

# 不同非生物胁迫对麻疯树幼苗光合速率等生理指标的影响

赵茜茜<sup>1,2</sup>, 张琳<sup>1,2</sup>, 朱双<sup>1,2</sup>, 张晟<sup>1,2</sup>, 吴平治<sup>1</sup>, 陈雅平<sup>1</sup>, 姜华武<sup>1</sup>, 吴国江<sup>1\*</sup>,  
李美茹<sup>1</sup>

(1. 中国科学院华南植物园植物资源保护与可持续利用重点实验室, 广州 510650; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 对麻疯树(*Jatropha curcas* L.)幼苗在不同非生物胁迫下的净光合速率(Pn)和蒸腾速率(Tr)等生理指标的变化进行了研究。结果表明,在缺磷处理中,麻疯树叶片 Pn 保持在对照的 90% 左右,气孔导度(Gs)和胞间 CO<sub>2</sub> 浓度(Ci)在处理 2 d 后显著增加, Gs 上升 20%~40%, Ci 升高 4%~16%, Tr 变化不大;处理 17 d 时,麻疯树的 P 含量下降 55%~85%,而干重只下降 3%。缺氮处理 9 d 时麻疯树叶片的 Pn 下降到最低,之后维持在对照的 64% 左右, Gs 在处理 2~7 d 显著高出对照 15%~57%,处理 9~16 d 恢复到对照水平, Ci 从第 2 天开始上升,高出对照 4%~24%, Tr 变化不大;处理 17 d 时组织中 N 含量显著下降 47%~78%,植株干重下降 23%。盐胁迫处理 5 d 后,麻疯树叶片 Pn 降低到对照的 54%,之后维持在对照的 48% 左右, Gs、Ci 和 Tr 与 Pn 的变化一致,均呈下降趋势;处理 17 d,叶柄和茎中 P 含量增加 37%~54%,组织中 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 下降 87%~96%,植株干重下降 18%。干旱胁迫处理 6 d,叶片 Pn 快速下降至 29%, Gs、Ci 和 Tr 与 Pn 整体变化趋势一致;处理第 7 天,叶片细胞膜透性增加 67%,停止浇水 17 d 后植株干重下降 55%,同时叶片卷曲下垂,老叶脱落。麻疯树植株 Pn 在缺磷胁迫过程中最早达到相对稳定状态,其次为盐胁迫和缺氮胁迫。这说明麻疯树植株对缺磷环境具有良好的适应性,而对缺氮环境适应性相对较差;耐盐类型可能属于逃避盐害中的聚盐植物,适应干旱环境的机制属于御旱性类型。

**关键词:** 麻疯树; 非生物胁迫; 光合速率; 蒸腾速率

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2012.05.002

## Effects of Several Abiotic Stresses on Photosynthetic Rate and Other Physiological Indexes in *Jatropha curcas* L. Seedlings

ZHAO Qian-qian<sup>1,2</sup>, ZHANG Lin<sup>1,2</sup>, ZHU Shuang<sup>1,2</sup>, ZHANG Sheng<sup>1,2</sup>, WU Ping-zhi<sup>1</sup>,  
CHEN Ya-ping<sup>1</sup>, JIANG Hua-wu<sup>1</sup>, WU Guo-jiang<sup>1\*</sup>, LI Mei-ru<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Plant Resources Conservation and Sustainable Utilization, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The dynamic changes in several physiological indexes, such as net photosynthetic rate (Pn), transpiration rate (Tr), etc., in *Jatropha curcas* L. seedlings under different abiotic stresses were studied. The results showed that under phosphorus deficiency, Pn of *J. curcas* contained about 90% of control, and stomata conductance (Gs) and intercellular CO<sub>2</sub> concentration (Ci) increased 20%~40% and 4%~16% after 2 days, respectively, and little change in Tr. The P content decreased from 55% to 85% under phosphorus deficiency, whereas dry weight only decreased 3% after 17 days. Under nitrogen deficiency, Pn decreased to the lowest level at the 9th day, and then maintained at about 64% of control. Gs increase significantly about 15%~57% treated

收稿日期: 2011-11-14 接受日期: 2012-04-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010CB126603); 中国科学院生命科学领域基础前沿研究专项(KSCX2-EW-J-28)资助

