

分根区灌溉和氮肥处理对星油藤幼苗的影响

耿艳菁^{1,2}, 蔡传涛¹, 蔡志全^{1*}

1 中国科学院西双版纳热带植物园热带植物资源可持续利用重点实验室, 云南勐腊 666303

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 探讨分根区灌溉和氮肥对盆栽星油藤幼苗生长的影响。试验设置 3 个因素, 灌水量、灌溉方式和氮肥, 共 7 个处理, 测量了幼苗生长、光合和水分利用效率等指标。结果表明: 与充分灌溉相比, 分根区灌溉的处理, 生物量降低 5%, 节水 75%, 水分利用率高出 60%, 表现出极大的节水效益。重度干旱条件下, 施氮肥的处理, 根冠比增加达 30%, 但分根区灌溉处理叶面积指数下降 38%, 光合速率下降 9%, 生物量下降 18%, 分根区灌溉在严重干旱条件不适宜施氮肥。总之, 在适度干旱条件下, 分根区灌溉降低蒸腾, 提高水分利用率, 是一种有效的节水灌溉技术。

关键词 星油藤; 分根区灌溉; 氮肥

中图分类号 S565

文献标识码 A

Effects of Different Irrigation Regimes and Nitrogen Fertilizer on *Plukenetia volubilis* L. Seedlings

GENG Yanjing^{1,2}, CAI Chuantao¹, CAI Zhiquan^{1*}

1 Key Laboratory of Tropical Plant Resources and Sustainable Use, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on a pot experiment, the effects of alternative root-zone irrigation (RD) and nitrogen fertilizer on *Plukenetia volubilis* L. seedlings were investigated. Seven treatments were set up, a factorial combination of irrigation water (100% control watering; mild drought 75% control watering; severe drought 50% control watering), irrigation methods (full irrigation and RD) and nitrogen fertilizer (supplied and without fertilizer), to explore the effects on the seedlings by measuring the growth, photosynthesis and water use efficiency (WUE). Results showed that compared with full irrigation, all RD treatments saved 75% water, improved WUE 60%, decreasing biomass only by 5%. Under severe drought condition, nitrogen fertilizer applied treatments were increased root-shoot ratio 30% to absorb more water, however to RD treatment with nitrogen fertilizer, the leaf area index, photosynthetic rate and total biomass fell by 38%, 9% and 18% respectively as compared to RD 50% treatment without fertilizer. So in severe drought conditions RD treatment is not suitable to supply nitrogen fertilizer. In conclusion, RD has significant influence on growth and physiology and is an effective irrigation technique of water saving.

Key words *Plukenetia volubilis* L.; Alternative root-zone irrigation; Nitrogen fertilizer

doi 10.3969/j.issn.1000-2561.2015.08.007

星油藤(*Plukenetia volubilis* L.), 又称南美油藤、印加果, 大戟科多年生木质藤本。星油藤种仁富含脂肪(45%~60%)、蛋白质(27%~33%)、多种维生素和甾醇等生物活性物质, 油脂部分的多元不饱和脂肪酸含量以 Omega 脂肪酸为主^[1-2], 其油被认为是世界上最好的食用植物油之一^[3-5]。星油藤于 2006 年引种至西双版纳热带植物园, 在西双版纳、老挝等地方已经有一定规模的种植。

热带、亚热带地区, 受季风气候影响, 年降水量分布不均, 有较长的旱季(11 月至次年 4 月), 植物的生长生育不可避免地受到水分胁迫。前期的

田间表明: 西双版纳自然干旱下星油藤植株的雌花、雄花和果实数目、植株源库比, 与充分灌溉条件下相比, 显著减少, 且果实的败育率较高。干季末期发育的果实进入雨季败育的几率也较大, 从而会降低雨季初期的果实产量^[6]。因此, 干季浇灌对于星油藤产量的提高是十分必要的措施。中国西南地区水资源短缺, 特别是最近连续几年出现特大旱灾, 提高水分利用率发展节水灌溉技术是农业现代化的必然趋势。

分根区交替灌溉(Partial root-zone drying; 或称 Alternate partial root-zone irrigation)作为一种新型

收稿日期 2014-12-12

修回日期 2015-03-24

基金项目 国家自然科学基金项目(No. Y3G161B01); 中国科学院知识创新工程重大部署项目(No. KSCX2EWQ17, KSCX2EWQ15)。

作者简介 耿艳菁(1987年—), 女, 硕士。研究方向: 药用植物栽培。*通讯作者(Corresponding author): 蔡志全(CAI Zhiquan), E-mail: zhiquan.cai@126.com。

