

调亏灌溉对小桐子幼树形态特征 与水分利用的影响

荣 烨¹, 杨启良¹, 张 京¹, 李 姝², 刘小刚¹, 王卫华¹
(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 云南 昆明 650500;
2. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 云南 昆明 650500)

摘 要: 在盆栽条件下, 研究调亏灌溉对小桐子幼树形态特征与水分利用的影响。设置 2 种调亏水平: 重度亏缺 W1(田间持水量的 25% ~ 45%) 和轻度亏缺 W2(田间持水量的 45% ~ 65%); 3 种亏水处理时间: D1(亏水 120 d)、D2(亏水 90 d) 和 D3(亏水 60 d); CK 为常规灌溉(田间持水量的 65% ~ 85%)。结果表明: 亏水度对小桐子幼树的株高、茎粗、壮苗指数、叶面积、基茎截面积、干物质质量和水分利用效率的影响趋势表现为轻度调亏处理 > 重度调亏处理; 对根冠比和胡伯尔值的影响趋势表现为: 重度调亏处理 > 轻度调亏处理。亏水时间对小桐子幼树的株高、茎粗、壮苗指数、叶面积、基茎截面积、干物质质量和水分利用效率的影响趋势表现为 60 d > 90 d > 120 d; 对根冠比和胡伯尔值的影响趋势均表现为 120 d > 90 d > 60 d。与正常灌水相比, 轻度调亏 60 d 的处理节约灌溉用水 11.2%, 其叶干重和叶柄干重显著下降, 根系、茎秆和总干重下降并不明显, 而粗高比和根冠比显著提高, 因此, 灌溉水利用效率和壮苗指数显著增加 7.8% 和 8.1%。可见, 苗后期轻度亏水不仅具有明显的壮苗作用, 而且促进水分利用效率显著增大。

关键词: 调亏灌溉; 小桐子; 壮苗指数; 胡伯尔值; 水分利用效率
中图分类号: S274 **文献标志码:** A

Effects of regulated deficit irrigation on morphological characteristics and water use of *Jatropha curcas* L. sapling

RONG Ye¹, YANG Qi-liang¹, ZHANG Jing¹, LI Shu², LIU Xiao-gang¹, WANG Wei-hua¹

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China;
2. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: A pot-grown experiment was conducted to investigate the effects of regulated deficit irrigation on morphological characteristics and water use of *Jatropha curcas* L. Two water deficit levels were set as severe water deficit W1 (soil moisture maintained at 25% ~ 45% of field capacity) and moderate water deficit W2 (soil moisture maintained at 45% ~ 65% of field capacity) and three water deficit time levels (D1: 120 d, D2: 90 d, and D3: 60 d) were designed in the study. Control treatment was full irrigation (soil moisture maintained at 65% ~ 85% of field capacity). Results showed that effects of light water deficiency were more apparent than those of severe water deficiency on plant height, stem diameter, healthy index of seedlings, total leaf area, xylem cross-sectional area of basal shoot, total dry mass, and water use efficiency of *Jatropha curcas* L. However, severe water deficit level seemed to have affected the root-shoot ratio and Huber value of *Jatropha curcas* L. more than light water deficit level. Effects of water deficit time on plant height, stem diameter, healthy index of seedlings, total leaf area, xylem cross-sectional area of basal shoot, total dry mass, and water use efficiency of *Jatropha curcas* L. were in the following order: 60 d > 90 d > 120 d. Additionally, effects of water deficit time on root-shoot ratio and Huber value of *Jatropha curcas* L. were as 120 d > 90 d > 60 d. Compared with the control, W2D3 treatment saved irrigation water by 11.2%, leaf and petiole dry mass were significantly reduced, and root, stem, and total dry mass dropped slightly. Nevertheless, base stem diameter-plant height ratio and root-shoot ratio

收稿日期: 2014-04-05
基金项目: 国家自然科学基金(51379004, 51009073, 51109102); 云南省应用基础研究面上项目(2013FB024); 国家高技术研究发展计划项目(2011AA100504)
作者简介: 荣 烨(1989—), 男, 湖北监利人, 硕士, 主要从事农业节水与生态环境保护研究。E-mail: 282465321@qq.com。
通信作者: 杨启良(1978—), 男, 甘肃通渭人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事农业节水理论与新技术研究。E-mail: yangqilianglovena@163.com。

became significantly increased. As a result, irrigation water use efficiency and healthy index of sapling were significantly increased to 7.8% and 8.1%, respectively. It is clear that light water deficit level t the late stage of seedling development not only increased the healthy index, but significantly promoted water use efficiency.

