

干旱胁迫下四种矿区生态修复植物的抗旱性研究

余莉琳^{1,2}, 裴宗平^{1,2}, 孔 静^{1,2}, 涂永成^{1,2}, 潘凌潇^{1,2}

(1. 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要:以八宝景天、沙打旺、紫花苜蓿和早熟禾 4 种典型干旱区草本植物为试材, 采用盆栽控水法进行干旱胁迫, 测定了 4 种植物叶片相对含水量、相对电导率、叶绿素含量、脯氨酸(Pro)含量、丙二醛(MDA)含量和可溶性糖含量 6 个抗旱指标的变化; 运用隶属函数值法进行植物抗旱性综合评价, 并采用灰色关联度法对 6 项抗旱指标与植物抗旱性的关联度进行分析, 以研究不同植物在干旱胁迫下的抗旱机制。结果表明: 4 种植物综合抗旱性顺序为: 八宝景天>早熟禾>紫花苜蓿>沙打旺; 各项抗旱指标与植物抗旱隶属函数均值关联度大小顺序为: 叶绿素含量(0.9727)、叶片相对含水量(0.9387)、可溶性糖含量(0.8314)、丙二醛含量(0.7940)、相对电导率(0.6320)、脯氨酸含量(0.4528), 即叶绿素含量、叶片相对含水量和可溶性糖含量对干旱环境最为敏感, 可作为矿区生态修复抗旱植物筛选的重要评价指标。

关键词:生态修复; 干旱胁迫; 抗旱性; 隶属函数值; 灰色关联度

中图分类号:Q 945.78 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2013)12-0061-04

随着人类对矿产资源需求的增加, 各种开挖行为导致大规模的土地和植被破坏以及严重的水土流失, 极大地破坏了原有的生态系统^[1-2]。如何使废弃矿山恢复植被, 已成为生态环境建设中亟需解决的问题。缺水 and 植物生长困难是矿区生态修复的限制问题, 因此科学筛选抗旱植物是矿区生态修复成功的关键和前提。植物的抗旱性是其干旱环境下生长和繁殖的必要条件, 是多种因素综合作用的结果^[3], 国内外学者分别从植物的形态结构、生理生化指标及基因工程等方面, 对植物的抗旱性和抗旱机理进行了研究, 提出了抗旱性植物筛选的一系列指标及综合评价方法, 探索了提高植物抗旱性能的技术等^[4-8]。虽然目前有众多的研究成果, 但是不同植物的抗旱机制不同, 植物的自身形态和生理生化特征都与植物抗旱性有关^[9], 对于矿区生态修复植物, 目前尚不能全面准确地描述各种植物的抗旱特征。

因此, 该试验选择八宝景天、早熟禾、紫花苜蓿和沙打旺 4 种抗旱草本植物, 测定了持续干旱胁迫下植物叶片的相对含水量、相对电导率、叶绿素含量、脯氨酸含量、丙二醛含量、可溶性糖含量等生理生化指标, 运用隶

属函数值法对植物进行抗旱性评价, 具有科学性和可靠性, 利用灰色关联度分析法进行抗旱指标间关联性分析, 避免主观差异, 具有可行性和准确性^[10], 以期能为矿区生态修复抗旱植物选择提供理论基础和技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选择八宝景天(*Sedum spectabile* Boreau.)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)和早熟禾(*Poa annua* L.) 4 种草本植物作为供试材料, 购于江苏沭阳苗木市场。以中国矿业大学南湖校区苗圃基地土壤作为供试土壤, 采用盆口直径为 22 cm, 底口直径为 15 cm, 盆高为 18 cm, 总体积为 4 893.69 cm³ 的硬质塑料花盆为试验器材。

1.2 试验方法

试验于 2012 年 6~9 月在中国矿业大学环境与测绘学院一楼绿化区进行。植物的抗旱性采用盆栽控水法, 早熟禾、紫花苜蓿、沙打旺每盆种植 100 颗种子, 景天每盆移栽 6 个枝条, 各设置 3 个重复。正常种植 3 个月后进行抗旱胁迫试验, 于 2012 年 8 月 29 日开始连续 3 d 浇透水, 保证土壤吸足水分, 9 月 1 日取样测定植物生理生化指标数据作为对照(CK), 次日开始断水处理, 同时人工防雨, 干旱胁迫试验为期 25 d, 在干旱第 22 天时进行自然复水, 每 5 d 测定 1 次, 最后 1 次测定为植物复水后。试验期内日平均温度在 19.5~25.5℃, 最高温度为 28℃, 最低温度为 13℃, 平均相对湿度为 69.9%。

第一作者简介:余莉琳(1989-), 女, 浙江义乌人, 硕士研究生, 研究方向为矿山生态修复。E-mail: cumtyulilin@126.com.