作者简介: 赵茜茜,女,硕士研究生,从事麻疯树逆境胁迫研究。E-mail: zhaoqianqian0718@163.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wugj@scbg.ac.cn

after 2 to 7 days, and then decreased to control. Ci rose about 4% to 24% from the 2nd day compared with the control, and there was little change in Tr. N content decreased 22% to 53% under nitrogen deficiency and plant dry weight decreased about 23% after 17 days. Under salt stress, Pn decreased to 54% of control at the 5th day, and then maintained about 48%. The changes in Gs, Ci and Tr were consistent with that in Pn. The content of P in petiole and stem increased 37%–54%, while  $K^+/Na^+$  decreased 87%–96% in different tissues, and dry weight decreased 18% of control after 17 days. Under drought stress, Pn decreased rapidly to 29% at the 6th day, and the changes in Gs, Ci and Tr were consistent with that of Pn. The cell membrane permeability increased 67% at the 7th day and dry weight decreased 55% of control at the 17th day. Meanwhile, leaves became curly and pendulous, and old leaves fall off. Among all of stresses, Pn of *J. curcas* reached relative stable state at first under phosphorus deficiency stress, followed by salt stress and nitrogen deficiency. It suggested that the *J. curcas* had good adaptability to phosphorus deficiency stress, and relatively poor to nitrogen deficiency stress. The salt tolerance of *J. curcas* should belong to the gathered salt type, which is a type of avoiding salt damage, while the drought adaptation of *J. curcas* belongs to drought avoidance type.

**Key words:** *Jatropha curcas*; Abiotic stress; Photosynthetic rate; Transpiration rate

麻疯树(*Jatropha curcas* L.)是大戟科(Euphorbiaceae)多年生落叶灌木或小乔木,主要分布在热带和亚热带地区<sup>[1]</sup>,种子富含油脂,种仁含油率高达50%<sup>[2]</sup>,是适宜于半干旱和瘠薄土壤种植的最具发展潜力的能源植物之一。在营养、盐和干旱等非生物胁迫下,植物的光合作用速率下降,生物量减少<sup>[3-9]</sup>。但是,有关木本植物在这些非生物胁迫下的相关生理指标变化的研究较少。麻疯树在自然生境条件下表现出较好的耐逆性,因此,对麻疯树耐逆性的生理特性进行研究将有助于揭示其耐逆分子生理学机制。

目前,有关麻疯树耐逆性的研究仅有少量报道,主要涉及耐旱性<sup>[3-5]</sup>、氮素胁迫<sup>[6-7]</sup>和盐胁迫<sup>[8-9]</sup>等。光合作用是植物生长发育的基础,对环境条件的变化十分敏感,因此常作为鉴定植物耐逆性的重要指标<sup>[10]</sup>。为了研究麻疯树对缺磷、缺氮、盐胁迫和干旱等非生物胁迫的生理响应进程,本文分析了麻疯树在这些胁迫条件下光合参数和蒸腾参数等生理指标的动态变化,以期为深入研究其分子生理学机制和合理栽培种植管理提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

供试麻疯树种子于2009年7月采自中国科学院华南植物园科研区实验田。播种前用1:5000的KMnO<sub>4</sub>溶液浸泡种子30 min进行消毒,再用清水浸泡12 h,然后沙层积催芽。种子萌发后选取长势一致(子叶完全展开,高约10~12 cm)的幼苗,以每

盆6株移入沙土(3:1)盆中(38 cm×27.5 cm×14 cm),每个处理5盆,遮阳网炼苗3 d后,温室自然光照(8-9月份)。幼苗长出第一片真叶后开始每天浇施Hoagland完全营养液<sup>[11]</sup>,待长出第六片真叶时进行胁迫处理。

### 1.2 胁迫处理

对照、缺素及盐胁迫处理前用5 L清水冲洗沙土,以确保实验设计的准确性。对照处理每盆每天浇施Hoagland完全营养液1 L;缺磷、缺氮处理则分别浇施缺磷Hoagland营养液(1.25 mmol L<sup>-1</sup> KCl替代2 mmol L<sup>-1</sup> KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)和缺氮Hoagland营养液(5 mmol L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>和5 mmol L<sup>-1</sup> KCl替代5 mmol L<sup>-1</sup> Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>和5 mmol L<sup>-1</sup> KNO<sub>3</sub>)<sup>[11]</sup>;盐胁迫处理浇施含有100 mmol L<sup>-1</sup> NaCl的Hoagland完全营养液;干旱胁迫处理则不浇施营养液。

### 1.3 光合特性参数的测定

每天上午8:30用Li-6400便携式光合速率仪测定麻疯树幼苗顶部第3、4片展开叶的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间CO<sub>2</sub>浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)。胁迫处理1 d后开始测定,每个处理随机选取3株苗进行测定,作为3个重复。

### 1.4 叶片相对电导率的测定

取顶端第4片展开叶,双蒸水冲洗干净后用滤纸吸干表面水分,避开主脉用打孔器(直径1 cm×1 cm)取5片叶圆片,置20 mL去离子水的三角瓶中,封膜后于温室下以150 r min<sup>-1</sup>振荡2 h。用电

导仪测定浸提液电导率( $R_1$ ),然后沸水浴 10 min,冷却至室温后,再次测定浸提液电导率( $R_2$ )。相对电导率 =  $R_1/R_2 \times 100\%$ <sup>[12]</sup>。每个处理随机选取 6 株苗进行测定,作为 6 个重复。

