西北林学院学报 2018,33(4):145-152
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2018.04.24

水分胁迫对3种扁桃的生长与耗水特征的影响

曾继娟,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:为探索不同水分胁迫下3种扁桃的耗水规律与生长特征,以蒙古扁桃、长柄扁桃、四川扁桃的1年生播种苗为试验材料,通过室外盆栽,设置适宜水分、轻度、中度和重度干旱4个水分条件,分别为田间持水量的75%～80%(CK)、60%～65%(T1)、45%～50%(T2)和30%～35%(T3)。结果表明:1)随着土壤水分的胁迫,3种扁桃的株高和地径均受到明显抑制,蒙古扁桃和四川扁桃均表现为CK>T1>T2>T3,而长柄扁桃则为T1>CK>T2>T3。2)3种扁桃的耗水量随着土壤含水量的降低而减少,表现出CK>T1>T2>T3的变化规律。3)相同水分条件下,四川扁桃的日耗水量最多,耗水高峰持续时间较长,蒙古扁桃的日耗水量最低,长柄扁桃的日耗水量介于两者之间。4)不同水分条件下,3种扁桃的单株水分利用效率排序分别为四川扁桃:T1>T2>T3>CK,适宜在轻度干旱下生长;蒙古扁桃:T3>T2>CK>T1,能够在重度干旱下生长;长柄扁桃:T2>T1>T3>CK,适宜在中度干旱下生长。表明3种扁桃均有很强的抗旱性,且蒙古扁桃最抗旱,为灌木树种在宁夏干旱区的生态造林及推广应用提供理论依据。

关键词:土壤含水量;蒙古扁桃;耗水量;水分利用效率

中图分类号:S662.1　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2018)04-0145-08

Effects of Water Stress on the Growth and Water Consumption Characteristics of Three *Amygdalus* Species

ZENG Ji-juan, ZHU Qiang*

(*Ningxia Forestry Institute Co., State Key Laboratory of Seeding Bioengineering, Yinchuan, Ningxia* 750004, *China*)

Abstract: In order to examine water consumption and growth characteristics of three *Amygdalus* species under drought stress, annual seedlings of *A. mongolica*, *A. pedunculata*, and *A. tangutica* were potted outdoors. Four soil moisture conditions were set up: sufficient water, mild drought, moderate drought and severe drought, which accounted for the field capacities of 75%－80% (control), 60%－65% (T1), 45%－50% (T2) and 30%－35% (T3). The results showed that 1) with the increase of drought stress, the height and ground diameter growths of all three species were obviously inhibited, for *A. mongolica* and *A. tangutica*, the growths were in the order of control>T1>T2>T3, for *A. pedunculata*, it was T1>control>T2>T3. 2) The water consumption decreased with the stress: control>T1>T2>T3. 3) Under the same moisture condition, daily water consumption of *A. tangutica* was the highest and water consumption peak duration was longest, the water consumption of *A. mongolica* was the lowest, the water consumption of *A. pedunculata* was between the two species. 4) Under different soil moisture conditions, water use efficiency of the three species performed as *A. tangutica*. T1>T2>T3>control, it was suitable for growing under mild drought condition. *A. mongolica*, T3>T2>control>T1, it was able to grow under severe drought condition. *A. pedunculata*, T2>T1>T3>control, it was suitable for growing in moderate drought condi-

收稿日期:2017-08-22　**修回日期**:2017-09-30

基金项目:中央财政推广项目([2015]ZY 09)。

作者简介:曾继娟,女,在读硕士,研究方向:植物资源与抗逆生理。E-mail:981315800@qq.com

* **通信作者**:朱　强,男,助理研究员,硕士,研究方向:植物资源。E-mail:qzhu2008@163.com

tion. In summary, three species of *Amygdalus* had a strong drought resist 的 ance, and *A. mongolica's* drought resistance was the best. The results could provide the theoretical basis for ecological afforestation and popularization of shrub species in arid area of Ningxia.

Key words: soil moisture content; *Amygdalus mongolica*; water consumption; water usef efficiency

水分是树木存活和生长发育的重要制约因素，而蒸腾耗水是树木水分散失的主要途径[1-2]。水分能否满足植物的需要是生态环境变化的首要因素，同时，植物对于干旱环境的适应能力是其正常生长的内部因素[3]。通过观测树木在水分胁迫下的生长发育表现是否良好，来判断该品种抗旱性的强弱更为直观，目前鉴定生长评价的指标主要有株高、地径、叶面积、生物量等。耗水量反映了一个树种在一定年龄阶段及个体大小的耗水特征，极具参考价值[4]；已有研究表明，黄连木、沙棘、沙枣、柠条和多花柽柳的苗高、地径、生物量等指标在不同水分梯度下差异显著；苗木的月耗水量、总耗水量、平均日耗水量均随着土壤含水量的下降而显著下降[5-6]。因此，考虑苗木生长及耗水特性，综合得出适宜的土壤含水量范围，为实现苗木的定向培育和水分高效利用提供参考。西北干旱半干旱地区的降水量少，蒸发量大，干旱缺水成为最突出的生态特征[7]，针对这一问题，通过研究干旱区植物耗水，确定出树种的耗水量并依据耗水需求节水灌溉，对于充分利用西北地区有限的水资源，局部改善生态脆弱性和生态修复具有重要作用。

