

两种氮肥浓度条件下小桐子生长和水力结构对氯盐胁迫的响应

李婕^{1,2}, 史正涛¹, 齐昌民³, 杨启良², 臧振楠²

(1. 云南师范大学 旅游与地理科学学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明理工大学 农业与食品学院, 云南 昆明 650500; 3. 中国葛洲坝集团股份有限公司, 湖北 武汉 430033)

摘要: 为了探究两种氮肥条件下小桐子生长和水力结构对氯盐胁迫的响应, 设置3种盐胁迫水平(土壤含盐量为 $S_1: 2 \text{ g/kg}$, $S_2: 4 \text{ g/kg}$, $S_3: 6 \text{ g/kg}$), 2种氮肥水平($N_1: 260 \text{ kg/hm}^2$, $N_2: 520 \text{ kg/hm}^2$)和对照组CK(无盐无氮)开展温室大棚试验。结果表明: 小桐子对土壤盐胁迫有一定的耐受力, 但其生长均受到不同程度的盐胁迫影响, 表现为基茎截面面积、总叶面积、干物质质量、导水率和水分利用效率均显著小于CK处理, 各处理下的总干物质质量较CK处理减少9.99%~72.85%; 高氮肥施用量可显著缓解土壤低盐胁迫对植物的伤害, 与 N_1 相比, N_2 水平下小桐子的基茎截面面积、总叶面积、总干物质质量分别增加了20.91%、24.56%和24.35% ($P < 0.05$)。胡伯尔值和根冠比随着土壤盐胁迫程度增加而增大, 盐胁迫对冠层的生长抑制大于根系的生长抑制; 比导率随着土壤盐胁迫程度增加而显著降低, 植物输水难度增加, 生长受阻。可见, 当土壤盐胁迫程度为中低水平时(2~4 g/kg), 提高土壤氮肥浓度可显著提高种植小桐子的导水率和水分利用效率值, 进而促进小桐子生物量积累, 达到修复土壤的目的。

关键词: 盐胁迫; 氮肥浓度; 导水率; 比导率; 叶比导率; 干物质质量; 小桐子

中图分类号: S794.9; Q945.78

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)04-0131-07

Response of growth and hydraulic structure to NaCl stress in *Jatropha curcas* L. under two nitrogen fertilizer concentrations

LI Jie^{1,2}, SHI Zhengtao¹, QI Changmin³, YANG Qiliang², ZANG Zhennan²

(1. College of Tourism and Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 3. China Gezhouba Group Co., Ltd., Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to explore the response of growth and hydraulic structure of *Jatropha curcas* L. to NaCl stress under two nitrogen fertilizer concentrations, three soil salt stress levels (NaCl content: $S_1: 2 \text{ g/kg}$, $S_2: 4 \text{ g/kg}$, and $S_3: 6 \text{ g/kg}$), two nitrogen fertilizer levels ($N_1: 260 \text{ kg/hm}^2$, $N_2: 520 \text{ kg/hm}^2$) and a control group (CK, without salt and nitrogen) were tested in the greenhouse. The results showed that *Jatropha curcas* L. had a certain tolerance to soil salt stress, but its growth was inhibited by different levels of salt stress. The basal stem cross-sectional area, total leaf area, dry matter quality, hydraulic conductivity and water use efficiency of the samples under salt stress were all significantly lower than those of the CK, and the total dry matter mass under all treatments decreased by 9.99%–72.85% compared with the CK. However, higher amount of nitrogen fertilizer can alleviate the damage of low-concentration salt stress on plants. Compared with N_1 , the basal stem cross-sectional area, total leaf area, and total dry matter mass increased by 20.91%, 24.56%, and 24.35% at the N_2 level ($P < 0.05$), respectively. Moreover, the Huber value and the root-shoot ratio increased with the increase of the soil salt stress, and the growth inhibition of the canopy was greater than that of the root system. The specific conductivity sig-

收稿日期: 2020-05-31; 修回日期: 2020-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979134、51779113)

作者简介: 李婕(1991-), 女, 贵州六盘水人, 博士研究生, 研究方向为节水灌溉。

通讯作者: 杨启良(1978-), 男, 云南昆明人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为节水灌溉。

nificantly decreased with the increase of the soil salt stress, and the growth was hindered. Therefore, it can be seen that when the level of soil salt content is 2 g/kg - 4 g/kg, increasing nitrogen fertilizer can effectively improve the biomass accumulation, hydraulic conductivity and water use efficiency of *Jatropha curcas* L., and it can be used to restore the salt soil.

Key words: salt stress; nitrogen fertilizers concentration; hydraulic conductivity; specific conductivity; leaf specific conductivity; dry matter mass; *Jatropha curcas* L.