Keywords: RDI; *Jatropha curcas* L.; healthy index of seedlings; Huber value; water use efficiency

近年来,日益严重的水资源短缺和环境恶化已经成为人类发展现阶段急需解决的难题,同时也成为严重制约我国农业生产与经济发展的重要因素。在这种情况下,发展节水农业以及开发生物质能源已成为众多学者关注的热点,也是实现农业可持续发展的有效途径和必然选择。调亏灌溉(Regulated deficit irrigation,简称 ADI)由澳大利亚学者于 20 世纪 70 年代提出,其原理是在作物生长阶段主动施加有益水分胁迫,调节各个组织器官之间的产物分配比例,从而提高有效产量而降低部分营养器官的生长量及有机合成物的总量,以达到节水增产的目的。自调亏灌溉提出以来,学者们先是研究其作用于果树的效果^[1],然后拓展到其他作物,结果均表明调亏灌溉是一种有效的节水增产方法^[2-3]。

小桐子(*Jatropha curcas* L.)又称麻疯树,为大戟科麻疯树属物种,是一种多功能树种。小桐子果实具有较高的含油率,可作为生物柴油的提取原料^[4-5],同时,小桐子对恶劣生态环境的适应能力很强,可用来修复矿山多金属废弃地^[6],此外小桐子还是重要的生物医药和生物饲料来源,应用前景十分广阔^[7]。

近年来,有关小桐子灌溉方面的研究日益增多。L. Díaz - López 等^[8]采用蒸散量的 100%、75%、50%、25%、0%作为灌溉量的不同水分梯度处理,结果表明小桐子幼树在干旱胁迫下会降低气孔导度控制蒸腾量,同时适当减少地上部分的生物量。W. H. Maes 等^[9]采用田间持水量的 0%、40%、100%作为不同水分梯度的处理,得出小桐子的肉质茎会维持自身在少量水分损失的平衡状态来抵御干旱胁迫。杨启良等^[10]采用灌水定额为 10 mm 和 30 mm 交替灌溉的处理,研究发现复水效应使小桐子贮存水调节能力提高,根系和总干物质质量增加,并且水分利用效率显著提高。尹丽^[11]等采用盆栽控水方法研究得出最适合小桐子生长的土壤水分为田间持水量的 60% ~ 80%。

围绕小桐子的生长、生理生态、产量及品质和调亏灌溉对多种作物的作用效果等方面进行了许多研究,但尚少见到调亏灌溉对小桐子幼树形态特征和水分利用影响的报道。本文目标是研究不同调亏度和调亏时期对小桐子生长发育、干物质累积、壮苗指数、胡伯尔值及水分利用的影响,找出有利于小桐子

壮苗和提高水分利用的最佳调亏度和调亏日数组,以为调亏灌溉在小桐子幼树上的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况及试验材料

试验于 2012 年 5—9 月在昆明理工大学现代农业工程学院温室(坐标 E102°8',N25°1')完成。供试小桐子幼树来自于云南元谋干热河谷区,4 月 3 日将小桐子幼树移栽至上口宽 30 cm,下口宽 22.5 cm,高 30 cm 的大花盆中,盆中装风干并过 5 mm 筛的土 15.5 kg,每盆栽 1 株小桐子幼树,移栽后灌水至田间持水量。供试土壤为燥红壤土,体积质量为 1.2 g·cm⁻³,其有机质组分为 13.12 g·kg⁻¹,全氮、全磷、全钾含量分别为 0.87 g·kg⁻¹、0.68 g·kg⁻¹、13.9 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