### 1.5 植株干重及组织中矿质元素含量的测定

处理 17 d 后取样,于 60℃ 烘至恒重后称取重量;干样磨成粉后过筛,用凯式消解法消解,采用流动注射分析法<sup>[13]</sup>测各组织的 P 和 N 含量,用原子吸收光谱法<sup>[14]</sup>测  $K^+$  和  $Na^+$  含量。

### 1.6 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件对实验数据进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),选择 Duncan 检验进行差异显著性比较。采用 Microsoft Excel 2003 软件绘制图表。

## 2 结果和分析

### 2.1 胁迫处理对光合速率等的影响

净光合速率(Pn)反映了植株同化  $CO_2$  的能力,受气孔导度(Gs)、胞间  $CO_2$  浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)等因素的影响<sup>[8]</sup>。缺磷处理中,麻疯树叶片 Pn 维持在对照的 90% 上下波动(图 1: A)。Gs 和 Ci 在处理 2 d 后显著升高, Gs 上升 20%~40%, Ci 上升 4%~16% ( $P < 0.05$ )(图 1: B,C),但 Tr 的变化不大(图 1: D)。缺氮处理 3~7 d,植株 Pn 维持在对照的 76% 左右,第 9 天下降至对照的 54%, 11~16 d 又上升到对照的 64% 左右( $P < 0.05$ )(图 1: A)。Gs 在 2~7 d 显著高于对照( $P < 0.05$ ), 9~16 d 恢复到对照水平(图 1: B)。Ci 从第 2 天开始明显上升,高出对照 4%~24% ( $P < 0.05$ ), Tr 的变化不大(图 1: C,D)。说明缺氮胁迫下,麻疯树叶片光合作用速率的下降主要是由于自身光合组织同化  $CO_2$  能力的下降,而与气孔导度等的关系不大。

盐胁迫处理 2~4 d,麻疯树叶片 Pn 比对照显著下降 17%~22%,第 5 天下降至对照的 54%, 6~16 d 为对照的 48% ( $P < 0.05$ )(图 1: A)。干旱胁迫 3~5 d,植株 Pn 显著下降 11%~37%, 6~7 d 时 Pn 快速下降至对照的 25%~29% ( $P < 0.05$ )(图 1: A)。在盐胁迫和干旱胁迫下,麻疯树叶片的 Gs、Tr 和 Ci 整体变化趋势与 Pn 一致(图 1: B,C,D),说明干旱胁迫和盐胁迫时,麻疯树叶片气孔导度下降,同时由于自身光合组织受损,同化  $CO_2$  的能力下降,最

终导致植株叶片 Pn 下降。

### 2.2 盐胁迫及干旱胁迫对细胞膜透性的影响

相对电导率是反映植物细胞膜系统完整性的重要指标。盐胁迫处理 2~4 d,植株叶片相对电导率上升 14%~15% ( $P < 0.05$ )(图 2: A),而干旱处理 4 d,植株叶片相对电导率比对照高 62% ( $P < 0.05$ )(沙土含水量见图 2: B),盐胁迫 7 d 时植株叶片相对电导率与对照相当,而干旱处理的升高 67% ( $P < 0.05$ ),说明干旱胁迫对麻疯树叶片细胞膜结构有较大伤害,而盐胁迫伤害较小。

### 2.3 胁迫后植株干重及部分元素含量的变化

干旱胁迫处理 17 d 的麻疯树植株矮小,叶片卷曲下垂,老叶脱落,植株干重下降 55%;缺氮处理 17 d 的植株整体发黄,干重下降 23%;盐胁迫处理的植株叶色暗绿,干重下降 18%;缺磷处理的植株表型无明显变化,植株干重下降 3%。说明干旱、缺氮和盐胁迫明显降低麻疯树植株的干物质积累,而缺磷胁迫的影响较小。

同对照植株相比,缺磷处理植株各组织中的 P 含量均大幅下降,地上部分平均下降 81%,根部略低,为 55% ( $P < 0.05$ )(图 3: A),地上部分的 N/P 上升 284%~445%,根部 N/P 上升 89%,叶片中  $K^+/Na^+$  上升 263%,叶柄、茎韧皮部上升 32%~33%,茎木质部与根部的变化不大( $P < 0.05$ )(图 3: C,D)。缺氮处理植株地上部分 N 含量平均下降了 67%,根部下降 47% ( $P < 0.05$ )(图 3: B);各组织中 N/P 降低,叶片和根中下降 21% 和 36%,低于叶柄和茎的 51%~70%,地上部分除茎韧皮部  $K^+/Na^+$  降低 62% 外,其余组织  $K^+/Na^+$  升高 120%~240%,根中  $K^+/Na^+$  变化不大 ( $P < 0.05$ )(图 3: C,D)。盐胁迫处理的植株叶柄、茎韧皮部及茎木质部中 P 含量分别增加 37%、53% 和 38% ( $P < 0.05$ )(图 3: A),除茎韧皮部,各组织中 N 含量下降 6%~14% ( $P < 0.05$ )(图 3: B),叶柄、茎和根中 N/P 显著下降,叶的变化不大,所有组织中  $K^+/Na^+$  下降 87%~96%,下降幅度以叶 > 叶柄 > 根 > 茎木质部 > 茎韧皮部( $P < 0.05$ )(图 3: C,D)。干旱处理植株地上部分 P 含量下降 47%~69%, N/P 升高 71%~132%,  $K^+/Na^+$  下降 25%~57%,根部 P 含量下降 23%, N/P 升高 9%,  $K^+/Na^+$  下降 70% ( $P < 0.05$ )(图 3)。