1 研究背景

小桐子 (*Jatropha curcas* L.) 是大戟科 (*Euphorbiaceae*) 麻风树属 (*Jatropha*) 植物, 原产墨西哥和中美洲, 是一种广泛种植在拉丁美洲、非洲、印度、东南亚等热带林地的经济作物和造林树种^[1]。麻风树抗干旱胁迫能力强^[2], 生长迅速, 易于繁殖, 种子含油量高^[3], 妊娠期短, 环境适应范围广^[2], 可在砂壤、盐碱化土壤等很多种恶劣的环境中存活, 约有 30 ~ 50 a 的生产期。成熟的小桐子平均每年产种子 4 ~ 5 kg, 成为干热河谷地区植被恢复、固土保水、特色农林经济等优选的植物资源之一^[4]。我国盐碱土面积约占国内总耕地面积的 70%, 分布极为广泛, 筛选耐盐经济作物, 发展盐碱地农林业, 加强盐碱地保护林建设具有现实需要^[5-6]。因此, 开展小桐子耐盐适应及缓释盐胁迫研究具有重要实践意义。

氮肥和盐胁迫对小桐子等经济作物的影响一直是国内外学者研究热点。研究表明, 盐胁迫会诱导出植物的水分胁迫和营养失衡, 而合理施加氮肥能有效地促进植株的生长, 影响果实产量和品质^[7-8]。盆栽试验中, 小桐子的光合作用及生长指标在氮肥量为 288 kg/hm² 时达到较优水平^[9], 氮肥浓度为 0.2 g/kg 时, 调亏灌溉可促进小桐子生物量积累及其抗旱性^[10]; 大田实验中, 每株 4 年生小桐子施加 150 g 氮肥 (种植株行距为 2 m × 2 m 时, 施加氮肥量为 375 kg/hm²), 可提高小桐子果实产量及果仁含油量^[11]; 适当的增加灌水量可有效缓解土壤盐胁迫, 增加小桐子叶片的水势, 促进小桐子根系对土壤水分的吸收和向上传输^[12]。

干热河谷地区气候以干热为主, 剧烈的雨旱交替导致地表盐分积累效应明显, 土壤盐碱化情况严重, 导致植被恢复难度进一步增加。研究表明, 氮肥不足时, 植物生长受限, 合理施肥有助于植物改善盐胁迫状况, 但过高的化肥施用量会引起严重的土壤硝酸盐污染、土壤养分不平衡及恶化、病虫害发生及作物品质下降^[13]。目前, 在干热河谷地区, 小桐子栽培主要选用 1 年生小桐子苗作为种植苗, 株行距

为 1 m × 1 m, 鱼鳞坑或隔坡水平沟种植, 田间管理措施仅以氮肥为主进行施肥管理, 一般种植年旱雨交替期施用氮肥 500 ~ 600 kg/hm² (种植每株小桐子施加 60 g 氮肥)。现阶段, 干热河谷区以此作为小桐子栽培及造林的主要管理方法, 取得良好的种植效果, 植株年均生物量显著提高, 小桐子造林区域雨季植被覆盖度显著提升, 固土保水及种植区土壤改良效益明显。尽管造林成效显著, 但该区域对小桐子的栽培管理极其粗放, 施肥方式单一, 有不合理施肥的情况。因此, 探讨小桐子对土壤盐胁迫的响应, 并优化合理的施肥方式, 确定不同盐浓度土壤的化肥施用量, 特别是氮肥的使用量, 进一步提高植物的水氮资源利用率, 对区域植被恢复等工作的开展具有现实意义。

植物的水力结构是描述植物水代谢特征的物理参数, 主要由导水率 (水分传导)、比导率、叶比导率以及胡伯儿值来表征^[14]。比导率和叶比导率主要基于导水率计算, 分别是按茎基截面面积和总叶面积标准化后的导水率。植物导水率的大小主要受外部环境 (土壤、大气等) 和内部因素 (植物形态、木质部导管结构等) 共同影响^[7-8, 15]。以往关于植物的生态适应性研究发现, 干旱胁迫可促进胡杨对水分的吸收和传输, 增加枝条和叶片的水分传导^[16]; 盐浓度的增加可显著降低苹果幼树水分传导, 从而影响其生长^[8]; 小叶锦鸡儿、中间锦鸡儿和柠条锦鸡儿均形成了较小的导管直径来适应干旱胁迫, 但其水分传导在 3 种不同的锦鸡儿属植物中呈现出显著差异^[17]。由此可见, 水力结构参数能较好表征干旱胁迫、温度、物种等因素对灌木、乔木等植物的水分传导的影响, 且这种作用与植株的形态差异有关, 但针对小桐子水力结构参数变化研究有待完善。本研究主要关注小桐子在盐梯度胁迫下水力结构变化的情况, 同时关注区域施肥管理对盐胁迫小桐子水力等参数的影响。另一方面, 前期野外调查结果显示, 干热河谷部分缓坡地小桐子种植地有盐碱化加剧的情况, 对比研究后推测旱雨交替期施用氮肥 500 ~ 600 kg/hm² 的粗放管理方式有过量施肥的风险, 故在盐梯度的胁迫试验中加入区域常规施肥量

减半的氮肥管理方式(即 $260 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 每株小桐子施加 30 g 氮肥), 分析盐梯度胁迫对小桐子水力参数的影响, 并采用相关水利指标及植株生长情况探讨氮肥管理对盐梯度胁迫小桐子的施肥效应, 旨在为盐碱地区可持续发展农林业经济作物小桐子的优质和科学培育提供理论依据。

2 材料与方法

2.1 试验材料

2014年4-10月在云南省高校特色作物高效用水与绿色生产重点实验室智能温室内开展种植槽试验($102^{\circ}08' \text{ E}$, $25^{\circ}01' \text{ N}$)。试验时, 在温室大棚内共开挖14个深 0.65 m 的种植槽, 槽表面尺寸为 $6 \text{ m} \times 0.55 \text{ m}$, 槽内两侧及下底面覆有防渗漏塑料薄膜, 槽间距为 0.5 m , 试验中无地下水补给及槽间水分运输。供试土壤为自然风干过 10 mm 筛的燥红壤土, 土壤 pH 值为 5.4 ; 土壤全氮、全磷和全钾质量分数分别为: 0.85 、 0.68 和 $13.7 \text{ g}/\text{kg}$, 有机质质量分数 $13.12 \text{ g}/\text{kg}$; 供试小桐子幼苗由云南省农业科学院热区生态农业研究所元谋干热河谷植物园(云南元谋县)提供。