的节水技术, 受到广泛重视^[7], 基于作物感知缺水的根源信号理论^[8], 控制根系部分干燥, 已在玉米、大豆等大田作物和葡萄等果树上广泛推广和应用^[9-12], 而对星油藤栽培的影响还未见报道。此外, 分根区交替灌溉在干旱半干旱地区应用广泛, 但在热带、亚热带地区, 分根区交替灌溉研究较少^[13]。本试验在室内盆栽基础上, 通过严格控制分根灌溉, 探讨分根区交替灌溉对星油藤幼苗生长生理的影响, 同时也为星油藤旱季大田种植提供合理灌溉的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2013 年 11 月 20 日~2014 年 1 月 11 日在西双版纳热带植物园经济推广站的温室大棚(大棚为塑料大棚, 四周设高 30 cm 防虫网, 平均温度约 22 ℃)中进行。星油藤(*Plukenetia volubilis* L.)取当年采摘颗粒饱满的种子, 沙土育苗, 选择长势健壮且生长一致高约 20 cm 的幼苗移植盆中。试验用盆内径 26 cm, 高 23 cm, 供试土壤有机质 18.39 g/kg, 速效氮 110 mg/kg, 有效磷 5.98 mg/kg, 速效钾 98 mg/kg, 每盆 7 kg。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验设置 3 个因素, 灌水方式、灌水量、施肥。灌水方式分为常规灌溉和分根区交替灌溉(Partial root-zone drying irrigation, RD)。灌水量设置 3 个供水梯度, 分别为正常供水(蒸腾量的 100%)、轻度干旱(蒸腾量的 75%)和重度干旱(蒸腾量的 50%, 其中蒸腾量是每 2 d 称盆栽的重量的差值)。施肥设置施肥(施氮肥尿素, 5 g/株)与不施肥。试验共 7 个处理(表 1), 每个处理 20 盆, 共计 140 盆。对于进行分根区交替灌溉处理的盆栽, 盆内中央用塑料均匀隔开分成两部分, 移栽时, 根平均分种两侧, 每两周交替灌溉 1 次。移栽于充分灌溉的盆中, 适应 10 d 后, 开始试验。所有处理的盆薄膜覆盖, 减少土壤蒸发。试验采取严格控制水分方式, 人工灌溉, 每 2 d 称重灌溉一次, 并记下每次每盆的灌水量, 总灌水量(I)为试验期间灌水量的总和。氮肥分 4 次, 溶于灌溉的水中, 以对角方式均匀施苗周围。

1.2.2 测定指标及方法 试验开始时, 随机选取 5 株幼苗, 鼓风干燥箱中 105 ℃杀青 30 min, 70 ℃烘干至恒重, 称重记录(W_1)。试验结束前选晴天上午 8:30~11:00, 用 Li-6400 光合测定系统测定星油藤的光合指标, 选择完全伸展的成熟叶片, 每个处理重复 5 次, 测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率

表1 星油藤幼苗试验处理

Table 1 The treatments of *plukenetia volubilis* L. seedlings

处理/%	次数/次	灌水方式	施肥与否	总灌水量/mL
100	26	完全灌溉		3 372
75	26	完全灌溉		1 680
RD75	26	分根区交替灌溉		1 315
50	26	完全灌溉		684
50+N	26	完全灌溉	施肥	695
RD50	26	分根区交替灌溉		350
RD50+N	26	分根区交替灌溉	施肥	325

说明 100: 正常供水(蒸腾量100%); 75: 轻度干旱(蒸腾量75%); RD75: 分根区交替灌溉(蒸腾量75%); 50: 重度干旱(蒸腾量50%); 50+N: 重度干旱(蒸腾量50%)+施氮肥; RD50: 分根区交替灌溉(蒸腾量50%); RD50+N: 分根区交替灌溉(蒸腾量50%)+施氮肥。

Note 100: sufficient water, the irrigation amount is the same with its transpiration. 75: mild drought, the irrigation amount is 75% of transpiration. RD75: mild drought, the irrigation amount is 75% of transpiration, alternative root-zone. 50: severe drought, the irrigation amount is 50% of its transpiration. 50+N: severe drought, the irrigation amount is 50% of its transpiration, combined with nitrogen fertilizer. RD50: severe drought, the irrigation amount is 50% of its transpiration, alternative root-zone. RD50+N: severe drought, the irrigation amount is 50% of its transpiration, alternative root-zone, combined with nitrogen fertilizer.

