

# 喀斯特地区古茶树幼苗对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性综合评价

牛素贞<sup>1,2</sup>, 樊卫国<sup>3,\*</sup>

(<sup>1</sup>贵州大学林学院, 贵阳 550025; <sup>2</sup>贵州大学茶叶工程技术研究中心, 贵阳 550025; <sup>3</sup>贵州省果树工程技术研究中心, 贵阳 550025)

**摘要:** 以贵州喀斯特地区 10 个古茶树扦插苗为材料, 采用盆栽控水法研究其对干旱胁迫的生理响应, 并筛选出抗旱的种质资源。试验结果表明, 随着干旱胁迫程度的加重, 10 个古茶树扦插苗的相对含水量、 $F_v/F_m$ 、气孔开放率和气孔大小均呈下降趋势, 而相对电导率、丙二醛含量、 $H_2O_2$  含量与  $O_2^-$  产生速率以及气孔密度呈上升趋势; 从 10 个古茶树扦插苗中选出 1 个强抗旱材料, 5 个较强抗旱材料。田间持续干旱试验验证了基于生理指标的隶属函数分析对于古茶树扦插苗筛选的准确性及可靠性。

**关键词:** 茶树; 干旱胁迫; 生理响应; 抗旱性; 评价

**中图分类号:** S 571.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2013) 08-1541-12

## The Physiological Responds of Cutting Seedlings of Ancient Tea Plant to Drought Stress and the Comprehensive Evaluation on Their Drought Resistance Capacity in Karst Region

NIU Su-zhen<sup>1,2</sup> and FAN Wei-guo<sup>3,\*</sup>

(<sup>1</sup>College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; <sup>2</sup>Tea Engineering and Technology Research Center of Guizhou, Guiyang 550025, China; <sup>3</sup>Fruits Engineering and Technology Research Center of Guizhou, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** Physiological characteristics of cutting seedlings of ten ancient tea plants from Karst region were investigated under water controlled conditions to unveil the possible mechanisms of cutting seedlings of ancient tea plants in response to drought stress and to screen out the drought resistant germplasms. The results showed that the relative water content, PS II ( $F_v/F_m$ ), stomatal opening rate, stomatal length and stomatal width were decreased. Meanwhile, the relative conductivity, content of the lipid peroxidation product (Malondialdehyde, MDA), contents of hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ), superoxide radical ( $O_2^-$ ) producing rate and stomatal density were increased with the treatment intensity. One strong drought resistance material and five better drought resistance materials were selected from the ten ancient tea cuttings. The one-year field trial proved the subordinate function method based on physiological parameters could be used as a reliable method to screen out the drought-tolerant ancient tea germplasms.

**Key words:** tea plant; drought stress; physiological responds; drought resistance; evaluation

收稿日期: 2013-05-05; 修回日期: 2013-06-17

基金项目: 贵州省科技厅农业攻关计划项目 ([2010]3018); 贵州省特色农业产业人才基地资助计划 (黔人领发 2008-3)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: wgfan@gzu.edu.cn)

中国西南贵州喀斯特山区分布着大量古茶树(庄晚芳, 1981), 其中一些种质资源具有重要的学术研究价值和利用潜力, 长期以来这些种质资源被当地人们作为饮料利用。近年来, 随着人们对茶叶的消费由追求数量向追求质量转变, 古茶树在贵州等西南部地区逐渐受到重视, 政府及茶农开始对优质的古茶树种质资源进行大量种植和推广, 然而, 喀斯特山区土壤浅薄, 保水能力弱, 局部和暂时性干旱频繁等特点(魏媛和喻理飞, 2010), 是优质古茶树种质资源大量种植推广的重要限制因子。因此研究这些优质古茶树种质资源, 挖掘出抗旱株系是合理开发和利用古茶种质资源的关键。

干旱胁迫条件下, 木本植物的生理反应主要表现在叶片含水量的下降及荧光参数的改变、活性氧自由基的积聚以及叶片解剖结构的变化(Perez-Martin et al., 2009; Habermann et al., 2011; Liu et al., 2011; 陈文荣等, 2012)等方面。Upadhyaya 和 Panda (2004)、Netto 等(2010)也对茶树做了相关的研究, 结果显示, 茶树对干旱胁迫反应敏感, 干旱条件下, 植株光合作用、气孔特性及叶片抗氧化系统物质均受到不同程度影响, 使茶树受到伤害。这与生理指标与水分处理之间有很强的相关性的观点(郭春芳等, 2008; 龙维等, 2010)一致。

本试验中选取贵州喀斯特地区目前大量种植的 10 个优质古茶树扦插苗为材料, 通过盆栽控水法设置不同程度干旱处理, 比较其生理生化特性及气孔特征, 用隶属函数加权平均值综合评价抗旱性, 同时, 应用田间持续干旱试验对其加以验证, 旨在为抗旱古茶树种质资源的筛选和高效利用, 以及在土壤保水性能较差的喀斯特地区茶树的抗旱育种提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

选用的材料为贵州喀斯特地区 10 个优质古茶树[Sect. *Thea* (L.) Dyer]扦插苗, 其立地环境和生长特征见表 1。古茶树的年龄根据植物志以及民间调查, 并参考其胸径/地径、树高、冠幅得出。

表 1 古茶树单株生长特征及其立地环境  
Table 1 Growth characteristics and surrounding conditions of ancient tea plants

