

曾继娟,李瑞芳,王国义,等. 水分胁迫对4种灌木幼苗生长与耗水特性的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(21):117-122.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.21.029

水分胁迫对4种灌木幼苗生长与耗水特性的影响

曾继娟,李瑞芳,王国义,朱强

(宁夏林业研究院股份有限公司/种苗生物工程国家重点实验室,宁夏银川750004)

摘要:以1年生树锦鸡儿、沙棘、互叶醉鱼草、鞑靼忍冬幼苗为试验材料,采用盆栽试验研究正常水分CK(土壤田间持水量为75%~80%)、轻度干旱 T_1 (土壤田间持水量60%~65%)、中度干旱 T_2 (土壤田间持水量45%~50%)和重度干旱 T_3 (土壤田间持水量30%~35%)胁迫下4种灌木的生长特征和耗水规律。结果表明:(1)生长季,随着土壤水分的胁迫加重,4种灌木的总生物量、地上生物量和总耗水量均呈下降趋势;根冠比和水分利用效率(WUE)呈正相关关系。(2)相同水分条件下,4种灌木的单株日耗水量和月耗水量大小排序为树锦鸡儿>沙棘>互叶醉鱼草>鞑靼忍冬,且在每月的分配比例不同:5、6、10月耗水少,7—9月耗水多。(3)不同水分条件下,4种灌木的耗水量表现为CK> T_1 > T_2 > T_3 。总的来看,树锦鸡儿属于高耗水低水分利用效率的树种,适宜在轻度干旱下生长;互叶醉鱼草属于低耗水高水分利用效率树种,适宜在重度干旱下生长;沙棘、鞑靼忍冬分别适宜在中度、正常水分条件下生长。因此,在不同生境下应有针对性地进行树种选择,达到适地适树。

关键词:土壤含水量;生长;耗水量;水分利用效率;灌木

中图分类号:S718.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)21-0117-06

水是植物体的重要组成部分,在影响植物生产力的诸多生态因子中,水分的作用尤为重要^[1]。水分能否满足植物的需要决定了相应的地区生态环境是否向良性的方向发展^[2]。如何根据具体的生境条件选择合适的树种,是当前生态造林和植被恢复工作中急需解决的问题之一。针对这一问题,必须对各树种的水分利用特点有清楚的认识^[3]。而植物水分利用效率作为衡量消耗水分形成有机物质的效率、确定其生长最佳水分条件和评价抗旱性的重要指标,为探讨干旱地区树种最大程度地利用稀少而不规则的降水来适应逆境提供了依据^[4],可见,以树种的耗水量和形态表现来判断其适应能力显得更为直观。已有研究表明,白刺花属高耗水、高水分利

用效率的树种,虎榛子属低耗水、低水分利用效率的树种,辽东栎属低耗水、高水分利用效率的树种^[5]。因此,通过探究不同水分条件下灌木树种的耗水需求,确定适合植物生长的土壤含水量范围以及确切的耗水量,对于充分利用干旱区有限的水资源、提高造林质量、加强植被恢复从而局部改善生态环境意义重大。

树锦鸡儿(*Caragana arborescens*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、互叶醉鱼草(*Buddleja alternifolia*)、鞑靼忍冬(*Lonicera tartarica*)是我国西北地区典型的固沙造林树种,是干旱区园林绿化、生态恢复的优良备选灌木资源,具有耐旱、耐寒、抗盐碱、观赏性强等优点^[6],开发利用价值较高。当前有关这4种灌木的研究主要集中在其地理分布^[7]、形态^[8]、生物学^[9-10]、生理生态特征^[11-14]、栽培育苗^[15]、镉积累^[16]、耐盐能力以及沙棘的资源开发、利用^[17-18]等方面,而有关其耗水特征研究尚未见报道。因此,本试验通过研究水分胁迫下4种灌木的生长与耗水特性,并分析其适宜生长的干旱条件,以期灌木树种的适地适树栽培提供依据。

收稿日期:2018-01-30

基金项目:银川市植物园沙生植物国家林木种质资源库研究专项。

作者简介:曾继娟(1990—),女,甘肃景泰人,硕士,研究实习员,主要从事植物资源收集与抗逆生理研究。E-mail:981315800@qq.com。

通信作者:朱强,硕士,助理研究员,主要从事植物资源收集与开发利用研究。E-mail:qzhu2008@163.com。

[16]葛丽萍,路安民,潘开玉. 马桑绣球(绣球科)的花器官发生和发育[J]. 植物分类学报,2003,41(3):235-244.

[17]Polowick P L, Sawtney V K. A scanning electron microscopic study on the initiation and development of floral organs of *Brassica napus* (cv Westar)[J]. American Journal of Botany, 1986, 73(2):254-263.

[18]Endress P K. Floral phyllotaxis and floral evolution[J]. Bot Jahrb Syst, 1987, 108:417-438.

[19]李中涛,郎丰华. 栗芽发育特性的研究[J]. 园艺学报, 1964, 3(1):17-29.

[20]陈旭辉,江莎,古松,等. 黄金树花器官发生及发育的形态观察[J]. 园艺学报, 2009, 36(2):285-290.