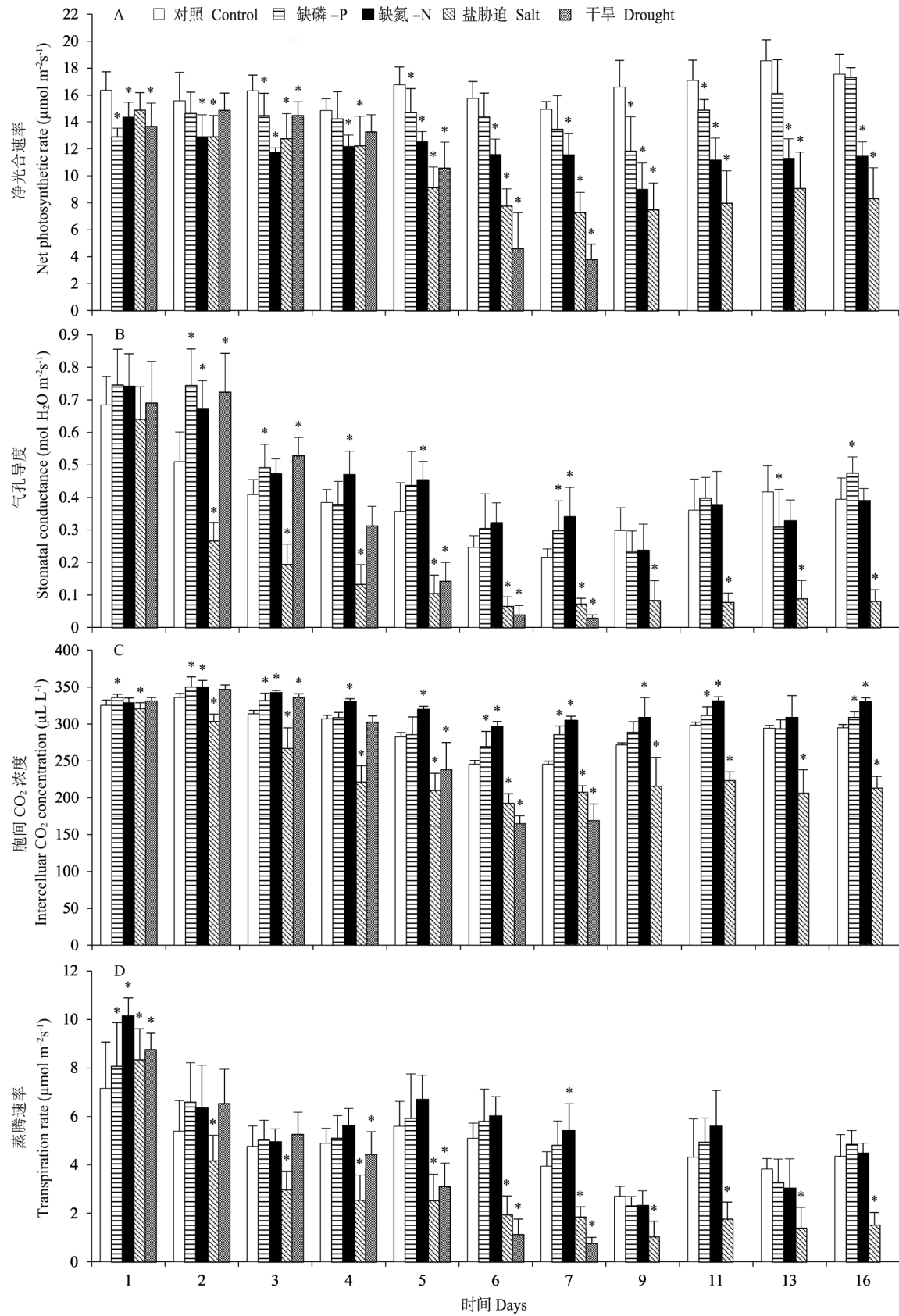


图1 不同胁迫处理对麻疯树叶片光合指标和蒸腾指标的影响。\*：  $P < 0.05$ 。

Fig. 1 Changes in photosynthesis and transpiration of *Jatropha curcas* leaves under stresses. \*：  $P < 0.05$ .

