

水氮耦合对小桐子生长和灌溉水利用效率的影响^{*}

王明克 杨启良^{**} 刘小刚 戈振扬 杨具瑞 刘柯楠

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要 为了研究水氮耦合对于小桐子生长和灌溉水利用效率的影响, 采用 3 个供水水平 ($W_1, 15.3 \text{ mm}$; $W_2, 25.5 \text{ mm}$; $W_3, 40.7 \text{ mm}$) 和 3 个施氮水平 ($N_1, 0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; $N_2, 0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; $N_3, 0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 进行盆栽实验。结果表明: 与 W_3 相比, W_1 和 W_2 处理的株高、茎粗、叶面积和总干物质量分别降低了 61% 和 34%、57% 和 35%、46% 和 32%、49% 和 35%, 根冠比在 W_2 处理时达到最大值; 对不同氮素处理, 株高和叶面积最大值均出现在 N_2 处理, 而茎粗和根冠比则随着施氮量的增加而减小; 与 W_3N_3 相比, W_2N_2 处理节省灌溉用水 38%, 节约氮肥施用量 50%, 其株高、茎粗和总干物质量分别减少了 12%、21% 和 12%, 根冠比和叶面积分别显著增加了 48% 和 16%, 灌水后第 2 天、第 3 天和第 4 天的蒸腾量分别显著降低 21%、15% 和 12%, 从而使灌溉水利用效率提高了 40%。

关键词 限量灌溉; 施氮; 小桐子; 形态特征; 灌溉水利用效率

中图分类号 Q945 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)5-1175-06

Coupling effects of watering and nitrogen fertilization on the growth and irrigation water use efficiency of *Jatropha curcas*. WANG Ming-ke, YANG Qi-liang^{**}, LIU Xiao-gang, GE Zhen-yang, YANG Ju-rui, LIU Ke-nan (*Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(5): 1175-1180.

Abstract: A pot experiment was conducted to study the coupling effects of watering and nitrogen fertilization on the growth and irrigation water use efficiency (WUEi) of *Jatropha curcas*. Three watering levels ($W_1, 15.3 \text{ mm}$; $W_2, 25.5 \text{ mm}$; $W_3, 40.7 \text{ mm}$) and three nitrogen fertilization levels ($N_1, 0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; $N_2, 0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; $N_3, 0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) were designed. As compared with those in treatment W_3 , the plant height, stem diameter, leaf area, and total dry mass in treatments W_1 and W_2 decreased significantly by 61% and 34%, 57% and 35%, 46% and 32%, and 49% and 35%, respectively, and the root-shoot ratio in treatment W_2 reached the maximum. In nitrogen fertilization treatments, the maximum values of plant height and leaf area appeared in treatment N_2 , but the stem diameter and root-shoot ratio decreased with the increasing nitrogen fertilization level. As compared to treatment W_3N_3 , treatment W_2N_2 (which saved the irrigation water and nitrogen fertilizer by 38% and 50%, respectively) decreased the plant height, stem diameter, and total dry mass by 12%, 21%, and 12%, and increased the root-shoot ratio and leaf area significantly by 48% and 16%, respectively, and decreased the transpiration significantly by 21%, 15% and 12% at the days 2, 3, and 4 after watering, respectively, leading to the WUEi of *J. curcas* increased significantly by 40%.

Key words: limited irrigation; nitrogen fertilization; *Jatropha curcas*; morphological characteristics; irrigation water use efficiency.

小桐子又名麻疯树、膏桐、芙蓉树, 为大戟科麻疯树属植物, 原产于美洲, 现广泛分布于世界各热

带、亚热带及干热河谷地区(郑万均, 1998)。小桐子在云南广泛分布在金沙江、澜沧江、红河等干热河谷地区(费世民等, 2006), 具有喜光, 耐干旱贫瘠的特点, 小桐子因其具有较高的抗环境胁迫的能力引起了众多专家学者的高度关注(费世民等, 2006;

^{*} 国家自然科学基金项目(51009073 和 51109012)、水利部公益项目(201101042)、云南省应用基础研究面上项目(2010ZC042 和 2010ZC043)和昆明理工大学分析测试基金项目(2010293)资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: yangqilianglovena@163.com