[21]张大勇. 植物生活史进化与繁殖生态学[M]. 北京:科学出版

社,2004.

[22]Dafni H, Lensky Y, Fahn A. Flower and nectar characteristics of nine species of Labiatae and their influence on honeybee visits[J]. Journal of Apicultural Research, 1988, 27(2):103-114.

[23]Fahn A. The topography of the nectary in the flower and its phylogenetics trend[J]. Phytomorphology, 1953, 3(4):424-426.

[24]沈宗根,刘文哲,胡正海. 薄荷花蜜腺额发育解剖学研究[J]. 西北植物学报, 1994, 14(1):29-32.

[25]邓彦斌,王虹. 牛至花蜜腺的发育解剖学研究[J]. 西北植物学报, 1997, 17(5):32-36.

[26]滕红梅,胡正海. 紫苏花蜜腺的发育解剖学研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(7):1288-1291.

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

树锦鸡儿、沙棘、互叶醉鱼草、鞑靼忍冬均采自宁夏银川森森现代科技园的苗圃地(38°25′06″N, 106°10′35″E)。于2016年4月15日开始试验,选取大小基本一致的一年生营养袋苗各40株,分别栽植于口径30 cm、高35 cm的塑料桶内,每桶2株,浇透水并置于大棚内缓苗,以防止自然降雨进入桶内。缓苗期间正常管理,于5月5日缓苗结束后测定桶内土壤田间持水量为26.23%。采用随机区组试验,将所有桶随机分成4组进行水分胁迫,设置4个水分梯度:适宜水分、轻度、中度和重度干旱,分别为田间持水量的75%~80%(CK)、60%~65%(T₁)、45%~50%(T₂)和30%~35%(T₃),同时设置空白处理(没有栽植苗木,其他条件一致),每个处理5次重复。利用便携式土壤水分速测仪(TDR-3, USA)以及称量桶质量2种方法使土壤水分保持在设定范围内,利用精度为0.05 L的量杯每2 d浇1次水,每次于17:00浇水。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 生长参数 于5月5日水分控制之前,各树种选取10株生长基本一致的幼苗进行干物质测定。水分处理1个月(2016年6月5日),从6月到10月,每月分别用钢卷尺

和电子游标卡尺测定株高和地径。10月26日试验结束后,收集桶内幼苗,清洗干净,将各处理所有植株的根、茎、叶分开后在105℃烘箱内杀青20 min后置于75℃条件下烘至恒质量,分别测定地上生物量、根生物量及总生物量。

1.2.2 耗水量及水分利用效率 每2 d用精密电子秤(精度为0.1 g)称量1次桶质量并补充相应的水分消耗至设定范围内,各处理质量的减少量与空白桶质量的差值为该幼苗的单株日耗水量。单株月耗水量为当月单株日耗水量之和,单株水分利用效率(WUE) = 产生的干物质量/耗水量^[12]。

1.3 数据统计与分析

数据处理与分析采用统计软件SPSS 18.0,用Duncan's方法进行多重比较,用Excel 2010作图。

2 结果与分析

2.1 水分胁迫对4种灌木生长特性的影响

2.1.1 水分胁迫对4种灌木叶片生长的影响 干旱处理30 d后,4种灌木的生长表象不一致。对照的4种植物形态均表现良好;中度干旱下,互叶醉鱼草、沙棘生长表现较为稳定,树锦鸡儿、鞑靼忍冬的叶缘干枯或叶片萎蔫;重度干旱下,4种植物叶片均表现出不同程度的弱化,但是树锦鸡儿、鞑靼忍冬有较为明显的黄化、干枯现象(表1)。

表1 4种灌木干旱处理30 d的表现

树种	干旱处理30 d的表现			
	对照	轻度干旱	中度干旱	重度干旱
树锦鸡儿	叶片饱满、挺立	叶片饱满	部分叶缘干枯	叶片黄化、长势弱
沙棘	叶片挺立、饱满	叶片饱满	叶色正常、叶尖卷曲	未生长新叶
互叶醉鱼草	长势旺盛、叶片挺立	叶片饱满	长势良好、叶色正常	叶片狭小、叶色浅淡
鞑靼忍冬	叶片饱满、挺立	部分叶缘干枯	部分叶片萎蔫	部分叶片严重干枯

2.1.2 水分胁迫对4种灌木株高生长的影响 树锦鸡儿的株高增长量随着干旱程度的加剧呈先增加后减小的趋势,在T₁处理下有峰值,在8月的变化幅度最大,且T₃处理较对照减小了53.2%,9月,各处理间均存在显著差异($P < 0.05$) (图1-A)。沙棘的株高增长量在7、10月随着干旱程度的加剧呈下降趋势,8、9月表现为先升高后下降的趋势,且在T₁处理下有峰值,其中9月,株高变化在T₁处理下较对照显著增加了30.1%,方差分析结果显示,除7月在T₂、T₃处理和8月在CK、T₁处理间无显著差异外,其余处理间均有显著差异($P < 0.05$),详见图1-B。

