

## 干旱胁迫对金花茶幼苗光合生理特性的影响

柴胜丰, 唐健民, 王满莲, 陈宗游, 蒋运生, 韦 霄\*

(广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西桂林 541006)

**摘 要:**以金花茶一年生实生苗为材料, 采用盆栽控水试验, 研究不同水分处理(CK、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ , 土壤含水量分别为田间持水量的 85%~90%、65%~70%、50%~55%、35%~40%)对金花茶幼苗光合生理指标的影响。结果显示: (1)在重度干旱胁迫( $T_3$  处理)下, 金花茶植株都因干旱而死亡, 表明金花茶幼苗对于干旱胁迫的耐受极限为田间持水量的 50%~55%(土壤含水量为 15.04%~16.54%)。(2)随着干旱胁迫程度的加剧, 金花茶幼苗叶片净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔限制值( $L_s$ )和 PSⅡ 实际光化学量子效率( $\Phi_{PSⅡ}$ )均显著降低, 胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )和水分利用效率(WUE)无显著变化, 干旱胁迫下金花茶光合速率降低的主要原因是由非气孔因素所致。(3)与 CK 相比,  $T_1$  处理下叶片初始荧光( $F_0$ )、最大荧光( $F_m$ )、PSⅡ 最大光化学效率( $F_v/F_m$ )和丙二醛(MDA)含量均无显著变化, 而  $T_2$  处理下  $F_0$ 、MDA 含量显著升高,  $F_m$ 、 $F_v/F_m$  显著降低;  $T_1$  处理下金花茶的 PSⅡ 反应中心还未受到伤害, 而  $T_2$  处理下其光合机构发生了不可逆的破坏。(4)叶片叶绿素总量(Chl)、叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)、类胡萝卜素(Car)含量、Chl a/Chl b、Car/Chl、叶片相对含水量(RWC)均随干旱胁迫的增强而降低, 脯氨酸(Pro)含量随干旱胁迫的加剧呈现出先升高后降低的趋势。研究表明, 金花茶对于干旱胁迫极为敏感, 水分稍有亏缺, 便会明显抑制其光合作用; 金花茶不耐干旱的生理特性可能是限制其种群扩散的一个重要原因。

**关键词:**金花茶; 干旱胁迫; 气体交换; 叶绿素荧光; 生理特性

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

## Photosynthetic and Physiological Characteristics of *Camellia petelotii* Seedlings under Drought Stress

CHAI Shengfeng, TANG Jianmin, WANG Manlian, CHEN Zongyou,  
JIANG Yunsheng, WEI Xiao\*

(Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuangzu Autonomous Region and the Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi 541006, China)

**Abstract:** A pot experiment was conducted to study the effects of different water treatments [CK (with soil water content 85%~90% of field capacity),  $T_1$  (with soil water content 65%~70% of field capacity),  $T_2$  (with soil water content 50%~55% of field capacity),  $T_3$  (with soil water content 35%~40% of field capacity)] on the photosynthetic and physiological characteristics of *Camellia petelotii* seedlings. The results showed that: (1) All plants were dead in  $T_3$  treatment, indicating that soil water content 50%~55% of field capacity is the threshold to water stress. (2) When increasing drought stress, the net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomata conductance ( $G_s$ ), transpiration rate ( $T_r$ ), stomatal limitation values ( $L_s$ ) and actual photosynthetic efficiency of PSⅡ ( $\Phi_{PSⅡ}$ ) all significantly decreased, while the intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ )

收稿日期: 2014-08-19; 修改稿收到日期: 2014-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(31160137); 广西科技成果转化与推广计划(桂科转 14125003-2-18); 广西科学研究与技术开发计划(桂科重 1355001-5-4); 广西自然科学基金(2012GXNSFAA053067); 国际植物园保护联盟(BGCI)项目

作者简介: 柴胜丰(1980—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事植物保护生物学研究。E-mail: sfchai@163.com

\* 通信作者: 韦 霄, 博士, 研究员, 主要从事生物多样性保育研究。E-mail: weixiao@gxib.cn

and water use efficiency(WUE) kept invariable. The decrease of  $P_n$  in drought stress of *C. petelotii* was mainly caused by non-stomatal inhibition. (3) Compared with CK, the minimal fluorescence( $F_0$ ), maximal fluorescence( $F_m$ ), maximum quantum yield of PS II ( $F_v/F_m$ ) and malondialdehyde(MDA) content of leaves in  $T_1$  treatment did not change significantly, while in  $T_2$  treatment,  $F_m$  and  $F_v/F_m$  decreased significantly,  $F_0$  and MDA content enhanced significantly, which indicated that the reaction center of PS II of *C. petelotii* was not injured in  $T_1$  treatment, while the photosynthetic apparatus was destroyed irreversible in  $T_2$  treatment. (4) The contents of total chlorophyll(Chl), chlorophyll a(Chl a), chlorophyll b(Chl b), carotenoid(Car) in leaves, Chl a/Chl b, Car/Chl, relative leaf water content(RWC) all decreased with increasing drought stress, while the proline(Pro) content increased under  $T_1$  treatment and decreased under  $T_2$  treatment. The results proved that *C. petelotii* was extremely sensitive to drought stress, the water deficit would restrain its photosynthesis. Intolerance to drought for *C. petelotii* may be an important reason to limit the spread of its population.

