

干旱胁迫下青藏高原 4 种灌木生物量和根系变化特征及抗旱性

邱 权¹, 李吉跃^{1*}, 王军辉², 何 茜¹, 苏 艳¹, 马建伟³,
杜 坤³, 潘 昕¹

(1. 华南农业大学 林学院, 广东 广州 510642; 2. 中国林业科学研究院 林业研究所,
国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091; 3. 甘肃省小陇山林业科学研究所, 甘肃 天水 741022)

摘 要: 以江孜沙棘 (*Hippophae gyantsensis*)、锦鸡儿 (*Caragana sinica*)、砂生槐 (*Sophora moorcroftiana*)、唐古特蕀 (*Caryopteris tangutica*) 4 种青藏高原灌木树种为试材进行干旱胁迫模拟盆栽试验, 通过对比干旱胁迫后 4 种灌木生物量和根系特征值的数量变化差异, 对供选树种进行抗旱性能分析与评价。结果表明, 锦鸡儿根冠比增加最多 (233.43%), 而砂生槐则基本保持稳定, 江孜沙棘和唐古特蕀则呈现不同程度的增加。干旱胁迫后 4 种灌木微细根根长、表面积、根尖数均呈现不同程度的增加, 其中唐古特蕀根长增加最大, 达 112.11%, 江孜沙棘次之, 锦鸡儿和砂生槐分别增加了 38.84% 和 24.55%; 根表面积方面, 干旱条件下的苗木比对照增加幅度的大小为: 唐古特蕀 > 江孜沙棘 > 砂生槐 > 锦鸡儿; 根尖数增幅介于 45.89%~57.29% 之间。干旱胁迫后锦鸡儿微细根表面积、根尖数占全根比例下降, 而其他 3 种灌木根系特征值占全根比例均呈上升趋势。隶属函数值综合评价表明, 抗旱性强弱顺序为: 唐古特蕀 > 锦鸡儿 > 江孜沙棘 > 砂生槐。

关键词: 青藏高原; 灌木; 生物量; 根系特征; 抗旱性

中图分类号: S718.556

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2013)03-0001-06

Biomass and Root System Characteristics and Drought Resistance of 4 Shrubs in Tibetan Plateau under Drought Stress

QIU Quan¹, LI Ji-yue^{1*}, WANG Jun-hui², HE Qian¹, SU Yan¹, MA Jian-wei³, DU Kun³, PAN Xin¹

(1. College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 3. Xiaolongshan Research Institute of Forestry, Tianshui, Gansu 741022, China)

Abstract: Four native shrubs (*Hippophae rhamnoides*, *Caragana sinica*, *Sophora moorcroftiana*, and *Caryopteris tangutica*) occurring in Tibetan Plateau were selected for potted experiment for simulating drought stress. The drought resistance of the chosen species was analyzed and evaluated through the comparison of the changes of biomass and root characteristics to provide scientific basis for the selection of drought resistant shrub species in the region. The results showed that *C. sinica* exhibited the largest increment in root shoot ratio (233.43%), the ratio was stable for *S. moorcroftiana*, and increased in various degrees for *H. rhamnoides* and *C. tangutica*. On the other hand, fine root length, surface area and amount of root tip of 4 shrubs under drought stress increased in different degrees. *C. tangutica* had a largest increase in root length, reaching to 112.11%, *H. rhamnoides* was the second, *C. sinica* and *S. moorcroftiana* increased by 38.84% and 24.55%, respectively. For the root surface area, compared with seedlings under

收稿日期: 2012-09-27 修回日期: 2012-10-18

基金项目: 林业公益性行业科研专项 (200904033); 农业科技成果转化项目 (2011GB24320010)。

作者简介: 邱权, 男, 在读硕士, 研究方向: 栽培生理生态。E-mail: qiuquan89@163.com

* 通信作者: 李吉跃, 男, 博士, 教授, 研究方向: 森林培育、栽培生理生态。E-mail: ljyymy@vip.sina.com

normal water condition,the amplitude of the increase of 4 species was in the order of *C. tangutica*>*H. rhamnoides*>*S. moorcroftiana*>*C. sinica*. Amounts of root tip increased between 45.89% to 57.29%. *C. sinica* demonstrated decreases in surface area of fine roots and the proportion of small fine roots to total roots, while other 3 species exhibited increases in the ratio of root eigenvalues to the total roots. Comprehensive evaluation results of subordinate function value showed that the order of drought resistance was *C. tangutica*>*C. sinica*>*H. rhamnoides*>*S. moorcroftiana*.