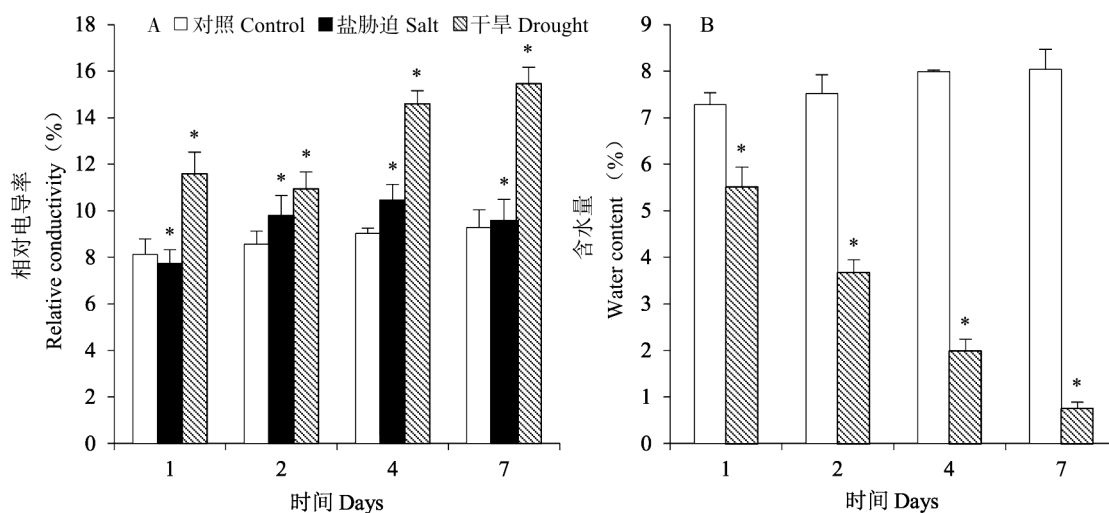


图2 胁迫下麻疯树叶片相对电导率和沙土含水量的变化。\*:  $P < 0.05$

Fig. 2 Changes in relative conductivity of *Jatropha curcas* leaves and water content of sandy soil under stress. \*:  $P < 0.05$ .