编号 No.	树龄/ Year Age	冠幅/ (m × m) Crown diameter	胸径/ cm DBH	树高/m Plant height	树型 Plant type	生长地年降雨 量/mm Average annual precipitation	立地土壤类型 Type of the surrounding soil	来源 Origin
GN01	> 400 年	6.0 × 5.5	68.0	9.0	灌木 Shrub	1 079.3	黄色砂泥土 Yellow little sand soil	正安 Zeng'an
GN02	> 500 年	8.0 × 8.5	62.0	8.0	乔木 Tree	1 398.7	黄色砂泥土 Yellow little sand soil	普安 Pu'an
GN03	> 300 年	6.2 × 5.0	45.0	15.0	乔木 Tree	1 148.6	黄色砂土 Yellow sand soil	贵定 Guiding
GN04	≈1000 年	12.0 × 13.0	120.0	13.0	乔木 Tree	1 508.4	黄色砂泥土 Yellow little sand soil	兴义 Xingyi
GN05	> 600 年	10.5 × 11.0	92.0	8.0	灌木 Shrub	1 154.3	黄色泥土 Yellow soil	贵阳 Guiyang
GN06	> 300 年	7.0 × 5.5	40.0	5.0	灌木 Shrub	1 398.7	黄色砂土 Yellow sand soil	印江 Yinjiang
GN07	> 500 年	8.0 × 8.5	45.0	11.5	乔木 Tree	1 079.4	黄色砂泥土 Yellow little sand soil	道真 Daozhen
GN08	≈1000 年	10.5 × 10.0	90.0	5.0	灌木 Shrub	1 374.4	黄色泥土 Yellow soil	普定 Puding
GN09	> 500 年	8.0 × 8.5	45.0	7.0	乔木 Tree	1 038.4	紫色砂土 Purple sand soil	金沙 Jinsha
GN10	> 300 年	7.0 × 5.5	40.0	15.0	乔木 Tree	1 229.2	黄色泥土 Yellow soil	安龙 Anlong

### 1.2 盆栽控水试验

#### 1.2.1 材料处理

2011 年 11 月, 选取在贵州大学茶学试验基地长势一致的 1 年生古茶树扦插苗, 移栽至黑色塑料桶中, 每桶 5 株。于露天环境中常规管理, 2012 年 8 月 1 日开始水分胁迫处理。设 4 处理: 对照, 相对含水量为  $75\% \pm 2.5\%$ ; 轻度胁迫, 相对含水量为  $55\% \pm 2.5\%$ ; 中度胁迫, 相对含水量为

40% ± 2.5%; 重度胁迫, 相对含水量为 25% ± 2.5%。每个处理 5 桶。将材料置于遮雨棚中, 对各桶进行充分灌水使桶内土壤含水量基本达到饱和, 之后不浇水, 让桶内水分自然消耗至所设定的水分含量, 以后每天采用称重补水法补充所失去的水分, 使土壤含水量控制在设定的范围内。其他管理按常规进行。2012 年 9 月 15 日取样进行生理指标测定, 2012 年 10 月 1 日取样进行气孔指标的测定。

试验土壤取自贵州大学茶学试验茶园, 土壤的理化指标分别是: pH 4.53、有效磷 6.6 mg · kg<sup>-1</sup>、有机质 10.68 g · kg<sup>-1</sup>、碱解氮 22.63 mg · kg<sup>-1</sup>、速效钾 140 mg · kg<sup>-1</sup>、有效铁 1.99 mg · kg<sup>-1</sup>、交换钙 40.51 mg · kg<sup>-1</sup>、交换镁 21.8 mg · kg<sup>-1</sup>、有效锰 12.73 mg · kg<sup>-1</sup>、有效铜 0.19 mg · kg<sup>-1</sup>、有效锌 0.54 mg · kg<sup>-1</sup>、有效硫 30 mg · kg<sup>-1</sup>。

### 1.2.2 测试方法

叶片相对含水量的测定采用称重法(陈文荣等, 2012); 丙二醛(MDA)含量测定采用巴比妥酸法(郭春芳, 2008); 电导率测定采用陈文荣等(2012)的方法; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量的测定参照Jin等(2008)的分光光度计比色法; O<sub>2</sub><sup>-</sup>含量测定参照Huang等(2008)的方法; 叶片气孔特征观察采用扫描电镜法(陈文荣等, 2012); PS II最大光化学量子产量(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>)利用Li-6400便携式光合仪, 选择长势一致的枝条自顶部向下的第3~5片功能叶进行3次重复测定(陈文荣等, 2012); 茶多酚含量测定采用酒石酸亚铁比色法(GB/T 8313-2002), 游离氨基酸含量的测定采用茚三酮比色法(GB/T 8314-2002), 咖啡碱含量的测定采用紫外分光光度法(GB/T 8312-2002); 测定原料为春季一芽二叶。

古茶树单株叶片解剖结构观察参考王庆森等(2009)的方法: 在2013年3月16—26日期间, 分别取古茶树一年生定型叶, 经FAA固定液固定后, 采用常规石蜡切片法制片, 用MoticBA400型显微镜观察记录, 每一样片观察10个视野, 并计算栅海比=栅栏组织厚度/海绵组织厚度; 叶片紧密组织结构指数(CTR)=(栅栏组织厚度+下部紧密组织厚度)/叶片厚度(简令成等, 1986)。

### 1.2.3 抗旱性的隶属函数分析

隶属函数计算方法(胡标林等, 2007): 正相关,  $U_{ij} = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$ ; 负相关,  $U_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$ 。式中  $U_{ij}$  表示  $i$  种类  $j$  指标的抗旱隶属函数值;  $X_{ij}$  表示  $i$  种类  $j$  指标的测定值;  $X_{jmin}$  表示所有种类  $j$  指标的最小值;  $X_{jmax}$  表示所有种类  $j$  指标的最大值;  $i$  表示某个品种;  $j$  表示某项指标。

权重应用客观赋权法进行计算:  $I_j = C_j/S_j$ , 其中,  $I_j$  是一个无量纲数, 表示某评价指标在干旱胁迫下的测定值相对于对照组的比值。  $C_j$  是第  $j$  个指标对照组的测定值,  $S_j$  第  $j$  个指标在某个胁迫处理下所测定的平均值。如果是负相关, 则计算式为  $I_j = S_j/C_j$ 。最后通过归一化, 计算出每个评价指标的权重:  $W_j = I_j/\sum I_j$  (程启月, 2010)。