互叶醉鱼草、鞑靼忍冬的株高增长量在整个生长季均随着干旱程度的加剧呈下降趋势,9月,互叶醉鱼草的株高增长量增幅最大。在整个生长季,鞑靼忍冬的株高增长量表现为7月>8月>9月>10月,除10月在T₂、T₃处理间无显著差异外,其余处理间均有显著差异($P < 0.05$),详见图1-C、图1-D。

2.1.3 水分胁迫对4种灌木地径生长的影响 树锦鸡儿的地径增长量在整个生长季均随着干旱程度的加剧呈先增加后减小的趋势,在T₁处理下有峰值,其中7、8月较CK分别增加了54.7%、26.7%,各处理间均存在显著差异($P < 0.05$) (图2-A)。沙棘的地径增长量在7、9、10月随着干旱程度的加剧呈下降趋势,而8月呈先增加后减小的趋势,在T₁处理下有峰值且较CK显著增加30.5%,除9月在T₂与T₃处理

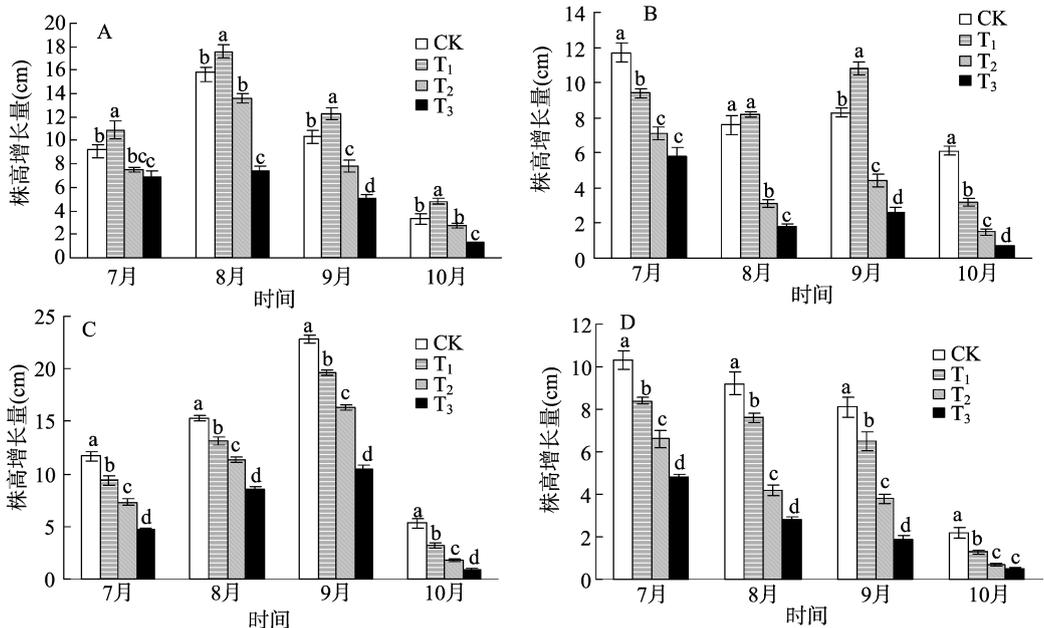
间无显著差异外,其余处理间均有显著差异($P < 0.05$),详见图2-B。

互叶醉鱼草的地径增长量在7、8、10月随着干旱程度的加剧呈下降趋势,而9月呈先增加后减小的趋势,在T₁处理下有峰值且较CK显著增加21.2%,各处理间均有显著差异($P < 0.05$),详见图2-C。鞑靼忍冬的地径增长量在整个生长季均随着干旱程度的加剧呈下降趋势,在CK处理下有峰值且7月达到最大值,除7、10月在T₂、T₃处理间无显著差异外,其他处理间均有显著差异($P < 0.05$),详见图2-D。

2.1.4 水分胁迫对4种灌木生物量、水分利用效率的影响 4种灌木的总生物量、地上生物量均随着干旱程度的加剧显著降低,而根冠比、水分利用效率有不同的变化规律:树锦鸡儿的根冠比在各处理间无显著差异,WUE在T₁条件下有最大值,较CK显著增加了92.1%;沙棘的根冠比、WUE均在T₂条件下有最大值,分别较CK显著增加了71.0%、95.0%,且与T₃处理之间有显著差异($P < 0.05$);互叶醉鱼草的根冠比、WUE均随土壤干旱程度的加剧而增加,在T₃处理下有最大值,分别较CK增加了431.8%、33.3%;鞑靼忍冬的根冠比、WUE均在T₁处理下有最大值,分别较CK显著增加了25.5%、7.6% (表2)。