长柄扁桃、蒙古扁桃、四川扁桃为蔷薇科桃属灌木，其营养丰富，种仁含油量 55%以上，是西北地区优良的固沙植物，同时也是很好的灌木能源树种，蒙古扁桃为国家三级保护植物，具有重要的生态与生物质能源开发利用前景。当前关于 3 种扁桃的研究集中在资源收集、种子生物学[8-9]、生理生态[10-12]、光合[13-15]、营养成分[16]及遗传多样性研究[17]等方面，有关耗水量研究未见报道。因此，了解 3 种扁桃在不同水分条件下的生长与耗水特征，对于西北地区造林、生态建设及能源开发利用均具有重要意义。本试验通过研究 3 种扁桃在不同土壤干旱条件下的耗水特性，分析蒙古扁桃等 3 种灌木在不同水分条件下的生长和水分需求，在此基础上探讨其抗旱性强弱，以期为我国西北生态环境建设和经营管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在宁夏银川森淼现代科技园的试验基地(38°25′06″N，106°10′35″E)，日照充足，干旱少雨，海拔 1 115 m，年平均气温 9.5～11.4℃，年平均降水量 180 mm 左右，年平均蒸发量 1 500～2 200 mm。

1.2 材料与方法

于 2016 年 4 月 10 日在银川植物园苗圃地选择大小、长势基本一致的 1 年生 3 种扁桃的营养袋苗各 20 株，栽植于口径 30 cm、高 35 cm 的塑料桶内，每桶 1 株并浇透水，置于抗旱棚内缓苗，以防止天然降雨进入桶内。缓苗结束后，于 4 月 28 日测定桶内土壤田间持水量为 26.23%，开始水分控制处理。设置水分梯度为适宜水分、轻度、中度和重度干旱 4 个水平，分别为田间持水量的 75%～80%(CK)、60%～65%(T1)、45%～50%(T2)和 30%～35%(T3)，同时设置没有栽植苗木的空白桶作对照，每个处理 5 次重复。利用便携式土壤水分速测仪(TDR-3，USA)以及称量桶重 2 种方法来保证土壤水分保持在设定范围之内，利用精度为 0.05 L 的量杯每 2 d 浇 1 次水，每次于同一时间(16:30)浇水。

1.3 测定内容

1.3.1 生长指标 于植物生长旺季开始，每月分别用钢卷尺和电子游标卡尺测定株高和地径。

1.3.2 耗水量 用称重法测定整株苗木耗水量，每 2 d 用精密电子秤(上海双鹰电子有限公司，SY-023，精度 0.1 g)称重 1 次，补充相应的水分消耗至设定范围内。单株水分利用效率 WUE＝产生的干物质量/耗水量[18]。

1.3.3 光合指标 采用 GFS-3000 便携式光合仪，于晴朗无风的 8 月 3 日 08:30－11:00 测定各处理植物叶片的光合特性，并标记好叶片带回室内测量叶面积，每个处理 3 次重复，测定时环境条件控制为 Flow750、Impeller7、Light Mode PARtop1000，仪器会自行记录净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(G_i)等光合参数。

1.4 数据统计与分析

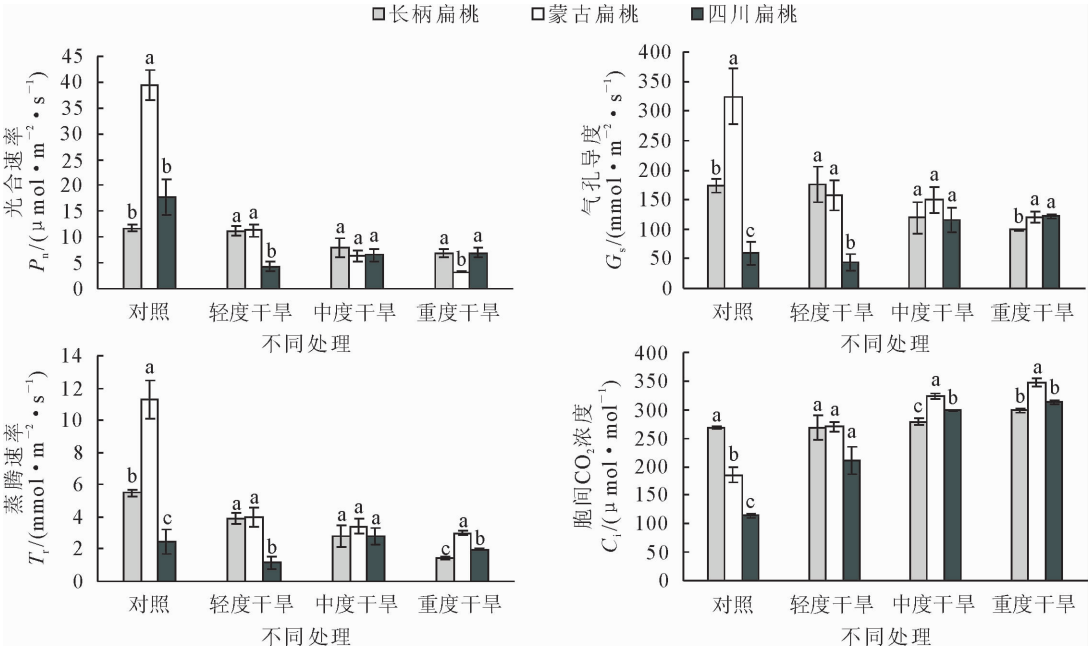
数据处理与分析采用统计软件 SPSS18.0，Duncan 方法进行多重比较，Excel2010 作图。