收稿日期: 2012-12-14 接受日期: 2013-01-15

Kumar & Sharma, 2008; Prueksakorn *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2010)。小桐子以其极高的种子含油率,作为可再生资源,对于生物能源的研究开发有着非常重要的作用(Evans, 1983)。Ye等(2010)报道指出,不同国家18个产地的小桐子种仁含油率在51.3%~61.2%,且小桐子油的组成成分及化学特性与零号柴油非常接近,经过简单的加工就可以使用,是一种极具开发潜力的生物液体燃料(Carvalho *et al.*, 2008)。

小桐子作为重要的能源作物,在云南的发展非常迅速,仅规划的种植面积就已超过百万公顷,并且多数都为人工纯林(伍建榕等, 2008)。根据云南省的气候和土壤特点,通过保证充分灌溉和施肥的方式来大幅度提高生产水平的方式成本太高。研究表明,干旱缺水并不总会降低产量,一定时期内有限的水分亏缺可能对增加产量和节水都有利(林琪等, 2004);适当减少灌水次数和定额,可以达到不减产甚至是增产的目的(许振柱等, 1997; Srivali & Renu, 1998)。尹丽等(2010)研究表明,干旱胁迫条件下,轻度干旱时,提高施氮水平对麻疯树光合和生长具有明显促进作用;中度干旱时,中氮的促进作用最好;重度干旱时,低氮促进效果最好,高氮的促进作用逐渐转为抑制。焦娟玉等(2011)研究发现,在土壤N含量不高的情况下,较低的土壤水分更适宜麻疯树下生长,而在80%田间持水量条件下,增施氮肥会更有利于麻疯树光合特性的提高。目前对小桐子生态适应性方面的研究多集中于盐分和水分胁迫等方面(Silva *et al.*, 2010a, 2010b, 2010c; Rao & Kesava *et al.*, 2012)。而关于水氮耦合对小桐子生长、耗水特性和灌溉水利用效率方面的研究还报道较少。为此,本文基于水氮耦合对小桐子生长和灌溉水利用效率的影响进行研究,目的是为了找出有利于小桐子灌溉水利用效率提高的最佳水氮耦合模式,为小桐子的栽培与经营提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区材料与方法

试验于2011年3—9月在昆明理工大学现代农业工程学院温室进行,温室位于25°3′40.24″N, 102°45′38.45″E。实验所用小桐子来自元谋县干热河谷地区。试验用盆规格:下底宽22.5 cm,上底宽30 cm,高30 cm,底部有3个直径1 cm的小孔保证排水和通气。盆栽用土为云南当地常见的红壤土,

呈酸性,pH值5.0~5.5,其有机质含量为13.12 g·kg⁻¹、全氮0.87 g·kg⁻¹、全磷0.68 g·kg⁻¹、全钾13.9 g·kg⁻¹。经过自然风干、粉碎、过5 mm筛,按照每盆13 kg的规格装盆,苗移栽后浇水至田间持水量,表面均匀铺1 cm厚的蛭石以防止因浇水导致的土壤板结。灌溉用水为自来水。

1.2 实验设计

经过90 d的缓苗后,挑选出长势均匀的小桐子幼苗进行分组处理,每盆1株。实验设置3个氮素处理,3个水分处理,完全设计共9个处理,每个处理重复3次,灌水处理为(W₁, 40.7 mm; W₂, 25.5 mm; W₃, 15.3 mm),施氮处理中每千克风干土中施入尿素分析纯为(N₁, 0 g; N₂, 0.3 g; N₃, 0.6 g)。灌水周期为7 d,磷肥用磷酸二氢钾分析纯(P₂O₅, 0.3 g·kg⁻¹风干土),按田间持水量进行计算,将氮磷肥一次性溶于水,然后随水浇入盆中以保证肥料在盆内土壤中均匀分布,氮肥也用此法一次性施入盆中。为了减少温室内植物生长因盆放置环境而产生的系统误差,实验期间每两周沿相同的方向转动一次。

1.3 研究方法

1.3.1 株高、茎粗及干物质质量 株高和茎粗分别采用卷尺和游标卡尺测量,7月2日进行小桐子苗的移栽,7月7日进行实验处理,每7 d测量一次,共10次。各器官的生物量均在2011年9月18日获取,保持105℃杀青30 min,接着调温至80℃在烘箱中烘干至恒重,用天平测定干物质质量。

1.3.2 蒸散量和单株蒸腾量测定 均采用连盆称重法进行测量。测量单盆蒸散量时,在不同的时间点连盆称重并记录数据;测量单株蒸腾量前,先用黑塑料袋蒙住盆表面,然后用胶带密封茎杆接触处,从而避免了盆表面土壤蒸发的发生,再连盆称重并记录数据。