2.2 不同水分条件下4种灌木的耗水规律

2.2.1 不同水分条件下4种灌木的日耗水动态 4种灌木的单株日耗水量随土壤水分的减少呈下降趋势,表现为CK >



A—树锦鸡儿; B—沙棘; C—互叶醉鱼草; D—鞑靼忍冬。下同。

图中相同字母表示无显著差异,不同字母表示有显著差异。图2同

图1 水分胁迫下4种灌木的株高增长量变化

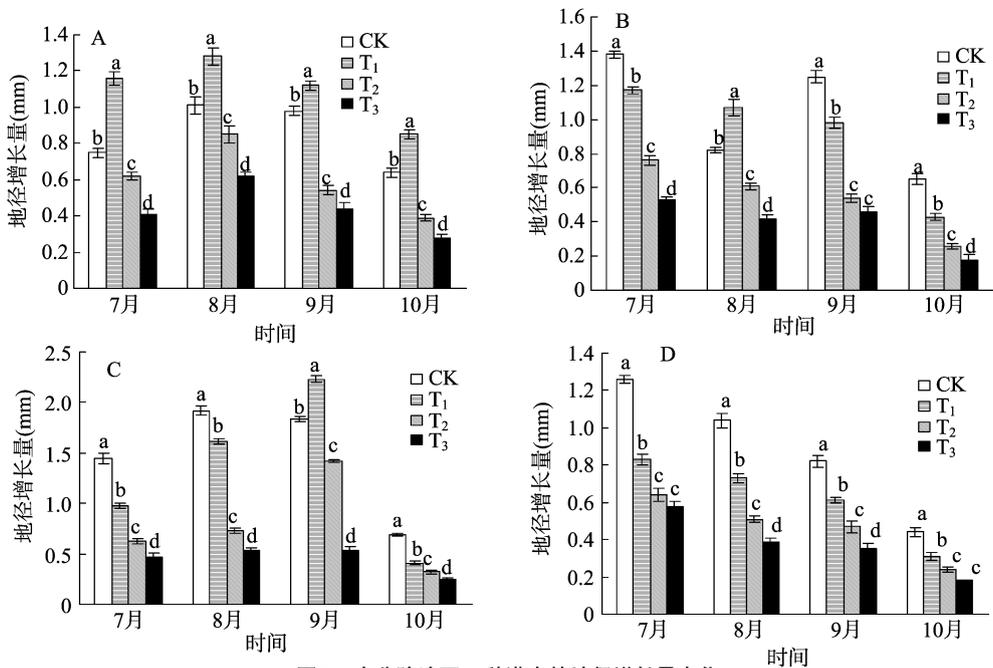


图2 水分胁迫下4种灌木的地径增长量变化

$T_1 > T_2 > T_3$ 的变化规律,说明土壤含水量对4种灌木的日耗水量影响较大。相同的是,在各处理下,4种灌木的日耗水量均在5、6月处于较低水平,7月上中旬处于较高水平,8、9月的日耗水量在 T_1 处理下与CK相比大幅度下降,而在 T_2 、 T_3 处理之间波动不大(图3)。不同的是,4种灌木的日耗水量高峰值出现的时间点和次数不一致,波峰多出现在晴天,波谷多出现在阴雨天,其中鞑靼忍冬的日耗水量最大值出现在7月13日,而其他3种植物出现在7月6日,同时, T_1 条件下互叶醉鱼草的最高单株日耗水量出现的时间延迟,较CK下降7%,且与 T_3 处理的变化趋势相同。总的来看,树锦鸡儿的单

株日耗水量在4种灌木中最高且高耗水期持续时间较长,其次是沙棘、互叶醉鱼草和鞑靼忍冬。

2.2.2 不同水分条件下4种灌木的月耗水量变化规律 4种灌木的月耗水量随土壤水分的减少呈下降趋势,表现为 $CK > T_1 > T_2 > T_3$ (图4)。树锦鸡儿与沙棘的变化趋势基本一致:整体先增加后减少,高耗水时间集中在7—9月;互叶醉鱼草的月耗水量从6月到9月呈不同程度的上升趋势,9月到10月急剧下降;鞑靼忍冬的月耗水量在整个生长期维持在较低水平,耗水高峰持续时间随土壤水分的减少而明显缩短,且在 T_3 条件下的下降幅度最大。树锦鸡儿、沙棘和鞑靼忍冬的

