

杨好星, 酆永鑫, 陈思莉, 等. 华南地区水库消落带耐旱性草本植物的筛选[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(19): 275–279.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.19.065

华南地区水库消落带耐旱性草本植物的筛选

杨好星^{1,2}, 酆永鑫², 陈思莉², 易 皓², 张政科², 潘小康³, 谢武明¹, 魏清伟²

(1. 广东工业大学环境科学与工程学院, 广东广州 510006; 2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广东广州 510655;

3. 南华大学, 湖南衡阳 421000)

摘要:消落带出现在淹水之前及退水之后, 植物在干旱时期的生长状况将直接影响植物在淹没时期的耐淹性能以及退水之后的恢复能力。为筛选出适合华南地区水库消落带生长的耐旱草本植物, 选择铺地黍 (*Panicum repens*)、李氏禾 (*Leersia hexandra* Swartz)、香根草 (*Vetiveria zizanioides*)、狗牙根 (*Cynodon dactylon*)、芦苇 (*Phragmites australis*)、芦竹 (*Arundo donax*) 等消落带治理常用草本植物, 通过测定其在干旱胁迫 0、10、20、30 d 时脯氨酸 (proline, 简称 Pro) 含量、丙二醛 (malondialdehyde, 简称 MDA) 含量、叶片叶绿素含量、叶片含水量及干旱胁迫 30 d 时土壤含水量和植株株高等指标的变化幅度, 综合评定各植物的抗旱性能, 并将各指标相对值与抗旱隶属函数值进行关联度分析。结果表明, 在干旱 30 d 时, 狗牙根相对株高最高, 其次是铺地黍, 香根草株高最低; 植株基底土壤含水量以铺地黍最高, 其次是狗牙根, 芦竹基底土壤含水量最低, 且植株相对株高与土壤含水量具有一定相关性 ($P < 0.05$)。根据各植株在干旱阶段第 30 天时隶属函数组得出, 6 种植物的综合抗旱性能由高到低依次为铺地黍 > 狗牙根 > 芦竹 > 李氏禾 > 芦苇 > 香根草, 且各植物在不同的干旱程度下其抗旱表现不同; 各指标对干旱胁迫的敏感程度表现为叶片相对含水量与 Pro 含量对干旱有较高的敏感度, MDA 含量及叶片叶绿素含量对干旱胁迫的敏感度较低, 关联度大小依次为 0.863 9、0.839 7、0.765 8、0.765 4; 同时土壤含水量与抗旱隶属函数值关联度也较大, 高达 0.852 6, 显著相关 ($P < 0.05$), 说明某些植物可能通过本身的特点影响土壤水分蒸发强度, 从而间接影响自身的抗旱性能。

关键词:华南地区; 消落带; 耐旱性; 草本植物; 干旱胁迫; 植被恢复

中图分类号: Q945.79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)19-0275-05

消落带 (water-level-fluctuation-zone) 是伴随蓄水建坝而形成的水陆交叉生态系统, 周期性水位涨落是其主要特点, 同时也是这种特点导致消落带植被的萎缩甚至消失^[1-2]。如何减缓和阻止消落带自然植被的退化和萎缩, 恢复和重建受损的消落带生态系统成为目前讨论的热点, 也是国内外学者主要关注的方向^[3-7]。虽然植被恢复工作已在多种退化生态系统中开展, 但周期性水位涨落造成生态环境的极端变化,

使库岸消落带植被恢复成为世界性的难题^[8-11]。

华南地区水库型消落带具有独特热带亚热带特性。以广东省为例, 全境属于东亚季风区, 从北向南分别为中亚热带、南亚热带和热带气候, 通常高降水量的背后是高温天气, 高温造就土壤水分的高蒸发量和土壤贫瘠无植被的特点, 从而形成了保水性能低下的消落带, 干旱也就成为华南地区消落带的常态, 而一定时间内植株的耐旱性能直接关系到植株的生长及生存甚至整个消落带植被的生存。华南地区水库消落带植被恢复的重中之重同样是适生性植物的遴选, 草本植物作为消落带生态系统重要的组成部分, 尤其是许多多年生草本植物拥有发达的匍匐茎和根状茎, 具有广泛适应性和强大的恢复生长能力, 可以迅速覆盖地面, 可作为消落带植被恢复的先锋植物, 抗旱性草本植物的筛选也就成为华南地区消落带植被恢复研究中关键的环节^[12-14]。付奇峰等在进行华南地区水库消落带适生植物筛选研究中得出, 铺地黍 (*Panicum repens*) 是消落带生境的适生植物^[15]; 方华等长期针对新丰江