Key words: Tibetan Plateau; shrub; biomass; root system characteristic; drought resistance

青藏高原具有典型的高原干旱、寒冷气候特征,生态环境处于持续退化状态之中,而通过栽植抗旱的固沙固土植物,结合水土保持工程措施是改造和利用干旱、半干旱地区土地,防治环境进一步恶化的有效手段,筛选出最佳的抗逆树种便是这项工作中的重点。有研究表明,干旱条件下苗木生物量分配状况可以一定程度反映苗木的抗旱性能差异^[1-2],而根系与土壤水分有密切的关系,在植物干旱胁迫响应过程中发挥着重要作用^[3-5],研究干旱胁迫对青藏高原灌木生物量和根系特征的影响对于筛选出最佳的抗逆树种有重要的意义。一般认为,植物遭受干旱胁迫后会通过调整自身的营养物质分配,导致根系生物量增加,根茎比增加,但树种不同生物量分配方式也有所不同^[1,6]。目前的研究主要关于干旱胁迫对玉米(*Zea mays*)^[7]、水稻(*Oryza sativa*)^[8]等农作物,茶树(*Camellia sinensis*)^[9]、荔枝(*Litchi chinensis*)^[10]等经济作物,油松(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等黄土高原主要造林树种^[1]以及黄栌(*Cotinus coggygria*)^[11]、桉树(*Eucalyptus*)^[12]等根系特征的影响。其中陈明涛^[1]等对黄土高原 4 种造林树种的研究表明不同的干旱程度下根系生物量和微细根特征值变化在树种之间存在明显的差异,但总体上看一定程度的干旱胁迫促进根系生物量和微细根特征值的增加。而单长卷^[13]等对冬小麦(*Triticum aestivum*)幼苗的研究表明水分胁迫导致根的伸长与分生能力减弱,根长缩短,根条数减少。研究中通常把根系划分为微细根(small fine roots,直径≤2 mm),粗细根(coarse fine roots,2~5 mm),粗根(coarse roots,>5 mm)。微细根是主要的吸收和代谢根,表皮薄、幼嫩、膜透性强,通过大量的根呼吸提供能量进行水分、矿物养分的吸收和运输。根特征值的数量在微细根中最大,粗细根中急剧下降,粗根中最小^[13-14],相差高达 25.9 倍^[14]。根特征值比根生物量对土壤环境变化更敏感^[15-19],微细根特征值的变化更能直接体现灌木对于干旱胁迫的响应,而关于此方面内容的研究报道不多。本研究以江孜沙棘、锦

鸡儿、砂生槐、唐古特蕨 4 种青藏高原灌木树种为试材进行干旱胁迫模拟盆栽试验,通过对比干旱胁迫后 4 种灌木生物量和根系特征值的数量变化差异,综合分析及评价其抗旱性能的差异,为青藏高原干旱地区灌木树种抗逆性(耐旱)评价指标的建立及优良抗逆灌木树种的筛选提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

选择青藏高原 4 种灌木:江孜沙棘(*Hippophae gyantsensis*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)、砂生槐(*Sophora moorcroftiana*)、唐古特蕨(*Caryopteris tangutica*)的 1 年生播种苗(表 1)。2011 年 3 月于甘肃小陇山林业科学研究所大棚内采用 30 cm×30 cm 的花盆盆栽,每树种 60 盆,采用森林土:泥炭土:鸡粪:7:2:1 的土壤作为基质(森林土取自甘肃小陇山林科所附近山地森林),其容重为(0.89±0.04)g·cm⁻³,田间持水量为(57.11±4.11)%,待苗木恢复生长至 6 月下旬后进行试验处理。

表 1 苗木生长情况

Table 1 Growth status of the seedlings

树种	地径/mm	苗高/cm
江孜沙棘	8.46±1.25	58.11±8.52
锦鸡儿	7.92±1.00	64.78±12.01
砂生槐	4.26±1.15	52.56±7.58
唐古特蕨	8.40±1.12	69.78±6.59

1.2 方法

1.2.1 干旱处理 2011 年 7 月将供试树种分对照和干旱 2 组,每组 30 盆。对照组正常浇水,干旱组进行自然干旱处理,直至苗木处于严重干旱胁迫程度。用土壤含水量快速测定仪(EM50 测定)每隔 2 d 监测干旱组苗木的土壤含水量,当盆内土壤质量含水量下降至田间持水量 30%时,可视作达到严重干旱胁迫。

1.2.2 采样和分析 当灌木树种盆栽土壤达到严重干旱胁迫时,同步从对照和干旱胁迫处理苗木中各取 6 株苗木整株根系(外业获取的根系放入冰盒中保鲜,防止根系脱水,体积变小)置于密封袋带回实验室后用根系扫描系统分析根系形态特征(表面