表2 水分胁迫对4种灌木生物量的影响

供试植物	处理	总生物量 (g)	地上生物量 (g)	根冠比	总耗水量 (kg)	水分利用效率 (g/kg)
树锦鸡儿	CK	32.10 ± 1.08a	25.87 ± 1.02a	0.24 ± 0.02a	50.79 ± 0.82a	0.63 ± 0.03c
	T ₁	26.25 ± 0.60b	18.48 ± 0.85b	0.42 ± 0.09a	21.77 ± 0.68b	1.21 ± 0.02a
	T ₂	15.30 ± 0.53c	11.21 ± 0.48c	0.36 ± 0.04a	13.91 ± 0.81c	1.10 ± 0.03a
	T ₃	4.52 ± 0.42d	3.43 ± 0.21d	0.32 ± 0.05a	5.23 ± 0.23d	0.86 ± 0.06b
沙棘	CK	30.91 ± 0.56a	19.06 ± 0.57a	0.62 ± 0.04b	38.65 ± 0.76a	0.80 ± 0.02d
	T ₁	23.09 ± 1.00b	12.28 ± 0.39b	0.88 ± 0.14a	17.49 ± 0.37b	1.32 ± 0.04b
	T ₂	17.76 ± 0.39c	8.63 ± 0.10c	1.06 ± 0.07a	11.37 ± 0.33c	1.56 ± 0.04a
	T ₃	4.42 ± 0.09d	2.91 ± 0.09d	0.52 ± 0.02b	3.83 ± 0.11d	1.15 ± 0.06c
互叶醉鱼草	CK	45.14 ± 0.65a	37.04 ± 0.55a	0.22 ± 0.02d	19.25 ± 0.50a	2.34 ± 0.06c
	T ₁	39.46 ± 0.66b	26.65 ± 0.56b	0.48 ± 0.04c	15.57 ± 0.48b	2.53 ± 0.04bc
	T ₂	34.89 ± 0.43c	19.81 ± 0.82c	0.76 ± 0.06b	13.09 ± 0.22c	2.67 ± 0.01b
	T ₃	13.52 ± 0.31d	6.23 ± 0.20d	1.17 ± 0.02a	4.33 ± 0.31d	3.12 ± 0.15a
鞑靼忍冬	CK	16.69 ± 0.32a	10.74 ± 0.54a	0.55 ± 0.05b	12.61 ± 0.42a	1.32 ± 0.02a
	T ₁	14.48 ± 0.37b	8.58 ± 0.26b	0.69 ± 0.02a	10.19 ± 0.28b	1.42 ± 0.02a
	T ₂	8.05 ± 0.22c	5.68 ± 0.22c	0.42 ± 0.05c	7.58 ± 0.28c	1.06 ± 0.03b
	T ₃	3.09 ± 0.08d	2.31 ± 0.09d	0.34 ± 0.01c	3.63 ± 0.11d	0.85 ± 0.05c

注: 同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

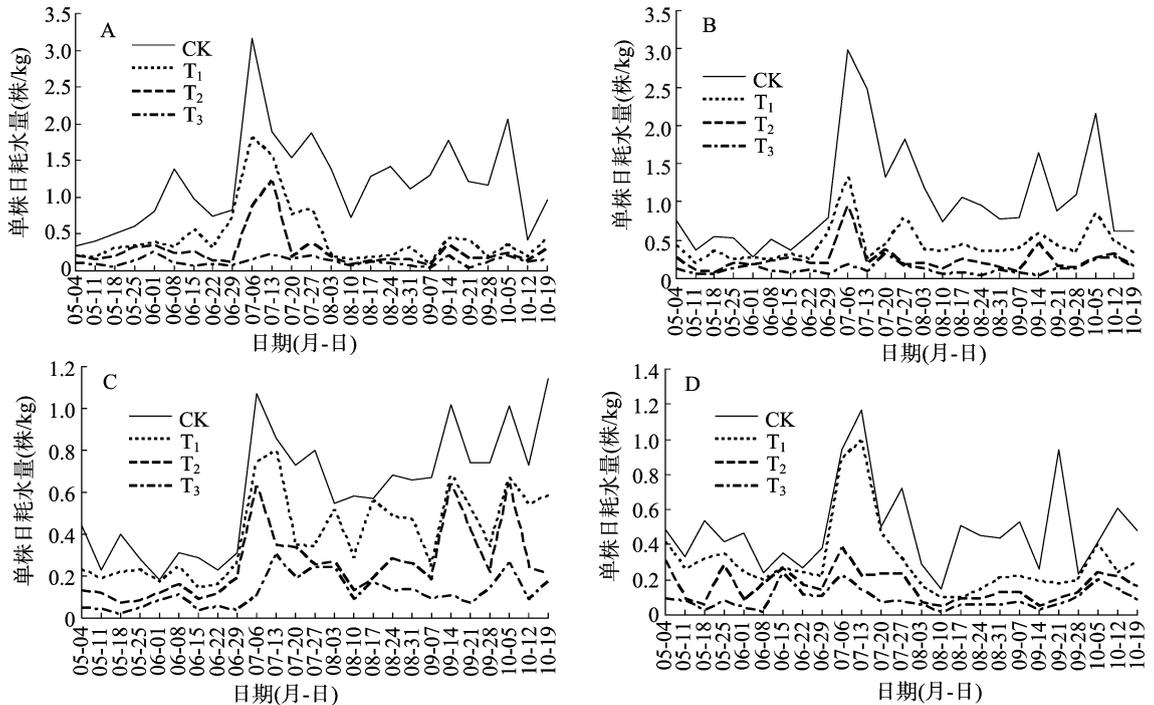


图3 水分胁迫下4种灌木的日耗水量变化

月耗水量峰值均出现在7月,而互叶醉鱼草的月耗水量在9月达到最大值,其中树锦鸡儿的月耗水量峰值是相同水分条件下沙棘的1.4倍,鞑靼忍冬的6.1倍,互叶醉鱼草的3.0倍。总的来看,整个生长季4种灌木的总耗水量在每个月的分配比例各不相同;5、6、10月耗水少,7—9月耗水多,总耗水量大小排序为树锦鸡儿 > 沙棘 > 互叶醉鱼草 > 鞑靼忍冬。

2.3 4种灌木水分利用效率与生长特性的相关性分析

树锦鸡儿、沙棘、互叶醉鱼草的水分利用效率与总生物量、地上生物量和总耗水量呈负相关,但是与根冠比呈正相关(表3)。其中树锦鸡儿的WUE与根冠比呈显著正相关($P <$