经过 30 d 的缓苗后,挑选长势均匀的小桐子幼树于 5 月 4 日进行不同的水分调亏处理。试验共设 2 种调亏水平:重度亏缺 W1(田间持水量的 25% ~ 45%)和轻度亏缺 W2(田间持水量的 45% ~ 65%),3 种亏缺时期水平:D1(全时期调亏共 120 d)、D2(6 月 3 日起调亏共 90 d)和 D3(7 月 3 日起调亏共 60 d),CK 为常规灌溉(田间持水量的 65% ~ 85%)(表 1),每个处理 3 次重复,共 21 盆。各处理在处于调亏期之外时均按常规灌溉,灌水采用称重法,在土壤水分含量低于相应处理的田间持水量下限时补至上限。试验期间每 2 周将花盆沿相同的方向转动 1 次并将所有花盆调换位置以减少温室边界效应造成的系统误差,试验灌水处理共 120 d。其它管理措施均保持一致。

1.3 测定项目

(1) 生长量:从 5 月 4 日开始,每 30 d 测量一次,株高采用直尺测量,茎粗采用游标卡尺测量。

(2) 干物质质量:各器官干物质质量用天平测定。9 月 1 日挖取小桐子幼树,将各器官分离后在烘箱中 105℃杀青 30 min,再调至 80℃继续烘至恒重,得到各器官干物质质量。壮苗指数:壮苗指数 = (茎粗/株高 + 根干质量/地上部干质量) × 全株干质量^[12]。

表 1 试验处理
Table 1 Experimental treatments

处理 Treatments	亏水度 Water deficit levels	亏水开始时间(Y - M - d) Water deficit start date	亏水结束时间(Y - M - d) Water deficit end date	亏水处理天数/d Water deficit days
W1D1	25% ~ 45% θ_f	2012 - 05 - 04	2012 - 09 - 01	120
W1D2	25% ~ 45% θ_f	2012 - 06 - 03	2012 - 09 - 01	90
W1D3	25% ~ 45% θ_f	2012 - 07 - 03	2012 - 09 - 01	60
W2D1	45% ~ 65% θ_f	2012 - 05 - 04	2012 - 09 - 01	120
W2D2	45% ~ 65% θ_f	2012 - 06 - 03	2012 - 09 - 01	90
W2D3	45% ~ 65% θ_f	2012 - 07 - 03	2012 - 09 - 01	60
CK	65% ~ 85% θ_f	全时期不亏水 None water deficit		0

(3) 叶面积:相似比法测定,植株总叶面积 = 单位叶干质量对应的叶面积 × 植株总叶干质量,依据游标卡尺测定的基茎直径,通过圆面积计算获得茎截面面积,胡伯尔值 = 茎截面面积/总叶面积^[13]。

(4) 水分利用效率:水分利用效率 = 总干物质质量/灌溉量。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据处理,采用 Origin8.5 软件作图,用 SAS 统计软件的 ANOVA 和 Duncan ($P = 0.05$) 进行数据的多重比较和方差分析。

2 结果与分析

2.1 调亏灌溉对小桐子幼树生长量的影响

小桐子幼树生长曲线如图 1 所示,在调亏处理前小桐子的生长状况差异不大,在处理开始后株高和茎粗均显著小于 CK 处理。在各调亏处理之间,亏水度对株高和茎粗的影响均表现为 $W2 > W1$,亏水阶段对株高和茎粗的影响均表现为 $D3 > D2 > D1$ 。由图 1 可知,在 $W2$ 调亏灌溉水平下,试验开始时,各处理的株高和茎粗基本相同,30 d 之后, $D1$ 处

理的株高和茎粗均显著低于 $D2$ 和 $D3$,而 $D2$ 与 $D3$ 之间差异并不显著,60 d 之后, $D2$ 株高和茎粗均显著低于 $D3$,试验开始 60 d 之后直至试验结束株高和茎粗仍维持 $D3 > D2 > D1$ 的趋势。而我们也注意到与 CK 处理相比, $W2D3$ 处理的株高和茎粗有一定的减少,但是减少量并不显著。

2.2 调亏灌溉对小桐子幼树粗高比、根冠比和壮苗指数的影响

试验结束时小桐子幼树的根冠比、粗高比和壮苗指数如图 2 所示。差异显著性分析表明,亏水度和亏水阶段及其交互作用对小桐子茎粗/株高的影响均不显著 ($P > 0.05$),但对小桐子根冠比和壮苗指数影响均达到显著水平 ($P < 0.05$)。数据分析表明,亏水度对根冠比的影响表现为 $W1 > W2$,亏水阶段对根冠比的影响表现为 $D1 > D2 > D3$;亏水度对壮苗指数的影响表现为 $W2 > W1$,亏水阶段对壮苗指数的影响表现为 $D3 > D2 > D1$ 。在 $W2$ 条件下,与 $D1$ 相比, $D3$ 处理的根冠比显著减少,而壮苗指数增加 49.0%。比较 $W2D3$ 和 CK 处理可知, $W2D3$ 处理在节约 11.2% 灌溉量的情况下,壮苗指数增加 8.1%。