2.2 试验设计

本试验设计氮肥浓度和盐胁迫2因素区组试验, 共7个处理。其中, 氮肥浓度设置2个水平: 260 和 $520 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 氯盐胁迫设置3个水平: 2 、 4 和 $6 \text{ g}/\text{kg}$, 同时设置对照处理CK(无外加氮肥和 NaCl 分析纯), 各处理均施加磷肥 $350 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 详见表1。

2014年4月, 将不同盐分处理的 NaCl 分析纯与土混合均匀后填入种植槽内, 株行距 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 种植一年生小桐子幼树(每个种植槽内栽种6株), 种植槽内植株布局图如图1所示。2014年6月, 每个槽内选取4棵生长形态一致的树苗(各处理共选取8棵), 分别编号后进行施肥处理。按表1所示氮肥和磷肥浓度, 分别称取相应质量的氮肥(尿素: 湖南腾茂农化有限责任公司生产, N 含量 $\geq 46.3\%$, 粒度范围为 $1.18 \sim 3.35 \text{ mm}$)和磷肥(湖南腾茂农化有限责任公司生产, P_2O_5 含量 $\geq 52\%$), 第1次灌水前, 以植株为圆心, 开挖半径为 0.1 m 、深度为 0.2 m 的圆柱形坑, 将两种肥料均匀撒在坑内, 填土后进行灌水。田间灌溉系统设有水泵取水装置、输水管道(PE管, 壁厚 1 mm , 直径 16 mm)和滴灌管网(滴灌带内径为 16 mm , 压力补偿式滴头间距为 1 m , 滴头流量为 $3 \text{ L}/\text{h}$, 工作压力为 $0.1 \sim 0.3 \text{ MPa}$), 灌水周期为 20 d 。

表1 试验各处理参数

处理	氮肥/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	氯盐/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	磷肥/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	总耗水量/ mm
CK	0	0	350	180.14
N_1S_1	260	2	350	178.23
N_1S_2	260	4	350	177.45
N_1S_3	260	6	350	175.32
N_2S_1	520	2	350	178.49
N_2S_2	520	4	350	177.63
N_2S_3	520	6	350	175.95

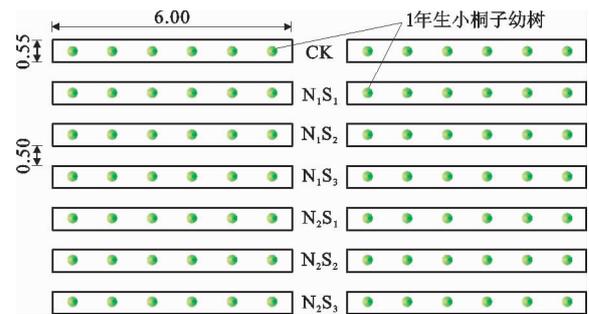


图1 试验采用的种植槽植株布局图(单位:m)

2.3 测定项目与方法

2.3.1 植物水分传导(导水率) 使用高压流速仪(HPFM, 生产公司: 美国Dynamax)测定植物地上部分(冠层)及地下部分(根系)水分传导。使用前 12 h , 给仪器加水并加压至 550 kPa 经 12 h 后排除气泡, 并对仪器各项指标归零。使用时, 先将植株在距土层表面 5 cm 处的地上部分截取, 截取点以上用于测定冠层水分传导, 截取点以下用于测定根系水分传导^[17-18]。

冠层水导采用准稳态流速法, 将冠层截面用刀片削平连接压力耦合器, 压力调零后打开控气阀和水阀, 选取合适的量程, 加压至 $350 \sim 450 \text{ kPa}$ 时关闭控气阀, 等待 $15 \sim 45 \text{ min}$ 后达到准稳态。

根系水导采用瞬时法, 用刀片将根系截面处削平并连接压力耦合器, 压力调零后打开控气阀和水阀, 用 $4 \sim 7 \text{ kPa}/\text{s}$ 的压力连续加压至 500 kPa 时关闭阀门, 此时水分传导值为流速-压力曲线的斜率。

2.3.2 生长指标 茎基径: 使用游标卡尺(精度为 0.01 mm)测量距土层表面 5 cm 处树木直径; 叶面积: 采用剪纸称重法^[19]测量; 各部分的干物质质量: 水分传导测定结束后, 将小桐子的冠层和根系分别装入不同的纸袋后放入烘箱, 将烘箱温度升高至 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青处理, 烘干时常约 0.5 h , 然后将烘箱温