0.05);互叶醉鱼草的WUE与总生物量和总耗水量呈极显著负相关($P < 0.01$),与地上生物量呈显著负相关($P < 0.05$),与根冠比呈显著正相关($P < 0.05$);鞑靼忍冬的WUE与总生物量、根冠比呈显著正相关($P < 0.05$)。

3 讨论与结论

3.1 水分胁迫对4种灌木生长特性的影响

植物对环境的适应取决于环境水分的供应状况,植物本身的生物特性决定其生长表现,自身对水分的需求与其所在环境的水分状况通常处于矛盾之中^[19],而在干旱半干旱地

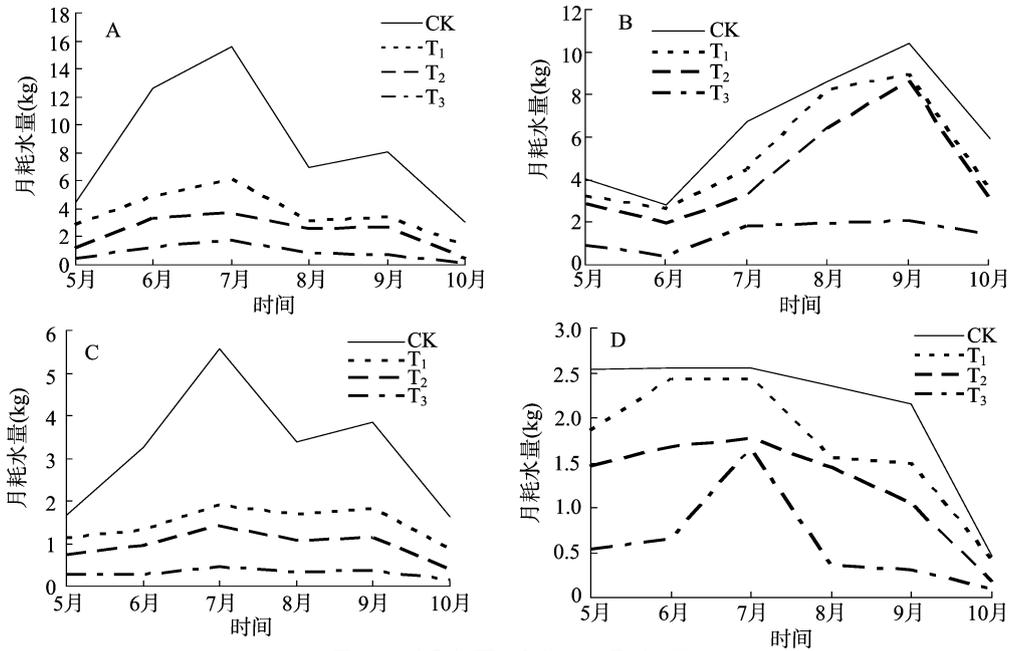


图4 水分胁迫下4种灌木的月耗水量变化

表3 4种灌木水分利用效率与生长特性的相关系数

供试植物	相关系数			
	总生物量	地上生物量	根冠比	总耗水量
树锦鸡儿	-0.165	-0.281	0.983 *	-0.585
沙棘	-0.374	-0.541	0.807	-0.697
互叶醉鱼草	-0.994 **	-0.987 *	0.987 *	-1.000 **
鞑靼忍冬	0.954 *	0.919	0.970 *	0.908

注：“*”表示显著相关($P < 0.05$),“**”表示极显著相关($P < 0.01$)。

区,水分成为限制植物生长的主要因素,植物通过降低生长、改变生物量分配、降低蒸腾量、提高水分利用效率等策略来应对不同程度的水分胁迫^[20],当水分胁迫程度超过植物自身的适应限度时,其正常生长和代谢就会受到抑制,进而影响生物量的形成^[21]。大量研究表明,株高、地径、生物量增量与土壤含水量紧密相关。如过高或过低的土壤含水量会降低黄连木幼苗的根冠比,显著影响株高、地径、生物量等指标^[22]。多花柃柳、柠条、沙枣的株高、地径均随土壤含水量的增加而增加^[23]。本研究中,水分变化对于4种植物幼苗生长的影响以及植物对于水分变化的响应策略存在差异。树锦鸡儿的株高增量、地径增量、总生物量、根冠比和水分利用效率均在 T_1 处理下显著增加且达到最大值,而地上生物量和总耗水量在 T_1 处理下显著减小,这说明树锦鸡儿幼苗可能通过地上部分老叶萎蔫、长出新芽的方式来适应干旱,当水分减少时,其叶片脱落或休眠的速度远超过萌发新芽的进程,植物可进行有效光合作用的器官在减少,不能通过降低植物蒸腾和光合作用这一路径来忍耐水分亏缺,这与李秋艳等的研究结果一致^[4]。沙棘、互叶醉鱼草、鞑靼忍冬的株高和地径增长量基本随干旱程度的加剧而降低,水分变化显著降低了这3种植物的总生物量、地上生物量和总耗水量,沙棘的根冠比和WUE在 T_2 条件下显著高于其他处理,在土壤含水量低于田间持水量的40%~45%的情况下,植株分配到根系的同化物