收稿日期: 2016-05-03

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 50908095); 广东省自然科学基金 (编号: 9451065501002521)。

作者简介: 杨好星 (1990—), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要从事水库湖泊植被恢复及水土流失治理研究。E-mail: 738912472@qq.com。

通信作者: 魏清伟, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事环境应急与风险管理研究、环境工程研究与设计。E-mail: guoqingwei@scies.org。

[21] Erisman J W, Draaijers G J. Atmospheric deposition: in relation to acidification and eutrophication[M]. [S. l.]: Elsevier, 1995.

[22] 季 静, 王 昱, 杜希龙, 等. 京津冀地区植物对灰霾空气中 PM_{2.5} 等细颗粒物吸附能力分析[J]. 中国科学 (生命科学), 2013, 43(8): 694–699.

[23] 阚海东, 陈秉衡. 我国大气颗粒物暴露与人群健康效应的关系[J]. 环境与健康杂志, 2002, 19(6): 422–424.

[24] 刘晓云, 谢 鹏, 刘兆荣, 等. 珠江三角洲可吸入颗粒物污染急

性健康效应的经济损失评价[J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2010, 46(5): 829–834.

[25] 谢元博, 陈 娟, 李 巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM_{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 1–8.

[26] Zhang M, Song Y, Cai X. A health-based assessment of particulate air pollution in urban areas of Beijing in 2000–2004[J]. Science of the Total Environment, 2007, 376(1/2/3): 100–108.

水库消落带水土流失研究得出,李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz)分蘖快,可以迅速形成覆盖,根系发达,能有效防止水土流失、改善库区生态环境和提升景观美学价值,是华南地区水库消涨带的适生植物^[16];马利民等针对三峡库区生境下的狗牙根(*Cynodon dactylon*)、香根草(*Vetiveria zizanioides*)等 7 种草本植物进行适生性评价认为,狗牙根具有较好的耐淹能力,同时香根草可作为消落带生态恢复备选植物^[17]。芦苇(*Phragmites australis*)及芦竹(*Arundo donax*)在三峡库区消落带广泛存在^[18],故考虑到华南地区消落带的长时间高温环境,应用植物耐旱性及其机制,在前人关于消落带适生草本植物的研究成果基础上,本研究针对铺地黍、李氏禾、香根草、狗牙根、芦竹、芦苇等 6 种草本植物进行耐旱性适生植物筛选研究^[19-22]。

1 材料与方法

1.1 材料

铺地黍,采自广东省惠州市博罗县野外,采挖之后进行培育;李氏禾、狗牙根直接进行播种繁殖,采自广东省惠州市博罗县苗圃;芦苇、芦竹,由购自广东省惠州市博罗县苗圃的根苗进行培植所得;香根草,购自江西省红壤研究所的苗圃基地;土壤采自广东省新丰江水库消落带。

1.2 试验地点

试验地点位于广东省惠州市博罗县,地理位置 23°9'N、114°19'E,属亚热带海洋性季风气候;多年平均气温为 22.0℃,7 月平均气温为 29.0℃,极端最高气温为 38.2℃。

1.3 试验方法

于 2015 年 5 月 5 日,将各类植物种植于装有足够土壤的内径为 30 cm、深为 40 cm 的高密度聚乙烯桶内,种植数量根据植物本身特点及消落带植被恢复实际需要进行设置,置于露天大棚内,各类植株的株高在 40~50 cm 范围,连续 1 周进行施肥和浇水(按尿素 150 kg/hm² 兑水浇灌),保证其恢复正常生长,且覆盖率在 70% 以上,此后不再浇水。各设置 3 个平行,同时设置 3 个平行对照,同一植物对照组与处理组的植株种植数量都相同,对照组正常浇水,分别在干旱胁迫 0、10、20、30 d 测定各理化指标,同时在耐旱试验中对各植株的生长状况进行观测,并记录。