2 结果与分析

2.1 不同土壤水分条件下 3 种扁桃的光合特性

随着干旱程度的加剧，3 种扁桃的光合速率基本呈下降趋势，且轻度干旱下，蒙古扁桃的下降幅度

最大(图 1);长柄扁桃、蒙古扁桃的气孔导度、蒸腾速率随着干旱程度的加剧而降低,均在重度干旱下有最小值,可见这 2 种植物在严重干旱时通过降低气孔开度来减少水分散失,有利于适应逆境;但是四川扁桃的 G_s、T_r 呈先下降后升高的趋势,G_s 在 T2、T3 处理间无显著性差异($P>0.05$),T_r 在 T1、T3 处理间无显著性差异($P>0.05$),说明随着胁迫程度的加重,四川扁桃基本失去气孔调节能力,更适宜在轻度干旱下生长。同时,对照下,长柄扁桃的 P_n、G_s 和 T_r 均显著高于其他 2 种,3 种扁桃的胞间 CO_2 浓度随着干旱程度的加剧而增加,均在 T3 下有峰值,蒙古扁桃在该处理下与其他 2 种植物相比有显著性差异($P<0.05$)。



注:字母不同表示差异显著($P<0.05$)。下图同。

图 1　不同水分胁迫下 3 种扁桃的光合特征

Fig. 1　Photosynthetic characteristics on three species of *Amygdalus* in different drought stress

2.2　不同土壤水分对 3 种扁桃生长特性的影响

2.2.1　不同土壤水分对 3 种扁桃叶片生长的影响

从表 1 可以看出,土壤水分胁迫 30 d 后,3 种扁桃的生长表现存在一定差异:蒙古扁桃整体状态较稳定,对照与干旱胁迫后的植株表象变化较小;而四川扁桃在中度干旱下叶片枯黄,重度干旱下叶色严重失绿,长柄扁桃在重度干旱下叶色失绿。

表 1　3 种扁桃干旱处理 30 d 的表现

Table 1　Performance on three species of *Amygdalus* after 30-day drought stress

树种	对照	轻度干旱	中度干旱	重度干旱
四川扁桃(*Amygdalus tangutica*)	新芽较多,叶片挺立	叶色翠绿	部分叶片枯黄	叶色严重失绿
蒙古扁桃(*Amygdalus mongolica*)	叶片饱满、挺立	叶色正常	叶片挺立,叶色正常	叶色稍失绿
长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata*)	叶片饱满、挺立	叶色正常	叶片挺立、叶色正常	叶色失绿

2.2.2　不同土壤水分对 3 种扁桃株高生长的影响

3 种扁桃的株高增长量随干旱程度的加剧呈不同的变化趋势(图 2)。其中四川扁桃基本呈下降趋势,9 月份,在 T1 下有峰值,株高增长量较对照增加了 44.68%;7 月份,增长速度最快,10 月份则缓慢增长;方差分析结果显示,7、8 月份,T1、T2 处理间株高变化无显著性差异,9 月份,T2、T3 处理间株高变化无显著性差异,其他处理间均存在显著性差异($P<0.05$)。而蒙古扁桃的株高增长量在整个生长季的变化趋势不一致,8 月份,随着干旱胁迫的加剧,在 T1 下达到峰值,较 CK 增加了 10.98%,10 月份,在 T2 下有峰值且较 CK 增加了 194.12%,方差分析结果显示,9 月份,株高变化在 CK、T1 处理间无显著性差异,其余处理间均存在显著性差异($P<0.05$)。长柄扁桃则为先升高后下降的趋势,在 T1 下有峰值,8 月份,其株高增长量较 CK 增加了 121.3%,增长速度最快,10 月份,较 CK 增长了 12.5%,说明该植物在生长后期代谢缓慢,更适宜在土壤含水量为 60%～65%的条件下生长;方差分析结果显示,10月份,CK、T1处理间株高变化无显著

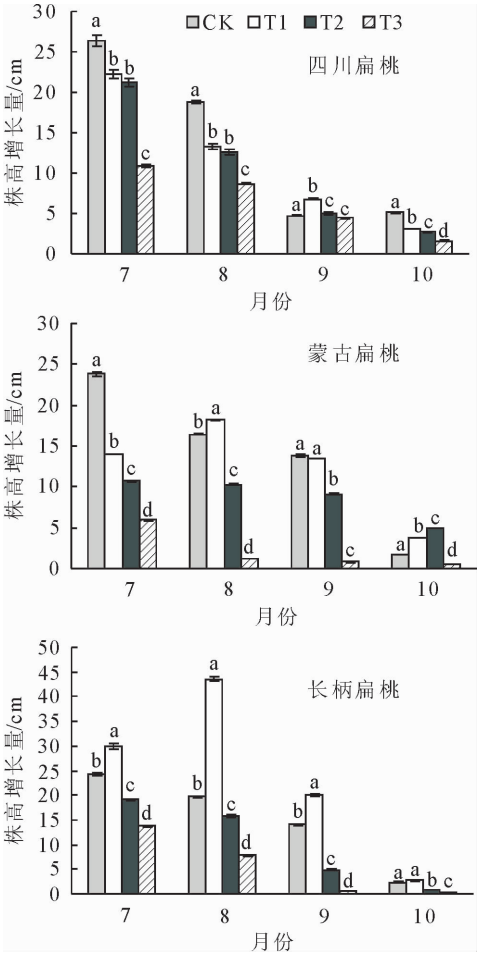


图 2 不同水分胁迫下 3 种扁桃的株高增长量变化

Fig. 2 Changes of height growth on three species of *Amygdalus* in different drought stress