**Key words:** *Camellia petelotii*; drought stress; photosynthetic gas exchange; chlorophyll fluorescence; physiological characteristics

水分是影响植物生长的重要环境因子之一,它对植物的生长、生存和发育非常重要<sup>[1]</sup>。植物对环境的适应取决于环境的水分供应状况,树木对水分条件的要求和适应是其水分关系上的重要特性。与非濒危植物相比,濒危植物在生理生态学方面存在生存力、适应力较差的共性<sup>[2]</sup>,多数濒危植物表现出不耐干旱的生理特性。经常性的干旱胁迫可能是华山新麦草濒危的原因之一<sup>[3]</sup>;重度水分胁迫是制约夏蜡梅生存的重要环境因子<sup>[4]</sup>;干旱是云南金钱槭分布的主要限制因素<sup>[5]</sup>;珙桐幼苗对土壤干旱胁迫极为敏感<sup>[6]</sup>;较高的土壤湿度有利于焕镛木的生长<sup>[7]</sup>。对濒危植物水分生理的研究不仅有利于揭示其濒危机制,而且可为其迁地保护和引种栽培提供理论依据。

金花茶(*Camellia petelotii*)为山茶科(Theaceae)山茶属(*Camellia*)金花茶组(Sect. *Chrysanth* Chang)常绿灌木或小乔木,是世界珍稀的观赏植物和种质资源,被誉为“茶族皇后”,亦是培育黄色系山茶新品种的珍贵材料,具有极高的观赏价值和科研价值<sup>[8]</sup>。该物种已列入国家一级保护植物和国际生物多样性公约附属 II 物种<sup>[9-10]</sup>。目前,关于金花茶的研究主要集中在居群生物学<sup>[11]</sup>、生殖生态学<sup>[12-13]</sup>、光合生理<sup>[14-15]</sup>、保护遗传学<sup>[16-17]</sup>、引种栽培及繁殖<sup>[18-19]</sup>等方面,而关于金花茶水分生理,仅见杨期和<sup>[20]</sup>对不同水势 Hoagland 营养液下生长的金花茶幼苗的净光合速率的报道,结果表明金花茶不耐干旱,即使轻度水分亏缺也会抑制其光合作用。然而,该试验未能分析金花茶在干旱胁迫下光合速率下降的原因,以及金花茶对于干旱胁迫的耐受极限。为此,本试验采用盆栽控水模拟不同程度的土壤水

分状况,研究干旱胁迫对金花茶幼苗气体交换参数、叶绿素荧光参数、叶片相对含水量以及光合色素、脯氨酸、丙二醛含量等光合生理指标的影响,探讨其光合作用对于干旱胁迫的响应规律,以确定影响其苗木生长的土壤含水量阈值,为金花茶的保护及开发利用提供科学依据,也为揭示其濒危机制奠定基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料处理

试验在广西植物研究所苗圃玻璃房内进行,棚内光照强度为自然光强的 20% 左右。6 月选取长势基本一致的一年生实生苗,移栽于内径 30 cm、深 25 cm 的塑料花盆中,每盆 1 株,栽培基质为表层田园土,每盆土重约 5 kg,土壤田间持水量为 30.08%。从栽种之日起至开始试验这段时间,保证土壤水分充足,确保苗木成活和试验处理的一致性。试验共设置 4 种土壤水分处理,它们的土壤含水量分别为田间持水量的 85%~90%(25.50%~27.10%)、65%~70%(19.55%~21.06%)、50%~55%(15.04%~16.54%)、35%~40%(10.53%~12.03%),依次用 CK、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  表示。每处理 10 盆,共 40 株。9 月初所有试验盆土都达到预定含水量后即开始控水,每天 18:00 称取盆重,补充当天失去的水分,使各处理土壤含水量保持在设定的水平,干旱胁迫 15 d 后测定各处理植株的光合生理指标。

### 1.2 测定项目与方法

干旱胁迫结束后,选择植株顶端向下第 3~5 片成熟功能叶,进行气体交换参数、叶绿素荧光参数、叶片相对含水量、光合色素、丙二醛和脯氨酸含量等各项指标的测定。本试验中金花茶幼苗在  $T_3$  处理