责任作者:裴宗平(1963-), 男, 江苏丰县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 现主要从事矿区生态修复与环境规划及地下水污染治理等研究工作。E-mail: peizp689@163.com.

基金项目:徐州市科技计划资助项目(XJ09093)。

收稿日期:2013-01-17

1.3 项目测定

叶片相对含水量采用烘干法测定, $RWC = (\text{原始鲜重} - \text{干重}) / (\text{饱和鲜重} - \text{干重}) \times 100\%$ ^[11]; 相对电导率采用 TFW-VI 型土壤养分·温湿度综合测定仪测定; 叶绿素含量采用 80% 丙酮浸提比色法测定^[12]; 脯氨酸含量采用磺基水杨酸法测定^[11]; 丙二醛含量、可溶性糖含量采用分光光度计法测定^[11]。

1.4 数据分析

1.4.1 抗旱系数 由于不同物种对照值存在差异, 量纲不同, 为避免影响, 利用公式求出所测得的各项生理指标不同时间的抗旱系数。抗旱系数 $= T_i / T_1 \times 100\%$ 。式中, T_i 为干旱第 i 天时的原始数据; T_1 为对照值, 即干旱第 1 天时的原始数据。

1.4.2 隶属函数值法 在模糊数学中, 1 个评价因素指标实测值属于某一级别的程度称为隶属度, 它是 0~1 之间的数, 越接近 1, 隶属于这一级别的程度就越大, 每给 1 个评价因素指标实测值, 就对应 1 个隶属度, 对应关系称为隶属函数^[13]。该方法根据模糊数学原理, 先将各指标换算成隶属函数值, 然后对各物种隶属函数值求平均值, 得出综合评价指标值, 其值越大, 说明抗旱性能越强。如果指标与抗旱性呈正相关, 则计算公式 $X_{(u)} = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。如果指标与抗旱性呈负相关, 则利用反隶属函数计算, $X_{(u)} = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。式中, X 为各物种的某一指标抗旱系数, X_{\max} 和 X_{\min} 分别为 4 种植物中指标的最大值和最小值, $X_{(u)}$ 为植物的抗旱隶属函数均值^[4,14]。

1.4.3 灰色关联度分析 灰色关联分析是根据因素之

间发展态势的相似或相异程度, 来衡量因素之间关联程度的一种系统分析方法。它基于行为因子序列的微观或宏观几何接近, 分析确定因子间的影响程度或因子对主行为的贡献程度。关联度的大小只是因子间相互作用、相互影响的外在表现, 关联度的排序才能体现众多因子对参考因子的相对影响程度^[10,15]。将 4 种植物的抗旱性和 6 个抗旱指标作为一个灰色系统, 设抗旱指标中叶片相对含水量、相对电导率、叶绿素含量、脯氨酸含量、丙二醛含量、可溶性糖含量的抗旱系数分别作为比较数列 $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$, 各植物抗旱隶属函数均值作为对照数列 X_0 。利用 DPS 数据处理系统的“关联分析”功能选项, 分辨系数取常规值 0.5^[16], 执行操作, 即可得出 4 种植物各抗旱指标与抗旱性的关联度。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对 4 种植物抗旱指标的影响

干旱胁迫期间每隔 4 d 对 4 种植物的 6 项抗旱指标进行测定分析, 设置 3 次重复, 得到各指标随干旱天数的变化平均值。由表 1 可知, 随着干旱天数的增加, 不同植物各指标数值呈现不同变化趋势。八宝景天在干旱胁迫期间 RWC 值和相对电导率变化趋势明显比其它 3 种植物平缓, 说明其水分亏缺较少、细胞受到伤害较小; 在干旱第 20 天时, 4 种植物叶绿素含量分别比对照下降了 29.4%、62.5%、47.7% 和 43.2%, 复水后沙打旺叶绿素含量增加幅度最大, 说明干旱对八宝景天影响最小, 而沙打旺光合能力恢复最迅速。

表 1 不同干旱天数对 4 种植物叶片相对含水量、相对电导率及叶绿素含量影响

Table 1 The effect of different drought days on RWC, relative conductivity, chlorophyll content of four plant species