性差异，其余各处理间均存在显著性差异（$P<0.05$）。

2.2.3 不同土壤水分对 3 种扁桃地径生长的影响 从图 3 可以看出，四川扁桃、长柄扁桃的地径增长量均随土壤干旱程度的增加而下降，且在 7 月份增长最快，增长速度随生长季的变化而减缓；而蒙古扁桃表现为先升高后下降的趋势，均在 T1 下达到峰值，其中 9 月份，地径增长量较 CK 增加了 38.98%，增长幅度最大，表明 T1 条件更利于蒙古扁桃的地径增长；方差分析结果显示，四川扁桃在 8 月份 CK 和 T1 处理间无显著性差异，长柄扁桃在 8、9 月份 CK 和 T1 处理间无显著性差异，蒙古扁桃在 10 月份 CK 和 T1，T2 和 T3 之间无显著性差异，其余处理间均有显著性差异（$P<0.05$）。

2.3 不同土壤水分条件下 3 种扁桃的耗水规律

2.3.1 不同土壤水分条件下 3 种扁桃的日耗水动态 从图 4 可以看出，3 种扁桃的日耗水量随着生长时间的延长均呈增加—减小—增加—减小的变化趋势，表现出 CK＞T1＞T2＞T3 的规律；日耗水量从 6 月下旬开始大幅度变化，各树种的耗水量峰值、峰谷出现的多少、前后、高低各不相同，6 月 29 日到 10 月 19 日期间，高峰点分别出现了 6、4、5 次，且多出现在 7、10 月中上旬，其中四川扁桃的日耗水量明显高于其他 2 种植物，峰值多出现在晴天，峰谷多出现在阴雨天，说明树木耗水量的多少不仅与土壤水分含量紧密相关，还有其自身规律。

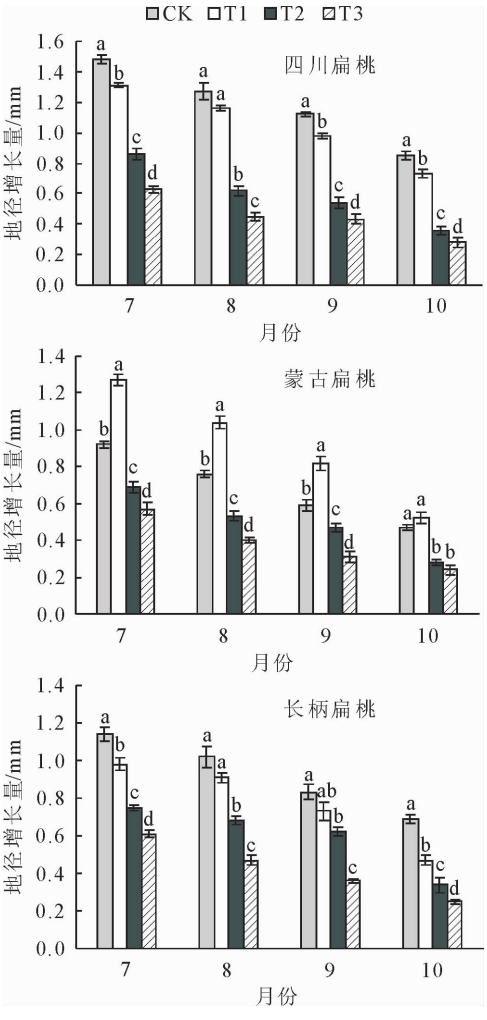


图 3 不同水分胁迫下 3 种扁桃的地径增长量变化

Fig. 3 Changes of ground diameter growth on three species of *Amygdalus* in different drought stress

2.3.2 不同土壤水分条件下 3 种扁桃的月耗水量变化规律 从图 5 可以看出，各处理下，四川扁桃的月耗水量在 7 月份有峰值且随着生长时间的延长基本呈下降趋势，其他 2 种扁桃的月耗水量整体呈减小—增加—减小—增加—减小的趋势；各处理间表现为 CK＞ T1＞T2＞ T3，其中 CK 条件下变化幅度最大，T3 条件下变化幅度最小，月耗水量峰值集中出现在 7、9 月。生长季，T1、T2 条件下，四川扁桃的月耗水总量均最多，分别是长柄扁桃、蒙古扁桃的 2.02、2.54 倍和 1.76、2.94 倍；而 T3 条件下长柄扁桃的月耗水总量最多，分别是四川扁桃、蒙古扁

桃的 1.02、1.47 倍,说明严重干旱时长柄扁桃需要更多的水分供应来适应环境,蒙古扁桃耗水量最少,较适应环境。方差分析结果显示,3 种扁桃的月耗水量在各处理间均有显著性差异($P<0.05$)。