本次试验测定叶片的相对含水量、叶绿素含量、脯氨酸含量、丙二醛含量等指标,以及处理 30 d 时各植株株高和基底土壤的含水量。

定期测定各 5 株草本植物的株高,以其平均值反映干旱过程中各植株的生长状况。

参照陈建勋等的方法^[23]测定叶片相对含水量(relative water content,简称 RWC),作相应调整,采用以下公式计算:叶片相对含水量=(干旱组鲜质量-干旱组干质量)/(对照组鲜质量-对照组干质量)×100%;测定叶绿素含量(chlorophyll)参照章家恩的比色法^[24];测定 Pro 含量参照章家恩的酸性茚三酮法^[24];测定丙二醛(MDA)含量参照硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid,简称 TBA)法^[24];土壤含水量测定参照章家恩的烘干法^[24]。

1.4 分析方法

数据处理采用 Excel 2003 和 Origin 8.0 软件。考虑到试

验期间高温炎热的天气,在数据分析中,为消除高温这一环境因子的附加影响,将各植株株高、含水量、MDA 含量、Pro 含量、叶绿素含量等指标与对照相比,转为相对值,并将 4 个指标(RWC、相对 MDA 含量、相对 Pro 含量、相对叶绿素含量)作隶属函数分析,对 6 种草本植物的耐旱性能进行综合评价。同时将各指标与抗旱隶属函数值进行关联度分析,考察各指标的干旱敏感度。

2 结果与分析

2.1 各植株相对株高及基底土壤含水量比较

通过植物耐旱试验,得出 6 种植物干旱处理和对照组在处理 30 d 时植株相对株高(relative height,简称 RH)及基底土壤含水量(soil moisture,简称 SM),如图 1 所示。

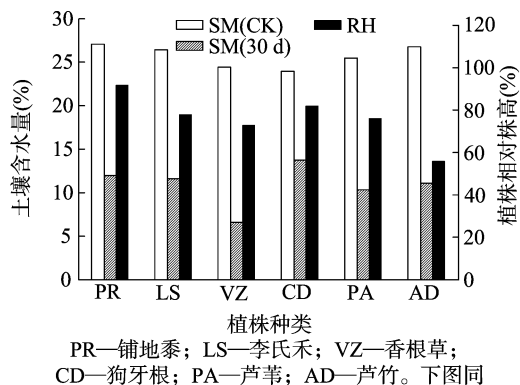


图1 各植物种植相对株高及基底土壤 CK 和 30 d 时含水量

由图 1 可看出,在干旱进行到 30 d 时,基底土壤的最低含水量为 6.60%,而对照组的土壤水分含量始终都保持在 20%~30% 之间,总体相差不大;干旱处理组的土壤含水量除香根草外,都在 10%~15% 之间,以狗牙根种植基底的土壤含水量最高,为 13.73%,其次是铺地黍、李氏禾,分别为 11.96%、11.60%,香根草最低,仅为 6.60%。由此可以看出,同一初始水平的土壤含水量,在干旱胁迫结束后,各土壤含水量有明显区别。植株相对株高以铺地黍最高,超过 91%,其次是狗牙根,为 81.81%,最低的为芦竹,相对株高在 60% 以下。由此可知,各植物对土壤的保水能力各不相同,进而可能对抗旱性能产生影响,从而直接或间接影响植物生长。

2.2 各植株 RWC 比较

由表 1 可知,在干旱 10 d,李氏禾、芦竹的叶片含水量低于对照,另外 4 种均高于对照;干旱 20 d,除芦苇、香根草外,其他植株的叶片含水量均高于对照组,且芦苇、香根草的叶片含水量也只是略微低于对照,分别低 2.96、2.98 百分点;干旱 30 d,所有植株叶片含水量呈现不同程度的下降,与对照相比,其中铺地黍、芦竹下降幅度较小,分别为 2.84、2.59 百分点,芦苇下降幅度最大,为 16.1 百分点。由此可知,不同植株在干旱胁迫下(30 d 时)叶片含水量有较大差异。

由表 2 可看出,在干旱试验前 2 个阶段,各植株除香根草和芦苇在 20 d 时的叶片含水量明显低于 0 d 时的叶片含水量外,在 10、20 d 这 2 个阶段其他植株的叶片含水量均与 0 d 时的叶片含水量接近;而干旱处理进入 30 d 时,芦竹、香根草、铺地黍叶片含水量分别下降到 96.84%、94.07%、92.97%,狗牙根最低。由此可以得出,芦竹、香根草、铺地黍 3 种植物