抗旱指标	叶片相对含水量/%				叶片相对电导率/%				叶绿素含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$			
干旱天数/d	八宝景天	沙打旺	紫花苜蓿	早熟禾	八宝景天	沙打旺	紫花苜蓿	早熟禾	八宝景天	沙打旺	紫花苜蓿	早熟禾
CK	93.97	72.10	90.03	95.75	17.65	3.45	2.78	9.41	0.4885	0.8324	1.0461	2.1569
5	91.14	79.79	85.88	92.27	19.05	5.41	4.17	10.53	0.4699	0.7308	0.9468	2.0221
10	90.93	82.53	85.44	90.52	20.51	8.00	5.88	12.50	0.3744	0.6247	0.9158	1.5741
15	88.20	77.80	83.51	80.41	21.74	10.00	10.71	14.71	0.3743	0.5533	0.7614	1.3247
20	77.28	50.77	71.19	75.70	24.00	15.15	20.69	30.77	0.3451	0.3125	0.5471	1.2246
25	88.72	66.61	74.85	77.90	22.31	13.89	13.79	17.78	0.3755	0.5428	0.6657	1.4258

由表 2 可知, 八宝景天、紫花苜蓿和早熟禾的 Pro 含量变化呈上升趋势, 干旱前期变化不明显, 随后急剧的上升, 干旱第 20 天时, 分别为对照的 15.2%、15.5% 和 11.5%, 干旱第 20 天时八宝景天和紫花苜蓿可溶性糖含量分别为对照的 1.9 和 1.8 倍, 复水后, 紫花苜蓿的 Pro 含量和可溶性糖含量比最高值下降幅度最大, 分别下降了

88.7% 和 35.8%; 沙打旺和早熟禾在干旱第 20 天时 MDA 含量均达到对照的 2.8 倍, 复水后各下降 31.4% 和 63.5%, 说明植物器官在干旱条件下发生了膜脂过氧化作用, 紫花苜蓿 MDA 含量变化最缓慢, 质膜过氧化程度最轻。

表 2 不同干旱天数对 4 种植物脯氨酸含量、丙二醛含量、可溶性糖含量的影响

Table 2 The effect of different drought days on proline content,MDA content,soluble sugar content of four plant species												
抗旱指标 干旱天数/d	脯氨酸含量/mg·g ⁻¹				丙二醛含量/nmol·g ⁻¹				可溶性糖含量/μmol·g ⁻¹			
	八宝景天	沙打旺	紫花苜蓿	早熟禾	八宝景天	沙打旺	紫花苜蓿	早熟禾	八宝景天	沙打旺	紫花苜蓿	早熟禾
CK	3.90	35.35	30.84	44.50	4.3145	5.2385	12.7624	2.7420	12.65	22.70	24.60	23.70
5	9.87	33.51	31.25	157.20	5.2553	6.4558	12.7898	3.6392	12.25	26.78	22.53	22.26
10	23.10	30.19	34.71	200.10	6.1150	8.4207	12.7855	4.4659	13.80	29.13	21.80	21.10
15	44.58	44.39	73.10	268.50	6.1646	10.5686	12.7030	5.9845	24.96	21.56	37.45	23.85
20	59.23	89.55	476.91	512.20	7.8980	14.8834	17.9599	7.5895	23.81	26.11	44.54	25.98
25	23.10	66.32	53.74	245.68	5.3755	10.2126	18.1211	2.7690	36.15	25.32	28.61	24.65

2.2 4 种植物抗旱适应性综合评价

干旱胁迫在第 22 天进行自然复水,因此取 4 种植物在干旱第 20 天和第 25 天的叶片相对含水量、叶片相对电导率、叶绿素含量、脯氨酸(Pro)含量、丙二醛(MDA)含量和可溶性糖含量 6 项指标的数据,求得各生理生化指标的抗旱系数,并取二者的平均值,进行抗旱性的隶属函数值分析。由表 3 可知,4 种草本植物的综合抗旱能力由强到弱分别为:八宝景天>早熟禾>紫花苜蓿>沙打旺,其中八宝景天隶属函数均值最大为 0.8300,沙打旺隶属函数均值最小为 0.2917,说明八宝景天的抗旱性能明显比其它 3 种植物的抗旱性强,这可能由于八宝景天是枝条移栽,培养 3 个月后生长稳定,抗旱性相对较强的原因。