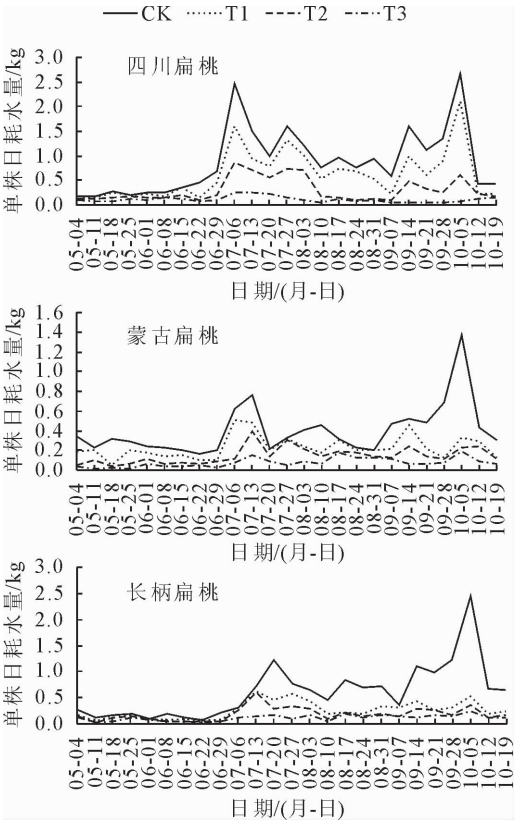


图 4　不同水分胁迫下 3 种扁桃的日耗水量变化

Fig. 4　Change of daily water consumption on three species of *Amygdalus* in different drought stress

2.3.3　不同土壤水分条件下 3 种扁桃的单株水分利用效率　从表 2 可以看出,不同土壤水分胁迫下,3 种扁桃的水分利用效率(WUE)存在一定差异。其中四川扁桃、长柄扁桃的 WUE 随着土壤含水量的降低呈先升高后下降的趋势,而蒙古扁桃则是先下降后升高。四川扁桃的 WUE 在 T1 时最大,较 CK 显著增加了 27.8%,蒙古扁桃的 WUE 在 T3 时最大,较 CK 增加了 39.7%,长柄扁桃的 WUE 在 T2 条件下最大,较 CK 增加了 55.5%。方差分析结果显示,蒙古扁桃、长柄扁桃的 WUE 在各处理间均有显著性差异($P<0.05$),而四川扁桃在 T2 和 T3 处理间无显著性差异,其余处理间存在显著性差异($P<0.05$)。

3　结论与讨论

3.1　不同土壤水分对 3 种扁桃光合特性的影响

光合作用直接关系到植物的生长发育、产量形成以及次生代谢物质的合成积累,而干旱胁迫是引起光合作用下降、产量降低最主要的环境因子[19-21]。蒸腾速率作为植物水分状况重要的生理指标之一,有助于了解其蒸腾及水分利用特性[16]。本试验结果表明,轻度干旱下,3 种扁桃均能充分利用外界环境资源,生活力较高,气孔因素并不能导致其叶片光合速率显著下降;而在重度干旱下,长柄扁桃、蒙古扁桃通过降低气孔开度、降低蒸腾、提高水分利用效率来适应逆境。这与高丽[22]等对中国沙棘的研究结果相近。长柄扁桃的 T_r 在 T3 与其他处理间有显著性差异($P<0.05$),说明该植物在重度干旱下的气孔关闭很敏感;而四川扁桃的 T_r 在 T1 处理下有最小值且与 T3 处理间无显著性差异($P<0.05$),说明重度干旱下,该植物已基本失去气孔调节能力,更适宜在轻度干旱下生长。

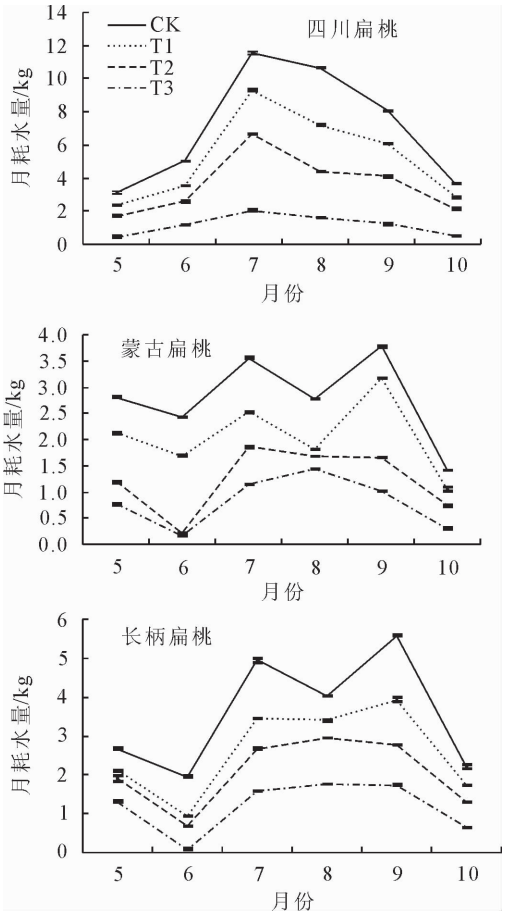


图 5　不同水分胁迫下 3 种扁桃的月耗水量变化

Fig. 5　Changes of monthly water consumption on three species of *Amygdalus* in different drought stress

3.2　不同土壤水分对 3 种扁桃生长特性的影响

植物对水分胁迫的响应较为复杂,是其长期应对环境而形成的生态适应特征,最终能反映在植株的生物量上[6],常通过降低生长,改变生物量分配,关闭气孔,降低蒸腾,提高水分利用效率等诸多生理适应机制及形态策略来应对不同程度的水分胁迫[23]。植物对水分胁迫的适应有一定限度,当超过