综合评价:  $D = (U_{ij} \times W_j)$ 。品种抗旱性分级标准:  $0.8 \leq D \leq 1$ , 强抗;  $0.6 \leq D < 0.8$ , 抗;  $0.3 \leq D < 0.6$ , 中抗;  $0 \leq D < 0.3$ , 弱抗(孔照胜等, 2001)。

## 1.3 田间模拟干旱试验

先期试验对正常水分管理(对照)的10个古茶树扦插苗抗寒性调查表明, 在干旱胁迫下10个古茶树扦插苗的旱死率、株高净增量均显著优于对照。故田间模拟干旱试验选取位于贵州大学实验茶园作为试验地。于2011年11月将上述10个古茶树1年生的扦插苗(苗高约15 cm)按随机区组设计进行宽窄双行种植, 宽行行距1.5 m, 窄行行距0.3 m, 株距0.3 m, 每小区种植20株, 每个株系设置3次重复, 正常除草施肥。待根系长稳后, 于2012年3月进行遮雨处理, 当土壤含水量低于25%田间持水量时进行补水控制在25%~35%之间, 共补水8次。于2012年11月统计植株死亡率、株高增长量等指标。

## 2 结果与分析

### 2.1 10 个古茶树单株及其扦插苗品质成分

古茶树单株和扦插苗一芽二叶品质成分(表 2)显示,本研究中 10 个古茶树单株游离氨基酸含量较高,均在 4.00%以上,其扦插苗游离氨基酸含量均显著高于同等栽培条件下的对照‘福鼎大白茶’。古茶树及其扦插苗的茶多酚含量、咖啡碱含量、酚氨比和水浸出物均符合制作优质绿茶的要求。茶农对古茶树扦插苗的栽培种植也证实这 10 个材料有较好的绿茶适制性,所制茶叶品质上乘。

表 2 10 个古茶树单株及其扦插苗品质成分

Table 2 The quality components of 10 ancient tea plants and the cutting seedlings of ancient tea plants

资源编号 Germplasm number	游离氨基酸/% Free amino acids		茶多酚/% Tea polyphenol		咖啡碱/% Caffeine		扦插苗水浸 出物/% Aqueous extract of clone
	古树 Ancient plants	扦插苗 Clone	古树 Ancient plants	扦插苗 Clone	古树 Ancient plants	扦插苗 Clone	
GN01	4.26 ± 0.09 de	4.52 ± 0.07**	28.89 ± 0.59 cd	26.76 ± 1.04	3.56 ± 0.09 c	2.97 ± 0.04**	42.82 ± 0.76
GN02	4.37 ± 0.02 cd	4.40 ± 0.11**	36.56 ± 1.13 a	35.21 ± 1.47**	2.57 ± 0.04 f	2.56 ± 0.03**	49.77 ± 0.99**
GN03	5.85 ± 0.07 a	5.75 ± 0.08**	32.50 ± 0.85 d	29.76 ± 0.99**	3.21 ± 0.02 d	3.15 ± 0.05*	51.23 ± 1.12**
GN04	4.90 ± 0.11 b	4.65 ± 0.09**	28.45 ± 0.84 b	27.65 ± 1.13*	3.65 ± 0.06 bc	3.19 ± 0.08	44.53 ± 0.80*
GN05	4.69 ± 0.06 bc	4.85 ± 0.13**	25.71 ± 0.87 de	25.65 ± 0.85	3.29 ± 0.09 d	3.46 ± 0.04**	50.09 ± 0.91**
GN06	4.15 ± 0.09 ef	4.43 ± 0.11**	24.23 ± 0.60 e	25.13 ± 0.66	3.14 ± 0.08 d	3.10 ± 0.08*	39.23 ± 0.72
GN07	3.95 ± 0.09 g	4.41 ± 0.11**	31.32 ± 1.14 b	31.45 ± 1.04**	4.12 ± 0.12 a	2.67 ± 0.02**	43.67 ± 0.53
GN08	5.74 ± 0.13 a	5.32 ± 0.05**	28.76 ± 1.02 d	26.53 ± 1.02	3.76 ± 0.08 b	3.25 ± 0.02	45.61 ± 1.00*
GN09	4.32 ± 0.04 de	4.47 ± 0.08**	32.78 ± 0.55 b	32.66 ± 1.23**	2.89 ± 0.05 e	2.56 ± 0.04**	44.32 ± 1.28*
GN10	4.07 ± 0.03 ef	4.25 ± 0.04*	31.14 ± 1.06 bc	29.55 ± 0.93**	2.61 ± 0.01 f	2.09 ± 0.01**	44.55 ± 0.87*
对照 Control		3.92 ± 0.03		25.11 ± 0.34		3.23 ± 0.01	42.26 ± 1.15

注: 同列相同字母者表示无显著差异; \*和\*\*分别表示在  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  水平与对照的显著性。

Note: The same letter indicates to no significant difference in a column. \* and \*\* indicates significance at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$  level difference compared with the control.