(Tr)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)等光合参数并计算瞬时水分利用效率 $WUE_i(P_n/Tr)$ 。试验结束时, 每个处理随机选取 5 株, 分成根(W_2)、茎(W_3)、叶(W_4)各部, 鲜叶片在 CanoScan 4400F 扫描仪扫描后, 利用 ImagJ 软件计算出叶面积指数, 将各部杀青烘干至恒重, 分别称重记录。烘干的叶片, 用碳氮分析仪测定叶片中的氮元素(N , %)。

根冠比(g/g)= $W_2/(W_3+W_4)$

光合氮肥利用率($\mu mol \cdot mol^{-2} \cdot s^{-1} \cdot N^{-1}$)= P_n/N

灌溉水分利用效率(WUE , g/L)= $(W_2+W_3+W_4-W_1)/I$

1.3 数据分析

试验数据采用 SPSS13.0 软件进行分析, 对未施肥的处理进行单因素方差分析, 多重比较采用 LSD法($\alpha=0.05$); 对重度干旱处理进行两因素方差分析, 考察交互作用, SigmaPlot 软件画图。

2 结果与分析

2.1 不同处理下星油藤幼苗生长及生物量的变化规律

2.1.1 生物量 生物量作为植物最重要的指标之一, 最直观的表明植物的生长状况。由图 1-A 可知, 未施肥处理的单因素方差分析差异不显著($p>0.05$), 随着灌水量的减少, 幼苗的生物量降低, 100 完全灌溉的处理的生物量最高, 与最低的 50 完全灌溉处理相差 0.31 g, 高出 27%, 水分短缺影响幼苗生物量的积累。当灌水量相当时, 分根

区灌溉比常规灌溉的生物量要高, RD75 比 75 完全灌溉的生物量高出 15%, RD50 高出 18%; 而 100 充分灌溉与分根区灌溉的处理 RD75 和 RD50 差异不显著, 平均仅高出 5%, 在灌溉水分受限的情况下, 分根区灌溉能一定程度的缓解水分胁迫, 保证植物的生物量。对重度干旱 50 处理的双因素方差分析表明: 灌溉方式和施肥的差异不显著, 交互作用差异不显著 ($p>0.05$), 严重干旱下, 灌溉方式和施氮肥对幼苗生物量积累影响不大。RD50+N 处理的生物量比 50 处理略高 7%, 而 RD50+N 的比 RD50 处理降低 12%, 说明在水分极度缺乏时, 施肥反而影响幼苗生物量的积累。

2.1.2 根冠比 根是植物主要的吸收水分营养器官, 根冠比反映植物自身调控地上与地下生物量的分配。方差分析显示(图 1-B), 不施肥的各处理差异不显著 ($p>0.05$), 灌水量 50 处理略高, 严重干旱时, 幼苗会优先将生物量分配到根部。对重度干旱处理的数据分析表明, 灌溉方式、施肥处理因素差异显

著 ($p<0.05$), 两者交互作用差异不显著 ($p>0.05$), 施肥处理的根冠比平均高出未施肥处理约 30%。说明严重缺水时, 分根区灌溉和施加氮肥, 能显著促进营养物质向根部运输, 增加根冠比和根生物量, 加大根部吸收营养和水分的能力, 从而提高抗旱能力。

2.1.3 叶面积指数 叶片作为主要的光合器官, 叶面积指数的大小, 反映出幼苗叶片生长状况。方差分析结果显示(图 1-C): 水分显著影响幼苗的叶面积指数 ($p<0.05$), 100 完全灌溉比干旱 75、50 处理分别高 25%、42%, 而比 RD75、RD50 分别仅高出 7%、27%, 干旱抑制叶片的生长, 但分根区灌溉能一定程度的缓解干旱对叶片生长的抵制作用。严重干旱条件下方差分析显示, 灌溉方式、施肥处理之间的差异显著 ($p<0.05$), 两者的交互作用差异不显著 ($p>0.05$), RD50 处理叶面积指数明显高于 RD50+N 处理 38%, 分根区灌溉处理下的星油藤幼苗在严重缺水条件下, 施肥不利于叶片的生长。