下因干旱全部死亡,所以仅对其余 3 个处理进行了光合生理指标的测定。

**1.2.1 气体交换参数** 采用 Li-6400 便携式光合测定系统分析仪(USA, LI-COR)测定苗木在不同干旱胁迫条件下的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )等光合特性指标,并计算水分利用效率( $WUE = P_n/T_r$ )和气孔限制值( $L_s = 1 - C_i/C_a$ , 其中  $C_a$  为空气  $CO_2$  浓度)。测定时间为 9:00~11:00,测定时光合有效辐射设置为  $200 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ,控制叶室温度为  $28^\circ C$ ,样本室  $CO_2$  浓度为  $370 \mu mol \cdot mol^{-1}$ 。每处理测定 5 株,每株测定 3 片叶,取其平均值。

**1.2.2 叶绿素荧光参数** 采用 Li-6400 的荧光叶室测定叶片叶绿素荧光参数。叶片暗适应 20 min 后,测定初始荧光( $F_0$ )、最大荧光( $F_m$ )和 PSII 最大光化学效率( $F_v/F_m$ );并测定光适应下(最少 20 min)的 PSII 实际光化学量子效率( $\Phi_{PSII}$ )。每处理测定 5 株,每株测定 3 片叶,取其平均值。

**1.2.3 光合色素含量** 用 95%乙醇提取叶片光合色素,测定提取液在波长 665、649 和 470 nm 下吸光值,按公式<sup>[21]</sup>计算出叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl

b)和类胡萝卜素(Car)的含量及叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值(Chl a/Chl b)、类胡萝卜素与叶绿素的比值(Car/Chl)。

**1.2.4 叶片相对含水量、丙二醛和脯氨酸含量** 叶片相对含水量(RWC)按邹琦<sup>[22]</sup>方法测定。取鲜叶称其鲜质量,然后在蒸馏水中浸泡 24 h 后称饱和鲜质量,最后在  $105^\circ C$  下烘干称其干质量。计算公式为:相对含水量(RWC,%)=[(鲜质量-干质量)/(饱和鲜质量-干质量)] $\times 100\%$ 。丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸比色法测定,脯氨酸(Pro)含量采用磺基水杨酸法测定<sup>[21]</sup>。

### 1.3 数据处理

数据利用 SPSS13.0 软件进行方差分析及显著性检验(Duncan 法),用 Sigma Plot 9.0 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫对金花茶幼苗气体交换参数的影响

实验过程中,在重度干旱胁迫( $T_3$  处理)下,金花茶植株都因干旱而死亡。表明金花茶幼苗对于干旱胁迫的耐受极限为田间持水量的 50%~55%(土壤含水量为 15.04%~16.54%)。

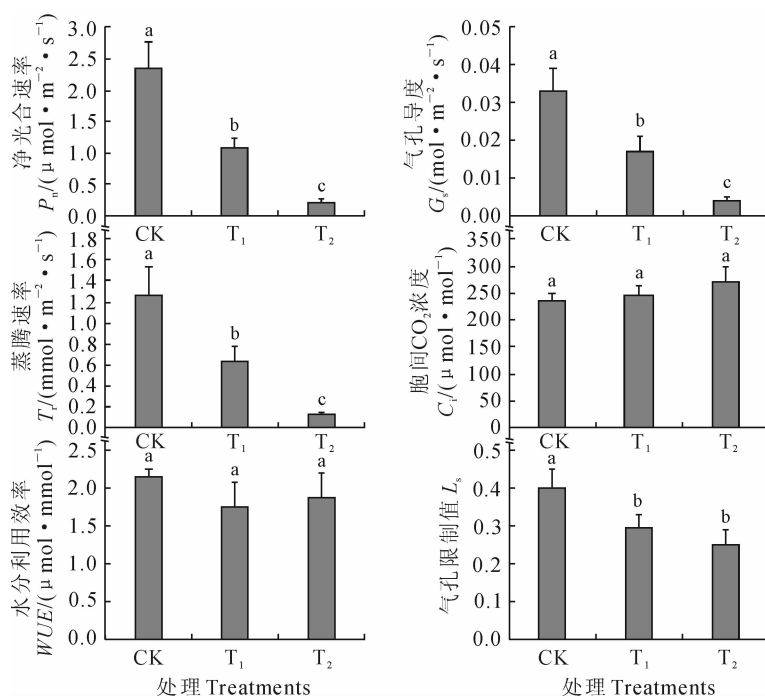


图 1 干旱胁迫下金花茶幼苗气体交换参数的变化

CK、 $T_1$ 、 $T_2$  处理的土壤含水量分别为田间持水量的 85%~90%、65%~70%、50%~55%;