### 2.2 干旱胁迫对古茶树扦插苗叶片生理的影响

随着水分胁迫程度的加强,茶树叶片的相对含水量也逐渐降低(表 3)。在轻度、中度和重度干旱胁迫条件(相对含水量分别为田间持水量的 55%、40%和 25%)下,10 个古茶树扦插苗叶片相对含水量与对照相比均显著下降。在重度胁迫下,10 个古茶树扦插苗相对含水量的差异进一步扩大,GN09 叶片相对含水量最高,GN01 叶片相对含水量最低,分别为 76.3%及 55.1%。

不同水分胁迫下 10 个古茶树扦插苗叶片相对电导率与对照组相比均显著上升(表 3)。重度胁迫下的电导率分别是对照组的 9.62、2.84、3.58、3.17、3.52、7.90、6.61、4.29、4.11、2.99 倍,其中,材料 GN01 升幅较明显,GN02 和 GN10 增幅相对较少。丙二醛含量随着胁迫程度的加深呈上升趋势。

在中度和重度干旱时,MDA 含量均有较大幅度的增加,且与对照组呈显著差异(表 3)。比较而言,GN02、GN05、GN07、GN09、GN10 增幅相对较小,表明干旱对其膜伤害的程度较小。

随着干旱胁迫程度的加深,10 个古茶树扦插苗叶片  $H_2O_2$  含量与  $O_2^-$  产生速率都呈上升的趋势(表 3)。在轻度、中度和重度胁迫下,  $H_2O_2$  含量均显著高于对照组(表 3),GN01 和 GN10 比其余古茶树扦插苗的增幅相对较大。相同处理下,叶片的  $O_2^-$  产生速率变化更为明显,在中度胁迫下,10 个古茶树扦插苗叶片的  $O_2^-$  产生速率均比对照增加了 2 倍以上;重度胁迫下分别增加了 3.56、3.01、4.44、3.02、2.78、3.14、3.34、3.74、2.40、2.45 倍。

表 3 干旱胁迫对叶片相对含水量、渗透调节物质含量、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率的影响Table 3 The effect of drought stress on relative water content, conductivity, MDA, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and O<sub>2</sub><sup>-</sup> producing rate in leaves

资源编号 Germplasm number	干旱胁迫 Drought stress	叶片相对含水量/% Relative water content	电导率/% Relative conductivity	MDA/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / ( $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ )	O <sub>2</sub> <sup>-</sup> / ( $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ )
GN01	对照 Control	93.02 ± 0.39 cd	7.82 ± 0.13 y	5.35 ± 0.32 v	2.11 ± 0.02 nop	3.26 ± 0.06 vw
	轻度 Mild	81.26 ± 0.46 ij	28.19 ± 0.24 mn	25.87 ± 0.16 l	4.03 ± 0.32 de	6.11 ± 0.03 op
	中度 Moderate	63.07 ± 1.07 u	39.06 ± 0.88 i	42.14 ± 0.32 f	5.80 ± 0.13 b	8.22 ± 0.03 fg
	重度 Severe	55.08 ± 0.53 v	75.09 ± 0.70 a	73.03 ± 0.50 a	7.26 ± 0.05 a	11.59 ± 0.10 bc
GN02	对照 Control	95.97 ± 0.30 ab	14.43 ± 0.39 tu	10.01 ± 0.38 st	2.00 ± 0.05 op	2.59 ± 0.05 x
	轻度 Mild	85.67 ± 1.08 gh	20.37 ± 0.25 q	12.46 ± 0.93 q	2.92 ± 0.05 ijkl	4.41 ± 0.05 u
	中度 Moderate	79.71 ± 0.39 jk	25.22 ± 0.39 o	15.89 ± 0.56 p	3.11 ± 0.07 hijk	5.18 ± 0.06 rs
	重度 Severe	74.26 ± 1.31 mno	40.98 ± 0.62 h	27.72 ± 0.02 k	4.78 ± 0.28 c	7.81 ± 0.02 hi
GN03	对照 Control	92.76 ± 0.33 cd	15.24 ± 0.40 st	8.92 ± 0.33 t	2.51 ± 0.08 lmno	1.89 ± 0.03 x
	轻度 Mild	85.19 ± 0.33 gh	22.43 ± 0.17 p	15.49 ± 0.28 p	3.14 ± 0.05 hijk	4.74 ± 0.04 tu
	中度 Moderate	78.02 ± 0.86 kl	40.91 ± 0.76 h	31.50 ± 0.32 i	3.40 ± 0.16 fghi	6.26 ± 0.06 no
	重度 Severe	69.30 ± 0.72 qr	54.55 ± 0.73 c	62.80 ± 0.21 c	4.82 ± 0.27 c	8.39 ± 0.08 f
GN04	对照 Control	94.47 ± 0.33 bc	14.15 ± 0.36 tu	8.92 ± 0.36 t	2.11 ± 0.06 nop	2.34 ± 0.10 x
	轻度 Mild	86.45 ± 1.06 fg	27.23 ± 0.33 n	20.06 ± 0.40 n	2.79 ± 0.07 jkl	3.45 ± 0.13 vw
	中度 Moderate	72.45 ± 1.65 op	35.20 ± 0.35 j	41.09 ± 0.31 f	3.21 ± 0.03 hij	4.90 ± 0.04 st
	重度 Severe	67.40 ± 0.61 rs	44.84 ± 0.57 f	59.99 ± 0.22 d	4.21 ± 0.14 d	7.46 ± 0.04 ij
GN05	对照 Control	95.90 ± 0.97 ab	16.16 ± 0.29 s	6.94 ± 0.46 u	2.14 ± 0.05 mnop	3.37 ± 0.07 vw
	轻度 Mild	83.21 ± 0.41 hi	29.02 ± 0.38 m	12.19 ± 0.34 qr	3.26 ± 0.18 ghij	6.57 ± 0.04 mn
	中度 Moderate	78.25 ± 0.41 kl	42.37 ± 0.51 g	18.20 ± 0.39 o	3.75 ± 0.22 defg	7.89 ± 0.08 gh
	重度 Severe	72.19 ± 1.25 op	56.90 ± 0.54 b	36.96 ± 0.09 g	4.18 ± 0.14 d	9.37 ± 0.04 d
GN06	对照 Control	91.45 ± 0.52 de	6.49 ± 0.28 z	11.03 ± 0.48 rs	2.09 ± 0.01 nop	3.58 ± 0.15 v
	轻度 Mild	87.26 ± 1.06 fg	10.08 ± 0.54 x	24.78 ± 0.19 l	2.56 ± 0.06 lmn	5.65 ± 0.04 q
	中度 Moderate	77.93 ± 2.28 kl	35.59 ± 0.95 j	29.43 ± 0.31 j	3.15 ± 0.02 hijk	7.01 ± 0.04 l
	重度 Severe	71.18 ± 1.03 pq	51.26 ± 0.25 d	47.22 ± 0.29 e	3.53 ± 0.16 efgh	11.25 ± 0.04 c
GN07	对照 Control	97.39 ± 0.38 a	5.42 ± 0.29 z	6.08 ± 0.45 uv	2.06 ± 0.07 nop	3.52 ± 0.25 v
	轻度 Mild	89.03 ± 0.34 ef	11.99 ± 0.22 w	14.60 ± 0.33 p	2.65 ± 0.08 klm	7.06 ± 0.08 kl
	中度 Moderate	80.71 ± 0.30 jk	18.85 ± 0.09 r	23.26 ± 0.35 m	3.19 ± 0.06 hijk	8.90 ± 0.11 e
	重度 Severe	73.44 ± 1.12 nop	35.83 ± 0.69 j	33.53 ± 0.25 h	4.14 ± 0.38 d	11.74 ± 0.07 ab
GN08	对照 Control	96.85 ± 0.52 ab	12.53 ± 0.17 vw	12.33 ± 0.75 qr	2.01 ± 0.08 op	3.21 ± 0.09 vw
	轻度 Mild	85.42 ± 0.57 gh	22.52 ± 0.22 p	23.09 ± 0.38 m	2.09 ± 0.06 nop	6.27 ± 0.06 no
	中度 Moderate	75.94 ± 0.40 lmn	34.83 ± 0.84 j	37.46 ± 0.11 g	3.13 ± 0.12 hijk	8.77 ± 0.05 e
	重度 Severe	67.92 ± 1.82 rs	53.72 ± 0.29 c	65.44 ± 0.28 b	3.83 ± 0.09 def	11.99 ± 0.47 a
GN09	对照 Control	96.15 ± 0.15 ab	7.97 ± 0.33 y	5.14 ± 0.38 v	1.70 ± 0.05 q	3.08 ± 0.24 w
	轻度 Mild	88.53 ± 0.53 f	13.58 ± 0.16 uv	12.95 ± 0.80 q	2.40 ± 0.06 lmno	5.83 ± 0.06 pq
	中度 Moderate	81.57 ± 0.82 ij	18.98 ± 0.55 r	18.57 ± 0.10 o	3.10 ± 0.16 hijk	6.81 ± 0.04 l m
	重度 Severe	76.30 ± 1.42 lm	32.78 ± 0.19 k	32.79 ± 0.40 h	3.74 ± 0.04 defg	7.40 ± 0.02 jk
GN10	对照 Control	92.12 ± 0.46 cd	16.55 ± 0.23 s	9.81 ± 0.13 st	2.10 ± 0.09 nop	3.39 ± 0.10 vw
	轻度 Mild	84.62 ± 0.36 gh	30.64 ± 0.22 l	10.10 ± 0.10 st	3.27 ± 0.14 ghij	5.51 ± 0.12 qr
	中度 Moderate	66.42 ± 1.41 st	38.59 ± 0.90 i	15.89 ± 0.36 p	4.85 ± 0.06 c	7.16 ± 0.03 jkl
	重度 Severe	64.04 ± 1.87 tu	49.56 ± 0.73 e	29.51 ± 0.13 j	5.74 ± 0.31 b	8.32 ± 0.03 f