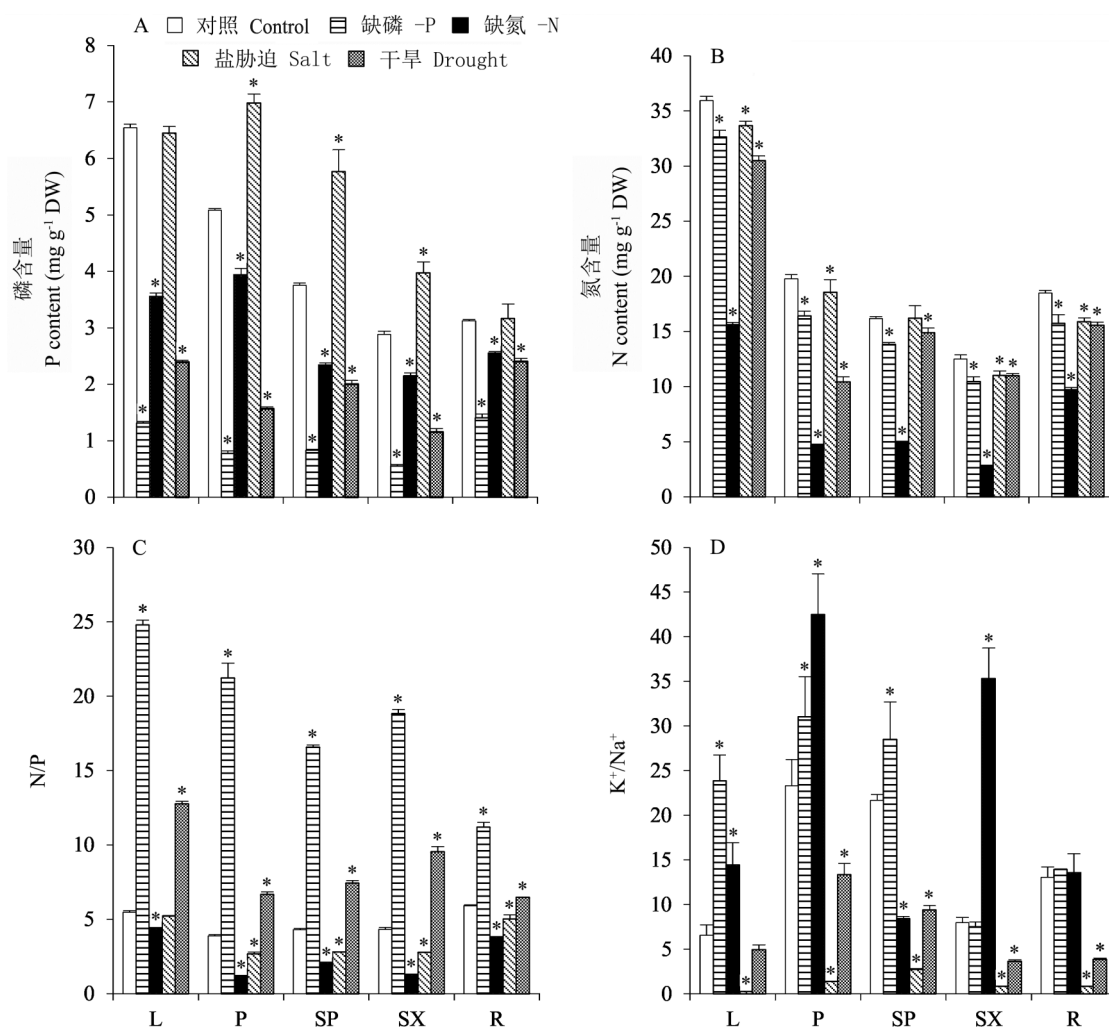


图3 胁迫处理17 d后麻疯树植株的N、P含量及N/P,  $\text{K}^+/\text{Na}^+$ 。\*:  $P < 0.05$ ; L: 叶; P: 叶柄; SP: 茎韧皮部; SX: 茎木质部; R: 根。

Fig. 3 N, P contents, N/P and  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  in *Jatropha curcas* under stresses for 17 days. \*:  $P < 0.05$ ; L: Leaf; P: Petiole; SP: Stem phloem; SX: Stem xylem; R: Root.

### 3 讨论

本研究结果表明,麻疯树植株对缺磷胁迫具有良好的适应性,而对缺氮胁迫适应性相对较差。首先,缺磷胁迫下植株叶片净光合速率(Pn)和胞间CO<sub>2</sub>浓度(Ci)的变化幅度明显小于缺氮胁迫处理的(图1:A,C)。缺氮处理第9天植株叶片Pn只有对照的64%左右(图1:A),Ci从第2天开始上升,高出对照4%~24%(图1:C)。其次,缺磷处理17d后,植株各组织中P含量比对照下降55%~85%(图3:A),而干重只下降3%左右;而缺氮处理植株各组织中N含量下降47%~78%(图3:B),植株干重却下降了23%。在逆境胁迫下植物自身能够主动调节生物量和营养元素的分配格局以适应胁迫环境<sup>[15-16]</sup>。黑籽南瓜(*Cucurbita ficifolia*)幼苗在缺磷处理21d时体内磷含量明显低于对照,地上部分生物量显著降低,根冠比显著增加,说明缺磷处理改变了干物质在地上部和根系间的分配比例<sup>[15]</sup>。本研究中,缺磷植株根部的P和N含量,以及N/P的变化明显小于地上部(图3:A,B,C),说明麻疯树在缺磷胁迫下能够较好地维系根部的正常代谢,从而有利于地上部分的生长发育。

盐胁迫抑制植物光合作用是由于渗透胁迫、糖积累造成的反馈抑制和离子伤害等原因所致<sup>[17]</sup>。为避免盐害,耐盐植物会通过限制根部对盐离子的吸收<sup>[18]</sup>,将盐离子区域化积累<sup>[19]</sup>,或者将多余的盐通过盐腺排出体外<sup>[20]</sup>等方式避免质膜受损。本研究结果表明,盐胁迫处理后植株Pn和生物量能维持在对照的48%(图1:A)和82%,叶片的K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>降低96%(图3:D),而细胞膜透性仅略有升高(图2:A)。这表明麻疯树可能具有将盐离子进行区域化积累的能力,应属于逃避盐害中的聚盐植物类型。黑麦草(*Lolium multiflorum*)<sup>[21]</sup>和草莓(*Fragaria ananassa*)<sup>[22]</sup>在盐胁迫下,增施磷肥能够促进植株生长,增强植株对K<sup>+</sup>吸收的选择性,维持叶片的正常生理代谢。本研究中,盐胁迫下麻疯树植株叶柄、茎韧皮部及茎木质部的P含量分别增加37%、53%和38%(图3:A),说明麻疯树也具有通过增加P的吸收增强耐盐性的特性。

干旱胁迫程度分为对照(沙土水分含量为最大持水量的75%~80%,下同)、轻度胁迫(60%~65%)、中度胁迫(50%~55%)和重度胁迫(35%~40%)<sup>[23]</sup>。而植物可以通过调节气孔导度<sup>[24]</sup>、减少截获的辐射或脱

