, Matowe W. Drought to letance in two mosses: correlated with enzymatic defense against lipid peroxidation[J]. *J. Exp. Bot*, 1981,32:79~91.
- [25]王宝山,赵思齐.干旱对小麦幼苗膜脂过氧化及保护酶的影响[J]. *山东师范大学学报(自然科学版)*, 1987,2(2):29.
- [26]王晓江.库布齐沙漠几种沙生灌木光合、耗水及耐旱生理生态特性研究[D].北京林业大学, 2008.
- [27]陈荣敏,杨学举,梁凤山等.利用隶属函数法综合评价冬小麦的抗旱性[J]. *河北农业大学学报*. 2002,2(25):7~9.