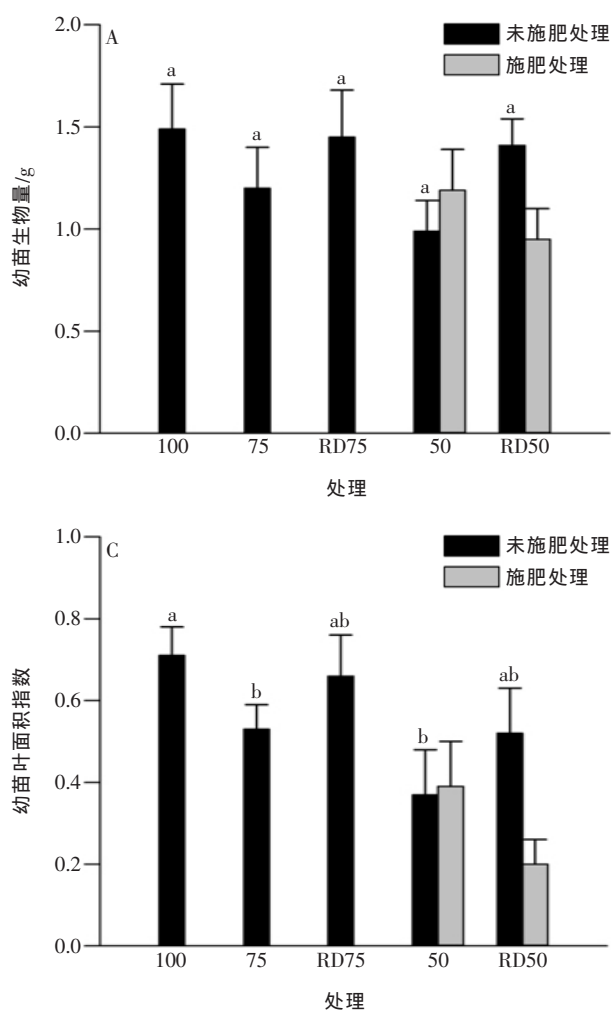


图1 不同处理下星油藤幼苗生物量、根冠比及叶面积指数

Fig. 1 Effects of different treatments on total mass, root shoot ratio and leaf area index of seedlings

2.2 不同处理下星油藤幼苗光合生理和氮素光合效率的变化

2.2.1 光合生理 分析结果表明(图 2), 正常供水 100 和轻度干旱 75 灌溉处理的光合速率没有差异, 蒸腾速率、气孔导度差异显著($p < 0.05$), 特别是 RD75 处理, 蒸腾速率与气孔导度与正常供水 100 和轻度干旱 75 处理相比, 分别降低 33%、36% 和 9%、18%, 说明随着灌溉水分的降低, 蒸腾速度和气孔导度也在降低, 但轻度干旱条件下分根区灌溉处理在不降低光合速率的情况下, 气孔导度、蒸腾速率明显降低。严重干旱灌溉处理的各项光合指标显著低于其他灌溉处理, 方差分析结果表明, 灌溉方式和施肥对光合作用过程的影响不明显($p > 0.05$), 说明水分胁迫显著抑制光合作用过程且影响作用大于

灌溉方式和施肥对幼苗的作用。

2.2.2 氮素光合效率 由测得的数据可知(图 2), 未施氮肥的各个处理, 叶片含氮量无差异, 施氮肥的处理叶片含氮量平均要高 10% 左右, 植物吸收水分和氮肥是相互独立的过程, 干旱不影响星油藤幼苗对氮肥的吸收利用。作物氮素光合效率(PNUE), 或瞬间氮素利用率, 是作物叶片氮素生理利用率特征之一, 是决定植物生长和叶氮生产力的主要因素。由方差分析可知, 严重干旱条件下处理的 PNUE 显著低于其他处理($p < 0.05$), 水分的短缺影响 PNUE。灌水量 50% 的处理数据分析结果表明, 施肥的影响显著($p < 0.05$), 灌溉方式及两者的交互作用不明显($p > 0.05$), 施肥处理的 PUNE 平均要低于未施肥处理 22%, PNUE 与叶片含氮量呈反比。