表 1 各植物不同处理阶段叶片组织含水量

处理时间	含水量(%)					
	铺地黍	李氏禾	香根草	狗牙根	芦苇	芦竹
CK	77.94	83.38	75.77	74.55	78.05	87.49
0 d	78.65	83.56	76.21	75.23	79.02	87.33
10 d	80.77	82.67	76.53	76.30	79.60	85.79
20 d	80.78	85.70	72.79	81.31	75.09	87.67
30 d	75.10	77.25	68.47	66.81	61.95	84.90

注:CK 为各处理时间含水量的平均值。

在干旱胁迫下,可能通过调整自身水势或降低蒸腾作用保持自身生理生长所需水分,表现出较好的适应能力。

表 2 各植物不同处理阶段叶片植株 RWC

植物	RWC(%)			
	0 d	10 d	20 d	30 d
铺地黍	100.91a	103.64a	100.01a	92.97b
李氏禾	100.21a	99.15a	103.67a	90.14b
香根草	100.58a	101.00a	95.11b	94.07b
狗牙根	100.91a	102.35a	106.57a	82.17c
芦苇	101.24a	101.99a	94.33b	82.50c
芦竹	99.81a	98.06a	102.19a	96.84a

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著($P < 0.05$)。下表同。

2.3 各植株叶绿素含量比较

用叶绿素相对(对照)含量和变化幅度大小来表征各植物的耐旱能力。由图 2 可看出,干旱胁迫 30 d 时,铺地黍叶绿素含量最高,狗牙根次之,香根草的叶绿素含量最低,且各植株叶绿素相对含量整体呈现下降趋势,下降幅度较大,但各植株在不同阶段下降幅度不尽相同。李氏禾和芦苇在干旱 20 d 时叶绿素相对含量较高,但干旱持续到 30 d 这个阶段,叶绿素相对含量急剧下降,相反,铺地黍却维持较低的下降幅度,体现了较好的抵抗干旱胁迫性能。

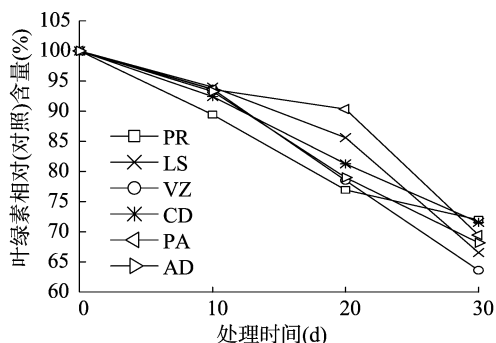


图2 各植物叶片组织叶绿素相对(对照)含量变化趋势

2.4 各植株 Pro 含量比较

在干旱处理过程中测定 6 种草本植物的脯氨酸含量,得出其脯氨酸含量变化趋势,指示各植株的抗干旱胁迫能力。

由图 3 可看出,铺地黍的脯氨酸含量随着干旱胁迫的持续,始终稳定上升,且在 0~20 d 这个阶段维持较高的上升幅度,并在 30 d 时达到最高水平;而狗牙根、李氏禾、芦竹在 10~20 d 阶段的脯氨酸含量趋于稳定,但干旱持续至 30 d 时,只有狗牙根脯氨酸含量继续上升,且上升幅度较大;香根草及芦苇在 10 d 后,其脯氨酸含量一直维持在较低水平,30 d

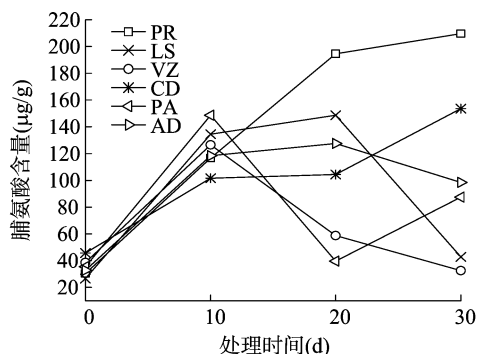


图3 各植物叶片组织 Pro 含量变化趋势

时,芦苇脯氨酸含量有短暂上升,但仍维持在较低水平。

2.5 各植株 MDA 含量比较

由图 4 可看出,在 0~20 d,除芦苇及芦竹外,各植株 MDA 含量都维持在一个较稳定的水平,但进入 20~30 d 阶段时,只有铺地黍与狗牙根的 MDA 含量维持在较低水平,李氏禾及香根草的 MDA 含量上升幅度都较大,由此可以看出,铺地黍与狗牙根在干旱胁迫下具有一定的自我保护能力。