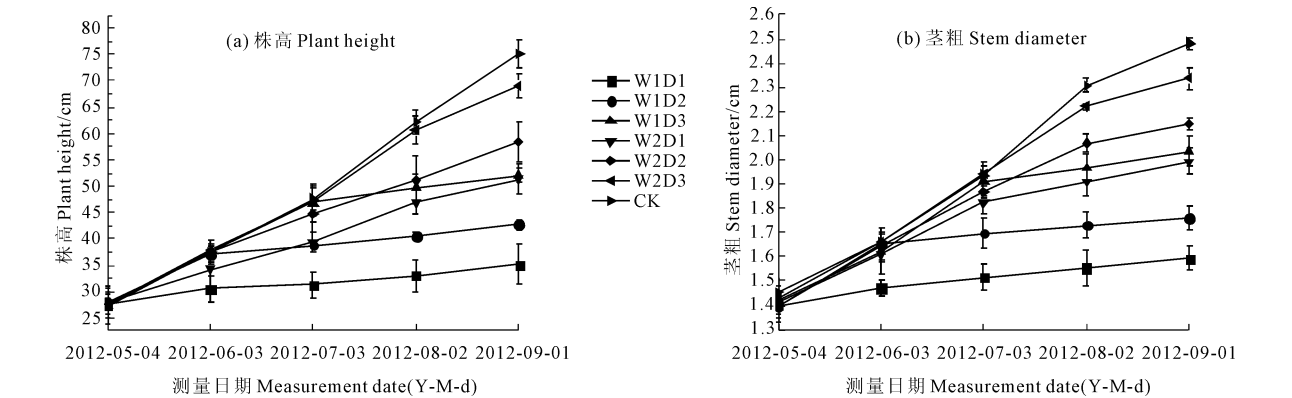
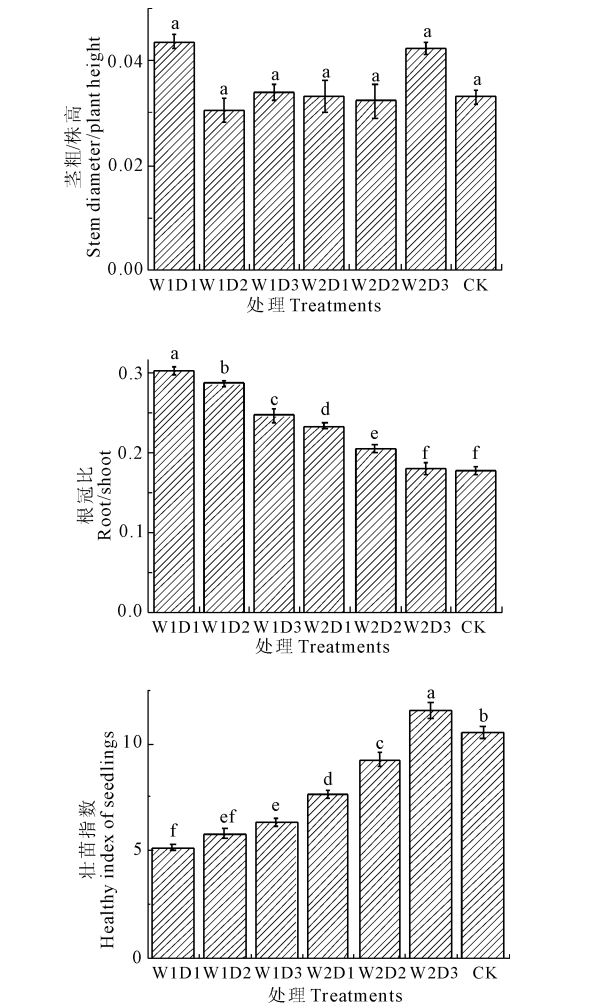


图 1 不同处理小桐子的株高和茎粗

Fig.1 Effects of different treatments on plant height and stem diameter of *Jatropha curcas* L.