度降低为 75 ℃, 烘干时常约 48 h, 取出后用天平(精度为 0.01 g)测定冠层和根系的干物质质量。

2.3.3 计算方法

$$\text{水分利用效率}(WUE) = M_r/W_t^{[10]} \quad (1)$$

$$\text{胡伯儿值}(Hv) = A_s/LA^{[17]} \quad (2)$$

$$\text{根冠比}(R/S) = M_r/M_{sh}^{[18]} \quad (3)$$

$$\text{总叶面积}(LA) = A_u \cdot M_t^{[19]} \quad (4)$$

$$\text{比导率}(K_s) = K_h/A_s^{[17]} \quad (5)$$

$$\text{叶比导率}(LSC) = K_h/LA^{[18]} \quad (6)$$

式中: M_r 为根系干物质质量, g; W_t 为总耗水量, mm; A_s 为基茎截面面积, cm^2 ; LA 为总叶面积, m^2 ; M_{sh} 为冠层干物质质量, g; A_u 为单位叶干质量对应的叶面积, m^2/g ; M_t 为总干物质质量, g; K_h 为导水率, $\text{g}/(\text{s} \cdot \text{MPa})$ 。

2.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2007 对试验数据进行整理并绘制柱状图。使用 IBM SPSS Statistics 21.0 对试验数据进行方差分析和多重比较, 采用 LSD(L) 法检验各个处理间显著水平 ($P < 0.05$)。

3 结果与分析

3.1 生长

试验得出的两种氮肥条件下小桐子生长对氯盐胁迫的响应结果如表 2 所示。由表 2 可知:

(1) 土壤盐胁迫极显著降低了小桐子基茎截面

面积、总叶面积及干物质积累 ($P < 0.01$), 且除根系干物质质量在 CK 和 N_2S_1 处理下达到最大, 其余各项生长指标均在 CK 处理下达到最大值。

(2) 与 CK 相比, 施盐后小桐子基茎截面面积 (A_s)、总叶面积 (LA)、根系干物质质量 (M_r)、冠层干物质质量 (M_{sh}) 和总干物质质量 (M_t) 分别降低 24.29% ~ 43.18%, 8.47% ~ 69.61%, 17.43% ~ 63.68%, 16.55% ~ 77.25% 和 9.99% ~ 72.85%。

(3) 当土壤盐胁迫程度较低为 S_1 时, 与 N_1 相比, 增施氮肥 (N_2), 小桐子的 A_s 、 LA 、 M_r 、 M_{sh} 和 M_t 分别显著增加了 20.91%、24.56%、22.08%、25.50% 和 24.35% ($P < 0.05$); 当土壤盐浓度较高为 S_2 时, 与 N_1 相比, 增施氮肥 (N_2), 小桐子 A_s 和根 M_r 无显著差异 ($P > 0.05$), 但 LA 和 M_{sh} 分别显著增加了 21.59% 和 36.20% ($P < 0.05$); 当土壤盐浓度为 S_3 时, 与 N_1 相比, 增施氮肥 (N_2), 小桐子各组织干物质质量 (M_r 、 M_{sh} 和 M_t) 无显著差异 ($P > 0.05$), A_s 显著减少 28.85%, 但 LA 显著增加 25.45% ($P < 0.05$)。

由此可见, 与较低浓度氮肥 (N_1) 相比, 当土壤盐胁迫程度为低、中时 (S_1 、 S_2), 增施氮肥 (N_2) 可有效促进小桐子总叶面积增加及各部分干物质质量的积累; 而当土壤盐胁迫程度高时 (S_3), 增施氮肥 (N_2) 不能显著提高小桐子的总叶面积和生物量 ($P > 0.05$), 并显著抑制其基茎生长 ($P < 0.05$)。

表 2 两种氮肥条件下小桐子生长对氯盐胁迫的响应

处理	基茎截面面积 A_s/mm	总叶面积 LA/cm^2	根系干物质 M_r/g	冠层干物质 M_{sh}/g	总干物质 M_t/g
CK	12.02 ± 0.77a	5.43 ± 0.09a	173.15 ± 1.84a	422.76 ± 8.94a	585.91 ± 10.55a
N_1S_1	9.28 ± 1.29b	3.99 ± 0.12c	142.97 ± 2.24ab	281.12 ± 8.79c	424.09 ± 8.16c
N_1S_2	9.89 ± 0.91b	2.64 ± 0.07e	115.06 ± 2.88c	185.93 ± 7.04e	300.99 ± 9.04e
N_1S_3	9.60 ± 0.82b	1.65 ± 0.06g	62.88 ± 2.56d	96.18 ± 3.55f	159.06 ± 3.82f
N_2S_1	11.22 ± 0.4ab	4.97 ± 0.06b	174.54 ± 3.29a	352.81 ± 7.16b	527.35 ± 10.45b
N_2S_2	9.10 ± 0.93b	3.21 ± 0.06d	122.38 ± 8.37bc	253.24 ± 5.14d	375.62 ± 8.31d
N_2S_3	6.83 ± 1.08c	2.07 ± 0.10f	66.44 ± 3.76d	101.20 ± 2.61f	167.63 ± 1.44f
F 检验统计量值					
N	0.509	93.618**	0.009	79.637**	68.368**
S	2.495	504.185**	21.159**	550.907**	751.765**
N * S	3.283	5.855*	2.863	16.021**	17.311**

注: (1) 表中同一栏中不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著, 数据为平均数 ± 标准误差; (2) *、** 分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平差异显著, 下同。