1.3.3 叶面积 叶面积采用剪纸称重法进行测量(冯冬霞和施生锦, 2005)。植物总叶面积=单位叶片干重对应的叶面积×植株总叶片干重。

1.3.4 灌溉水利用效率 灌溉水利用效率=总干物质质量/灌溉量。

2 结果与分析

2.1 不同水氮耦合处理对小桐子株高和茎粗的影响

由图1可以看出,灌水和施氮对小桐子株高增量的影响均达极显著水平($P<0.01$)。小桐子的株

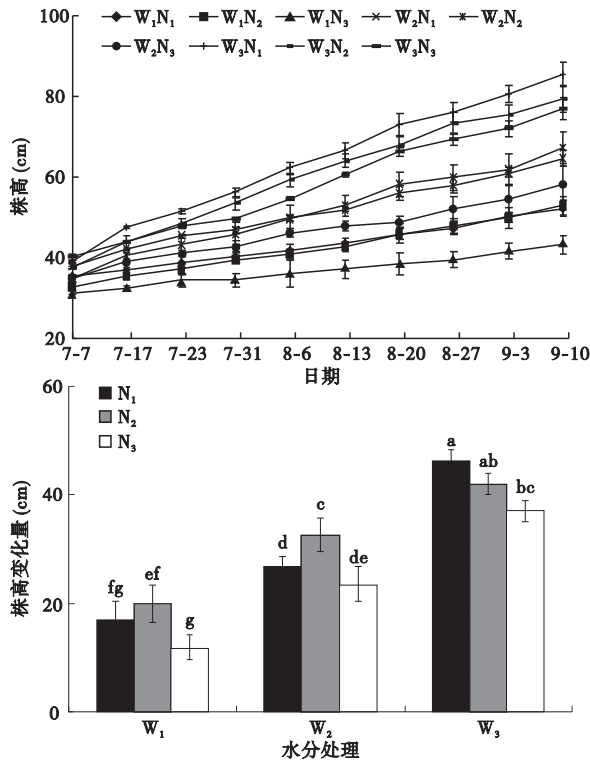


图1 不同水氮耦合处理对小桐子株高和株高增量的影响
Fig.1 Coupling effects of different irrigation and nitrogen fertilizer treatments on height and the amount of height increment of *Jatropha curcas*

高增量随着灌水量的增多呈明显上升趋势,可见,小桐子的株高随着灌水量的增加显著提高。与 W₁ 相比, W₂ 和 W₃ 处理的株高增量分别提高了 70% 和 156%, 达到极显著水平 ($P < 0.01$)。与 N₁ 相比, N₂ 的株高增量提高了 5%, 但 N₃ 处理的株高增量降低了 20%。与高水高氮的 W₃N₃ 相比, W₂N₂ 节省灌溉用水 38%, 节约氮肥施用量 50%, 其株高增量仅降低了 12%。

由图 2 可知, 灌水和施氮对于小桐子茎粗增量的影响均达极显著水平 ($P < 0.01$)。小桐子的茎粗增量随着施氮量的增多呈明显下降趋势, 而随着灌水量的增多呈明显上升趋势, 可见小桐子的茎粗增量随施氮量的增多显著降低, 随灌水量的增多显著提高。其中, 与 W₁ 相比, W₂ 和 W₃ 处理的茎粗增量分别提高了 52% 和 133% ($P < 0.01$); 与 N₁ 相比, N₂ 和 N₃ 处理的茎粗增量分别显著降低了 19% 和 37% ($P < 0.05$)。与高水高氮的 W₃N₃ 相比, W₂N₂ 节省灌溉水 38%, 节约氮肥施用量 50%, 其茎粗增量显著降低了 21% ($P < 0.05$)。