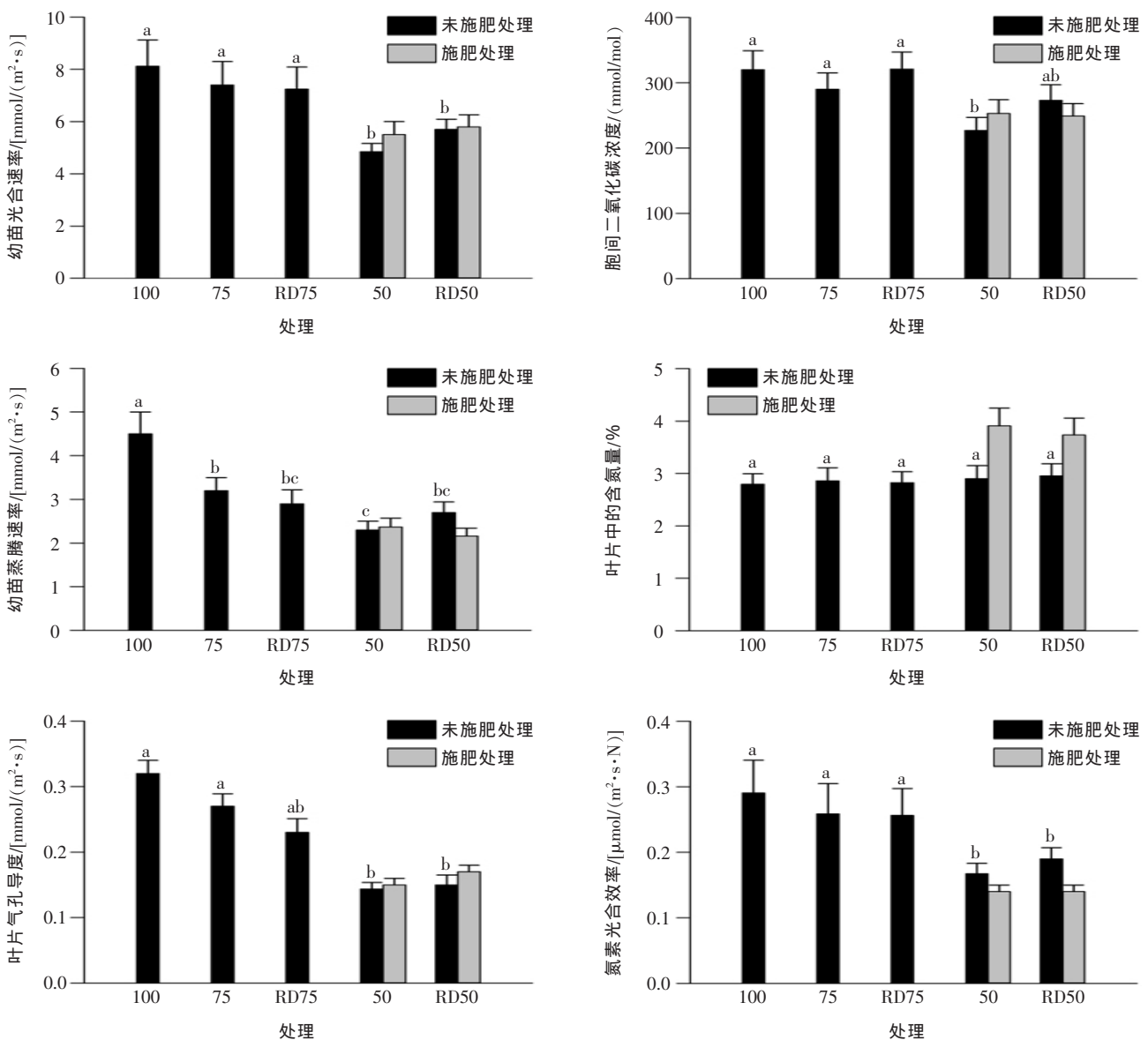


图2 不同处理下星油藤光合生理和氮素光合效率变化

Fig. 2 Effects of different treatments on photosynthetic physiology and photosynthetic nitrogen use efficiency of seedlings

2.3 不同处理下星油藤幼苗水分利用率的变化规律

不同处理对星油藤幼苗灌溉水分利用效率(WUE)和叶片瞬时水分利用效率(WUE_i)的影响, 其中叶片瞬时水分利用效率只代表某特定时间内植物部分叶片的行为, 且瞬时所得的结果和长期整体测定结果之间的关系不明确^[14], 不适用于反映整个试验期间的水分利用效率, 仅适用来说明叶片的瞬时水分利用效率。