表 3 干旱胁迫下 4 种植物抗旱指标隶属函数值及抗旱性综合评定

Table 3 Four plant species drought index membership function values and comprehensive assessment of drought resistance under drought stress								
植物	相对含水量	相对电导率	叶绿素	脯氨酸	丙二醛	可溶性糖	隶属函数均值	排序
八宝景天	0.92	0.92	0.84	0.99	0.54	0.77	0.8300	1
沙打旺	0.67	0.50	0.36	0.03	0.00	0.19	0.2917	4
紫花苜蓿	0.44	0.14	0.47	0.50	0.57	0.33	0.4083	3
早熟禾	0.37	0.83	0.55	0.40	0.40	0.16	0.4517	2

2.3 抗旱指标与抗旱性相关性分析

根据灰色系统理论,若某指标与抗旱性的关联度越大,则说明该指标与植物抗旱性的关系越密切,对于干旱胁迫的反应越敏感^[14],相似程度越高,反之越低。根据灰色关联度相关分析方法,得出分析结果见表 4。由表 4 可知,植物抗旱 6 项指标与抗旱性关联度顺序为:叶绿素含量>叶片相对含水量>可溶性糖含量>丙二醛含量>相对电导率>脯氨酸含量。其中,叶绿素含量和叶片相对含水量关联度分别为 0.9727 和 0.9387,对于干旱胁迫最为敏感,可溶性糖含量、丙二醛含量和相对电导率关联度都大于 0.6,具有较强的关联水平,脯氨酸含量的关联度为 0.4528,远低于其它 5 项指标的关联度。因此,叶绿素含量、叶片相对含水量和可溶性糖含量 3 项抗旱指标对所选的 4 种草本植物抗旱性影响最显著,可

表 4 各项抗旱指标与抗旱性关联度

Table 4 Correlation degree of each drought index with drought resistance						
	叶片相对含水量	相对电导率	叶绿素含量	脯氨酸含量	丙二醛含量	可溶性糖含量
关联度	0.9387	0.6320	0.9727	0.4528	0.7940	0.8314
关联顺序	2	5	1	6	4	3

为今后抗旱能力指标筛选提供借鉴。

3 结论与讨论

干旱对种植物生长都会产生一定的影响,测定其某些形态、生理指标,就能很好地反映植物对逆境的抗性^[17]。其中,叶片相对含水量大小可部分反映植物抗逆性的能力;相对电导率变化可以反映植物叶片受到逆境伤害的程度;叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,光合作用是植物进行同化作用的主要途径;植物在逆境下,体内会积累大量的脯氨酸和可溶性糖,是一种植物自我保护和适应逆境的表现;植物器官在干旱条件下,会发生膜脂过氧化作用,表示植物受到伤害的程度。随着干旱胁迫天数的增加,八宝景天、沙打旺、紫花苜蓿和早熟禾的叶片相对含水量和叶绿素含量呈递减变化,相对电导率、脯氨酸含量、丙二醛含量、可溶性糖含量均呈递增趋势,但不同植物对干旱的响应程度存在差异。该研究采用模糊数学中的隶属函数法,综合定量分析 4 种草本植物的抗旱能力,避免了利用少数指标进行评价的不足,涵盖了各指标与抗旱性的相关度,评价结果具有较强的科学性和准确性。试验结果表明,4 种草本植物抗旱性能为:八宝景天>早熟禾>紫花苜蓿>沙打旺。八宝景天的抗旱性较强,这与李云霞等^[18]的研究结果相符合。在逆境下,植物不同生理生化指标响应机制和贡献程度各不相同,通过灰色关联度定量分析可以确定某一个或某几个抗旱指标对植物的抗旱能力贡献最为显著。分析表明,6 种抗旱指标中叶绿素含量和叶片相对含水量与隶属函数均值关联度最大,说明对于干旱胁迫反映最敏感,其余指标关联度分别为:可溶性糖含量>丙二醛含量>相对电导率>脯氨酸含量。周江等^[14]对早熟禾、狗牙根和红三叶 3 种草本植物抗旱性综合评价结果中,各指标与植物抗旱性隶属函数值的关联度顺序

为:叶绿素含量>相对含水量>脯氨酸含量>丙二醛含量>可溶性糖含量>相对电导率,与该研究的分析结果不完全符合,尤其是脯氨酸含量,相关度小于0.5,可能与所选植物种类及其自身相应干旱胁迫的机制不同有关。

综上所述,4种草本植物对干旱胁迫均能反映一定的抗旱机制,其中八宝景天抗旱性能相对较强,叶绿素含量和叶片相对含水量对抗旱性相应最敏感,可为今后矿区废弃地生态修复工程提供理论依据和技术支持。