2.2 不同水氮耦合处理对小桐子叶面积的影响

由图 3 可知, 施氮和灌水对小桐子叶面积的影

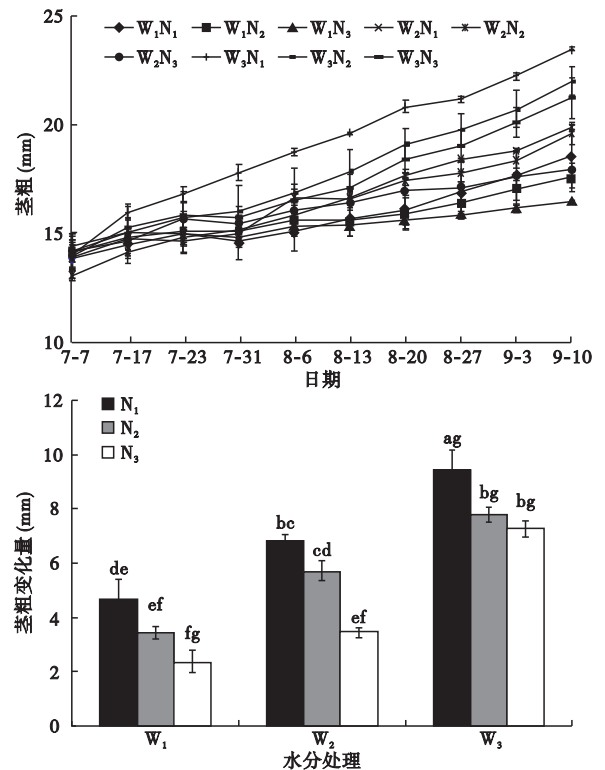


图2 不同水氮耦合处理对小桐子茎粗和茎粗增量的影响
Fig.2 Coupling effects of different irrigation and nitrogen fertilizer treatments on stem diameter and the amount of stem diameter increment of *Jatropha curcas*

响均达极显著水平 ($P < 0.01$), 其交互作用对小桐子叶面积的影响也达极显著水平。由图 3 可知, 不同水分处理中总是当 N₂ 处理的叶面积均达到最大值, N₃ 时反而降低, 在相同施氮处理条件下, 叶面积随着灌水量的增多显著增加。与 W₁ 相比, W₂ 和 W₃ 处理的叶面积分别显著提高了 27% 和 85%, 与 N₁ 相比, N₂ 处理的叶面积提高 55%, 但 N₃ 处理的叶面积显著降低 19% ($P < 0.01$)。与高水高氮的 W₃N₃ 相比, W₂N₂ 处理节省灌溉用水 38%, 节约氮肥施用量 50%, 其叶面积显著增加了 16% ($P < 0.05$)。

2.3 不同水氮耦合处理对小桐子根冠比和总干物质量的影响

由图 4 可知, 施氮和灌水及交互作用对小桐子根冠比的影响均达极显著水平 ($P < 0.01$)。当灌水处理为 W₂ 时, 根冠比均明显高于 W₁ 和 W₃ 处理, 这表明 W₂ 处理具有促进小桐子根冠比增加的功能。与 W₁ 相比, W₂ 和 W₃ 处理的根冠比分别显著提高了 72% 和 20% ($P < 0.01$); 与 N₁ 相比, N₂ 和 N₃ 处理的根冠比分别显著降低了 16% 和 9% ($P < 0.01$)。与 W₃N₃ 相比, W₂N₂ 处理节省灌溉用水

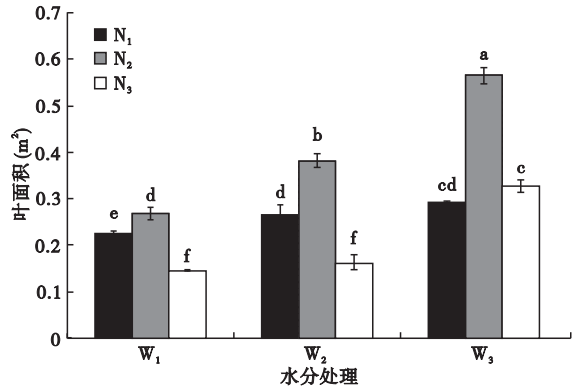


图 3 不同水氮耦合处理对小桐子叶面积的影响
Fig. 3 Coupling effects of different irrigation and nitrogen fertilizer treatments on leaf area of *Jatropha curcas*

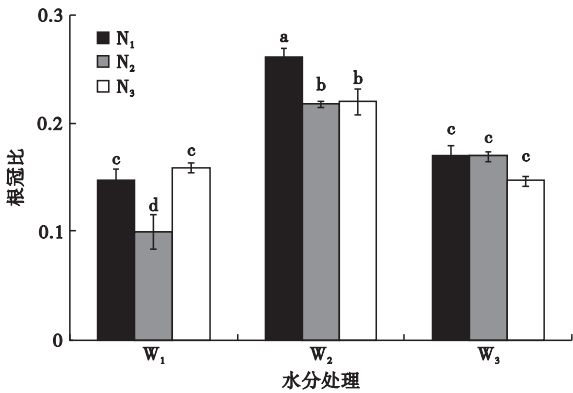


图 4 不同水氮耦合处理对小桐子根冠比的影响
Fig. 4 Coupling effects of different irrigation and nitrogen fertilizer treatments on root-shoot ratio of *Jatropha curcas*