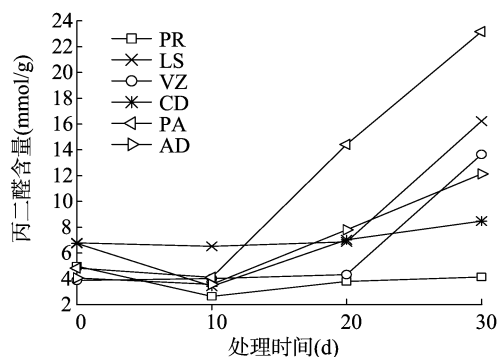


图4 各植物丙二醛含量变化趋势

2.6 各植株耐旱性能综合评价及各指标干旱敏感程度分析

针对各植株在同一干旱阶段的 4 个指标进行隶属函数分析,得出各植株隶属函数均值,以此对各植株在各个干旱时期的抗旱性能进行综合评价。

由表 3 可看出,6 种草本植物在不同的干旱阶段各指标呈现出不同的隶属表现,体现在不同的干旱阶段,6 种草本植物的各个指标呈现出不同的抗旱胁迫反应;在干旱胁迫 10 d,芦苇、李氏禾、狗牙根的抗旱性能较好,各指标整体来说对干旱反应较灵敏;在干旱胁迫进入 20 d,李氏禾和狗牙根的抗旱性能仍较好,各指标整体对干旱仍较灵敏,此外是铺地黍逐渐表现出较好的抗旱性能;在干旱胁迫最后阶段,铺地黍的抗旱表现最好,隶属函数值达到 0.99,狗牙根次之,然后是芦竹、李氏禾。

综合“2.2”至“2.5”节各植物各指标在不同干旱阶段的值,将其全部进行适当转换成相对对照的相对值,将各指标相对值与抗旱隶属函数值进行关联度分析,对各指标在干旱胁迫下的敏感程度进行分析,用得出的关联度值表征各指标对干旱的敏感程度。由表 4 可知,这 6 种草本植物整体上 RWC 与 Pro 含量对干旱表现较高的敏感度,MDA 含量及叶片叶绿素含量对干旱胁迫的敏感度较低。

表 3 各植物隶属函数值及抗旱性综合评价

处理 时间 (d)	植物	隶属函数值					抗旱性 能综合 排序
		脯氨酸 含量	MDA 含量	RWC	叶绿素 含量	综合	
10	铺地黍	0.09d	1.00a	1.00a	0d	0.52bc	Ⅳ
	李氏禾	1.00a	0.21c	0.20c	1.00a	0.60b	Ⅱ
	香根草	0.20c	0.08d	0.53bc	0.93a	0.43c	Ⅴ
	狗牙根	0d	0.86b	0.77b	0.66c	0.57b	Ⅲ
	芦苇	0.59b	0.72b	0.70b	0.92a	0.73a	Ⅰ
	芦竹	0.28c	0d	0d	0.84b	0.28d	Ⅵ
	铺地黍	0.61b	1.00a	0.58b	0d	0.55b	Ⅲ
20	李氏禾	1.00a	0.88b	0.52b	0.65b	0.76a	Ⅰ
	香根草	0.04d	0.73bc	0d	0.12cd	0.22c	Ⅵ
	狗牙根	0.19c	0.83b	1.00a	0.32c	0.58b	Ⅱ
	芦苇	0d	0d	0.01d	1.00a	0.25c	Ⅴ
	芦竹	0.48bc	0.24c	0.32c	0.15cd	0.30c	Ⅳ
	铺地黍	1.00a	1.00a	0.96a	1.00a	0.99a	Ⅰ
	李氏禾	0.26cd	0.55bc	0.75b	0.35c	0.48bc	Ⅳ
30	香根草	0d	0.07	0.62bc	0d	0.17d	Ⅵ
	狗牙根	0.70b	0.88b	0.58bc	0.95a	0.78b	Ⅱ
	芦苇	0.45c	0d	0d	0.70b	0.29cd	Ⅴ
	芦竹	0.57c	0.33c	1.00a	0.55bc	0.61b	Ⅲ