积、根长、根尖数),并对根系进行分级,重点研究微细根根长、表面积及根尖数。根系分析方法参考王冉^[20]等和何茜^[21]等。根系扫描仪为中晶 ScanMaker i800 Plus,分析软件为万深 LA-S 植物根系分析系统(杭州万深检测科技有限公司)。处理前,将根系样品从冰盒中取出,用清水小心冲洗掉根系表面的泥土。如遇到很细的根,则在根系下面放置 100 目筛以防止脱落的根系被水冲走。翻盆后收获地上部分(注意收集落叶)和全部根系,之后将所有地上和地下部分样品置于实验室在 70℃ 下烘干 48 h,称取干质量,分别记录根、茎、叶 3 个器官生物量。最后用隶属函数平均值判断抗旱性大小。

隶属函数值计算公式:

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

式中, $U(X_i)$ 为隶属函数值, X_i 为指标测定值, X_{\max} 、 X_{\min} 为所有参试品种某一指标的最大值和最小值。

1.3 数据处理

采用 Excel 2003 作图、SPSS16.0 进行 ANOVA 方差分析和多重比较(Duncan 法)。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对根系及地上部分生物量的影响

4 种灌木之间正常和干旱条件下的根系、地上部分生物量以及根冠比均表现出一定差异性,并且干旱胁迫下不同的灌木种类和苗木器官生物量的变化有所不同(图 1~图 3)。正常水分条件下,唐古特蕯根冠比显著高于其他 3 种灌木,砂生槐最低,锦鸡儿和江孜沙棘居中。与对照相比,受到干旱胁迫后 4 种灌木根系的生物量表现出不同程度的增加,其增幅大小为:锦鸡儿(136.52%)>砂生槐(19.23%)>唐古特蕯(2.79%)>江孜沙棘(0.84%)。与正常对照相比,干旱胁迫后 4 种苗木地上部分(茎和叶)总生物量均有所减小,其中江孜沙棘降幅最大(52.16%),砂生槐降幅最小(0.90%),锦鸡儿和唐古特蕯降幅分别为 29.12%和 32.18%(图 2)。正常和干旱条件下 4 种灌木根冠比均差异性显著($p<0.05$)。图 3 和图 4 表明,当苗木遭受干旱胁迫时,根系生物量增加,而地上部分生物量减小,以致根冠比随之增加,增幅大小为锦鸡儿(233.43%)>江孜沙棘(11.27%)>唐古特蕯(51.45%)>砂生槐(18.99%)。

总体来讲,苗木受到干旱胁迫后,锦鸡儿根系生物量增加最快,地上部分降低也较快,导致根冠比比正常状态增加了 233.4%,表现出了对于旱逆境极强的敏感性,而砂生槐则极为不敏感,与正常状态相