38%, 节约氮肥施用量 50%, 其根冠比增加了显著 48% ($P<0.05$)。

由图 5 可知,施氮和灌水对于小桐子总干物质质量的影响达极显著水平($P<0.01$),其交互作用的影响达显著水平($P<0.05$)。由图 5 可以看出,总干物质质量随灌水量的提高显著增大,但不管灌水多少,总干物质质量在 N₃ 处理时都明显下降。由表 4 可知,与 W₁ 相比,W₂ 和 W₃ 处理的总干物质质量分别显著提高 29% 和 98% ($P<0.01$);与 N₁ 相比,N₂ 处理的总干物质质量提高 7%,但 N₃ 处理的总干物质质量降低 24%。与高水高氮的 W₃N₃ 相比,W₂N₂ 处理节省灌溉用水 38%,节约氮肥施用量 50%,其干物质质量增加了显著 12% ($P<0.05$)。

2.4 不同水氮耦合处理对小桐子灌溉水利用效率的影响

由图 6 可知,灌水和施氮处理及交互作用对于小桐子灌溉水利用效率的影响达极显著水平($P<0.01$)。施氮量相同时,水分胁迫程度最高的 W₁ 处

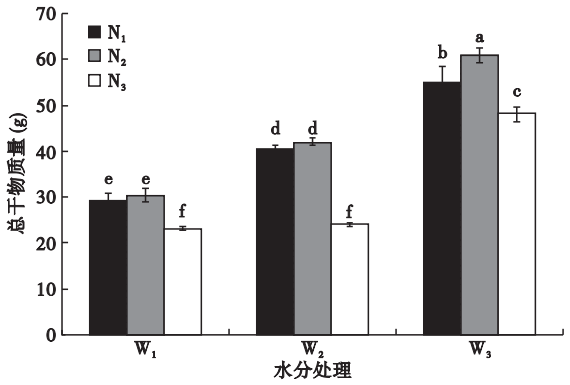


图 5 不同水氮耦合处理对小桐子单株总干物质量的影响
Fig. 5 Coupling effects of different irrigation and nitrogen fertilizer treatments on total dry mass of per plant of *Jatropha curcas*

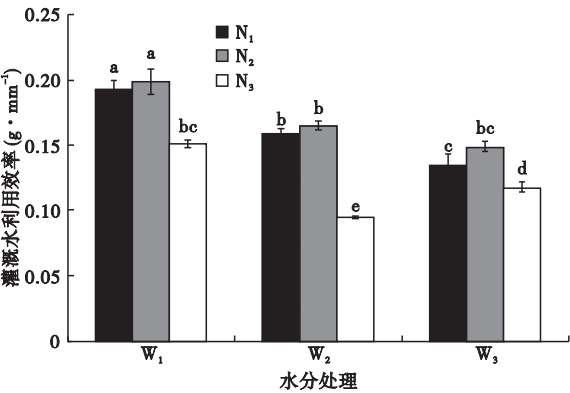


图 6 不同水氮耦合处理对小桐子灌溉水利用效率的影响
Fig. 6 Coupling effects of different irrigation and nitrogen fertilizer treatments on irrigation WUE of *Jatropha curcas*

理的小桐子取得较高的水分利用效率;与 N₁ 和 N₂ 处理相比,N₃ 处理并没有提高小桐子的灌溉水利用效率。与 W₁ 相比,W₂ 和 W₃ 处理的灌溉水利用效率分别降低 23% 和 26% ($P<0.01$);与 N₁ 相比,N₂ 处理的灌溉水利用效率提高 6%,但 N₃ 处理的灌溉水利用效率降低 25%。虽然 W₁ 处理时小桐子的灌溉水利用效率最高,但由图 5 可知,总干物质质量明显低于其他处理,故在节水的前提下,W₂ 为最佳水处理。与 W₃N₃ 相比,W₂N₂ 处理节省灌溉用水 38%,节约氮肥施用量 50%,其灌溉水利用效率提高了 40% ($P<0.05$)。