注: 同列相同字母者表示在  $P = 0.05$  水平无显著差异。

Note: The same letter indicates to no significant difference at  $P = 0.05$  level in a column.

### 2.3 干旱胁迫对古茶扦插苗叶片气孔特征和 PS II 最大光化学量子产量 $F_v/F_m$ 的影响

从表 4 可以看出, 尽管对照中 10 个古茶树扦插苗叶片的气孔密度并不一致, 但在各处理组中其气孔密度均随着干旱胁迫程度的加重而增大; 另外重度干旱胁迫下的气孔密度约为各对照的 1 倍以上, 是因为各试材多为大叶种, 叶片是对照 (福鼎大白茶) 的 2 倍以上, 加之干旱胁迫导致气孔密度显著增加。而随着干旱胁迫程度的加重, 10 个古茶树扦插苗叶片气孔开放率均逐渐减小, 尤其是在重度胁迫下, 其扦插苗叶片 70% 以上的气孔都处于关闭状态。GN01、GN03、GN05、GN06、GN08 气孔密度上升幅度较大, 气孔开放率相对较低。随着胁迫程度的加重, 10 个古茶树扦插苗叶片气孔

的长度和宽度都呈现出下降的趋势。在中度胁迫处理下，茶树叶片的气孔长度和宽度与对照组存在差异。而在重度胁迫处理下，其气孔长度和宽度与对照组相比均存在差异，表明古茶树扦插苗叶片气孔大小受水分变化的影响。在各胁迫处理中，材料 GN09 的气孔大小受干旱影响最小。

$F_v/F_m$  为 PS II 最大光化学量子产量，反映了植物光系统的最大光能转化效率。轻度胁迫下，10 个古茶树扦插苗叶片  $F_v/F_m$  的降幅较小。中度、重度胁迫下，10 个古茶树扦插苗叶片  $F_v/F_m$  与对照相比显著下降；其中，GN03、GN06 下降幅度较大，GN04 下降幅度较小。

表 4 干旱胁迫对叶片气孔特征和  $F_v/F_m$  的影响

Table 4 The effect of drought stress on stomatal characteristics and  $F_v/F_m$  in leaves