不同小写字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异;下同

Fig. 1 The gas-exchange parameters in *C. petilotii* seedlings under drought stress

The soil water content of treatment CK,  $T_1$ ,  $T_2$  are 85%~90%, 65%~70%, 50%~55% of field capacity, respectively;

Different letters in the same picture meant significant difference at 0.05 level. The same as below

干旱胁迫对金花茶幼苗的气体交换参数有重要影响(图 1)。其中,金花茶幼苗  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  和  $L_s$  均随干旱胁迫程度的升高而显著( $P<0.05$ )降低。与 CK 相比,  $T_1$  处理的  $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$  分别显著下降 54.5%、48.5%和 50.0%,  $T_2$  处理下则分别显著下降 90.6%、87.9%和 90.5%。在干旱胁迫条件下,金花茶幼苗  $C_i$  略有升高,  $WUE$  呈降低趋势,但变化均不显著( $P<0.05$ )。这表明金花茶对于干旱胁迫十分敏感,轻度水分亏缺即可引起光合速率的迅速大幅下降。

2.2 干旱胁迫对金花茶幼苗叶绿素荧光参数的影响

初始荧光( $F_0$ )是 PS II 反应中心处于完全开放时的荧光产量,其减少表明天线色素的热耗散增加,其增加则表明 PS II 反应中心遭受可逆失活或破坏<sup>[23]</sup>;最大荧光( $F_m$ )是 PS II 反应中心处于完全关闭时的荧光产量,可反映通过 PS II 的电子传递情况<sup>[24]</sup>;PS II 最大光化学效率( $F_v/F_m$ )反映 PS II 反应中心原初光能转化效率,该值降低表明植物在胁迫下 PS II 受到伤害,是反映光抑制程度的良好指标<sup>[25]</sup>。表 1 显示,随着干旱胁迫程度的加剧,金花茶幼苗  $F_0$  升高,而  $F_m$  和  $F_v/F_m$  则呈下降趋势,且它们在  $T_2$  处理下与 CK 相比均差异显著( $P<0.05$ )。这表明干旱胁迫条件下,尤其是在  $T_2$  处理下,金花茶 PS II 的结构与功能受到了一定程度的损伤与破坏。

PS II 实际光化学量子效率( $\Phi_{PSII}$ )反映 PS II 反应中心部分关闭情况下的实际光能捕获效率<sup>[26]</sup>。随着干旱胁迫程度的加剧,金花茶幼苗  $\Phi_{PSII}$  均比 CK 显著降低( $P<0.05$ ),  $T_1$  和  $T_2$  处理的降幅分别

为 29.2%和 56.9%(表 1)。可见,干旱胁迫使得金花茶 PS II 反应中心的开放比例下降,叶绿体吸收的光能用于光化学转换的比例减少,光合电子传递能力降低,光合速率降低。

2.3 干旱胁迫对金花茶幼苗叶片光合色素含量的影响

叶片中的光合色素参与光合作用过程中光能的吸收、传递和转化,光合色素含量直接影响植物的光合能力。随着干旱胁迫程度的加剧,金花茶幼苗叶片 Chl a 含量、Chl b 含量、Chl 总量和 Car 含量均显著降低( $P<0.05$ ), Chl a/Chl b 和 Car/Chl 亦呈下降趋势,且大多与对照差异达到显著水平(表 2)。即不同程度的干旱胁迫都显著影响着金花茶的光合色素含量及其比例,从而制约了其光合能力。

2.4 干旱胁迫对金花茶幼苗叶片 RWC、MDA 和 Pro 含量的影响

叶片相对含水量(RWC)能真实反映土壤缺水时植物体内水分的亏缺程度。随着干旱胁迫程度的加剧,金花茶幼苗叶片 RWC 显著降低(图 2),其在  $T_1$  和  $T_2$  处理下分别比 CK 下降了 11.84%和 30.59%,表明在干旱胁迫条件下金花茶叶片的保水能力较差。同时,丙二醛(MDA)是脂质过氧化作用的主要产物之一,其含量的高低在一定程度上反映脂膜过氧化作用水平和膜结构的受害程度。图 2 显示,与 CK 相比,  $T_2$  处理下金花茶幼苗叶片 MDA 含量显著升高 11.79%( $P<0.05$ ),即  $T_2$  处理下金花茶光合机构膜系统受到明显破坏。另外,脯氨酸(Pro)具有较强的水合力,它的积累可增加植物的抗旱或抗渗透胁迫能力。与 CK 相比,  $T_1$  处理下金花茶幼苗叶片 Pro 含量显著(图 2)升高,这是金花茶对轻度干旱胁迫