表2 不同水分胁迫下3种扁桃的单株水分利用效率

Table 2 Three species of *Amygdalus* water use efficiency in different drought stress

树种	水分处理	净增生物量/g	总耗水量/kg	水分利用率/(g·kg^{-1})
四川扁桃(*A. tangutica*)	CK	68.23±1.00 a	42.12±0.60 a	1.62±0.00 c
	T1	64.96±0.20 b	31.38±0.50 b	2.07±0.04 a
	T2	40.81±0.92 c	21.59±0.91 c	1.89±0.04 ab
	T3	12.62±0.75 d	6.97±0.11 d	1.81±0.14 bc
蒙古扁桃(*A. mongolica*)	CK	29.13±0.49 a	16.75±0.49 a	1.74±0.03 c
	T1	16.32±0.37 b	12.37±0.08 b	1.32±0.02 d
	T2	15.73±0.59 b	7.34±0.04 c	2.14±0.02 b
	T3	11.78±0.14 c	4.85±0.07 d	2.43±0.01 a
长柄扁桃(*A. pedunculata*)	CK	33.15±0.59 a	21.38±0.53 a	1.55±0.04 c
	T1	32.18±0.48 a	15.55±0.38 b	2.07±0.02 b
	T2	29.56±0.38 b	12.25±0.30 c	2.41±0.03 a
	T3	14.38±0.40 c	7.12±0.06 d	2.01±0.04 b

注:同列数据标有不同字母者表示差异显著($P<0.05$)。

该限度时,正常的代谢及生长发育进程会被抑制。本研究发现,随着干旱程度的加剧,其株高、地径均不同程度的变化,中度胁迫下,9月份,四川扁桃的株高增长量较对照增加了6.4%,而10月份,蒙古扁桃的株高增长量较CK增加了194.12%;重度胁迫下,3种扁桃的株高增长量均较对照显著下降,说明供水量显著影响3种扁桃的生长。本研究还发现,四川扁桃、蒙古扁桃的株高增长量排序均为CK>T1>T2>T3,而长柄扁桃的株高增长量排序为T1>CK>T2>T3,说明土壤水分超过T1(田间持水量的60%~65%)时,再增加水分不会促使株高生长,而严重干旱胁迫也会导致3种扁桃的生长被限制,说明土壤水分含量的多少直接影响植物生长,这与前人在其他植物中的研究结果一致[24-25];同时,地径在诸多形态指标中能够直观反映苗木质量的好坏。四川扁桃和长柄扁桃的地径增长量排序均为CK>T1>T2>T3,而蒙古扁桃的排序为T1>CK>T2>T3,这可能是由于水分的减少,蒙古扁桃自身调节更多的水分促使茎的生长,说明轻度干旱条件更利于蒙古扁桃的横向生长。

3.3 不同土壤水分对3种扁桃耗水特性的影响

植物自身对水分的需求与其所处环境的水分条件之间存在矛盾关系[26],而在干旱半干旱地区,水分不足与供需时间不一致的矛盾表现的尤为突出[27]。水分不足会影响植物造林成活率、保存率和分布情况[22]。有研究表明,杨树总耗水量和总生物量的大小顺序为适宜水分>中度干旱>严重干旱[28];刺槐、杨树为高耗水树种;柠条为中等耗水树种;沙棘、侧柏、油松为低耗水树种,尤其是沙棘,不但耗水量低,而且水分利用效率高[29]。大叶细裂槭、白刺花、辽东栎的耗水量排序为适宜水分>中度干旱>重度干旱;且4、5、10月耗水量少,6-9月耗水多[30]。本研究结果显示,不同土壤水分条件下,3种扁桃的日耗水量、月耗水量变化表现为CK>T1>T2>T3,说明耗水量的多少与土壤水分条件密切相关,水分供应量越高,扁桃的耗水量就越大,这与魏瑞峰[31]等对枣树的研究结果一致。生长季,耗水量高峰期均出现在7月中旬和10月上旬,且单株日耗水量大小为四川扁桃>长柄扁桃>蒙古扁桃,这可能是由于7月中旬,外界气温高达37℃,蒸腾失水较多,植物要补充更多的水分来适应环境,而10月上旬,随着植株生长量的增加,自身耗水量随之增多,表明植物蒸腾耗水与外界天气状况和生长量紧密相关;同时,T3条件下,蒙古扁桃的月耗水总量最少且生长表现均好于其他2种,同样说明蒙古扁桃比其他2种更耐旱,这一结论将对造林中节水灌溉的应用具有指导作用;此外,耗水量峰值、峰谷出现的多少、前后、高低各不相同,说明植物的日耗水变化动态与其自身规律有关。充足的水分供应虽然有利于植物苗期生长,但适当的水分胁迫可提高植物水分利用效率和抗旱性,为后期土壤水分状况下的良好生长提供依据[32-33]。本研究结果还发现,3种扁桃的单株WUE大小分别为四川扁桃:T1>T2>T3>CK;蒙古扁桃:T3>T2>CK>T1;长柄扁桃:T2>T1>T3>CK。CK条件下,3种扁桃的WUE均很低,说明大部分水分可能通过叶片表面蒸腾而被浪费,植物自身实际利用的水分较少,土壤水分一旦超过苗木的最大需水量临界值,就会随蒸发而流失,导致WUE降低。由此可见,四川扁桃适宜在轻度干旱下生长,长柄扁桃在T3胁迫下的生长被严重抑制,净增生物量明显减少,虽然耗水量也急速下降,但WUE仍较低,需要更多的水分供应来维持生长,适宜在中度干旱下生长,而蒙古扁桃在T3条件下的WUE高于其他处理,此时苗木处于严重干旱