随之减少,根冠比降低,严重的水分亏缺已经破坏了植物自身调节能力,说明沙棘适宜在中度干旱下生长。互叶醉鱼草的根冠比随土壤含水量的减小而增加,这可能由于水分减少使植株将更多的光合产物分配到根系来有效利用水分,WUE增加,从而提高抗旱性,这与前人在其他植物中的研究一致^[24-27]。鞑靼忍冬的根冠比和WUE在 T_1 处理下较对照显著增加且达到最大值,这可能是生长季随着水分进一步减少,蒸发量过大,植株萎蔫、干枯,气孔关闭抑制 CO_2 进入,导致体内有机物积累,使根系吸收的营养受到限制而活力下降,致使WUE降低,影响了幼苗的生长。可见这4种灌木在受到水分胁迫时利用水分的策略不同。

3.2 水分胁迫对4种灌木耗水特性的影响

干旱半干旱地区水资源亏缺已严重影响了植物造林成活率、生长和分布,而选择抗旱树种,做好适地适树是解决这一问题的重要手段之一,这就需要了解树种的耐旱机制、耗水特性以及耗水量的大小。同时,植物水分利用效率^[28-31]作为衡量某一树种能否在不同环境下正常生长的判断依据,通过准确测算植物耗水量可为其选择合适的生长区域,也为其抗旱性评价提供理论基础。已有研究表明,油松、侧柏、金银木、红瑞木是低耗水树种,枸杞、毛白杨、大叶黄杨是高耗水树种,柠条、侧柏、小叶黄杨、冬青卫矛和棣棠的耗水量居中^[32-33]。金叶女贞、冬青、紫叶小檗的耗水量随着土壤含水量的降低而减少^[34]。本研究结果表明,树锦鸡儿、沙棘、互叶醉鱼草、鞑靼忍冬这4种灌木的单株日耗水量、月耗水量均随土壤水分的减少而下降,表现为 $CK > T_1 > T_2 > T_3$ 的变化规律,说明植物耗水量与水分条件紧密相关,这与前人在其他植物中的研究结果一致^[23,33]。在生长季,4种灌木的耗水量高峰期集中出现在7月中上旬,同时,树锦鸡儿在整个生长季的单株日耗水量和月耗水量最高且高耗水期持续时间较长,其次是沙棘、互叶醉鱼草、鞑靼忍冬。说明植物耗水量的多少与自身生长特性以及外界天气状况均有关。树锦鸡儿在幼苗阶段的生长更

偏向于降水量或者土壤含水量稍多的条件,即在土壤水分含量为田间持水量的60%~65%的环境下生长,属于高耗水低水分利用效率树种;互叶醉鱼草幼苗阶段能够在重度干旱(土壤水分含量为田间持水量的30%~35%)环境中生长,生长季的总耗水量为 (4.33 ± 0.31) kg,属于低耗水高水分利用效率树种;沙棘幼苗阶段的总耗水量为 (11.37 ± 0.33) kg,耗水量居中,更适宜在中度干旱环境中生长;但是鞑靼忍冬幼苗阶段的生长需要更多的水分来保证存活,能够在正常水分下生长。由此推测,4种灌木的抗旱能力大小为互叶醉鱼草>沙棘>树锦鸡儿>鞑靼忍冬。

可见,这4种灌木树种适宜生长的干旱环境并不一样。因此,在不同立地条件下进行灌木树种造林时要有针对性地选择树种,尤其是宁夏乃至西北地区这一环境脆弱带,迫切需要在水量有限的情况下,选择耗水量较少且达到最高水分利用效率的树种进行生态保育。当然,本研究结果只是在1年的试验基础上得出的,仅考虑了水分变化对4种植物生长的影响,事实上,植物生长对于全球气候变化的响应还与外界温度、CO₂浓度等因素有关,对于这方面有待于进一步研究。

参考文献:

[1] 蔡马,韩蕊莲,靳淑静,等. 土壤干旱对黄土高原2种半灌木植物生长与耗水规律的影响[J]. 西北林学院学报,2012,27(6): 26-32.

[2] 肖春旺,周广旺. 毛乌素沙地中间锦鸡儿幼苗生长,气体交换和叶绿素荧光对模拟降水量变化的响应[J]. 应用生态学报,2001,21(5):692-696.

[3] 严昌荣,韩兴国,陈灵芝. 六种木本植物水分利用效率和其小生境关系研究[J]. 植物生态学报,2001,21(11):1952-1956.

[4] 李秋艳,赵文智. 5种荒漠植物幼苗对模拟降水量变化的响应[J]. 冰川冻土,2006,28(3):414-420.

[5] 王海珍,梁宗锁,韩蕊莲,等. 不同土壤水分条件下黄土高原乡土树种耗水规律研究[J]. 西北农林科技大学学报,2005,33(6): 57-63.

[6] 李爱平,王晓江,杨小玉,等. 库布齐沙漠几种沙生灌木叶解剖结构耐旱特征研究[J]. 中国沙漠,2010,30(6):1405-1410.