注:不同字母代表差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Note: Different letters mean significant differences at 0.05 level. The same below.

图 2 小桐子幼树的根冠比、粗高比和壮苗指数
Fig.2 Base stem diameter-plant height ratios, root-shoot ratios, and seedlings healthy indexes of *Jatropha curcas* L.

2.3 苗期调亏灌溉对小桐子幼树叶面积、基茎截面积和胡伯尔值的影响

试验结束时小桐子幼树的叶面积、基茎截面积和胡伯尔值如图 3 所示。差异显著性分析表明,亏水度和亏水阶段及其交互作用对小桐子叶面积、基茎截面积以及胡伯尔值影响均达到显著水平 ($P < 0.05$)。数据分析表明,亏水度对叶面积和基茎截面积的影响表现为 $W2 > W1$,亏水阶段对叶面积和基茎截面积的影响表现为 $D3 > D2 > D1$,CK 处理叶面积和基茎截面积最大;亏水度对胡伯尔值的影响表现为 $W1 > W2$,亏水阶段对胡伯尔值的影响表现为 $D1 > D2 > D3$ 。在 W1 条件下,与 D3 相比,D1 的胡伯尔值增加 120.4%。比较 W2D3 和 CK 处理可发现,W2D3 的基茎截面积显著低于 CK 处理,同时叶面积和胡伯尔值也有小幅度下降。

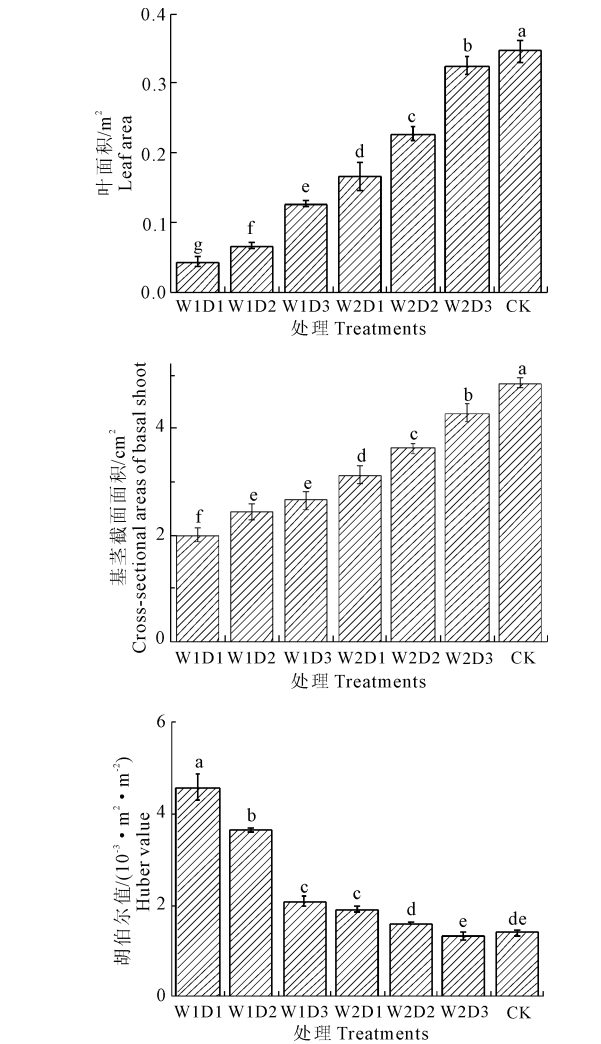


图 3 小桐子幼树的叶面积、基茎截面积和胡伯尔值
Fig.3 Total leaf areas, xylem cross-sectional areas of basal shoot, and Huber values of *Jatropha curcas* L.