且能正常生长,虽然净增生物量较低,但该植物自身能够适应环境,抗旱性最强。

综上所述,在实际应用中对于不同水分立地条件下植物的选择,应该同时考虑干旱程度和树种的适应性,达到适地适树。当然,本研究结果只是在 1 a的试验基础上得出的,仅围绕水分变化对植物生长的影响,而忽略了气温变化和水分的互作关系,对于这方面还需进一步研究。

参考文献:

[1] 郭孟霞,毕华兴,刘 鑫,等.树木蒸腾耗水研究进展[J].中国水土保持科学,2006,4(4):114-120.
GUO M X,BI H X,LIU X,*et al*. Review on the water consumption of tree transpiration [J]. Science of Soil and Water Conservation,2006,4(4):114-120. (in Chinese)

[2] 张皓,丁亚娜,赵启红,等.北方城市绿化常用灌木树种抗旱性评价[J].核农学报,2016,30(7):1446-1451.
ZHANG H,DING Y N,ZHAO Q H,*et al*. Comprehensive drought tolerance analysis of common shrub species in the Northern city of China[J]. Journal of Nuclear Agricultural Science,2016,30(7):1446-1451. (in Chinese)

[3] 李春燕,王进鑫,薛设.干旱及复水对侧柏幼苗叶片抗氧化酶活性的影响[J].西北林学院学报,2015,30(2):33-37.
LI C Y,WANG J X,XUE S. Effect of drought and rewatering on the activity of protect enzymes in the leaves of *Platycladus orientalis* seedings[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(2):33-37. (in Chinese)

[4] 徐先英,丁国栋,孙保平.内陆河下游民勤绿洲主要防风固沙植被生态需水量研究[J].水土保持学报,2007,21(3):144-148.
XU X Y,DING G D,SUN B P. Study on ecological water requirement of main windbreak and sand-fixing vegetation in Minqin oasis of lower reaches of Inland River[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2007,21(3):144-148. (in Chinese)

[5] 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.
CHEN J,MA L Y,DUAN J,*et al*. Studied of characteristics of growth and water consumption of *Pistacia chinensis* Bunge under different soil water conditions[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2014,34(3):68-73. (in Chinese)

[6] 陈科皓,王进鑫,李继文.不同生长期旱后复水对侧柏幼苗生物量的影响[J].西北林学院学报,2015,30(2):38-43.
CHEN K H,WANG J X,LI J W. Effect of re-watering after drought on biomass of *Platycladus orientalis* seedlings in different growth stages[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(2):38-43. (in Chinese)

[7] 冯燕,王彦荣,胡小文.水分胁迫对两种荒漠灌木幼苗生长与水分利用效率的影响[J].草业学报,2011,20(4):293-298.
FENG Y,WANG Y R,HU X W. Effects of soil water stress on seedling growth and water use efficiency of two desert shrubs[J]. Acta Prataculturae Sinica,2011,20(4):293-298. (in Chinese)

[8] 红雨,邹林林,朱清芳.濒危植物蒙古扁桃种子雨和土壤种子库特征[J].林业科学,2012,10 (48):145-149.
HONG Y,ZOU L L,ZHU Q F. The seed rain and soil seed bank of endangered *Amygdalus mongolica*[J]. Scientia Silvae Sinicae,2012,10 (48):145-149. (in Chinese)

[9] 马骥,倪细炉,史宏勇,等.蒙古扁桃的开花生物学研究[J].西北植物学报,2010,30(6):1134-1141.
MA J,NI X L,SHI H Y,*et al*. Study on flowering biology of *Amygdalus mongolica*[J]. Acta Botanica Boreali Occidentalia Sinica,2010,30(6):1134-1141. (in Chinese)

[10] 周红兵,王迎春.不同生境蒙古扁桃药材品质及生理生态适应机制研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2015.

[11] AKCURA M,PARTIGOC F,KAYA Y. Evaluating of drought stress tolerance based on selection indices in Turkish bread wheat landraces[J]. Journal of Animal and Plant Sciences,2011,21(9):700-709.

[12] LIDON Z Z,CEBOLA F. Anoverview on drought induced changes in plant growth,water relations and photosynthesis [J]. Emirates Journal of Food and Agriculture,2012,24(1):32-35.

[13] 格日乐,乌仁陶德,张力,等.几种沙漠植物蒸腾作用特性及其环境响应机制的研究[J].水土保持研究,2007,14(1):184-186.
GE R L,WU R T D,ZHANG L,*et al*. The study on transpiration of several desert plants and environment responding mechanism[J]. Research of Soil and Water Conservation,2007,14(1):184-186. (in Chinese)

[14] 靳甜甜,傅伯杰,刘国华,等.不同坡位沙棘光合日变化及其主要环境因子[J].生态学报,2011,31(7):1783-1793.
JIN T T,FU B J,LIU G H,*et al*. Diurnal changes of photosynthetic characteristics of *Hippophae rhamnoides* and the relevant environment factors at different slope locations[J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(7):1783-1793. (in Chinese)

[15] 张颖,朱铭强,李浩,等.半干旱黄土丘陵区 4 种灌木树种的光合特性研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(3):65-70.
ZHANG Y,ZHU M Q,LI H,*et al*. Photosynthetic and physiological characters of four shrub species in the Loess Hilly-Gully Region[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed. ,2012,40(3):65-70. (in Chinese)

[16] 王娅丽,李永华,王钰,等.3 种扁桃属植物营养成分分析[J].广东农业科学,2012,20(7):127-129.
WANG Y L,LI Y H,WANG Y,*et al*. Analysis of nutritional components of three kind of *Amygdalus* plant[J]. Journal of Guangdong Agricultural Sciences,2012,20(7):127-129. (in Chinese)

[17] 左思雨,乌云塔娜.长柄扁桃群体遗传学特征及重要形状评价[D].长沙:中南林业科技大学,2016.