表 1 干旱胁迫下金花茶幼苗叶绿素荧光参数的变化

Table 1 The chlorophyll fluorescence parameters in *C. petelotii* seedlings under drought stress

| 处理 Treatment | $F_0$       | $F_m$       | $F_v/F_m$    | $\Phi_{PSII}$ |
|--------------|-------------|-------------|--------------|---------------|
| CK           | 182.2±9.4b  | 941.3±35.3a | 0.808±0.004a | 0.202±0.039a  |
| $T_1$        | 187.4±16.2b | 923.3±41.2a | 0.798±0.010a | 0.143±0.016b  |
| $T_2$        | 213.3±29.7a | 862.5±47.8b | 0.742±0.037b | 0.087±0.015c  |

表 2 干旱胁迫下金花茶幼苗叶片光合色素含量及比例的变化

Table 2 The concentration and ratio of photosynthetic pigments in leaves of *C. petelotii* seedlings under drought stress

| 处理 Treatment | 叶绿素 a<br>Chl a<br>/(mg·g <sup>-1</sup> ) | 叶绿素 b<br>Chl b<br>/(mg·g <sup>-1</sup> ) | 叶绿素总量<br>Chl(a+b)<br>/(mg·g <sup>-1</sup> ) | 类胡萝卜素<br>Car<br>/(mg·g <sup>-1</sup> ) | 叶绿素 a/b<br>Chl a/Chl b | 类胡萝卜素/叶绿素<br>Car/Chl |
|--------------|------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------|----------------------|
| CK           | 1.52±0.17a                               | 0.64±0.06a                               | 2.16±0.22a                                  | 0.30±0.04a                             | 2.38±0.05a             | 0.12±0.01a           |
| $T_1$        | 1.10±0.12b                               | 0.59±0.03a                               | 1.63±0.20b                                  | 0.20±0.02b                             | 2.10±0.09b             | 0.10±0.01b           |
| $T_2$        | 0.82±0.16c                               | 0.42±0.08b                               | 1.24±0.24b                                  | 0.18±0.03b                             | 1.93±0.05c             | 0.09±0.01b           |

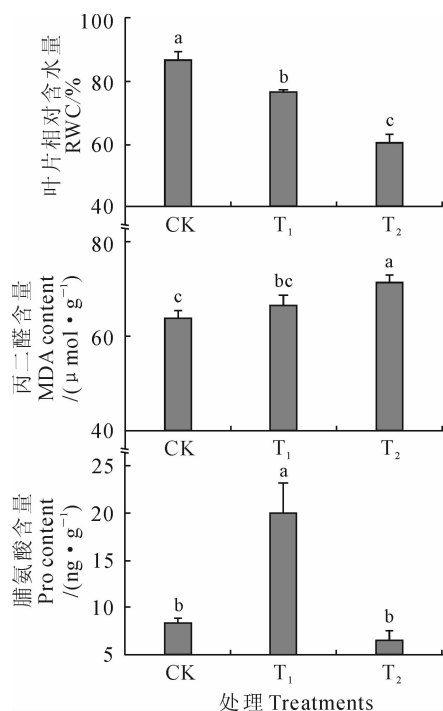


图2 干旱胁迫下金花茶幼苗叶片相对含水量、丙二醛和脯氨酸含量变化

Fig. 2 The RWC, MDA and Pro contents in leaves of *C. petelotii* seedlings under drought stress

胁迫的生理适应机制;而  $T_2$  处理下 Pro 含量又稍低于 CK,表明此时干旱胁迫的程度已超出金花茶的耐受限度,金花茶抵抗干旱胁迫的能力较弱。

### 3 结论与讨论

干旱胁迫抑制植物的光合作用,使光合速率下降。这种影响分为气孔因素和非气孔因素,前者指由于干旱胁迫引起植物叶片气孔导度下降,使  $\text{CO}_2$  从大气向叶片扩散减少进而对植物光合作用的影响;后者指叶肉细胞的光合能力直接受到的影响<sup>[27]</sup>。Farquhar 等<sup>[28]</sup>认为,引起光合速率降低的气孔和非气孔限制因素可以根据  $C_i$  和  $L_s$  的变化来判断,其中  $C_i$  是关键因子。只有  $P_n$  下降伴随着  $C_i$  降低和  $L_s$  升高时,才可以认为  $P_n$  的下降主要是受气孔限制所致;反之,如果  $P_n$  下降的同时,  $C_i$  升高或者不变,同时  $L_s$  降低,则光合作用的主要限制因素是非气孔因素,即叶肉细胞光合能力的下降。本研究结果显示,随着干旱胁迫程度的加剧,金花茶幼苗叶片  $P_n$  快速降低,而  $C_i$  略有升高,且  $L_s$  下降,表明金花茶幼苗  $P_n$  的降低主要为非气孔限制因素所致。一般认为,在轻度干旱胁迫下  $P_n$  的下降主要是气孔限制,中度到严重干旱胁迫时,主要限制转化