2.4 苗期调亏灌溉对小桐子幼树干物质质量及水分利用的影响

从表 2 可以看出,亏水度对小桐子幼树干物质质量的影响表现为 $W2 > W1$,亏水阶段对小桐子幼树干物质质量的影响表现为 $D3 > D2 > D1$ 。W1 处理下小桐子幼树根、茎、叶、叶柄的干物质质量对比充分灌溉的 CK 处理均有大幅度下降,而 W2 处理下小桐子幼树各器官干物质质量与 CK 组的差距要小许多,其中 W2D3 处理更是在根、茎以及总干物质质量方面与 CK 处理基本持平。数据分析表明,与 CK 相比,W1 处理的小桐子干物质质量有大幅度的降低,而 W2 处理的小桐子干物质质量只有小幅度下降。随着灌水量的减少,小桐子冠层干物质质量的下降幅度大于根系下降幅度,也使得根冠比增加。比较 W2D3 与 CK 处理可知,虽然 W2D3 从试验第 60 天开始进行调亏灌溉,但是根的干物质质量与 CK 处理差异并不大。

表 2 小桐子幼树干物质质量及水分利用效率

Table 2 Dry matter and WUE of *Jatropha curcas* L.

处理 Treatments	根干重/g Root dry matter	茎干重/g Stems dry matter	叶干重/g Leaf dry matter	叶柄干重/g Petiole dry matter	总干重/g Total dry matter	灌水量/L Irrigation water	水分利用效率 (g·kg ⁻¹) WUE
W1D1	3.43 ± 0.08f	9.61 ± 0.66e	1.47 ± 0.2g	0.24 ± 0.04e	14.76 ± 0.51f	14.33 ± 0.34f	1.03 ± 0.05d
W1D2	3.94 ± 0.19e	11.2 ± 0.68de	2.22 ± 0.13f	0.33 ± 0.04e	17.68 ± 0.94e	17.75 ± 0.96e	1.00 ± 0.1d
W1D3	4.36 ± 0.14d	12.72 ± 0.9d	4.24 ± 0.14e	0.73 ± 0.04d	22.05 ± 1.21d	21.35 ± 0.76d	1.03 ± 0.08d
W2D1	5.31 ± 0.19c	15.96 ± 0.62c	5.51 ± 0.66d	1.33 ± 0.11c	28.11 ± 0.86c	21.44 ± 0.19d	1.31 ± 0.05c
W2D2	6.52 ± 0.27b	22.11 ± 0.53b	7.58 ± 0.31c	2.13 ± 0.12b	38.34 ± 0.86b	22.92 ± 0.77c	1.67 ± 0.09b
W2D3	7.39 ± 0.34a	28.11 ± 0.29a	10.84 ± 0.44b	2.11 ± 0.11b	48.44 ± 0.61a	25.19 ± 0.47b	1.92 ± 0.04a
CK	7.54 ± 0.22a	28.14 ± 1.82a	11.54 ± 0.52a	2.73 ± 0.12a	49.94 ± 1.49a	28.00 ± 0.43a	1.78 ± 0.05b

数据分析表明,在调亏处理中,亏水度对水分利用效率的影响表现为 W2 > W1, 亏水阶段对水分利用效率的影响表现为 D3 > D2 > D1。在 W2 处理中,随着亏水天数的增加,水分利用效率显著降低,与 W2D3 相比, W2D1 处理的水分利用效率降低 46.7%。比较 W2D3 和 CK 处理可知, W2D3 在节约 11.2%灌溉量的同时,水分利用效率增加 7.8%。

3 讨 论

3.1 调亏灌溉对小桐子幼树生长量和胡伯尔值的影响

小桐子以其具有较强的抗干旱胁迫能力而引起众多学者的高度关注^[4]。在 W2(田间持水量的 45%~65%)的情况下, D1(亏水 120 d)、D2(亏水 90 d)和 D3(亏水 60 d)处理分别在试验开始 0、30 d 和 60 d 时,株高和茎粗开始出现生长缓慢的趋势。这是由于经亏水处理后的小桐子幼树株高和茎粗生长明显受到抑制,其中高亏水度 W1(田间持水量的 25%~45%)比低亏水度 W2 对株高和茎粗的抑制更明显。这说明亏水处理会显著抑制小桐子的株高和茎粗生长,这与白伟等^[14]的研究结果一致。比较 W1D3 和 W2D1 处理的株高可知,在试验开始的前 60 d, W1D3 处理的株高要优于 W2D1 处理,而试验开始 90 d 之后, W2D1 处理的株高超过 W1D3 处理直至试验结束。这说明相比于轻度调亏处理(W2),重度调亏处理(W1)对小桐子幼树株高的影响更加快速且显著。