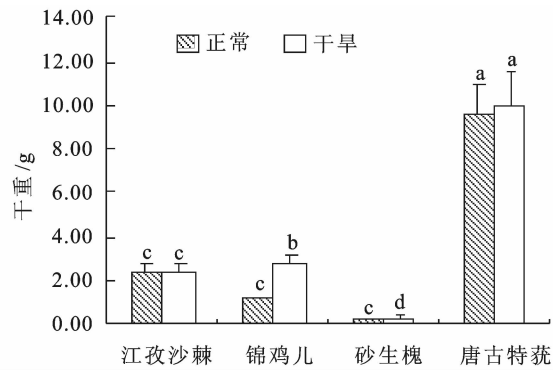


图 1 灌木地下部分生物量

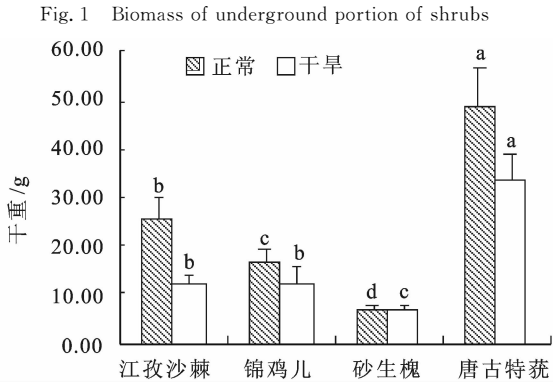


图 2 灌木地上部分生物量

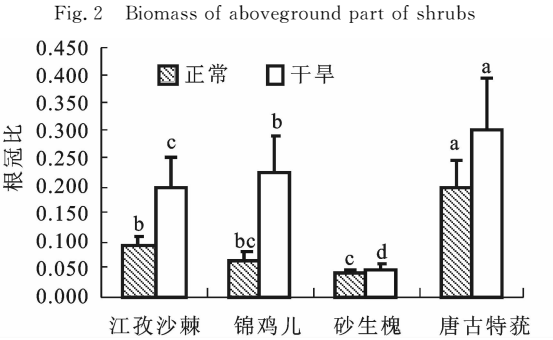


图 3 灌木根冠比

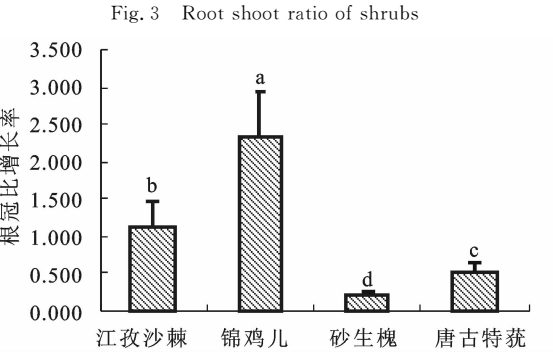


图 4 干旱胁迫后灌木根冠比增长率

Fig. 4 Growth rate of root shoot ratio of shrubs under drought stress condition

比,其根系、地上部分生物量基本保持稳定。江孜沙棘和唐古特蕯在受到干旱胁迫后各器官生物量均发生较明显的变化,说明干旱对其各器官生物量具有直接的影响。

2.2 干旱胁迫对微细根特征值的影响

4 种灌木正常和干旱条件下微细根根长、表面积、根尖数均差异性显著($p<0.05$)。由表 2 可知,正常和干旱条件下树种间微细根根长、表面积、根尖数均差异性显著。就正常水分条件下灌木微细根特征值而言,唐古特莢微细根根长、表面积、根尖数均显著高于其他 3 种灌木,而砂生槐这 3 项指标均为 4 种灌木中最低的,锦鸡儿和江孜沙棘居中。与正常状态相比,干旱胁迫后 4 种灌木微细根根长、表面积、根尖数均呈现不同程度的增加,其中干旱胁迫后唐古特莢根长增加最大,达到了 112.11%,江孜沙

棘次之,锦鸡儿和砂生槐分别增加了 38.84%和 24.55%。根表面积方面,干旱条件下的苗木比对照增加幅度的大小为:唐古特莢>江孜沙棘>砂生槐>锦鸡儿。另外,4 种灌木根尖数增加幅度基本一致,介于 45.89%~57.29%之间。就根长、表面积、根尖数 3 个指标综合来看,唐古特莢微细根特征值变化最为显著,江孜沙棘次之,砂生槐和锦鸡儿则相对稳定,由此说明受到干旱胁迫后,唐古特莢微细根敏感程度最高,能迅速对干旱胁迫做出生理反应,其他 3 种灌木也通过不同程度增加微细根特征值来适应逆境。

表 2 不同水分条件下 4 种灌木微细根根长、表面积和根尖数

树种	根长/cm		表面积/cm ²		根尖数	
	正常	干旱	正常	干旱	正常	干旱
江孜沙棘	417.58±57.33c	621.86±59.41c	20.46±5.03c	34.80±5.69c	531.50±64.33c	836.00±70.45c
锦鸡儿	733.01±66.53b	1 017.70±67.72b	41.52±2.43b	47.08±2.77b	1 211.33±270.23b	1 870.00±282.95b
砂生槐	211.47±51.33d	263.40±53.81d	7.88±3.52d	13.04±3.96d	199.50±40.32d	312.00±45.57d
唐古特莢	2 143.75±194.51a	4 547.11±296.65a	104.23±34.23a	249.64±36.11a	3 772.33±500.09a	5 503.33±324.56a

注:不同字母表示树种之间差异性显著($p<0.05$),下同。

2.3 干旱胁迫对微细根特征值占全根比例的影响

由表 3 可以看出,在正常水分条件下,锦鸡儿和唐古特莢微细根根长占全根比例显著高于江孜沙棘和砂生槐,达到 90%左右。锦鸡儿微细根表面积占全根比例显著高于其他 3 种灌木,而江孜沙棘、砂生槐和唐古特莢微细根表面积占全根比例差异不显著,4 种灌木微细根根尖数占全根的比例存在显著性差异,其大小关系为:锦鸡儿>唐古特莢>江孜沙棘>砂生槐。在正常状态下,4 种灌木微细根特征值占全根的比例而言,锦鸡儿微细根根长、根表面积、根尖数这 3 项指标占全根比例均为最高,由于其独特的根系特征,表现出了最强的水分吸收能力,唐古特莢次之,砂生槐和江孜沙棘则吸水能力相对较弱。当受到干旱胁迫后,4 种灌木微细根特征值占全根比例变化有所不同,其中,江孜沙棘、砂生槐和唐古特莢均呈现增加趋势,而锦鸡儿微细根表面积、