为非气孔因素。本试验中,金花茶在轻度干旱胁迫 ( $T_1$  处理)下即表现为非气孔限制,这与其它大多数植物的相关研究结果并不一致<sup>[29-31]</sup>,表明金花茶对于干旱胁迫十分敏感,轻度水分亏缺即可引起叶肉细胞光合能力的迅速下降,干旱胁迫导致了核酮糖 1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶 (Rubisco) 活性降低,  $\text{CO}_2$  与核酮糖-1,5-二磷酸 (RuBP) 的羧化反应速率降低<sup>[32]</sup>。在中度干旱胁迫 ( $T_2$  处理)下,  $P_n$  的下降达到 90% 以上,部分植株的  $P_n$  甚至出现负值,此时金花茶幼苗已达到其干旱耐受极限。在重度干旱胁迫 ( $T_3$  处理)下,金花茶植株都因干旱而死亡。表明金花茶幼苗对于干旱胁迫的耐受极限为田间持水量的 50%~55% (土壤含水量为 15.04%~16.54%),低于此含水量后将不能生存。这与金花茶在野外的分布范围相一致,金花茶多见于较荫蔽的沟谷两旁和林下溪边,对水湿条件的要求较高,其不耐干旱的生理特性可能是限制其种群扩散的一个重要原因。

干旱胁迫对植物光合作用的影响是多方面的,不仅直接引发光合机构的损伤,同时也影响光合电子传递和光合磷酸化以及暗反应的有关酶系<sup>[33]</sup>。利用叶绿素荧光动力学方法可快速、灵敏、无损伤探测干旱胁迫对植物光合作用的影响<sup>[34]</sup>。本研究结果显示,金花茶幼苗叶片  $F_0$ 、 $F_m$ 、 $F_v/F_m$  在  $T_1$  处理下与 CK 无显著差异,而在  $T_2$  处理下,  $F_0$  显著高于 CK,  $F_m$  和  $F_v/F_m$  则显著低于 CK。结合叶片 MDA 含量在  $T_2$  处理下显著高于 CK 的表现,可以推测金花茶幼苗的 PSII 反应中心在  $T_1$  处理下并未遭到破坏,其光合速率的下降可能与叶绿体和光合酶活性降低、光合磷酸化受到影响有关;而在  $T_2$  处理下,金花茶幼苗叶肉细胞受到损伤,PSII 反应中心受到不可逆破坏,光合酶的活性降低,光合作用光反应中光能转换、电子传递、光合磷酸化和光合作用暗反应等一系列过程受到抑制,导致植株光合速率降低。另外,本实验中干旱胁迫下叶片  $\Phi_{PSII}$  显著低于 CK,表明干旱胁迫致使金花茶 PSII 光化学量子产量下降,用于光化学反应的比例减少,PSII 原初受体  $Q_A$  的氧化态数量降低,从而降低了  $Q_A$  与  $Q_B$  间的电子传递速率,使整个电子传递链的电子传递速率下降,叶片吸收的光能中有较大比例通过非光化过程而散失。这是金花茶在干旱胁迫下光合速率降低的重要原因,亦是其保护光合机构的方式之一。

叶绿素含量的高低在一定程度上能反映叶片的光合能力,如能在适度干旱下保持叶绿素含量的稳定或有所提高,将有助于植物在逆境中生存生

长<sup>[35]</sup>。而在本试验中,  $T_1$  处理下金花茶幼苗叶片 Chl a、Chl b、Chl 总量和 Car 含量均显著低于 CK, 表明金花茶叶片光合色素含量对干旱胁迫十分敏感, 进一步说明金花茶不耐干旱。同时, Chl a/Chl b 值反映了植物对干旱胁迫的敏感性及抗旱性<sup>[36]</sup>, 在本实验中, 干旱胁迫下金花茶幼苗叶片 Chl a/Chl b 值显著降低, 这与其不耐干旱的特性相吻合。

叶片相对含水量是衡量植物耐旱性的一个重要指标, 且其值越大, 干旱胁迫条件下其下降速率越小, 则植物抗旱性越强<sup>[29]</sup>。而 Pro 是植物体内的重要渗透调节物质之一, 干旱胁迫下它在植物体内累积量可增加到原始含量的几十倍到几百倍, 从而保护植物免受脱水伤害<sup>[37]</sup>。本试验中, 金花茶幼苗叶