去老叶来减少蒸腾等方式适应干旱逆境。本研究中,由于沙土持水力较差,处理第7天的沙土相对含水量已不足10%(图2:B),幼苗叶片出现下垂卷曲以减少截获的辐射,Gs、Pn与Tr的变化一致(图1:A,B,D),均显著下降,细胞膜透性升高67%(图2:A)。这表明麻疯树植株在干旱初期通过调节叶片运动和气孔活动来平衡叶片的水分-光合的关系,而严重干旱时通过脱叶进入休眠来适应干旱。干旱胁迫后进行复水实验,麻疯树植株能够恢复正常生长(数据未列出),表明干旱胁迫下的形态和生理变化是可逆的。因此,麻疯树植株适应干旱的机制应属于御旱性类型。

另一方面,缺磷处理的麻疯树植株Pn能维持在对照的90%左右(图1:A),而缺氮处理的Pn则呈下降趋势,到第9天才趋于稳定(图1:A),这进一步说明麻疯树植株能够快速适应缺磷环境,而对缺氮环境的适应性相对较差。盐胁迫处理植株Pn在处理1~5d逐渐下降,此后保持平稳(图1:A)。干旱胁迫处理6~7d,植株Pn大幅下降(图1:A)。这此表明麻疯树植株能够对缺磷胁迫迅速做出响应,短暂代谢调整后能够重新维持稳态,其次是盐胁迫和缺氮胁迫。然而这些变化的分子生理学机制和麻疯树的栽培种植管理措施还有待深入研究。

### 参考文献

- [1] Li J, Wu P Z, Li M R, et al. Development of energy plant: Progress and suggestions [J]. *Chin J Nat*, 2007, 29(1): 21-25.  
李军, 吴平治, 李美茹, 等. 能源植物的研究进展及其发展趋势 [J]. *自然杂志*, 2007, 29(1): 21-25.
- [2] Deng Z J, Cheng H Y, Song S Q. Studies on *Jatropha curcas* seed [J]. *Acta Bot Yunnan*, 2005, 27(6): 605-612.  
邓志军, 程红焱, 宋松泉. 麻疯树种子的研究进展 [J]. *云南植物研究*, 2005, 27(6): 605-612.
- [3] Dou X Y, Wu G J, Huang H Y, et al. Responses of *Jatropha curcas* L. seedlings to drought stress [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, 19(7): 1425-1430.  
窦新永, 吴国江, 黄红英, 等. 麻疯树幼苗对干旱胁迫的响应 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(7): 1425-1430.
- [4] Yao S F, Yin L, Hu T X, et al. Effects of drought stress on photosynthetic characteristic and growth of *Jatropha curcas* L. seedlings [J]. *J Sichuan Agri Univ*, 2009, 27(4): 444-449.  
姚史飞, 尹丽, 胡庭兴, 等. 干旱胁迫对麻疯树幼苗光合特性及生长的影响 [J]. *四川农业大学学报*, 2009, 27(4): 444-449.
- [5] Jiao J Y, Chen K, Yin C Y. Effects of soil moisture content on growth, physiological and biochemical characteristics of *Jatropha curcas* L. [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, 30(16): 4460-4466.