资源编号 Germplasm number	干旱胁迫 Drought stress	气孔密度/ (个·mm <sup>-2</sup> ) Stomatal density	气孔开放率/% Stomatal open rate	气孔长度/μm Stomatal length	气孔宽度/μm Stomatal width	$F_v/F_m$
GN01	对照 Control	313.35 ± 2.11 n	95.00 ± 1.05 b	20.00 ± 0.17 c	16.84 ± 0.08 b	0.84 ± 0.01 a
	轻度 Mild	373.25 ± 2.52 lm	62.73 ± 0.23 g	19.10 ± 0.15 d	15.74 ± 0.05 d	0.78 ± 0.00 cdef
	中度 Moderate	450.97 ± 9.11 g	39.23 ± 0.46 j	17.43 ± 0.16 gh	13.89 ± 0.11 g	0.69 ± 0.01 ij
	重度 Severe	683.15 ± 5.99 a	14.44 ± 0.07 uv	14.44 ± 0.04 n	9.59 ± 0.04 o	0.60 ± 0.01 mn
GN02	对照 Control	188.51 ± 3.19 t	84.45 ± 0.50 d	18.23 ± 0.15 ef	12.19 ± 0.06 j	0.77 ± 0.01 defg
	轻度 Mild	244.12 ± 1.86 q	69.43 ± 0.32 f	16.89 ± 0.10 ij	11.79 ± 0.06 k	0.73 ± 0.01 gh
	中度 Moderate	301.57 ± 4.34 no	48.54 ± 0.72 i	13.18 ± 0.06 p	10.96 ± 0.04 m	0.62 ± 0.01 lm
	重度 Severe	391.57 ± 5.25 jk	25.23 ± 0.41 l	11.18 ± 0.02 r	6.91 ± 0.02 q	0.54 ± 0.01 q
GN03	对照 Control	221.77 ± 2.26 rs	90.00 ± 1.00 c	19.95 ± 0.13 c	16.54 ± 0.41 bc	0.83 ± 0.01 ab
	轻度 Mild	393.45 ± 6.71 jk	77.50 ± 0.50 e	17.86 ± 0.07 fg	15.74 ± 0.16 d	0.80 ± 0.01 bcd
	中度 Moderate	488.99 ± 4.40 f	36.86 ± 0.37 j	16.53 ± 0.17 jk	13.04 ± 0.07 hi	0.67 ± 0.01 jk
	重度 Severe	571.07 ± 5.46 d	20.83 ± 0.48 mn	12.84 ± 0.10 p	9.48 ± 0.03 o	0.58 ± 0.01 nop
GN04	对照 Control	182.96 ± 3.15 t	82.57 ± 1.03 d	18.15 ± 0.05 ef	14.79 ± 0.11 ef	0.74 ± 0.01 fgh
	轻度 Mild	243.95 ± 3.52 q	66.67 ± 0.14 f	16.89 ± 0.06 ij	12.98 ± 0.06 hi	0.73 ± 0.01 gh
	中度 Moderate	293.85 ± 2.67 o	51.54 ± 1.26 h	15.04 ± 0.05 m	9.67 ± 0.05 o	0.66 ± 0.00 jk
	重度 Severe	396.03 ± 7.32 jk	29.12 ± 0.28 k	11.88 ± 0.12 q	8.40 ± 0.01 p	0.56 ± 0.01 opq
GN05	对照 Control	221.77 ± 3.75 rs	100.00 ± 0.00 a	22.46 ± 0.38 a	17.44 ± 0.35 a	0.80 ± 0.01 bcd
	轻度 Mild	360.38 ± 6.09 m	77.56 ± 0.50 e	18.60 ± 0.32 e	16.44 ± 0.08 c	0.78 ± 0.00 cdef
	中度 Moderate	449.09 ± 4.22 g	46.15 ± 0.95 i	16.19 ± 0.08 kl	13.77 ± 0.02 g	0.68 ± 0.02 ij
	重度 Severe	565.32 ± 7.25 d	28.23 ± 0.23 k	14.99 ± 0.03 m	10.88 ± 0.03 m	0.56 ± 0.01 opq
GN06	对照 Control	310.48 ± 5.12 no	20.00 ± 0.51 no	20.35 ± 0.32 c	16.79 ± 0.19 bc	0.79 ± 0.01 cde
	轻度 Mild	418.89 ± 7.78 hi	19.10 ± 0.23 nop	18.41 ± 0.09 e	15.79 ± 0.18 d	0.76 ± 0.02 defg
	中度 Moderate	507.60 ± 6.96 e	17.43 ± 0.25 pqrs	15.84 ± 0.16 l	12.68 ± 0.07 i	0.66 ± 0.00 jk
	重度 Severe	664.13 ± 7.69 b	14.44 ± 0.12 uv	14.09 ± 0.03 no	9.57 ± 0.02 o	0.55 ± 0.00 pq
GN07	对照 Control	232.86 ± 3.24 qr	18.23 ± 0.37 opqr	20.00 ± 0.34 c	15.14 ± 0.12 e	0.81 ± 0.01 abc
	轻度 Mild	371.47 ± 5.45 lm	16.89 ± 0.29 qrs	18.60 ± 0.08 e	14.14 ± 0.09 g	0.79 ± 0.01 cde
	中度 Moderate	426.71 ± 2.23 h	13.18 ± 0.02 vw	17.54 ± 0.16 gh	13.12 ± 0.05 h	0.69 ± 0.01 ij
	重度 Severe	509.98 ± 1.59 e	11.18 ± 0.03 x	14.49 ± 0.07 n	10.99 ± 0.07 m	0.57 ± 0.00 nopq
GN08	对照 Control	188.51 ± 1.00 t	19.95 ± 0.84 no	20.89 ± 0.29 b	16.49 ± 0.17 bc	0.83 ± 0.00 ab
	轻度 Mild	406.92 ± 5.42 ij	17.86 ± 0.16 pqrs	17.54 ± 0.28 gh	14.14 ± 0.11 g	0.80 ± 0.01 bcd
	中度 Moderate	482.36 ± 5.12 f	16.53 ± 0.16 rst	15.19 ± 0.10 m	12.74 ± 0.11 hi	0.71 ± 0.01 hi
	重度 Severe	626.71 ± 4.97 c	12.84 ± 0.06 vw	13.84 ± 0.07 o	9.68 ± 0.05 o	0.59 ± 0.01 mno
GN09	对照 Control	247.22 ± 4.57 q	18.15 ± 0.28 opqr	19.30 ± 0.23 d	15.84 ± 0.08 d	0.81 ± 0.01 abc
	轻度 Mild	303.75 ± 3.86 no	16.89 ± 0.08 qrs	17.89 ± 0.05 fg	14.59 ± 0.07 f	0.79 ± 0.00 cde
	中度 Moderate	384.74 ± 6.38 kl	15.04 ± 0.33 tu	16.69 ± 0.15 j	14.14 ± 0.03 g	0.69 ± 0.01 ij
	重度 Severe	426.92 ± 2.21 h	11.88 ± 0.05 wx	14.39 ± 0.02 n	11.59 ± 0.05 kl	0.56 ± 0.01 opq
GN10	对照 Control	207.77 ± 1.07 s	22.46 ± 0.68 lm	18.54 ± 0.27 e	13.09 ± 0.10 h	0.75 ± 0.02 efg
	轻度 Mild	271.67 ± 4.02 p	18.60 ± 0.15 opq	17.19 ± 0.07 hi	11.39 ± 0.04 l	0.73 ± 0.01 gh
	中度 Moderate	299.40 ± 2.08 no	16.19 ± 0.20 stu	14.14 ± 0.04 no	10.39 ± 0.06 n	0.64 ± 0.01 kl
	重度 Severe	371.47 ± 5.17 lm	14.99 ± 0.20 tu	12.79 ± 0.04 p	8.61 ± 0.06 p	0.55 ± 0.00 pq