片相对含水量在  $T_1$  处理下就显著低于 CK, 在  $T_2$  处理下, 叶片下垂严重, 部分叶片枯萎脱落; 而  $T_1$  处理下金花茶幼苗叶片的 Pro 含量仅为 CK 的 2.39 倍,  $T_2$  处理下甚至还低于 CK。这表明金花茶并没有较好地适应干旱的生理机制, 充分证明了金花茶不耐干旱。

综上所述, 金花茶幼苗对干旱胁迫极为敏感, 水分稍有亏缺, 便会明显抑制其光合作用。干旱胁迫下金花茶幼苗光合速率降低的主要原因是由非气孔因素所致。金花茶幼苗对干旱胁迫的耐受极限为田间持水量的 50%~55% (土壤含水量为 15.04%~16.54%), 其不耐干旱的生理特性可能是限制其种群扩散的一个重要原因。

## 参考文献:

- [1] LI X (李霞), YAN X F (阎秀峰), YU T (于涛). Effects of water stress on protective enzyme activities and lipid peroxidation in *Phellodendron amurense* seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(12): 2353—2356 (in Chinese).
- [2] ZHANG W H (张文辉), ZU Y G (祖元刚), LIU G B (刘国彬). Population ecological characteristics and analysis on endangered cause of ten endangered plant species[J]. *Acta Ecology Sinica* (生态学报), 2002, **22**(9): 1512—1520 (in Chinese).
- [3] LI Q (李倩), WANG M (王明), WANG W W (王雯雯), et al. Response of photosynthetic characteristics of *Psathyrostachys huashanica* Keng to drought stress[J]. *Acta Ecology Sinica* (生态学报), 2012, **32**(12): 4278—4284 (in Chinese).
- [4] KE SH SH (柯世省), JIN Z X (金则新). Effects of water stress and temperature on gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Sinocalycanthus chinensis* leaves[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(1): 43—49 (in Chinese).
- [5] DENG Y (邓云), WANG B (王冰), SU W H (苏文华), et al. Adaptability of endangered plant *Dipteronia dyerana* under irradiance and water stress[J]. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2008, **27**(6): 888—893 (in Chinese).
- [6] WANG N N (王宁宁), HU Z H (胡增辉), SHEN Y B (沈应柏). Photosynthetic characteristics of *Davidia involucrata* Baill. seedlings under soil drought stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2011, **31**(1): 101—108 (in Chinese).
- [7] ZENG X P (曾小平), ZHAO P (赵平), CAI X A (蔡锡安), et al. Physioecological characteristics of *Woonyoungia septentrionalis* seedlings under various soil water conditions[J]. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2004, **23**(2): 26—31 (in Chinese).
- [8] 梁盛业. 金花茶[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [9] 傅立国. 中国植物红皮书[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [10] HUANG F P (黄付平). Study on community types of *Camellia nitidissima* [J]. *Guangxi Forestry Science* (广西林业科学), 2001, **30**(1): 35—38 (in Chinese).
- [11] HUANG M CH (黄明钊), SHI Y C (史艳财), WEI X (韦霄), et al. Point pattern analysis of rare and endangered plant *Camellia nitidissima* Chi. [J]. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2013, **32**(5): 1127—1134 (in Chinese).
- [12] CHAI SH F (柴胜丰), WEI X (韦霄), JIANG Y SH (蒋运生), et al. The flowing phenology and characteristics of reproductive modules of endangered plant *Camellia nitidissima* [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 2009, **17**(1): 5—11 (in Chinese).
- [13] YANG Q H, WEI X, ZENG X L, et al. Seed biology and germination ecophysiology of *Camellia nitidissima* [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255: 113—118.
- [14] CHAI SH F (柴胜丰), WEI X (韦霄), SHI Y C (史艳财), et al. Effect of strong light stress on the growth, biomass and chlorophyll fluorescence parameters in seedlings of endangered plant *Camellia nitidissima* [J]. *Bulletin of Botanical Research* (植物研究), 2012, **32**(2): 159—164 (in Chinese).
- [15] WEI X, JIANG Y S, JIANG S Y, et al. Photosynthetic characteristics of an endangered species *Camellia nitidissima* and its widespread congener *Camellia sinensis* [J]. *Photosynthetica*, 2008, **46**(2): 312—314.
- [16] TANG S Q, BIN X Y, WANG L, et al. Genetic diversity and population structure of Yellow Camellia (*Camellia nitidissima*) in China as revealed by RAPD and AFLP markers [J]. *Biochemical Genetics*, 2006, 44: 449—461.