2.5 不同水氮耦合处理对小桐子蒸散耗水特性的影响

由图 7 和表 1 可知,不同灌水和施氮处理对于小桐子蒸腾量和蒸散量日变化的影响均有所不同,W₂ 和 W₃ 处理下(W₂N₃ 处理因病害叶片脱落除外,脱落叶片计入叶干重)小桐子蒸腾量和蒸散量的日

表 1 不同水氮耦合处理对小桐子单株蒸腾量的影响 (g)
Table 1 Coupling effects of different irrigation and nitrogen fertilizer treatments on transpiration of *Jatropha curcas* individuals

处理	9 月 5 日	9 月 6 日	9 月 7 日	9 月 8 日
W ₁ N ₁	292.0±23.03 B	277.7±9.70 C	333.3±10.48 A	399.0±16.74 B
W ₁ N ₂	367.7±17.85 A	530.3±18.84 A	341.7±15.65 A	346.0±12.70 BC
W ₁ N ₃	279.0±32.14 B	382.7±27.21 B	335.3±7.27 A	328.7±21.67 C
W ₂ N ₁	168.3±20.85 CD	304.3±16.18 C	324.0±11.27 A	492.3±37.75 A
W ₂ N ₂	220.7±3.38 C	324.0±14.29 C	296.7±24.27 A	400.3±20.70 B
W ₂ N ₃	42.0±17.96 E	48.5±17.56 E	41.5±16.74 E	213.0±41.64 E
W ₃ N ₁	119.7±25.13 D	161.0±32.63 D	146.7±27.27 B	295.0±12.74 C
W ₃ N ₂	135.0±2.89 D	165.0±8.51 D	130.0±4.00 B	229.3±8.09 dE
W ₃ N ₃	143.7±11.14 D	127.7±7.13 D	126.3±2.40 B	281.0±11.06 CD

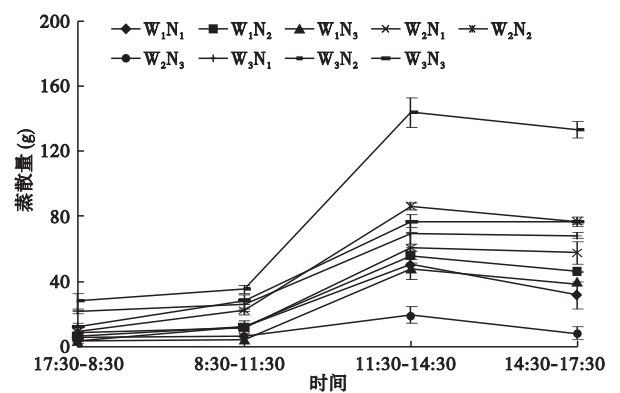


图 7 不同水氮耦合处理对单盆小桐子蒸散量的影响
Fig. 7 Coupling effects of different irrigation and nitrogen fertilizer treatments on evapotranspiration of per basin of *Jatropha curcas*

变化均显著高于 W₁(*P*<0.05)。蒸散量日变化表现为,在 11:30 前小桐子的蒸散量日变化不明显,在 11:30—14:30 时, W₃N₂ 达到最大值 143.7 g。与 W₃N₃ 相比, W₂N₂ 处理节省灌溉用水 37.5%, 节约氮肥施用量 50%, 其小桐子的平均蒸腾量降低了 6%, 但日蒸散量提高 1%, 灌水后第 2 天、第 3 天和第 4 天的蒸腾量分别显著降低 21%、15% 和 12% (*P*<0.05), 17:30—8:30、8:30—11:30 的蒸散量分别降低了 17%、19%, 11:30—14:30 蒸散量反而升高了 12%, 14:30—17:30 的蒸散量没有变化。

3 讨论

水是生命之源, 又是植物体与周围环境相互联系的纽带, 参与植物体几乎所有的生理过程 (Ingram & Bartels, 1996)。水分亏缺会延缓、停止或破坏植物正常生长 (Rodiyati *et al.*, 2005)。本研究表明, 与 W₁ 相比, W₂ 和 W₃ 处理的株高、茎粗、叶面积和总干物质量均随着灌水量的提高而显著提高。根冠比