参考文献

- [1] 刘刚. 矿山自然生态环境治理技术与治理方案[J]. 西部探矿工程, 2009(6):122-126.
- [2] 张俊云,周德培,李绍. 岩石边坡生态种植基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(2):239-242.
- [3] 邹琪. 植物生理实验指导[M]. 北京:中国农业出版社,2000:159-164.
- [4] 黎裕. 作物抗旱鉴定方法与指标[J]. 干旱地区农业研究,1993,11(1):91-99.
- [5] 徐云刚,詹亚光. 植物抗旱机理及相关基因研究进展[J]. 生物技术通报,2009(2):11-17.
- [6] 颜淑云,周志宇,邹丽娜,等. 干旱胁迫对紫穗槐幼苗生理生化特性的影响[J]. 干旱区研究,2011,28(1):139-145.
- [7] Bray E A. Genes commonly regulated by water-deficit stress in *Arabidopsis thaliana* [J]. Journal Experimental Botany, 2004, 55(44):2331-

2341.

- [8] Quarrie S A, Stojanovi C J, Peki C S, et al. Improving drought resistance in small-grained cereals: A case study, progress and prospects[J]. Plant Growth Regulation, 1999, 29(1/2):1-21.
- [9] 庄丽,陈亚宁,陈明,等. 模糊隶属法在塔里木河荒漠植物抗旱性评价中的应用[J]. 干旱区地理,2005,28(3):368-371.
- [10] 杨俊,马健,王婷婷,等. 5种荒漠植物抗旱性及其与抗旱指标相关性的定量评价[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(6):143-146.
- [11] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006:15-16,228-231,210-211.
- [12] 李合生,孙群,赵世杰,等. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000:134-137.
- [13] 吴克宁,杨扬,吕巧灵. 模糊综合评判在烟草生态适宜性评价中的应用[J]. 土壤通报,2007,38(4):631-634.
- [14] 周江,裴宗平,胡佳佳,等. 干旱胁迫下3种岩石边坡生态修复植物的抗旱性[J]. 干旱区研究,2012,29(3):440-444.
- [15] 张鹤山,张德罡,刘晓静,等. 灰色关联度分析法对不同处理下草坪质量的综合评判[J]. 草业科学,2007,24(11):73-76.
- [16] 赖运平,李俊,张泽全,等. 小麦苗期抗旱相关形态指标的灰色关联度分析[J]. 麦类作物学报,2009,29(6):1055-1059.
- [17] 薛彦斌,秦华,张科. 3种藤本地被植物抗旱性比较[J]. 中国农学通报,2010(9):239-243.
- [18] 李云霞,张建生,吴永华,等. 5种景天科地被植物抗旱性比较研究[J]. 干旱区资源与环境,2010(2):183-186.

Drought Resistance of Four Plant Species in Ecological Regeneration on Mining Area Under Drought Stress

YU Li-lin^{1,2}, PEI Zong-ping^{1,2}, KONG Jing^{1,2}, TU Yong-cheng^{1,2}, PAN Ling-xiao^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, Xuzhou, Jiangsu 221116; 2. School of Environmental and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116)

Abstract: In order to research the mechanism of drought resistance of different plants under drought stress, 4 kinds of plant species that typical in the ecological regeneration on arid region, including *Sedum spectabile* Boreau, *Astragalus adsurgens* Pall, *Medicago sativa* L. and *Poa annua* L. were selected, and changes of 6 drought resistance indexes including the relative water content, relative conductivity, chlorophyll content, contents of proline, malondialdehyde and soluble carbohydrate were measured with potted controlled water. Then the fuzzy membership function analysis to integrated evaluate plant drought resistance were used, and the grey correlation analysis to analyze the association between 6 drought indicators and plant drought resistance were adopted. The results showed that, the drought resistant capability of 4 arid region plants was in order of *Sedum spectabile* Boreau > *Poa annua* L. > *Medicago sativa* L. > *Astragalus adsurgens* Pall, and the relational degree order about each index of drought resistance and average subordinate function values was: chlorophyll content (0.9727), relative water content (0.9387), soluble carbohydrate (0.8314), malondialdehyde content (0.7940), relative conductivity (0.6320), content of proline (0.4528). So, chlorophyll content, relative water content and soluble carbohydrate were the most sensitive indexes to drought environment and can be accepted as the indexes of evaluating and selecting the drought resistant plant species for ecological regeneration on mining area.

Key words: ecological restoration; drought stress; drought resistant capability; fuzzy membership function analysis; grey correlation analysis