- 焦娟玉, 陈珂, 尹春英. 土壤含水量对麻疯树幼苗生长及其生理生化特征的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4460–4466.
- [6] Yin L, Hu T X, Liu Y A, et al. Effect of nitrogen application rate on growth and leaf photosynthetic characteristics of *Jatropha curcas* L. seedlings [J]. Acta Ecol Sin, 2011, 31(17): 4977–4984.  
尹丽, 胡庭兴, 刘永安, 等. 施氮量对麻疯树幼苗生长及叶片光合特性的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31(17): 4977–4984.
- [7] Jiao J Y, Yin C Y, Chen K. Effects of soil water and nitrogen supply on the photosynthetic characteristics of *Jatropha curcas* seedlings [J]. J Plant Ecol, 2011, 35(1): 91–99.  
焦娟玉, 尹春英, 陈珂. 土壤水、氮供应对麻疯树幼苗光合特性的影响 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(1): 91–99.
- [8] Chen J M, Zheng Q S, Liu Z P, et al. Growing and photosynthetic response of *Jatropha curcas* L. seedlings to salt stress [J]. Acta Ecol Sin, 2009, 29(3): 1356–1365.  
陈健妙, 郑青松, 刘兆普, 等. 麻疯树(*Jatropha curcas* L.)幼苗生长和光合作用对盐胁迫的响应 [J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1356–1365.
- [9] Chen J M, Zheng Q S, Liu Z P, et al. Response characteristics of physiology and ecology to salt stresses in two varieties of *Jatropha curcas* L. seedlings [J]. Acta Ecol Sin, 2010, 30(4): 933–940.  
陈健妙, 郑青松, 刘兆普, 等. 两种麻疯树苗对盐胁迫的生理生态响应 [J]. 生态学报, 2010, 30(4): 933–940.
- [10] Jia H S, Li D Q, Han Y Q. Advances in studies on photoinhibition in photosynthesis of higher plants [J]. Chin Bull Bot, 2000, 17(3): 218–224.  
贾虎森, 李德全, 韩亚琴. 高等植物光合作用的光抑制研究进展 [J]. 植物学通报, 2000, 17(3): 218–224.
- [11] Shanghai Institute of Plant Physiology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai Society for Plant Physiology. Laboratory Manual of Modern Plant Physiology [M]. 2<sup>nd</sup> ed. Beijing: Science Press, 2004: 1–75.  
中国科学院上海植物生理研究所, 上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南 [M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2004: 1–75.
- [12] Shanghai Society for Plant Physiology. Laboratory Manual of Plant Physiology [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985: 67–69.  
上海植物生理学会. 植物生理学实验手册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 67–69.
- [13] Karmarkar S V. Analysis of wastewater for anionic and cationic nutrients by ion chromatography in a single run with sequential flow injection analysis [J]. J Chromatogr A, 1999, 850(1/2): 303–309.
- [14] Shokrollahi A, Ghaedi M, Hossaini O. Cloud point extraction and flame atomic absorption spectrometry combination for copper(II) ion in environmental and biological samples [J]. J Hazard Mat, 2008, 160(2/3): 435–440.
- [15] Cao L X, Chen G L, Dun H X, et al. Effect of phosphorus deficiency on root growth and root exudates of *Cucurbita ficifolia* Bouché [J]. Acta Agri Boreali-Sin, 2009, 24(5): 164–169.  
曹丽霞, 陈贵林, 敦惠霞, 等. 缺磷胁迫对黑籽南瓜幼苗根系生长和根系分泌物的影响 [J]. 华北农学报, 2009, 24(5): 164–169.
- [16] Wu P F, Ma X Q. Research advances in the mechanisms of high nutrient use efficiency in plants [J]. Acta Ecol Sin, 2009, 29(1): 427–437.  
吴鹏飞, 马祥庆. 植物养分高效利用机制研究进展 [J]. 生态学报, 2009, 29(1): 427–437.
- [17] Zhu X G, Zhang Q D. Advances in the research on the effects of NaCl on photosynthesis [J]. Chin Bull Bot, 1999, 16(4): 332–338.  
朱新广, 张其德. NaCl对光合作用影响的研究进展 [J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 332–338.
- [18] Wang B, Davenport R J, Volkov V, et al. Low unidirectional sodium influx into root cells restricts net sodium accumulation in *Thellungiella halophila*, a salt-tolerant relative of *Arabidopsis thaliana* [J]. J Exp Bot, 2006, 57(5): 1161–1170.
- [19] Garbarino J, Dupont F M. NaCl induces a Na<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> antiport in tonoplast vesicles from barley roots [J]. Plant Physiol, 1988, 86(1): 231–236.
- [20] Zhao K F, Li F Z. Halophytes in China [M]. Beijing: Science Press, 1999: 62–65.  
赵可夫, 李法曾. 中国盐生植物 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 62–65.
- [21] Yang X Y, Yang J S. Effects of salt stress on growth of ryegrass seedlings and its mitigative effects of P fertilizer [J]. Chin J Soil Sci, 2005, 36(6): 989–902.  
杨晓英, 杨劲松. 盐胁迫对黑麦草幼苗生长的影响及磷肥的缓解作用 [J]. 土壤通报, 2005, 36(6): 989–902.
- [22] Zhang M Y, Tao X J, Fan J M, et al. Effect of phosphorus stress and AMF on photosynthesis in strawberry under salt stress [J]. J Agri Univ Hebei, 2009, 32(4): 71–75.  
张美月, 陶秀娟, 樊建民, 等. 磷和丛枝菌根真菌对盐胁迫草莓光合作用的影响 [J]. 河北农业大学学报, 2009, 32(4): 71–75.
- [23] Ke S S, Jin Z X. Effect of drought stress and water recovering on physiological characteristics of *Sinocalycanthus chinensis* seedlings [J]. Plant Nutr Fert Sci, 2007, 13(6): 1166–1172.  
柯世省, 金则新. 干旱胁迫和复水对夏蜡梅幼苗光合生理特性的影响 [J]. 植物营养与肥料科学, 2007, 13(6): 1166–1172.
- [24] Ma H C, Wu Y X, McConchie J A. Photosynthetic characteristics of several exotic species in dry season in Yuanmou County [J]. J Zhejiang For Coll, 2001, 18(1): 46–49.  
马焕成, 吴延熊, McConchie J A. 元谋干热河谷几种外来树种在旱季的光合特点 [J]. 浙江林学院学报, 2001, 18(1): 46–49.