根尖数占全根的比例分别下降了 11.52%和 17.12%。从这一点可以看出,一定程度干旱胁迫可以促进灌木大幅增加微细根比例来提高吸水能力,但严重干旱胁迫则会一定程度限制微细根比例的增加。对于江孜沙棘、砂生槐和唐古特莢微细根根长、表面积和根尖数占全根比例增幅大小顺序分别为:江孜沙棘(131.22%)>砂生槐(91.93%)>唐古特莢(8.66%)、唐古特莢(344.31%)>江孜沙棘(212.60%)>砂生槐(139.92%)和江孜沙棘(167.33%)>砂生槐(109.32%)>唐古特莢(66.10%)。综合微细根特征值占全根比例的变化趋势,江孜沙棘对干旱胁迫响应最为迅速,砂生槐和唐古特莢也能一定程度增加微细根比例来适应干旱逆境,而受到严重干旱胁迫后锦鸡儿全根中微细根比例受到了一定程度的抑制。

表 3 不同水分条件下灌木微细根根长、表面积和根尖数分别占全根的比例

树种	微细根根长占全根比例/%		微细根表面积占全根比例/%		微细根根尖数占全根比例/%	
	正常	干旱	正常	干旱	正常	干旱
江孜沙棘	38.72±9.15b	89.53±18.19b	8.57±1.17b	26.79±8.13b	30.00±9.24c	80.20±18.23a
锦鸡儿	90.04±15.23a	92.26±19.21ab	31.59±9.36a	27.95±8.15b	85.61±9.38a	70.95±17.45b
砂生槐	37.29±8.46b	71.57±16.28c	7.24±1.25b	17.32±7.22c	23.06±6.27d	48.27±9.27c
唐古特莢	89.47±17.38a	97.22±22.34a	11.24±1.37b	49.94±5.33a	43.84±11.28b	72.82±16.39b

2.4 4 种灌木抗旱性能综合评价

植物的抗旱性是一种复杂综合的性状,受多种因素的影响和制约。方差分析结果表明 4 种灌木根冠

比、微细根根长、表面积、根尖数 4 个指标干旱胁迫下变化值(即各指标严重干旱时期数值与正常对照数值的差值)均存在显著性差异($p<0.05$)。因此可选择

此 4 项指标变化值综合分析各灌木生物量和微细根特征,对 4 种灌木的抗旱性能差异进行隶属函数值综合评价结果(表 4)表明,4 种灌木抗旱性能强弱顺序均为:唐古特莠>锦鸡儿>江孜沙棘>砂生槐。

表 4 4 种灌木抗旱生理指标隶属函数值及综合评价

Table 4 Subordinate function values of 4 shrubs species and their comprehensive evaluation results of drought resistance						
树种	根冠比	根长	表面积	根尖数	隶属函数平均值	排名
江孜沙棘	0.638	0.065	0.065	0.118	0.222	3
锦鸡儿	1.000	0.099	0.003	0.337	0.360	2
砂生槐	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4
唐古特莠	0.631	1.000	1.000	1.000	0.908	1

3 结论与讨论

通过对 4 种灌木生物量和微细根特征值进行综合分析,用抗旱性隶属函数法选择根冠比、微细根根长、表面积、根尖数这 4 项指标干旱胁迫后变化值对苗木抗旱性能进行综合评价,结果表明唐古特莠抗旱性能最好,砂生槐最差,锦鸡儿和江孜沙棘居中。

根系的功能主要取决于根表面积,它反映根系的吸收能力,可作为衡量根系质量的一个重要标准^[21]。根长、根尖数也是衡量根系质量的重要指标^[7],根系越长说明根系可吸收利用水分范围越大,根尖数越多说明须根越多,吸水能力越强。当植物遭受干旱胁迫时,植物的营养物质分配会产生相应的变化,干旱胁迫会促进植物根冠比的增加^[1,22]。研究表明,干旱逆境导致 4 种灌木根系生物量增加,而地上部分生物量减小,根冠比增加,其中锦鸡儿对于干旱逆境响应最迅速,根冠比增加最多,而砂生槐则基本保持稳定,江孜沙棘和唐古特莠则呈现不同程度的增加。另一方面,干旱胁迫后,4 种灌木微细根特征值均出现不同程度的增加,灌木通过增加微细根根系长度,增大根系面积,增加根尖数,以尽可能吸收土壤中有限的水分。有研究表明,微细根特征值数量最大化的作用在于增大全根系的表面积^[23],占有更多的土壤空间和资源^[13,24],与本研究 4 种灌木的根系特征值变化趋势一致。就微细根特征值变化趋势来看,唐古特莠对于干旱逆境最敏感,增幅最大,江孜沙棘增幅较大,而砂生槐和锦鸡儿则相对稳定。干旱条件下物质分配格局在根系内部也有很大差异,表现为显著增加微细根生物量在总根系中的比例^[25-26],进而微细根特征值占全根的比例相应增加。本研究中受到严重干旱胁迫后 4 种灌木中江孜沙棘、砂生槐和唐古特莠微细根特征值占全根的比例大幅增加,进一步支持了这一结论。另一方面,严重的干旱胁迫导致锦鸡儿微细根表面积和根尖数占全根的比例有所下降,说明严重的干旱胁迫抑制根系活性^[13,27]、限制根系生长^[11]的现象在灌木中也存在,可能与微细根和粗根对于干旱胁迫的敏感程度不一致有关。