并未随着灌水量的提高而持续提高, 而是在 W₂ 时达到最大值, 可能的原因包括以下几点: 1) 温室内温度高, 蒸发蒸腾量大, W₁ 和 W₂ 处理长期处于干旱胁迫状态; 2) 当表层土壤水分亏缺时, 根会向深层延伸, 有利于根系发育和深层土壤水分的利用 (Potters *et al.*, 2003; Pasternak *et al.*, 2005), 而在破坏盆栽获取地下部分数据时观察到, 植物根系已遍布盆底, 无法通过向土壤深层生长获取水分; 3) 观察破坏时的土壤湿润程度, W₂ 处理明显高于 W₁。综合上述原因, W₁ 处理因严重缺水, 根系生长极度缓慢, 实验数据显示, W₁ 的地上部分干重较之 W₂ 降低了 27%, 根系干重降低 60%, 而 W₃ 处理因充足供水, 地上部分生长速度超过根系, 故而 W₂ 处理时根冠比取得最大值。氮肥施用量不同时, 对于株高和叶面积, 最大值均出现在 N₂ 处理; 茎粗和根冠比则随着施氮量的不断提高而下降。有研究指出, 施氮在促进植物地上部分生长的同时增大了蒸腾失水量, 导致土壤水分状况恶化, 从而抑制植物生长, 使植物对干旱更为敏感 (Shangguan *et al.*, 2000; Ashraf *et al.*, 2001)。与 W₁ 处理相比, W₂ 和 W₃ 处理的灌溉水利用效率分别降低了 23% 和 26%。施氮量不同时, 与 N₁ 处理相比, N₂ 处理的 WUE 提高 6%, N₃ 时反而降低 25%。虽然 W₁N₂ 处理在所有处理当中 WUE 最高, 但总干物质量取得最小值 (图 5), 因此, W₁N₂ 处理不利于小桐子的生长。

灌溉水利用效率公认为节水农业重要指标 (王会肖和刘昌明, 2000), 与抗旱性有着密切的关系, 较高的灌溉水利用效率有利于植物在缺水的条件下保持产量 (熊伟等, 2005)。氮素是植物体内叶绿素和多种酶的重要组成部分, 对植物的光合速率、光呼吸等都有明显的影响 (Evans, 1983)。同时, 这对因子也能相互作用, 合理的水氮组合能够明显的相互

协调和促进另一方的利用效率,从而达到增产增收的效果(梁运红等,2003)。由图6可知,与 N_2 相比, N_3 灌溉水利用效率并没有提高。与 W_3N_3 相比, W_2N_2 处理节约灌溉用水达38%,节约氮肥施用量达50%时,其灌溉水利用效率反而提高了40%,因此,合理的水氮组合在不影响小桐子生长的条件下,能促进灌溉水利用效率提高。有研究指出,适当的施肥可以一定程度上提高灌溉水利用效率(Thomas *et al.*, 2000)。孙文涛等(2003)利用滴灌施肥研究水肥互作效应时发现,合理施肥可提高旱地灌溉水利用效率,进而达到增产的目的。灌水也有明显的调节肥料利用效率的作用。本试验中,水氮交互作用均达到显著水平($P < 0.05$),也从一定程度上证实了水氮组合的相互协调和促进作用。综上所述,有利于小桐子灌溉水利用效率提高的最佳水氮耦合处理为 W_2N_2 处理。