表 4 6 种草本植物各指标与抗旱隶属函数值关联度

名称	脯氨酸含量	MDA 含量	RWC	叶绿素含量
铺地黍	0.601 1c	0.642 5c	0.998 8a	0.752 2c
李氏禾	0.915 1a	0.817 1ab	0.973 1a	0.624 0cd
香根草	0.995 1a	0.698 4b	0.926 9a	0.943 5a
狗牙根	0.999 7a	0.710 1b	0.920 5a	0.872 8b
芦 苇	0.923 4a	0.854 1a	0.649 3d	0.550 6d
芦 竹	0.604 2c	0.872 7a	0.715 2c	0.849 1b
关联度	0.839 7b	0.765 8ab	0.863 9b	0.765 4c
关联度排序	2	3	1	4

3 结论与讨论

本研究探讨 6 种常见草本植物在干旱胁迫下各生理生化指标的变化,以及对抗旱性能进行比较,以期为华南地区水库消落带植被恢复植物选择提供参考。

干旱是影响植物生存最大的非生物胁迫之一。通过影响植物的一系列生理过程,进而影响植物的生长和生产力^[25]。水库消落带以特殊的生态系统,长期处于水淹环境下,同时周期性地出露于水面,这就需要面对干旱气候的胁迫,这在华南地区尤为突出。干旱胁迫不容忽视^[26-27]。有研究指出,在持续干旱条件下,MDA 含量逐渐上升,而且抗旱性越强的品种 MDA 含量上升幅度越小^[28]。植物体内脯氨酸含量在一定程度上反映了植物的抗逆性,由于脯氨酸亲水性极强,能稳定原生质胶体及组织内代谢过程,因而可提高植物的抗旱性^[29]。抗旱性强的品种往往积累较多的脯氨酸^[27,30-31]。谷战英等认为,随着水分胁迫的加深,叶绿素含量的变化幅度越小,品种的抗旱性越强^[32]。吕静等得出几种暖季型草坪草叶绿素含量随着干旱胁迫的加深而变小的结论^[33]。李吉跃把植物的耐旱机制分为 3 类:(1)逃避干旱;(2)高水势延迟脱水耐旱;(3)低水势忍耐脱水耐旱。植物进行高水势延迟脱水,以

保持水分吸收和减少水分丧失为主,而本试验是在土壤无持续供水及高温高蒸发的环境下进行的,RWC 将在一定程度上直接反映植物的耐旱能力^[34]。综合“2.2”至“2.5”节各植株在干旱胁迫下的生理生化指标变化情况可知,不同植物同一生理生化指标在干旱胁迫下的变化差异明显,同一植物不同生理生化指标在干旱胁迫下呈现不同的变化趋势,只有综合各指标的变化状况才能客观地评价各植物的抗旱性能。根据各植株在干旱阶段 30 d 时隶属函数值得出,6 种草本植物的抗旱性能高低顺序为铺地黍>狗牙根>芦竹>李氏禾>芦苇>香根草。

由于高温蒸发作用,基底土壤含水量均出现一定程度的下降,这种下降直接反映在植株生长上,铺地黍和狗牙根在干旱胁迫下仍维持较高的生长量,香根草和芦苇生长量较低,这与李铭怡等的结论略有不同,同时有报道指出,土壤含水量下降到一定程度时,其植物膜脂遭破坏而出现抗旱性能降低,同时吕静等得出在干旱胁迫下,某些植物的水分饱和亏可以保持在较低水平,而土壤含水量显著高于其他品种,表明植物的抗旱机制可能主要体现在保持体内高水势的御旱机制上^[33,35-39]。本研究将各植株干旱至 30 d 的土壤含水量与抗旱隶属函数值进行关联度分析,得出其关联系数高达 0.852 6,相关性显著($P<0.05$),说明某些植物可能通过本身的特点影响土壤水分蒸发强度,从而间接影响自身的抗旱性能。