注：同列相同字母者表示在  $P = 0.05$  水平无显著差异。

Note: The same letter indicates to no significant difference at  $P = 0.05$  level in a column.

## 2.4 古茶树扦插苗抗旱性的综合评价

利用以上 10 个指标的隶属函数加权平均值对 10 个古茶树扦插苗耐旱性进行综合评价 (表 5)。从权重  $W_j$  方面测算出的与古茶树种质资源抗旱性最为密切的 4 个指标依次为: MDA、相对电导率、气孔开放率和  $O_2^-$  产生速率 (平均权重均大于 0.1)。耐旱性强弱顺序分别为 GN09 > GN07 > GN05 > GN02 > GN10 > GN04 > GN06 > GN03 > GN08 > GN01。其中, GN09 的隶属函数加权平均值为 0.886, 为强抗旱性的种质资源; GN02、GN04、GN05、GN07、GN10 的隶属函数值均大于 0.600, 属于具有抗旱特性的古茶树种质资源; GN03、GN06 和 GN08 的隶属函数值均大于 0.300, 为具有中等抗旱特性的茶树种质资源; GN01 的隶属函数加权平均值仅为 0.087, 为抗旱性较弱的茶树种质资源。

表 5 10 个古茶树扦插苗的抗旱性综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation on the drought resistance of cutting seedlings of ten ancient tea plants

资源编号 Germplasm number	指标 Index	相对含水量 Relative water content	电导率 Relative conductivity	MDA	$H_2O_2$	$O_2^-$	气孔密 度 Stomatal density	气孔开放率 Stomatal open ate	气孔长度 Stomatal length	气孔宽度 Stomatal width	$F_v/F_m$	综合评价 Comprehen- sive value	抗性 Resis- tance
GN01	$U_{ij}$	0	0	0	0	0.080	0	0	0.856	0.538	0.979	0.087	L
	$W_j$	0.037	0.211	0.300	0.076	0.078	0.048	0.144	0.033	0.043	0.030		
GN02	$U_{ij}$	0.904	0.806	1.000	0.650	0.847	0.935	0.709	0.000	0.000	0.328	0.657	R
	$W_j$	0.056	0.124	0.120	0.104	0.131	0.090	0.146	0.078	0.090	0.062		
GN03	$U_{ij}$	0.670	0.485	0.226	0.638	0.731	0.360	0.420	0.437	0.516	0.743	0.470	M
	$W_j$	0.044	0.118	0.233	0.064	0.147	0.085	0.143	0.056	0.064	0.047		
GN04	$U_{ij}$	0.581	0.715	0.288	0.800	1.000	0.921	0.964	0.184	0.298	0.483	0.604	R
	$W_j$	0.053	0.120	0.256	0.076	0.115	0.082	0.108	0.063	0.076	0.051		
GN05	$U_{ij}$	0.806	0.430	0.796	0.807	0.531	0.378	0.906	1.000	0.798	0.521	0.690	R
	$W_j$	0.051	0.137	0.207	0.076	0.108	0.099	0.137	0.062	0.068	0.055		
GN06	$U_{ij}$	0.758	0.563	0.570	0.978	0.151	0.061	0.335	0.764	0.533	0.372	0.483	M
	$W_j$	0.043	0.266	0.144	0.057	0.106	0.072	0.144	0.052	0.066	0.049		
GN07	$U_{ij}$	0.865	0.928	0.872	0.817	0.051	0.556	1.000	0.869	0.819	0.678	0.758	R
	$W_j$	0.047	0.235	0.196	0.072	0.119	0.078	0.096	0.053	0.054	0.050		
GN08	$U_{ij}$	0.605	0.505	0.167	0.898	0.000	0.181	0.146	0.699	0.557	0.837	0.347	M
	$W_j$	0.048	0.144	0.179	0.064	0.126	0.112	0.162	0.055	0.064	0.047		
GN09	$U_{ij}$	1.000	1.000	0.888	1.000	0.931	0.822	1.148	0.843	0.739	0.565	0.886	S
	$W_j$	0.050	0.163	0.252	0.080	0.095	0.068	0.113	0.057	0.065	0.057		
GN10	$U_{ij}$	0.422	0.603	0.960	0.397	0.744	1.000	0.562	0.423	0.342	0.372	0.608	R
	$W_j$	0.063	0.132	0.132	0.120	0.108	0.079	0.160	0.069	0.076	0.060		

注: L. 弱抗; R. 抗; M. 中抗; S. 强抗。下表同。

Note: L. Low drought resistance; R. Drought resistance; M. Mid drought resistance; S. Strong drought resistance. The same below.