本研究发现,与 CK 相比, W1 和 W2 处理叶面积和基茎截面面积均减小,并且减少量随着调亏的加重和时间加长而增加,但由于叶面积的降低幅度大于基茎截面面积,所以胡伯尔值显著增加(图 3),从而提高小桐子根系向冠层传输水分的效率^[15],保证小桐子在干旱胁迫下的生存能力。

3.2 调亏灌溉对小桐子幼树粗高比、根冠比和壮苗指数的影响

根冠比反映了植物的生长状况以及周围环境对其根系和地上部分的影响^[15]。之前研究表明,随着土壤水分的减少,辣椒根冠比呈先增加后减小的趋势^[16]。这与我们的研究结果有所差异,本研究表明,调亏处理会增大小桐子根冠比,而重度调亏和更长的调亏日数会使小桐子幼树根冠比显著增大,说明水分胁迫下,小桐子会减少地上部分的生长,减少程度与受到的水分胁迫程度成正比。

壮苗指数是衡量幼苗生长状况的指标,它与作物的品质有密切关系^[17]。传统的研究认为,壮苗指数与灌水量有很大关系,在水分状况比较好的情况下会获得好的壮苗指数,这与我们的研究结果基本一致,在调亏处理中,虽然更多的灌水量使根冠比减小,但干物质质量的增加幅度比根冠比更大,所以得到更好的壮苗指数。已有研究表明,在土壤水分较适宜的情况下,根系水分传导的提高会促进根系对水分的吸收与利用,从而显著提高了壮苗指数^[12]。但比较 W2D3 和 CK 处理可知, W2D3 处理灌水更少,但是获得了更高的壮苗指数,我们认为 W2D3 处理的灌水设计有利于干物质质量向各个器官分配,从而得到较大的根冠比,在总干物质质量相差不大的情况下, W2D3 处理获得更高的壮苗指数。前人研究也表明,与充分供水比较,轻度水分胁迫处理的小桐子幼树壮苗指数反而有提高^[18]。

3.3 苗期调亏灌溉对小桐子幼树干物质质量及水分利用的影响

水分胁迫会使小桐子干物质质量累积减少^[19]。在受到水分胁迫时,小桐子通过叶片早衰和脱落来减缓生长^[13],使得干物质质量显著下降,这与本研究结果一致。数据分析表明, W1 的干物质质量下降幅度要明显大于 W2 处理,这说明重度调亏会严重影响小桐子幼树的生长。比较 W2D3 与 CK 处理

可知,虽然 W2D3 从试验第 60 天开始进行调亏灌溉,但是根的干物质质量与 CK 处理差异并不大,我们认为小桐子幼树根系生长的重要阶段在前期,前期保持较好的土壤水分状况可使小桐子幼树的根系发育良好,有助于后期小桐子幼树生长。

小桐子是一种落叶的肉茎植物,之前研究表明其具有较高的水分利用效率^[20]。在 W2 处理中,随着亏水天数的增加,水分利用效率显著降低,这是因为亏水处理虽然降低了灌水量,但也影响了小桐子的生长发育,而干物质质量降低量多于灌水量,所以水分利用效率降低了。与 CK 相比,W2D3 处理在灌水量节约 11.2% 的情况下,水分利用效率显著提高了 7.8%。之前的研究也表明适当调亏有利于植株加强对有效水的利用从而提高水分利用效率^[21]。

4 结 论

1) 亏水度对小桐子幼树的株高、茎粗、壮苗指数、叶面积、基茎截面积、干物质质量和水分利用效率的影响趋势表现为轻度调亏处理 > 重度调亏处理;对根冠比和胡伯尔值的影响趋势表现为重度调亏处理 > 轻度调亏处理。

2) 亏水时间对小桐子幼树的株高、茎粗、壮苗指数、叶面积、基茎截面积、干物质质量和水分利用效率的影响趋势表现为 60 d > 90 d > 120 d;对根冠比和胡伯尔值的影响趋势均表现为 120 d > 90 d > 60 d。