[7] Zhang M L, Xue J, Zhang Q, et al. Inferring ancestral distribution area and survival vegetation of *Caragana* (Fabaceae) in Tertiary[J]. Plant Systematics and Evolution,2015,301(7):1831-1842.

[8] 周萌,安黎哲. 锦鸡儿属响应干旱胁迫的形态适应特征和生理机制的研究[D]. 兰州:兰州大学,2016.

[9] 王军辉,张建国,许洋,等. 耐旱灌木互叶醉鱼草的生物学特性研究[J]. 中国野生植物资源,2007,26(6):23-25.

[10] 朱燕娟,马丽群. 鞑靼忍冬生物学特性及繁育技术[J]. 现代园艺,2016,4(2):22-23.

[11] 董明,苏德荣,刘泽良,等. 干旱胁迫对阿诺诺红鞑靼忍冬生理指标的影响[J]. 西北林学院学报,2008,23(4):8-13.

[12] 田魏龙,蒋志荣. 不同沙棘品种对干旱胁迫的生理生化响应[J]. 中国沙漠,2011,31(5):1215-1220.

[13] 刘光琇,张威,陈桂琛. 西部中国沙棘叶片稳定碳同位素组成的空间特征及其气候意义[J]. 中国沙漠,2009,29(5):866-871.

[14] 蔡海霞,吴福忠,杨万勤. 干旱胁迫对高山柳和沙棘幼苗光合生理特征的影响[J]. 生态学报,2011,31(9):2430-2436.

[15] 赵辛,赵志鹏,李国江. 优质绿化树种树锦鸡儿栽培技术[J]. 中国林副特产,2016,24(1):60-62.

[16] 燕江伟,李昌晓,崔振,等. 干旱胁迫下镉处理对互叶醉鱼草幼苗生长、镉积累及光合生理的影响[J]. 生态学报,2017,37(21):1-9.

[17] 苏锦松,赵彩云,文检,等. 中国沙棘叶黄酮类成分与生态因子相关性及其生态适宜性研究[J]. 中国中药杂志,2017,42(10):1865-1870.

[18] 丁健,阮成江,关莹,等. 沙棘果肉和种子发育过程中含油量及脂肪酸组成的对比分析[J]. 中国油脂,2017,42(5):140-144.

[19] 曾小平,赵平,彭少麟. 鹤山人工马占相思林水分生态研究[J]. 植物生态学报,2000,24(1):69-73.

[20] 龚吉蕊,黄永梅,葛之葳,等. 4种杂交杨对土壤水分变化的生态学响应[J]. 植物生态学报,2009,33(2):387-396.

[21] 罗永忠,李广. 土壤水分胁迫对新疆大叶苜蓿的生长及生物量的影响[J]. 草业学报,2014,23(4):213-219.

[22] 陈婧,马履一,段劼,等. 不同土壤含水量下黄连木苗木生长及耗水特性研究[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(3): 68-73.

[23] 孙龙,彭祚登,王佳茜,等. 不同土壤水分对4个灌木能源树种生长和蒸腾耗水的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2015,35(10):54-61.

[24] 李阳,齐曼·尤努斯,祝燕. 水分胁迫对大果沙枣光合特性及生物量分配的影响[J]. 西北植物学报,2006,26(12): 2493-2499.

[25] 李菊艳,赵成义,孙栋元,等. 水分对胡杨幼苗光合及生长特性的影响[J]. 西北植物学报,2009,29(7):1445-1451.

[26] Sobrado M A. Relation of water transport to leaf gas exchange properties in three mangrove species[J]. Trees,2000,14(5): 258-262.

[27] 张荣,单立山,李毅,等. 人工模拟降雨格局变化对白刺幼苗生长的影响[J]. 草业学报,2016,25(1):117-125.

[28] 张辉,朱绿丹,安霞,等. 水分和钾肥耦合对甘薯光合特性和水分利用效率的影响[J]. 江苏农业学报,2016,32(6): 1294-1301.

[29] 吉仁慈,朱义勇,柴源,等. 模拟SO₂湿沉降对桑树叶片光合日变化和生长的影响[J]. 江苏农业学报,2016,32(6):1396-1403.

[30] 杨军,廉晓娟,王艳,等. 滴灌条件下不同灌溉量对芹菜耗水量和水分利用效率的影响[J]. 江苏农业学报,2016,32(3): 656-661.

[31] 肇思迪,娄运生,庞渤,等. UV-B辐射增强下施硅对冬小麦光合特性和产量的影响[J]. 江苏农业学报,2017,33(5): 1036-1043.

[32] 周平,李吉跃,招礼军. 北方主要造林树种苗木蒸腾耗水特性研究[J]. 北京林业大学学报,2002,24(5):50-55.

[33] 李新宇,赖娜娜,郜怡彬,等. 北京市园林主要灌木单株耗水量比较研究[J]. 节水灌溉,2008,11(4):15-20.

[34] 崔香,陈友媛,李亚平,等. 不同土壤含水量下3种盆栽灌木耗水特性研究[J]. 水土保持通报,2012,32(3):77-80.