各植物在不同的干旱阶段呈现出不同的抗旱反应,同时各植物的 4 种指标也对干旱表现出不同的敏感程度,这说明各指标在植物处于干旱环境下所表现出来的响应机制和所处的角色不同。余莉琳等研究指出,叶绿素含量和相对含水量对干旱胁迫的反应最为敏感,各指标与植物的抗旱性关联度在 0.45~0.97 之间^[40],与周江等的结果^[27]相同,但关联度大小变化较大,同时也有较多研究得出不同的结果^[41-42]。本研究结果表明,各指标与干旱胁迫下的植物的关联度大小为 RWC>Pro 含量>MDA 含量>叶绿素含量,与周江等的结果^[27]略有不同,抗旱性关联度在 0.76~0.87 间,得出的关联度较大,这可能与华南地区高温气候有一定关联。

针对 6 种植物的抗旱性能的筛选,得出铺地黍、狗牙根的抗旱性能相对较强,这说明铺地黍、狗牙根是能适应华南地区消落带炎热干旱环境的优势物种,这将为华南地区水库消落带植被恢复植物的选择及配置提供有力依据。虽然针对水淹之后考察植物的耐旱性已有相关报道,但植物类型单一,且水淹试验并未按照水库实际水位节律变化进行设计,这些问题都使结合水淹实际环境进行植物耐旱性研究仍是趋势;同时结合实际消落带环境探讨不同植物的生理生化指标变化情况,并进行植物筛选,有待进一步研究^[43-44]。

参考文献:

[1] 白宝伟,王海洋,李先源,等. 三峡库区淹没区与自然消落区现存植被的比较[J]. 西南农业大学学报(自然科学版),2005,27(5):684-687,691.
[2] Bao Y H, Gao P, He X B. The water-level fluctuation zone of three gorges reservoir - a unique geomorphological unit [J]. Earth - Science Reviews,2015,150:14-24.