- [17] WEI X, CAO H L, JIANG Y S, *et al.* Population genetic structure of *Camellia nitidissima* (Theaceae) and conservation implications[J]. *Botanical Studies*, 2008, 49: 147—153.
- [18] ZHANG Z X(张宗享), HUANG Q B(黄启斌). Propagation of *Camellia nitidissima*[J]. *Guihaia*(广西植物), 1981, 1(2): 34—39(in Chinese).
- [19] WEI J Q(韦记青), JIANG Y SH(蒋运生), TANG H(唐 辉), *et al.* Cutting techniques of *Camellia nitidissima*[J]. *Journal of Guangxi Normal University*(Nat. Sci. Ed.) (广西师范大学学报·自然科学版), 2010, 28(3): 70—74(in Chinese).
- [20] YANG Q H(杨期和), LI X Q(李旭群), YANG H SH(杨和生), *et al.* Photosynthetic ecophysiological characteristics of *Camellia nitidissima* seedlings[J]. *Journal of Beijing Forestry University*(北京林业大学学报), 2010, 32(2): 57—63(in Chinese).
- [21] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [22] 邹 琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] KRAUSE G H. Photoinhibition of photosynthesis: an evaluation of damaging and protective mechanisms[J]. *Physiologia Plantarum*, 1988, 74: 566—574.
- [24] WU G L(吴甘霖), DUAN R Y(段仁燕), WANG ZH G(王志高), *et al.* Effects of drought stress and rehydration on chlorophyll fluorescence characteristics in *Fragaria* × *ananas* Duch[J]. *Acta Ecology Sinica*(生态学报), 2010, 30(14): 3 941—3 946(in Chinese).
- [25] ZHANG SH R(张守仁). A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance[J]. *Chinese Bulletin of Botany*(植物学通报), 1999, 16(4): 444—448(in Chinese).
- [26] WANG Y(王 琰), CHEN J W(陈建文), DI X Y(狄晓艳). Characterization of the responses of photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters to water stress in seedlings of six provenances of Chinese Pine(*Pinus tabulaeformis* Carr.)[J]. *Acta Ecology Sinica*(生态学报), 2011, 31(23): 7 031—7 038(in Chinese).
- [27] ZHAN Y N(詹妍妮), YU S L(郁松林), CHEN P Q(陈培琴). Review of progress in response to fruit tress under water stress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*(中国农学通报), 2006, 22(4): 239—243(in Chinese).
- [28] FARQUARH G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis Ann Rev[J]. *Plant Physiology*, 1982, 33: 317—345.
- [29] YAO SH F(姚史飞), YIN L(尹 丽), HU T X(胡庭兴), *et al.* Effect s of drought stress on photosynthetic characteristic and growth of *Jatropha curcas* L. seedlings[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*(四川农业大学学报), 2009, 27(4): 444—449(in Chinese).
- [30] LI J(李 娟), PENG ZH H(彭镇华), GAO J(高 健), *et al.* Photosynthetic parameters and chlorophyll fluorescence characteristics of *Pleioblastus kongosanensis* f. *aurestriaus* under drought stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2011, 22(6): 1 395—1 402(in Chinese).
- [31] PEI B(裴 斌), ZHANG G C(张光灿), ZHANG SH Y(张淑勇), *et al.* Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings[J]. *Acta Ecology Sinica*(生态学报), 2013, 33(5): 1 386—1 396(in Chinese).
- [32] LAL A, KU M S B, EDWARDS G E. Analysis of inhibition of photosynthesis due to water stress in the C<sub>3</sub> species *Hordeum vulgare* and *Vicia faba*: electron transport, CO<sub>2</sub> fixation and carboxylation capacity[J]. *Photosynthetic Research*, 1996, 49: 57—69.
- [33] GUO CH F(郭春芳), SUN Y(孙 云), TANG Y H(唐玉海), *et al.* Effect of water stress on chlorophyll fluorescence in leaves of tea plant(*Camellia sinensis*) [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*(中国生态农业学报), 2009, 17(3): 560—564(in Chinese).
- [34] LI X(李 晓), FENG W(冯 伟), ZENG X CH(曾晓春). Advances in chlorophyll fluorescence analysis and its uses[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*(西北植物学报), 2006, 26(10): 2 186—2 196(in Chinese).
- [35] AN Y Y(安玉艳), LIANG Z S(梁宗锁), HAN R L(韩蕊莲), *et al.* Effect of soil drought on seedling growth and water metabolism of three tree species in Loess Plateau[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*(西北植物学报), 2007, 27(1): 91—97(in Chinese).
- [36] ZHANG M SH(张明生), TAN F(谈 锋). Relationship between ratio of chlorophyll a and b under water stress and drought resistance of different sweet potato varieties[J]. *Seed*(种子), 2001, 116: 23—25(in Chinese).
- [37] LI Z J(李在军), LENG P SH(冷平生), CONG ZH F(丛者福). The physiological response of *Pistacia chinensis* Bunge to drought stress [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*(植物资源与环境学报), 2006, 15(3): 47—50(in Chinese).

(编辑: 裴阿卫)