3.2 水力结构

试验得出的两种氮肥条件下小桐子水力结构对氯盐胁迫的响应结果如表3所示。由表3可知:不同土壤盐胁迫条件和不同氮肥浓度处理对小桐子根系和冠层水力结构具有耦合作用。盐胁迫对小桐子各器官水力结构(除 K_{s-sh}) 达到显著水平 ($P < 0.05$); 不同氮肥浓度对导水率(K_h) 影响极显著 ($P < 0.01$), 对叶比导率(LSC) 和比导率(K_s) 无显著影响 ($P > 0.05$); 二者的交互作用仅对根系导水率(K_{h-r}) 影响达到极显著水平 ($P < 0.01$), 其余各处理的交互作用对水分传导均无显著影响 ($P > 0.05$)。

数据分析表明, 导水率(K_h)、叶比导率(LSC) 及比导率(K_s) 数据在 CK、 S_1 和 S_2 处理中, 均为根系大于冠层; 而在 S_3 处理中反之。导水率随着土壤盐胁迫程度的增加而显著降低 ($P < 0.01$), 与 CK 相比, S_1 、 S_2 、 S_3 的平均 K_{h-r} 和 K_{h-sh} 分别显著降低了 16.05%、18.89%、59.26% 和 44.84%、83.95%、63.33%; 在不同氮肥浓度条件下, K_{h-r} 和 K_{h-sh} 随着

氮肥浓度的增加显著增大, 与 N_1 相比, N_2 水平下的平均 K_{h-r} 和 K_{h-sh} 分别显著增加了 19.05% 和 16.67%。盐胁迫或氮肥浓度均对 LSC_{sh} 无显著影响 ($P > 0.05$), 氮肥浓度对 LSC_r 无显著影响 ($P > 0.05$), 与 CK 相比, S_2 和 S_3 的 LSC_r 分别显著降低了 23.31% 和 52.36% ($P < 0.05$)。此外, 氮肥浓度均对 K_{s-sh} 和 K_{s-r} 无显著影响 ($P > 0.05$), 与 CK 相比, S_2 和 S_3 的 K_{s-sh} 和 K_{s-r} 分别显著降低了 27.63% 和 48.53%, 44.73% 和 75.74% ($P < 0.05$)。

试验中未标准化的水分传导值(导水率 K_h) 与基茎截面面积变化趋势一致, 表明基茎截面面积越大, 则水分传导越大; 当土壤盐胁迫程度较低时 (S_1), 增加氮肥 (N_2) 的投入量, 可一定程度增加小桐子根系和冠层叶比导率, 而当土壤盐胁迫程度为中、高时 (S_2 、 S_3), 增施氮肥 (N_2) 相较于低浓度氮肥 (N_1) 处理并不能显著提高小桐子根系和冠层叶比导率; 此外, 根系和冠层比导率降低主要归因于盐胁迫程度的加深。

表3 两种氮肥条件下小桐子水力结构对氯盐胁迫的响应

处理	导水率 K_h / $10^{-4} (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1})$		叶比导率 LSC / $10^{-5} (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$		比导率 K_s / $10^{-5} (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2})$	
	冠层 K_{h-sh}	根系 K_{h-r}	冠层 LSC_{sh}	根系 LSC_r	冠层 K_{s-sh}	根系 K_{s-r}
CK	0.45 ± 0.02a	0.81 ± 0.05a	0.83 ± 0.04ab	1.48 ± 0.09ab	0.38 ± 0.03a	0.68 ± 0.06a
N_1S_1	0.34 ± 0.01c	0.58 ± 0.02b	0.84 ± 0.01ab	1.45 ± 0.06ab	0.38 ± 0.05a	0.64 ± 0.08a
N_1S_2	0.22 ± 0.02e	0.32 ± 0.03c	0.84 ± 0.08ab	1.20 ± 0.13bc	0.23 ± 0.04bc	0.32 ± 0.04bc
N_1S_3	0.16 ± 0.00f	0.12 ± 0.02d	0.97 ± 0.06a	0.74 ± 0.13d	0.17 ± 0.01c	0.12 ± 0.01d
N_2S_1	0.39 ± 0.01b	0.78 ± 0.02a	0.78 ± 0.00b	1.57 ± 0.06a	0.34 ± 0.01a	0.70 ± 0.05a
N_2S_2	0.28 ± 0.02d	0.34 ± 0.02c	0.89 ± 0.05ab	1.07 ± 0.06c	0.32 ± 0.01ab	0.38 ± 0.02b
N_2S_3	0.17 ± 0.01f	0.14 ± 0.02d	0.81 ± 0.05ab	0.67 ± 0.05d	0.25 ± 0.03bc	0.21 ± 0.04cd
F 检验统计量值						
N	12.059**	14.455**	2.102	0.123	4.089	2.91
S	96.943**	213.703**	1.352	40.575**	14.287**	56.823**
N * S	2.006	7.501**	2.334	1.147	2.856	0.084

3.3 根冠比、胡伯儿值、水分利用效率

两种氮肥条件下小桐子根冠比、胡伯儿值及水分利用效率如图2所示。盐胁迫下不同氮肥浓度对桐子根冠比、胡伯儿值及水分利用效率影响显著 ($P < 0.05$), 二者的交互作用也显著影响小桐子生长特征或水力结构参数 ($P < 0.05$)。

由图1(a)可知, 在 N_1 水平条件下, 随着盐胁迫程度的增加, 小桐子的根冠比显著上升 ($P <$

0.05), 但在 N_2 水平下呈先下降后上升的趋势, CK 处理下的根冠比值最低, 为 0.41, N_2S_2 处理次之, 为 0.45。数据分析表明, 当土壤盐胁迫水平为 S_1 和 S_3 时, 氮肥浓度由 N_1 增加到 N_2 时, 根冠比无显著差异 ($P > 0.05$); 但 S_2 水平下, N_2 水平的根冠比较 N_1 水平显著降低了 26.92% ($P < 0.05$)。由图1(b)可知, 在不同氮肥浓度水平下, 随着土壤盐胁迫程度增加, 小桐子胡伯儿值显著上升 ($P < 0.01$), CK 处