植物根系生长动态与土壤水分状况具有密切联系^[28-29],英慧^[28]等研究表明土壤水分会对根系生长动态和周转产生直接影响。综合来看,灌木树种对于干旱逆境的生理响应机制有所不同。营养物质分配方面,锦鸡儿和砂生槐主要通过根系大量积累营养物质来促进根系生长来适应逆境,而江孜沙棘则主要通过将地上部分营养物质转移至根系,生理上表现为受到干旱胁迫后其地上部分生物量降幅最大。微细根特征值方面,江孜沙棘和唐古特莠主要通过增加根系长度和增大根系表面积来扩大水分的吸收范围以充分利用水分,与陈明涛^[1]等和刘锦春^[22]等的研究结论一致。王迪海^[29]等通过对黄土高原刺槐(*Robinia pseudoacacia*)的研究表明其细根表面积动态变化与土壤含水量相关性不显著,而本研究中土壤水分条件对 4 种灌木微细根表面积有显著影响。干旱胁迫后 4 种灌木根尖数均增加并且增幅基本一致,由此可见,4 种苗木也存在一定的抗旱共性,均是通过迅速新生长出大量微细根,增强根系水分吸收能力来适应逆境,而对于确定每种灌木具体的抗旱生理响应机制还有待进一步研究。4 种灌木遭受干旱逆境时,生物量以及微细根对于干旱逆境的敏感程度不一致,进一步证实了关于根系特征值和生物量对土壤环境变化敏感程度不一致的相关研究^[15-18]。

本研究中抗旱性评价结果仅限于生物量和微细根特征值这两方面生理指标综合分析得出,而抗旱性能评价需要更加综合性的研究,对其他抗旱生理指标(耗水、渗透调节物质等)的研究能否得到类似结论还有待进一步研究。另一方面,本次研究采用盆栽幼苗作为研究对象,花盆可能会根系伸展产生一定影响,并且盆栽基质土壤非灌木树种自然生境土壤,也会对研究产生影响,因此,今后应当及时开展野外自然条件下各灌木树种生物量以及根系特征的相关研究。

致谢:感谢华南农业大学博士研究生陈博、硕士研究生李志华、谢堃、彭资,甘肃小陇山林业科学研究所相关工作人员对本试验提供的帮助。

参考文献:

- [1] 陈明涛,赵忠.干旱对4种苗木根系特征及各部分物质分配的影响[J].北京林业大学学报,2011,33(1):16-22.
CHEN M T,ZHAO Z. Effects of drought on root characteristics and mass allocation in each part of seedlings of four tree species[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(1):16-22. (in Chinese)
- [2] TOORCHI M,SHASHIDHAR H E,HITTALMANI S,*et al.* Rice root morphology under contrasting moisture regimes and contribution of molecular marker heterozygosity[J]. Euphytica,2002,126(2):251-257.
- [3] CHRISTMANN A,WEILER E W,STEUDLE E,*et al.* A hydraulic signal in root-to-shoot signaling of water shortage[J]. The Plant Journal,2007,52(1):167-174.
- [4] DODD I C. Root-to-shoot signaling; assessing the roles of “up” in the up and down world of long-distance signaling in plants[J]. Plant and Soil,2005,274(1/2):251-270.
- [5] WRIGHT R A,WEIN R A,DANCIK B P. Population differentiation in seedling root size between adjacent stands of jack pine[J]. Forest Science,1992,38(4):777-785.
- [6] 王秋菊,李明贤,赵宏亮,等.控水灌溉对水稻根系生长影响的试验研究[J].中国农学通报,2008,24(8):206-208.
WANG Q J,LI M X,ZHAO H L,*et al.* Study of the effect of control irrigation on the growth of rice root[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2008,24(8):206-208. (in Chinese)
- [7] 李博,田晓莉,王刚卫,等.苗期水分胁迫对玉米根系生长杂种优势的影响[J].作物学报,2008,34(4):662-668.
LI B,TIAN X L,WANG G W,*et al.* Heterosis of root growth in maize (*Zea mays* L.) seedling under water stress[J]. Acta Agronomica Sinica,2008,34(4):662-668. (in Chinese)
- [8] 高志红,陈晓远.聚乙二醇造成的水分胁迫对水稻根系生长的影响[J].华北农学报,2009,24(2):128-133.
GAO Z H,CHEN X Y. Effects of polyethylene glycol induced water stress on root growth of rice[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2009,24(2):128-133. (in Chinese)
- [9] 王家顺,李志友.干旱胁迫对茶树根系形态特征的影响[J].河南农业科学,2011,40(9):55-57.
WANG J S,LI Z Y. Effects of drought stress on root morphology of tea[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2011,40(9):55-57. (in Chinese)
- [10] 张承林,付子斌.水分胁迫对荔枝幼树根系与梢生长的影响[J].果树学报,2005,22(4):339-342.
ZHANG C L,FU Z S. Impact of water stress on the root and shoot growth of litchi seedlings[J]. Journal of Fruit Science, 2005,22(4):339-342. (in Chinese)
- [11] 孔艳菊,孙明高,胡学俭,等.干旱胁迫对黄栌幼苗几个生理指标的影响[J].中南林学院学报,2006,26(4):42-46.
KONG Y J,SUN M G,HU X J,*et al.* Effects of drought stress on several physiological indexes of *Cotinus coggygria* seedlings[J]. Journal of Central South Forestry University, 2006,26(4):42-46. (in Chinese)
- [12] 李林锋,刘新田.干旱胁迫对桉树幼苗的生长和某些生理生态特性的影响[J].西北林学院学报,2004,19(1):14-17.
LI L F,LIU X T. Effect of soil water stress on the growth and eco-physiological characteristics of *Eucalyptus seedling* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(1): 14-17. (in Chinese)
- [13] 单长卷,梁宗锁.土壤干旱对冬小麦幼苗根系生长及生理特性的影响[J].中国生态农业学报,2007,15(5):38-41.
SHAN C J,LIANG Z S. Effects of soil drought on root growth and physiological characteristics of winter wheat seedlings[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(5): 38-41. (in Chinese)
- [14] CHENG S,WIDDEN P,MISSIER C. Light and tree size influence belowground development in yellow birch and sugar maple[J]. Plant and Soil,2005,270(1):321-330.
- [15] CHENG S. Lorentzian model of roots for understory yellow birch and sugar maple saplings[J]. Journal of Theoretical Biology,2007,246(2):309-322.
- [16] BAKKER M R,KERISIT R,VERBIST K,*et al.* Effects of liming on rhizosphere chemistry and growth of fine roots and of shoots of sessile oak (*Quercus petraea*) [J]. Plant and Soil, 1999,217(1/2):243-257.
- [17] BLOCK R M A,VAN REES K C J,KNIGHT J D. A review of fine root dynamics in *Populus plantations* [J]. Agroforestry Systems,2006,67(1):73-84.
- [18] TRUBAT R,CORTINA J,VILAGROSA A. Plant morphology and root hydraulics are altered by nutrient deficiency in *Pistacia lentiscus* L. [J]. Trees-Structure and Function,2006, 20(3):334-339.
- [19] MOORE J D,CAMIRE C,OUIMET R. Effects of liming on the nutrition, vigor, and growth of sugar maple at the Lake Clair Watershed, Quebec, Canada [J]. Canadian Journal of Forest Research,2000,30(5):725-732.
- [20] 王冉,李吉跃,张方秋,等.不同施肥方法对马来沉香和土沉香苗期根系生长的影响[J].生态学报,2011,31(1):908-106.
WANG R,LI J Y,ZHANG F Q,*et al.* Growing dynamic root system of *Aquilaria malaccensis* and *Aquilaria sinensis* seedlings in response to different fertilizing methods [J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(1):908-106. (in Chinese)
- [21] 何茜,丁晓刚,王冉,等.指数施肥下黑木相思根系特征值的动态变化[J].广东林业科技,2011,27(5):1-6.
HE Q,DING X G,WANG R,*et al.* Root characteristics dynamic change of *Acacia melanoxylon* seedlings under index fertilization [J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2011,27(5):1-6. (in Chinese)
- [22] 刘锦春,钟章成.水分胁迫和复水对石灰岩地区柏木幼苗根系生长的影响[J].生态学报,2009,29(12):6439-6445.
LIU J C,ZHONG Z C. Influence of water stress and re-watering on the root growth of *Cupressus funebris* Endl. seedlings in the limestone area [J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(12): 6439-6445. (in Chinese)
- [23] 王立德,廖红,王秀荣,等.植物根毛的发生、发育及养分吸收[J].植物学通报,2004,21(6):649-659.
WANG L D,LIAO H,WANG X R,*et al.* Root hair initiation and development and nutrient uptake in plants [J]. Chinese Bulletin of Botany,2004,21(6):649-659. (in Chinese)

nal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3): 50-53. (in Chinese)