- [3] Yin X A, Yang Z F. A method to assess the alteration of water – level – fluctuation patterns in lakes [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 2427 – 2436.
- [4] Zhang B, Guo J S, Fang F. Concentration of nutrients in the soil in water – level – fluctuating zone of three gorges reservoir [J]. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 2012, 12(2): 105 – 114.
- [5] 艾丽皎, 吴志能, 张银龙. 水体消落带国内外研究综述[J]. *生态科学*, 2013, 32(2): 259 – 264.
- [6] Zhang Z Y, Wan C Y, Zheng Z W. Plant community characteristics and their responses to environmental factors in the water level fluctuation zone of the three gorges reservoir in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20 (10): 7080 – 7091.
- [7] 吕明权, 吴胜军, 陈春娣, 等. 三峡消落带生态系统研究文献计量分析[J]. *生态学报*, 2015, 35(11): 3504 – 3518.
- [8] Grabau M R, Milczarek M A, Karpiscak M M, et al. Direct seeding for riparian tree re – vegetation: small – scale field study of seedling methods and irrigation techniques[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(6): 864 – 872.
- [9] Ruwansa S, Gaertner M, Esler K J, et al. The effectiveness of active and passive restoration on recovery of indigenous vegetation in riparian zones in the Western Cape, South Africa: a preliminary assessment [J]. *South African Journal of Botany*, 2013, 88: 132 – 141.
- [10] 卢晓强, 杨万霞, 奚月明. 茂兰喀斯特地区不同植被恢复类型对土壤化学及微生物生物量的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(5): 73 – 80.
- [11] 宋祥兰, 王兰英, 邝先松, 等. 赣南废弃稀土矿区植被恢复模式实验[J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(6): 58 – 62.
- [12] 樊大勇, 熊高明, 张爱英, 等. 三峡库位水位调度对消落带生态修复中物种筛选实践的影响[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(4): 416 – 432.
- [13] 冯大兰, 刘 芸, 黄建国, 等. 三峡库区消落带芦苇穗期光合生理特性研究[J]. *水生生物学报*, 2009, 33(5): 866 – 873.
- [14] 郭泉水, 洪 明, 康 义, 等. 消落带适生植物研究进展[J]. *世界林业研究*, 2010(4): 14 – 20.
- [15] 付奇峰, 方 华, 林建平. 华南地区水库消涨带生态重建的植物筛选[J]. *生态环境*, 2008, 17(6): 2325 – 2329.
- [16] 方 华, 陈天富, 林建平, 等. 李氏禾的水土保持特性及其在新丰江水库消涨带的应用[J]. *热带地理*, 2003, 23(3): 214 – 217.
- [17] 马利民, 唐燕萍, 张 明, 等. 三峡库区消落区几种两栖植物的适生性评价[J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 1885 – 1892.
- [18] 冯大兰, 刘 芸, 钟章成, 等. 三峡库区消落带芦苇 [*Phragmites communis* (reed)] 的光合生理响应和叶绿素荧光特性[J]. *生态学报*, 2008, 28(5): 2013 – 2021.
- [19] 谭淑端, 朱明勇, 党海山, 等. 三峡库区狗牙根对深淹胁迫的生理响应[J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3685 – 3691.
- [20] Tan S D, Zhu M Y, Zhang Q F. Physiological responses of Bermudagrass (*Cynodon dactylon*) to submergence [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2010, 32(1): 133 – 140.
- [21] 周明涛, 杨 平, 许文年, 等. 三峡库区消落带植物治理措施[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(4): 90 – 94.
- [22] 高艳芝, 宗俊勤, 孟 璠, 等. 不同暖季型草坪草耐淹性能评价[J]. *草地学报*, 2014, 22(5): 1021 – 1030.
- [23] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 2 版. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [24] 章家恩. 生态学常用实验研究方法与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [25] Barigah T S, Charrier O, Douris M, et al. Water stress induced xylem hydraulic failure is a causal factor of tree mortality in beech and poplar[J]. *Annals of Botany*, 2013, 112(7): 1431 – 1437.
- [26] 李 强, 高 祥, 丁武泉, 等. 常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响[J]. *环境科学*, 2012, 33(8): 2628 – 2633.
- [27] 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.
- [28] 刘 茜. 樟树叶片蒸腾特性及其与生理生态因子关系分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2009, 29(1): 1 – 5.
- [29] Barnett N M, Naylor A W. Amino acid and protein metabolism in bermuda grass during water stress[J]. *Plant Physiology*, 1966, 41(7): 1222 – 1230.
- [30] 汝 红, 王瑞贞, 常海飞, 等. 干旱胁迫下早熟禾幼苗几种抗旱性指标的变化[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(34): 17258 – 17259.
- [31] 胡化广, 张振铭, 郭 敏. 四种草坪草对干旱胁迫的反应及抗旱性评价[J]. *节水灌溉*, 2011(11): 37 – 40.
- [32] 谷战英, 谢碧霞, 梁文斌, 等. NAA 处理对圣诞红幼苗抗旱性的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2008, 28(5): 64 – 67.
- [33] 吕 静, 刘卫东, 王 丽, 等. 4 种暖季型草坪草的抗旱性分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2010, 30(3): 100 – 104.
- [34] 李吉跃. 植物耐旱性及其机理[J]. *北京林业大学学报*, 1991, 13(3): 92 – 100.
- [35] 郝彦宾, 王艳芬, 崔晓勇. 干旱胁迫降低了内蒙古羊草草原的碳积累[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(8): 898 – 906.
- [36] 郎 莹, 汪 明. 春、夏季土壤水分对连翘光合作用的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(9): 3043 – 3051.
- [37] 李铭怡, 刘 刚, 肖 海. 香根草光合特性对水淹 – 干旱交替胁迫的响应[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(2): 48 – 52.
- [38] 缪福俊, 罗 珺, 王宏虬, 等. 马铃薯幼苗的抗旱特性及磷钾肥对其抗旱性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(5): 92 – 94.
- [39] 张 俊, 刘 娟, 汤丰收, 等. 不同花生品种抗旱生理特性的差异[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(12): 114 – 117.
- [40] 余莉琳, 裴宗平, 孔 静, 等. 干旱胁迫下四种矿区生态修复植物的抗旱性研究[J]. *北方园艺*, 2013(12): 61 – 64.
- [41] 陈秀晨, 王士梅, 朱启升, 等. 水稻品种耐热性与相关生化指标的关联分析[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(9): 1633 – 1639.
- [42] 谢小玉, 张 霞, 张 兵. 油菜苗期抗旱性评价及抗旱性指标变化分析[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(3): 476 – 485.
- [43] 白林利, 李昌晓. 水淹对水杉苗木耐旱性的影响[J]. *林业科学*, 2014, 50(11): 166 – 174.
- [44] Liu Z B, Cheng R M, Xiao W F. Leaf gas exchange, chlorophyll fluorescence, non – structural carbohydrate content and growth responses of *Distylium chinense* during complete submergence and subaerial reemergence[J]. *Aquatic Botany*, 2015, 124: 70 – 77.