3) 与正常灌水相比,轻度调亏 60 d 的处理节约灌溉用水 11.2%,其叶干重和叶柄干重显著下降,根系、茎秆和总干重下降并不明显,而粗高比和根冠比显著提高,因此,灌溉水利用效率和壮苗指数增加 7.8% 和 8.1%。可见,苗后期轻度亏水不仅具有明显的壮苗作用,而且水分利用效率显著增大。

4) 根据试验结果可以得出,小桐子自身具有较强的抗水分胁迫能力,可在干旱地区种植,若作为改善恶劣生态环境的先锋植物种植,可在种植前期保证较好的土壤水分,使小桐子的根系正常发育为之后的生长提供良好基础。

参 考 文 献:

[1] 马福生,康绍忠,王密侠.果树调亏灌溉技术的研究现状与展望[J].干旱地区农业研究,2005,23(4):225-228.

[2] 康绍忠,史文娟,胡笑涛.调亏灌溉对玉米生理指标和水分利用效率的影响[J].农业工程学报,1998,4:82-87.

[3] 孟兆江,贾大林,刘安能,等.调亏灌溉对冬小麦生理机制及水

分利用效率的影响[J].农业工程学报,2003,19(4):66-68.

[4] Kumar A, Shamma S. An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review[J]. Industrial Crops and Products, 2008,28(1):1-8.

[5] 罗福强,王子玉,梁 昱,等.作为燃油的小桐子油的物化性质及黏温特性[J].农业工程学报,2010,26(5):227-231.

[6] 李清飞,周小勇,仇荣亮,等.麻疯树复垦酸性矿山废弃地及其生长影响因子研究[J].土壤学报,2010,47(1):172-176.

[7] 李远发,梁葵华,王凌晖.麻疯树资源分布及其应用研究[J].广西农业科学,2009,40(3):311-314.

[8] L. Díaz - López, V. Gimeno, I. Simón, et al. *Jatropha curcas* seedlings show a water conservation strategy under drought conditions based on decreasing leaf growth and stomatal conductance[J]. Agricultural Water Management, 2012,105:48-56.

[9] Maes W H, Achten W M J, Reubens B. Plant-water relationships and growth strategies of *Jatropha curcas* L. seedlings under different levels of drought stress[J]. Journal of Arid Environments, 2009,73:877-884.

[10] 杨启良,孙英杰,齐亚峰,等.不同水量交替灌溉对小桐子生长调控与水分利用的影响[J].农业工程学报,2012,28(18):121-126.

[11] 尹 丽,刘永安,谢财永,等.干旱胁迫与施氮对麻疯树幼苗渗透调节物质积累的影响[J].应用生态学报,2012,23(3):632-638.

[12] 杨启良,张富仓,刘小刚,等.控制性分根区交替滴灌对苹果幼树形态特征与根系水分传导的影响[J].应用生态学报,2012,23(5):1233-1239.

[13] Sellin A, Öunapuu E, Kaurilind E, et al. Size-dependent variability of leaf and shoot hydraulic conductance in silver birch[J]. Trees, 2012,26:821-831.

[14] 白 伟,孙占祥,刘晓晨,等.苗期调亏灌溉对大豆生长发育和产量的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(4):50-53.

[15] 王艳哲,刘秀位,孙宏勇,等.水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J].中国生态农业学报,2013,21(3):282-289.

[16] 马 甜,郭 睿,范兴科,等.苗期土壤水分控制对线辣椒生长和水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2012,31(3):119-121.

[17] 黄淑华,徐福利,王渭玲,等.丹参壮苗指数及其模拟模型[J].应用生态学报,2012,23(10):2779-2785.

[18] 杨启良,周 兵,刘小刚,等.限量灌溉和施氮对小桐子根区水氮迁移与利用的影响[J].农业工程学报,2013,29(4):142-150.

[19] Maes MH, Achten WMJ, Reubens B, et al. *Jatropha curcas* saplings under different levels of drought stress[J]. J Arid Environ, 2009,73(10):877-884.

[20] Loggini B, Scartazza A, Brugnoli E. Antioxidative defense system, pigment composition, and photosynthetic efficiency in two wheat cultivars subjected to drought[J]. Plant Physiol, 1999,119(3):1091-1099.

[21] 庄健元,成自勇,韩辉生,等.麦草覆盖免耕栽培马铃薯调亏灌溉技术试验研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):7-11.