[13] 陈彩虹,叶道碧. 4 种人工林土壤酶活性与养分的相关性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(6): 64-68.
CHEN C H, YE D B. Study on the relationship between soil enzymes and nutrient of four artificial forests in Changsha urban rural fringe[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(6): 64-68. (in Chinese)

[14] 罗青红,宋锋惠,史彦江,等. 伊犁河流域新垦区杨树水保林水分生态效益研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 39-43.
LUO Q H, SONG F H, SHI Y J, *et al.* Research on ecological benefit to polar forest for soil and water conservation in the vergin exploit region of Iii river basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(6): 39-43. (in Chinese)

[15] 徐恒,廖超英,李晓明,等. 榆林沙区人工固沙林土壤微生物生态分布特征及酶活性研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2008, 36(12): 135-141.
XU H, LIAO C Y, LI X M, *et al.* Soil microorganism and enzyme activities under different artificial sand-fixing vegetations in the sandy area of Yulin[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2008, 36(12): 135-141. (in Chinese)

[16] 杨晓娟,廖超英,刘莉丽,等. 毛乌素沙地不同植被对土壤有机质和生物学特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2012, 40(3): 77-83.
YANG X J, LIAO C Y, LIU L L, *et al.* Effect of different vegetations on soil organic matter and biological properties in Muus sandland[J]. Journal of Northwest A&F University : Nat. Sci. Ed., 2012, 40(3): 77-83. (in Chinese)

[17] ADEBOYE M K A, IWUAFOR E N O, AGBENIN J O. The effects of crop rotation and nitrogen fertilization on soil chemical and microbial properties in a Guinea savanna Alfisol of Nigeria[J]. Plant and Soil, 2006, 281: 97-107.

[18] BEATE F, RAINER G J, ANDREAS B. Impact of legume versus cereal root residues on biological properties of West African soils[J]. Plant and Soil, 2009, 325: 145-156.

[19] 李亮,包耀贤,廖超英,等. 乌兰布和沙漠东北部沙区人工林土壤微生物及酶活性研究[J]. 西北植物学报, 2010, 30(5): 987-994.
LI L, BAO Y X, LIAO C Y, *et al.* Soil microorganism and enzyme activities under different artificial forests in the north-east of Ulanbuh desert[J]. Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin., 2010, 30(5): 987-994. (in Chinese)

[20] 余娜,刘济明,张超,等. 不同沙生植被土壤酶活性分异特征研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 77-81, 87.
YU N, LIU J M, ZHANG C, *et al.* Study on the differentiation characteristics of different sandy vegetation soil enzyme activities[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(1): 77-81, 87. (in Chinese)

(上接第 6 页)

[24] BOROWICZ V A, ALESSANDRO R, ALBRECHT U, *et al.* Effects of nutrient supply and below-ground herbivory by *Diaprepes abbreviatus* L. (Coleoptera: Curculionidae) on citrus growth and mineral content[J]. Applied Soil Ecology, 2005, 28(2): 113-124.

[25] WISON J B. Shoot competition and root competition[J]. Ecology, 1988, 25(1): 279-296.

[26] 王晓冬,叶生欣,沈海龙,等. 不同土壤水分条件对真桦幼苗形态特征、生物量及光合生理特征的影响[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(5): 22-24.
WANG X D, YE S X, SHEN H L, *et al.* Effect of soil water regimes on morphological characteristics, biomass and photosynthetic and physiological characters of *Betula maximowicziana* seedlings[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(5): 22-24. (in Chinese)

[27] 赵忠,李鹏. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征及抗旱性研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 96-99.
ZHAO Z, LI P. Researches on vertical root distributions and drought resistance of main planting tree species in Weiwei Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(1): 96-99. (in Chinese)

[28] 英慧,殷有,于立忠,等. 土壤水分、养分对树木细根生长动态及周转影响研究进展[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(3): 36-42.
YING H, YIN Y, YU L Z, *et al.* Effects of soil moisture and soil nutrient on the dynamic and turnover of the tree fine roots: a review[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(3): 36-42. (in Chinese)

[29] 王迪海,赵忠,张彦. 黄土高原刺槐细根与土壤水分特征[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(1): 1-5.
WANG D H, ZHAO Z, ZHANG Y. The fine root of *Robinia pseudoacacia* and soil moisture in the Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(1): 1-5. (in Chinese)