[18] LATRACH L,FARISSI M,MOURADI M,*et al*. Growth and nodulation of alfalfa-rhizobia symbiosisunder salinity:electrolyte leakage,stomatal conductance,and chlorophyll fluorescence[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry,2014,38(3):320-326.

[19] 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.
CAI H X,WU F Z,YANG W Q. Effects of drought stress on the photosynthesis of *Salix paraqplesia* and *Hippophaerhamnoides* seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(9):2430-2436. (in Chinese)

[20] 王克勤. 集水造林与水分生态[M]. 北京:中国林业出版社,2002,16-25.
WANG K Q. Water catchment afforestation and ecological [M]. Beijing:China Forestry Press,2002,16-25. (in Chinese)

[21] 吉小敏,宁虎森,梁继业,等. 不同水分下梭梭和多花柽柳苗期光合特性及抗旱性比较[J]. 中国沙漠,2012,32(2):399-406.
JI X M,NING H S,LIANG J Y,*et al*. Comparison of drought resistance and photosynthetic characteristics of *Haloxylon ammodendron* and *Tamarix hohenackeri* at seedling stage under different moisture conditions[J]. Journal of Desert Research,2012,32(2):399-406. (in Chinese)

[22] 高丽,杨劼,刘瑞香. 不同土壤水分条件下中国沙棘雌雄株光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征[J]. 中国沙漠,2009,29(11):6025-6034.
GAO L,YANG J,LIU R X. Effects of soilmoisture levels on photosynthesis,transpiration,and moisture use efficiency of female and male plants of *Hippophae rhamnoides* ssp. sinensis[J]. Journal of Desert Research,2009,29(11):6025-6034. (in Chinese)

[23] 徐炳成,山仑,李凤民. 3种禾草苗期生长和水分利用对土壤水分变化的反应[J]. 西北植物学报,2007,27(2):297-302.
XU B C,SHAN L,LI F M. Water changes in soil and water use during seedling growth of three *Herbaceous* grasses[J]. Acta Botanica Boreali Occidentalia Sinica,2007,27(2):297-302. (in Chinese)

[24] 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.
LI J Y,ZHAO C Y,SUN D Y,*et al*. Effects of water on photosynthesis and growth characteristics of *Populus euphratica* seedlings[J]. Acta Botanica Boreali Occidentalia Sinica,2009,29(7):1445-1451. (in Chinese)

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

[26] 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.
LUO Y Z,LI G. The effect of water stress on growth and biomass of *Medicago sativa* cv. Xinjiangdaye[J]. Acta Prataculturae Sinica,2014,23(4):213-219. (in Chinese)

[27] 刘长利,王文全,崔俊茹,等. 干旱胁迫对甘草光和特性与生物量分配的影响[J]. 中国沙漠,2006,21(1):142-145.
LIU C L,WANG W Q,CUI J R,*et al*. Effects of drought stress on photosynthesis characteristics and biomass allocation of *Glycyrrhiza uralensis*[J]. Journal of Desert Research,2006,21(1):142-145. (in Chinese)

[28] 杨建伟,梁宗锁,韩蕊莲,等. 不同干旱土壤条件下杨树的耗水规律及水分利用效率研究[J]. 植物生态学报,2004,28(5):630-636.
YANG J W,LIANG Z S,HAN R L,*et al*. Water use efficiency and water consumption charateristics of *Populus* under soil drought conditions[J]. Acta Phytoecologica Sinica,2004,28(5):630-636. (in Chinese)

[29] 彭孝飞,王百田. 黄土高原主要造林苗木耗水特性与生长量关系研究[D]. 北京:北京林业大学,2012.

[30] 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:自然科学版,2005,33(6):57-63.
WANG H Z,LIANG Z S,HAN R L,*et al*. Changes of water consumption regularity of native tree species in Loess Plateau under different soil water contents[J]. Journal of Northwest A&F University:Nat. Sci. Ed.,2005,33(6):57-63. (in Chinese)

[31] 魏瑞锋,庄飞,范阳阳,等. 土壤水分对枣树光合特性及耗水量的影响[J]. 灌溉排水学报,2012,31(2):107-111.
WEI R F,ZHUANG F,FAN Y Y,*et al*. Effect of soil water content on photosynthetic characteristics and transpiration water consumption of *Jujube*[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2012,31(2):107-111. (in Chinese)

[32] 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.
GONG J R,HUANG Y M,GE Z W,*et al*. Ecological response of four hybrid populations to soil moisture variation[J]. Acta Phytoecologica Sinica,2009,33(2):387-396. (in Chinese)

[33] GUO S H,KONG D J,ZHANG Y P. Effects of different irrigation amounts on water consumption and water use efficiency of green house cucumber[J]. Agricultural Science Technology,2010,11(9):217-220.