2.3.1 瞬时水分利用效率 叶片瞬时水分利用效率(WUE_i)的方差结果显示(图3), 各灌溉处理幼苗的 WUE_i 差异不显著($p>0.05$), 但分根区灌溉 RD75 的 WUE_i 与充分灌溉 100 的处理差异显著($p<0.05$), 高出约 25%, 分根区灌溉的 RD75 处理在不降低光合效率的情况下, 降低了蒸腾效率。可能是由于干旱使得叶片气孔关闭, 减少奢侈蒸腾, 提高了叶片瞬时水分利用率。在 50 处理严重干旱条件下, 施肥、灌溉方式及交互作用的影响不明显($p>0.05$),

但施肥处理的 WUE_i 要略高, 可能是施肥提高了叶片含氮量, 增强光合速率, 提高叶片水分利用率。

2.3.2 灌溉水分利用效率 由图 3 可知, 单因素方差分析结果表明, 不同灌溉处理对星油藤幼苗的灌溉水分利用效率(WUE)的影响差异显著($p<0.05$), 随着灌水量的降低, 幼苗的水分利用率在显著增加, RD50 水分利用率最高, 为 0.85 g/L, 分根区灌溉要显著高于 100 充分灌溉约 60%, 一方面可能是星油藤正处于幼苗期需水少, 另一方面说明干旱条件下分根区灌溉, 有利于提高幼苗的水分利用率, 特别是严重干旱时, 效果更显著。当严重干旱时, 双因素方差分析表明, 灌水方式对其影响显著($p<0.05$), 施肥及两者的交互作用不显著($p>0.05$), 全根区灌溉施肥 50+N 处理的 WUE 要高于 RD50+N 处理, 说明在严重水分胁迫时, 分根区灌溉能在保证一定光合作用时, 降低蒸腾, 从而使水分利用效率达到最大化, 但是施氮肥的促进效果不明显。

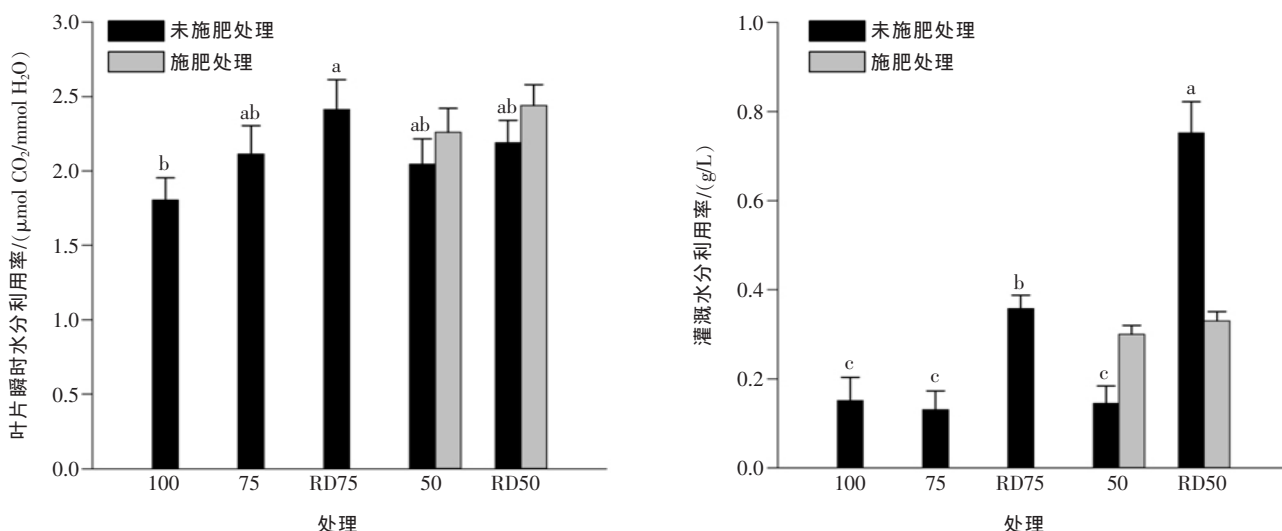


图3 不同处理下幼苗水分利用率的变化

Fig. 3 Effects of different treatments on water use efficiency of seedlings

3 讨论与结论

本研究结果表明, 分根区交替灌溉通过调节叶片气孔, 提高水分利用率, 一定程度上缓解干旱, 是一种有效的节水灌溉技术。与充分灌溉相比, 分根区灌溉, 生物量降低 5%, 节水 75%, 水分利用率高出 60%, 表现出极大的节水效益。这与之前有关大田作物水稻、土豆、玉米和果树葡萄、桃树等^[13,15-18]的研究结论相似, 在不影响作物产量的基础上, 提高水分利用率。这可能是由于干旱部分根系产生的胁迫信号如脱落酸 ABA 有关, 信号传递至地上部分, 调控叶片气孔闭合, 气孔导度和蒸腾耗