理下的胡伯尔值最低,为2.22。数据分析表明,当土壤盐胁迫水平为 S_2 和 S_3 时,氮肥浓度由 N_1 增加到 N_2 时, S_2 和 S_3 水平下的胡伯尔值分别显著降低了24.12%和43.73% ($P < 0.01$),CK, N_1S_1 和 N_2S_1 处理下的胡伯尔值无显著差异。由图1(c)可知,在不同氮肥浓度水平下,随着土壤盐胁迫程度增加,小桐子总水分利用显著降低 ($P < 0.01$)。数据分析表明,当土壤含盐量为 S_1 和 S_2 时,施氮量由 N_1 增加到 N_2 时,总水分利用效率分别显著提高了24.17%和24.61% ($P < 0.01$);当土壤盐胁迫水平为 S_3 时,总水分利用效率在两种氮肥浓度水平下差

异并不显著 ($P > 0.05$),均为最小值。

由此可见,当土壤盐胁迫程度较低时(S_1),增施氮肥(N_2)比较低浓度氮肥(N_1)处理可显著提高单株小桐子总水分利用效率;当土壤盐胁迫程度中时(S_2),增施氮肥(N_2)比较低浓度氮肥(N_1)处理虽然提高了总水分利用效率,但是降低了小桐子的根冠比和胡伯尔值;而当土壤盐胁迫程度高时(S_3),增施氮肥(N_2)比较低浓度氮肥(N_1)处理虽然显著降低了胡伯尔值,但其根冠比和总水分利用效率没有显著变化。该结论表明施氮管理能在一定范围内缓解小桐子土壤盐胁迫的影响。

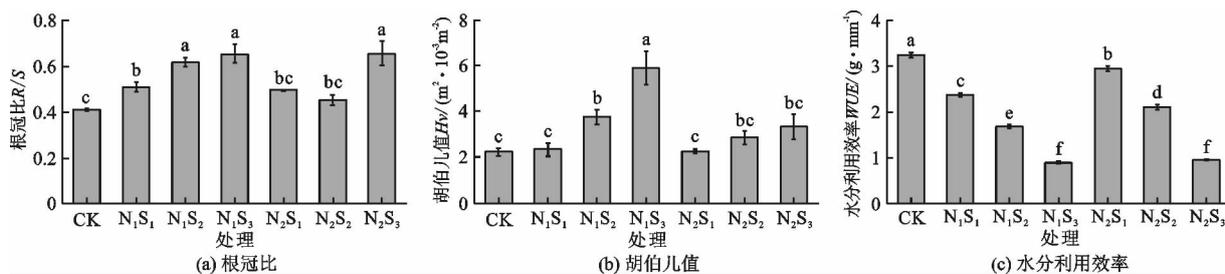


图2 两种氮肥条件下小桐子根冠比、胡伯尔值和水分利用效率对氯盐胁迫的响应

4 讨论

植物光合作用主要发生于叶片上,叶片的茂密程度直接反映了植株同化能力的大小,影响光合产物的积累总量,植物对水分的吸收、运输和利用过程效率最终是通过水分利用效率参数来表征的^[10,20]。本研究表明,不同土壤盐胁迫和氮肥浓度处理对小桐子的各项生长指标和水分利用效率影响显著(表2,图2(c))。试验期间,中(S_2)、高(S_3)浓度土壤盐胁迫条件下,小桐子总叶面积和冠层干物质质量显著降低,这是因为在植物长时间受高浓度盐胁迫时, Na^+ 和 Cl^- 浓度在植物体内剧增,促使根系产生脱落酸传递到叶片,植物叶片的逐渐变黄、变干,甚至脱落,导致总光合面积骤降,从而削弱了叶片同化能力,最终抑制了植物体生长^[7,12,15]。由于各处理下灌溉用水量无显著差异,此时水分利用效率随着总干物质质量的增大而增大,两者呈现正相关变化趋势,对照处理CK(无盐无氮)的生物量显著高于其他处理,不同程度的盐胁迫均抑制了小桐子冠层和根系的生物量积累;但是,小桐子对土壤盐胁迫有一定耐受力, N_2S_1 处理小桐子的生物量积累显著高于 N_1S_1 处理, N_2S_2 处理下小桐子的生物量积累显著高于 N_1S_2 处理,这说明可以通过增加氮肥(N_2 水平)和磷肥的投入来缓解低浓度盐胁迫的伤害,这

是因为:当灌溉水量合理时,作物根系水分充足、吸收养分的表面积充分,增施氮肥可增加土壤中随水分迁移到植物的根部的硝态氮,养分吸收量增加,从而提高产量,增加其水分利用效率^[21-23]。