参考文献

- 费世民,陈秀明,何亚平. 2006. 四川麻疯树生物柴油研究展望. 生物质化学工程, **40**(B12): 193–194.
- 冯冬霞,施生锦. 2005. 叶面积测定方法的研究效果初报. 中国农学通报, **21**(6): 150–152.
- 焦媚玉,尹春英,陈珂. 2011. 土壤水、氮供应对麻疯树幼苗光合特性的影响. 植物生态学报, **35**(1): 91–99.
- 梁运红,依艳丽,尹英敏,等. 2003. 水肥耦合效应对辣椒产量影响初探. 土壤通报, **34**(4): 262–266.
- 林琪,侯立白,韩伟,等. 2006. 限量控制灌水对小麦光合作用及产量构成的影响. 莱阳农学院学报, (6): 199–202.
- 孙文涛,孙占祥,王聪翔,等. 2003. 滴灌施肥条件下玉米水肥耦合效应的研究. 中国农业科学, **39**(3): 563–568.
- 王会肖,刘昌明. 2000. 作物水分利用效率内涵及研究进展. 水利科学进展, **11**(1): 99–104.
- 伍建榕,马焕成,刘婷婷,等. 2008. 干热河谷地带麻疯树主要病虫害调查. 中国森林病虫, **7**(4): 18–21.
- 熊伟,王彦辉,于澎涛. 2005. 树木水分利用效率研究综述. 生态学杂志, **24**(4): 417–421.
- 许振柱,于振文,李晖,等. 1997. 限量灌水对冬玉米光合性能和水分利用的影响. 华北农学报, **12**(2): 65–70.
- 尹丽,胡庭兴,刘永安,等. 2010. 干旱胁迫对不同施氮水平麻疯树幼苗光合特性及生长的影响. 应用生态学报, **21**(3): 569–576.
- 郑万均. 1998. 中国树木志. 北京: 中国林业出版社.
- Ashraf M, Shabaz M, Ashraf MY. 2001. Influence of nitrogen supply and water stress on growth and nitrogen, phosphorus potassium and calcium contents in pearl millet. *Biologia Plantarum*, **44**: 459–462.
- Carvalho CR, Clarindo WR, Praca MM, *et al.* 2008. Genome size, base composition and karyotype of *Jatropha curcas* L., an important biofuel plant. *Plant Science*, **174**: 613–617.
- Evans RJ. 1983. Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology*, **72**: 297–302.
- Ingram J, Bartels D. 1996. The molecular basis of dehydration tolerance in plant. *Annual Review of Plant Physiology & Plant Molecular Biology*, **47**: 377–403.
- Kumar A, Sharma S. 2008. An evaluation of multipurpose oil seedcrop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review. *Industrial Crops and Products*, **28**: 1–8.
- Pasternak T, Rudas V, Potters G, *et al.* 2005. Morphogenic effects of a biotic stress: Reorientation of growth in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, **53**: 299–314.
- Potters G, Pasternak TP, Guisez Y, *et al.* 2007. Stress-induced morphogenic responses: Growing out of trouble. *Trends in Plant Science*, **12**: 98–105.
- Prueksakorn K, Gheewala SH, Malakul P, *et al.* 2010. Energy analysis of *Jatropha* plantation systems for biodiesel production in Thailand. *Energy for Sustainable Development*, **14**: 1–5.
- Rao AVRK, Wani SP, Singh P, *et al.* 2012. Water requirement and use by *Jatropha curcas* in a semi-arid tropical location. *Biomass and Bioenergy*, **39**: 175–181.
- Rodiyati A, Arisoelaningsih E, Isagi Y, *et al.* 2005. Responses of *Cyperus brevifolius* (Roth.) Hassk. and *Cyperus kyllingia* Endl to varying soil water availability. *Environmental and Experimental Botany*, **53**: 259–269.
- Shangguan ZP, Shao MA, Dyckmans J. 2000. Nitrogen nutrition and water stress effects on leaf photosynthetic gas exchange and water use efficiency in winter wheat. *Environmental and Experimental Botany*, **44**: 141–149.
- Silva EN, Ribeiro RV, Ferreira-Silva SL, *et al.* 2010a. Comparative effects of salinity and water stress on photosynthesis, water relations and growth of *Jatropha curcas* plants. *Journal of Arid Environments*, **74**: 1130–1137.
- Silva EN, Ferreira-Silva SL, Fontenele Ade V, *et al.* 2010b. Photosynthetic changes and protective mechanisms against oxidative damage subjected to isolated and combined drought and heat stresses in *Jatropha curcas* plants. *Journal of Plant Physiology*, **167**: 1157–1164.
- Silva EN, Ribeiro RV, Ferreira-Silva SL, *et al.* 2012c. Coordinate changes in photosynthesis, sugar accumulation and antioxidant enzymes improve the performance of *Jatropha curcas* plants under drought stress. *Biomass and Bioenergy*, **45**: 270–279.
- Srivali B, Renu KC. 1998. Drought induced enhancement of protease activity during monocarpic senescence in wheat. *Current Science*, **75**: 1174–1176.
- Thomas TL, Doerge TA, Godin RA. 2000. Nitrogen and water interactions in subsurface drip-irrigated cauliflower. II. Agronomic, economic, and environmental outcomes. *Soil Science Society of America Journal*, **64**: 412–418.
- Ye M, Li CY, Francis G, *et al.* 2010. Current situation and prospects of *Jatropha curcas* as a multipurpose tree in China. *Agroforestry Systems*, **76**: 487–497.

作者简介 王明克,男,1986年生,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与新技术方面的研究。E-mail: herowangk@163.com

责任编辑 王伟