水呈线性关系, 而与光合速率为渐趋饱和的非线性关系, 所以当气孔导度从最大值适当降低时, 可显著减少奢侈蒸腾, 但对光合影响较小, 这种差异为通过调控气孔行为来提高植物水分利用效率提供了理论依据^[9,19]。本研究中, 分根区灌溉处理与充分灌溉 100 相比, 气孔导度下降 29%, 光合速率下降 20%, 但是蒸腾速率下降达 38%, 瞬时水分利用率提高 19%。研究结果还表明, 极度干旱处理的水分利用率平均高于其他处理, 特别是 RD50 的水分利用率最高, 是充分灌溉 100 处理的 4 倍, 这与之之前有关柑橘的研究相似^[20]。

研究认为在干旱条件下,根系产生的 ABA 输送到地上部不仅调控叶片气孔闭合,而且能减小叶片扩张速率,降低叶片生长,把更多的同化物分配到根系,达到促进地下生长,抑制地上生长,调控植物的根冠比^[10],本试验轻度干旱分根区灌溉的根冠比不太明显,但严重干旱 RD50 明显要高其他处理 30% 左右,这与相关文献轻度干旱时分根区灌溉根冠比最高不一致^[21-22],可能是因为实验处理的条件、植物种类、生长的状态不同造成的。此外分根区灌溉会一定程度缓解干旱,但是长期严重干旱,使生物量过多分布于根部,叶面积指数下降,光合各项指标降低,长期下去势必会影响幼苗生长发育。

在水分有限的情况下,适度施氮可以改善植物的光合特性,促进植株的生长,提高水分利用效率,一定程度上提高植物抗旱能力^[6,23],全根区 50+N 灌溉施氮处理的光合速率高 6%,生物量增加 11%,水分利用率增加 25%,而分根区灌溉施肥处理的生物量即 RD50+N 比 RD50 降低 12%,可能严重干旱条件下,分根区灌溉条件下,施肥使得 RD50+N 幼苗,调整生物量的分配,将大部分的生物量集中在根部,根冠比及根生物量平均要高出 30% 左右,用以增强抗旱能力,但是叶面积指数下降 38%,光合速率下降 9%,总的生物量下降 18%,分根区灌溉在严重干旱条件下不适宜施氮肥。作物氮素光合效率(PNUE)作为评价 P_n 与叶片氮含量间关系指标,常用于生态植被适应性和植物种群进化方面的研究,在作物方面研究上发现其与光合特性、产量和氮肥利用率特性存在显著相关性^[24-26]。试验 50+N 与 RD50+N 灌溉处理的 PUNE 与叶片氮含量成反比这与有关试验结果相同^[27-28],这可能叶片分配到光合中心和形成细胞壁结构所用的氮素有关;本试验是在星油藤幼苗盆栽试验条件下进行的,对于大田种植条件下如何实现分根区灌溉,天气条件如雨水对分根影响,干旱的持续的时间等问题还需要进一步的研究。

参考文献

- [1] 蔡志全, 杨清, 唐寿贤, 等. 木本油料作物星油藤种子营养价值的评价[J]. 营养学报, 2011, 33(2): 193-195.
- [2] Fanali C, Dugo L, Cacciola F, et al. Chemical characterization of Sacha Inchi(*Plukenetia volubilis* L.)oil[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59: 13 043-13 049.
- [3] Ivor M do Prado, Willyan M Giufrida, Victor H Alvarez, et al. Phase equilibrium measurements of sacha inchi oil(*Plukenetia*