根冠比反映了植物根系与冠层的生长分配比例^[24],胡伯尔值则是基茎截面面积与植物叶面积比值^[16]。试验数据表明,各氮肥浓度水平下的胡伯尔值均在高盐水平(S_3)下达到最大值(图2(b)),这表明土壤含盐量的增加对小桐子地上、地下部分的生长均有明显抑制作用,但冠层生物量积累降幅大于根系生物量积累降幅^[17]。此外,不同盐胁迫梯度下,各氮肥处理下的总叶面积随土壤盐胁迫程度的增加而显著减小,而基茎截面面积并未显著减小,使得胡伯尔值也呈现显著增大的趋势(表2,图2(b)),胡伯尔值的增大表明要维持植物体单位面积的水分供应时需要更粗的基茎组织^[17],这使得植物增加其由根系向冠层的水分传输以保证其存活率^[25]。

植物体内的水分传输,也是营养物质传输的基本动力,因此导水率的大小可间接反映植物生长优劣^[16]。本研究表明,导水率(表3)随着土壤盐胁迫程度的增加而显著降低 ($P < 0.01$),特别是高盐胁迫(S_3)时,冠层和根系导水率均显著下降,增加氮肥施用量也不能提高冠层和根系的导水率,这是因为在重度盐胁迫下,植物的木质部栓塞加重,植物体

冠层和根系输水性能降低,小桐子基于减少其木质部的渗透势的自我调控能力显著减弱,木质部导水能力急剧下降,表现为根系和冠层导水率均显著降低^[7-8,16]。在中低土壤盐胁迫下(S_1, S_2),增加氮肥施用量可增强植物渗透调节能力,刺激植物根部吸水及输水,增大导水率^[8,22],这与生物量的变化趋势表现出一致性。压力势梯度恒定的条件下,叶比导率值越高,则表示小桐子单位叶面积的供水条件越好^[14],本研究数据表明,不同盐胁迫和氮肥浓度处理下的冠层比导率没有显著差异,而盐胁迫程度的高低显著影响根系比导率, N_2S_1 、CK 和 N_1S_1 处理下的根系比导率较高且没有显著差异,但 3 个处理下的导水率差异显著(表 3),因此,小桐子叶比导率值的变化主要受植株冠层的叶干重或是叶面积影响^[14,19]。此外,比导率是反映水分运输有效性的主要指标之一,该值越高表明植物的输水效率越高^[14],已有研究表明盐胁迫导致小桐子单位有效面积的输水能力减弱^[14,26],本试验中不同氮肥浓度对小桐子冠层和根系比导率无显著影响,但土壤盐胁迫程度对其影响显著(表 3),说明盐胁迫导致小桐子输水难度增加,生长受到阻碍。

5 结 论

CK 处理下小桐子的各项生长指标(基茎截面积、总叶面积、干物质质量)、导水率(K_{h-r} 和 K_{h-sh})和水分利用效率均为最大值;不同程度的盐胁迫均抑制了小桐子生长,但增加氮肥施用量可不同程度缓解盐胁迫对其生长的危害,促进生物量的积累和水分利用效率的提高。胡伯尔值和根冠比随着土壤盐胁迫程度增加而增大,盐胁迫对冠层的生长抑制大于根系的生长抑制,需更粗的茎干组织来维持每单位叶面积;比导率值(K_{s-r} 和 K_{s-sh})随着土壤盐胁迫程度增加而显著降低,输水效率减弱,植物生长受到阻碍。当土壤盐胁迫程度为中低水平时(2 ~ 4 g/kg),提高土壤氮肥浓度可显著促进小桐子生物量积累(总叶面积、干物质质量),提高导水率(K_{h-r} 和 K_{h-sh})和水分利用效率值,并在 N_2S_1 处理下达到最高;当土壤盐胁迫程度高时(≥ 6 g/kg),提高土壤氮肥浓度并不能促进植物生长,反而加速土壤酸化,不建议种植小桐子进行土壤修复。

参考文献:

[1] PURABI M, POOJA S, SUBRAMANIAN B, et al. An update on biological advancement of *Jatropha curcas* L.: New

insight and challenges[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018,91:903-917.

- [2] WANI S P, CHANDER G, SAHRAWAT K L, et al. Carbon sequestration and land rehabilitation through *Jatropha curcas* (L.) plantation in degraded lands[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012,161:112-120.
- [3] BANAPURMATH N R, TEWARI P G, HOSMATH R S, et al. Performance and emission characteristics of a DI compression ignition engine operated on Honge, *Jatropha* and sesame oil methyl esters[J]. *Renewable Energy*, 2008,33(9):1982-1988.
- [4] VALDESRODRIGUEZ O A, SANCHEZSANCHEZ O, PEREZVAZQUEZ A, et al. Soil texture effects on the development of *Jatropha* seedlings - Mexican variety 'piñón manso' [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2011,35(8):3529-3536.
- [5] 王善仙,刘宛,李培军,等. 盐碱土植物改良研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011,27(24):1-7.
- [6] 储冬生,郑旭秦,盛华苏,等. 北淤泥质海岸土壤盐分特征及其对杨树生长的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020. (网络首发论文)
- [7] 周洪华,李卫红. 胡杨木质部水分传导对盐胁迫的响应与适应[J]. *植物生态学报*, 2015,39(1):81-91.
- [8] 杨启良,张富仓,刘小刚,等. 不同滴灌方式和 NaCl 处理对苹果幼树生长和水分传导的影响[J]. *植物生态学报*, 2009,33(4):200-208.
- [9] 尹丽,胡庭兴,刘永安,等. 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[J]. *应用生态学报*, 2010,21(3):39-46.
- [10] 李婕,杨启良,徐曼,等. 调亏灌溉和氮处理对小桐子生长及水分利用的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2016,34(11):995-1002.
- [11] 徐天宇,李婕,杨启良,等. 限量灌溉和施氮对小桐子产量和品质的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2018,44(3):244-250.
- [12] 刘冰,杨启良,徐曼. 盐胁迫下水氮处理对小桐子生理特性的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2018,36(8):679-684.
- [13] XIE S, FENG H, YANG F, et al. Does dual reduction in chemical fertilizer and pesticides improve nutrient loss and tea yield and quality? A pilot study in a green tea garden in Shaoxing, Zhejiang Province, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019,26(3):2464-2476.
- [14] 刘娟娟,张建国,李吉跃,等. CO₂ 浓度升高对 4 种乔木幼树水力结构的影响[J]. *生态学杂志*, 2017,36(7):1769-1776