- volubilis*)and CO₂ at high pressures[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2011, 88(8): 1 263-1 269.
- [4] 蔡志全. 特种木本油料作物星油藤的研究进展[J]. 中国油脂, 2011, 36(10): 1-6.
- [5] Rosana Chirinos, Gledy Zuloeta, Romina Pedreschi, et al. Sacha inchi(*Plukenetia volubilis*): a seed source of polyunsaturated fatty acids, tocopherols, phytosterols, phenolic compounds and antioxidant capacity[J]. Food Chem, 2013, 141(3): 1 732-1 739.
- [6] Jiao D Y, Xiang M H, Li W G, et al. Dry-season irrigation and fertilisation affect the growth, reproduction, and seed traits of *Plukenetia volubilis* L. plants in a tropical region[J]. Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 2012, 87: 311-316.
- [7] Davies W J, Hartung W. Has extrapolation from biochemistry to crop functioning worked to sustain plant production under water scarcity?[C]. The Fourth International Crop Science Congress, 2004.
- [8] Fereres E, Soriano M A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58: 147-159.
- [9] Kang S Z, Zhang J H. Controlled alternate partial root zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55: 2 437-2 446.
- [10] Mousavi S F, Soltani-Gerdefaramarzi S, Mostafazadeh-Fard B. Effects of partial rootzone drying on yield, yield components, and irrigation water use efficiency of canola(*Brassica napus* L.)[J]. Paddy and Water Environment, 2010, 8(2): 157-163.
- [11] 杜太生, 康绍忠, 张建华. 不同局部根区供水对棉花生长与水分利用过程的调控效应[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2 546-2 555.
- [12] Antonia Romero-Conde, Ayako Kusakabe, Juan Carlos Melgar, et al. Physiological responses of citrus to partial root-zone drying irrigation[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 169: 234-238.
- [13] Li F S, Liang J H, Kang S Z, et al. Benefits of alternate partial root-zone irrigation on growth, water and nitrogen use efficiencies modified by fertilization and soil water status in maize[J]. Plant and Soil, 2007, 295: 279-291.
- [14] Wright G C, Hubick K T, Farquhar G D. Discrimination in carbon isotope of leaves correlated with water-use efficiency of field-grown peanut cultivars[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1988, 15: 815-825.
- [15] Ye Y, Liang X, Chen Y, et al. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use[J]. Field Crops Research, 2013, 144: 212-224.
- [16] Wakrim R, Wahbi S, Tahi H, et al. Comparative effects of partial root drying(PRD)and regulated deficit irrigation(RDI)on water relations and water use efficiency in common bean(*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 106: 275-287.
- [17] Kang S Z, Hu X T, Goodwin I, et al. Soil water distribution, water use, and yield response to partial root zone drying under a shallow groundwater table condition in a pear orchard[J].

- Scientia Horticulturae, 2002, 92: 277–291.
- [18] Ahmadi, Seyed Hamid Agharezaee, Mohammad Ali Reza. Effects of dynamic and static deficit and partial root zone drying irrigation strategies on yield, tuber sizes distribution, and water productivity of two field grown potato cultivars[J]. Agricultural Water Management, 2014, 134: 126–136.
- [19] 张建华, 贾文锁, 康绍忠. 根系分区灌溉和水分利用效率(英文)[J]. 西北植物学报, 2001(2): 191–197.
- [20] Romero P, Dodd I C, Martinez-Cutillas A. Contrasting physiological effects of partial root zone drying in field-grown grapevine(*Vitis vinifera* L. cv. Monastrell) according to total soil water availability[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63: 4 071–4 083.
- [21] Lo Bianco R, Francaviglia D. Comparative responses of ‘Gala’ and ‘Fuji’ apple trees to deficit irrigation: Placement versus volume effects[J]. Plant and Soil, 2012, 357(1/2): 41–58.
- [22] 王 磊, 曹福亮, 吴家胜. 分根区交替渗灌对银杏苗木生长及生理的影响[J]. 林业科学, 2013(6): 52–59.
- [23] Dogan E, Copur O, Kahraman A, *et al.* Supplemental irrigation effect on canola yield components under semiarid climatic conditions[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98: 1 403–1 408.
- [24] Field C, Mooney H A. The photosynthesis–nitrogen relationship in wild plants[M]. // Givnish T J ed. On the Economy of plant Form and Function, Cambridge UK: Cambridge University Press, 1986: 25–55.
- [25] Hikosaka K. Interspecific difference in the photosynthesis nitrogen relationship: patterns physiological causes, and ecological importance[J]. Journal of Plant Research, 2004, 117: 481–494.
- [26] Garnier E, Gobin O, Poorter H. Nitrogen productivity depends on photosynthetic nitrogen use efficiency and on nitrogen allocation within the plant[J]. Annals of Botany, 1995, 76(6): 667–672.
- [27] Kouki H, Tadaki H. Photosynthetic nitrogen–use efficiency in evergreen broad-leaved woody species coexisting in a warm–temperate forest[J]. Tree Physiology, 2000, 20: 1 249–1 254.
- [28] 薛利红, 罗卫红, 曹卫星, 等. 作物水分和氮素光谱诊断研究进展[J]. 遥感学报, 2003(1): 73–80.

责任编辑：沈德发