(下转第 144 页)

- [14] GAO Yingzhi, LYNCH J P. Reduced crown root number improves water acquisition under water deficit stress in maize (*Zea mays* L.) [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2016, 67(15): 4545–4557.
- [15] ZHAO Wensai, SUN Yonglin, KJELGREN R, et al. Response of stomatal density and bound gas exchange in leaves of maize to soil water deficit [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2015, 37: 1704.
- [16] SUN Tao, LI Zizhong, WU Qi, et al. Effects of alfalfa intercropping on crop yield, water use efficiency, and overall economic benefit in the Corn Belt of Northeast China [J]. *Field Crops Research*, 2018, 216: 109–119.
- [17] 张计峰, 耿庆龙, 曹文超, 等. 氮肥品种与施氮量对滴灌红枣光合特性和产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 92–98.
- [18] 史建国, 崔海岩, 赵斌, 等. 花粒期光照对夏玉米产量和籽粒灌浆特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(21): 4427–4434.
- [19] 杨涛, 段志平, 石岩松, 等. 新疆枣棉间作下棉花光合特性及产量变化[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(1): 89–94.
- [20] 段志平, 刘天煜, 张永强, 等. 离树间距对枣麦间作小麦光合特性及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(11): 1445–1452.
- [21] 屈洋, 苏旺, 李翠, 等. 陕北半干旱区沟垄覆膜集水模式下糜子边际效应及生理特性[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 776–782.
- [22] 吕瑞洲, 薛蔚荣, 吴松松, 等. 种植带与树干距离对间作花生生长发育及产量的影响[J]. *山西农业科学*, 2019, 47(12): 2115–2117+2134.
- [23] 王婷, 马亮, 马英杰. 干旱区枣棉复合系统细根空间分布特征及种间地下竞争关系[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(1): 54–60.
- [24] 崔吉晓, 檀海斌, 吴佳迪, 等. 微喷灌水肥一体化对河北夏玉米生长及产量的影响[J]. *玉米科学*, 2017, 25(3): 105–110.
- [25] 赵珊珊, 韩娇, 张大伟, 等. 吉林西部水田防护林对林带内温湿度和水稻产量的影响[J]. *西部林业科学*, 2015, 44(6): 31–37.
- [26] 王世伟, 潘存德, 张翠芳, 等. 枣与棉花间作巷道内的光环境研究[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(4): 728–733.
- [27] 何平如, 张富仓, 侯翔皓, 等. 土壤水分调控对南疆滴灌棉花产量及土壤水盐分布的影响[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 84–92.
- [28] 杜刚锋, 汪江涛, 孙雪冰, 等. 不同灌溉方式和灌水量对棉花冠层叶铃配置的影响[J]. *新疆农业科学*, 2019, 56(7): 1177–1186.

(上接第 137 页)

- [15] COHEN Y, FUCHS M, COHEN S, et al. Resistance to water uptake in a mature citrus tree [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1983, 34(4): 451–460.
- [16] 李端, 司建华, 张小由, 等. 胡杨(*Populus euphratica*)对干旱胁迫的生态适应[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(2): 17–23.
- [17] 龚容, 徐霞, 田晓宇, 等. 三种锦鸡儿属植物水力结构特征及其干旱适应策略[J]. *生态学报*, 2018, 38(14): 65–74.
- [18] 齐昌民. 盐胁迫条件下不同水氮对小桐子生长和水分传输机制的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [19] 张树斌, 张教林, 曹坤芳. 季节性干旱对白皮乌口树(*Tarennia depauperata Hutchins*)水分状况、叶片光谱特征和荧光参数的影响[J]. *植物科学学报*, 2016, 34(1): 117–126.
- [20] 王艳哲, 位刘秀, 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.
- [21] 丁红, 张智猛, 戴良香, 等. 水分胁迫和氮肥对花生根系形态发育及叶片生理活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 450–456.
- [22] 刘小刚, 郝琨, 韩志慧, 等. 水氮耦合对干旱区小粒咖啡产量和品质的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 143–150, 160.
- [23] 杨启良, 周兵, 刘小刚, 等. 亏缺灌溉和施氮对小桐子根区硝态氮分布及水分利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(4): 142–150.
- [24] 张林森. 陕西黄土高原地区苹果园分区灌溉和施钾的效应[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2012.
- [25] 荣焯, 杨启良, 张京, 等. 调亏灌溉对小桐子幼树形态特征与水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(1): 130–135.
- [26] 陈亚宁, 郝兴明, 李卫红, 等. 极端干旱环境下的胡杨木质部水力特征[J]. *生态学报*, 2012, 32(9): 2748–2758.