## 2.5 古茶树单株叶片解剖结构分析

对古茶树单株叶片解剖结构分析结果表明 (表 6), 10 个古茶树单株叶片的上表皮厚度、下表皮厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅海比、叶片 CTR 均存在不同程度的差异; 其中 GN02、GN04、GN05、GN07 和 GN09 古茶树单株叶片栅海比和叶片 CTR 均分别在 0.6 和 0.3 以上, 表明其具有抗旱特性, 其中 GN09 古树单株的栅海比和叶片 CTR 均值最大, 分别是 0.89 和 0.38, 为 10 个古茶树单株中最为抗旱的种质资源。

表 6 古茶树叶片解剖结构的比较及其抗旱性综合评价  
Table 6 Comparison and comprehensive value of leaf anatomical of ancient tea plants

编号 No.	上表皮厚度/ $\mu\text{m}$ The sizes of upper epidermis	栅栏组织厚度/ $\mu\text{m}$ Stockade tissue thickness	海绵组织厚度/ $\mu\text{m}$ Sponge tissue thickness	下表皮厚度/ $\mu\text{m}$ The sizes of lower epidermis	栅海比 Ratio of stockade tissue thickness to sponge tissue thickness	叶片紧密组织 结构指数 CTR	抗性 Resis- tance
GN01	14.78 $\pm$ 0.36 f	57.12 $\pm$ 0.24 f	122.34 $\pm$ 0.50 cd	13.54 $\pm$ 0.68 e	0.47 $\pm$ 0.00 de	0.25 $\pm$ 0.00 d	L
GN02	21.43 $\pm$ 0.27 bc	92.44 $\pm$ 1.16 b	148.65 $\pm$ 0.90 a	19.67 $\pm$ 0.41 c	0.66 $\pm$ 0.01 c	0.31 $\pm$ 0.01 b	R
GN03	17.65 $\pm$ 1.02 de	51.34 $\pm$ 0.82 g	115.98 $\pm$ 1.78 d	15.43 $\pm$ 0.67 de	0.44 $\pm$ 0.01 e	0.25 $\pm$ 0.01 d	L
GN04	17.96 $\pm$ 0.60 de	81.76 $\pm$ 1.16 c	124.34 $\pm$ 0.74 c	14.43 $\pm$ 0.34 e	0.62 $\pm$ 0.01 c	0.31 $\pm$ 0.01 b	R
GN05	26.32 $\pm$ 0.48 a	84.85 $\pm$ 1.18 c	115.56 $\pm$ 0.90 df	23.12 $\pm$ 0.91 ab	0.73 $\pm$ 0.01 b	0.34 $\pm$ 0.01 b	R
GN06	18.44 $\pm$ 0.32 d	65.98 $\pm$ 1.25 e	124.56 $\pm$ 1.07 c	19.33 $\pm$ 0.30 c	0.53 $\pm$ 0.01 d	0.28 $\pm$ 0.01bc	M
GN07	22.45 $\pm$ 0.65 b	89.47 $\pm$ 0.84 b	102.65 $\pm$ 1.06 g	21.55 $\pm$ 0.60 bc	0.87 $\pm$ 0.00 a	0.38 $\pm$ 0.00 a	S
GN08	15.43 $\pm$ 1.11 ef	71.35 $\pm$ 0.84 d	138.31 $\pm$ 0.45 b	15.76 $\pm$ 1.13 e	0.52 $\pm$ 0.01 d	0.27 $\pm$ 0.00 cd	M
GN09	25.70 $\pm$ 0.53 a	96.63 $\pm$ 1.64 a	108.34 $\pm$ 0.43 fg	25.12 $\pm$ 0.45 a	0.89 $\pm$ 0.01a	0.38 $\pm$ 0.00 a	S
GN10	19.43 $\pm$ 0.32 cd	45.55 $\pm$ 1.01 h	102.76 $\pm$ 0.86 g	18.78 $\pm$ 0.36 cd	0.44 $\pm$ 0.01 e	0.25 $\pm$ 0.00 d	L

注: 同列相同字母者表示在  $P = 0.05$  水平无显著差异。

Note: The same letter indicates to no significant difference at  $P = 0.05$  level in a column.

古茶树扦插苗与古茶树单株抗旱指标相关分析结果(表 7)表明, 扦插苗抗旱性隶属函数值、单株叶片栅海比和单株叶片 CTR 之间具有极显著正相关, 相关系数分别为 0.734<sup>\*\*</sup>、0.768<sup>\*\*</sup>、0.996<sup>\*\*</sup>, 表明古茶树单株的抗旱性与古茶树扦插苗的抗旱性一致。

表 7 相关系数分析  
Table 7 Analysis of correlation coefficient

相关系数 Correlation coefficient	古茶树叶片栅海比 Stockade tissue / sponge tissue of ancient plants	古茶树叶片 CTR CTR of in leaves of ancient plant
叶片 CTR CTR of in leaves of ancient plants	0.768 <sup>**</sup>	
扦插苗隶属函数值 Comprehensive value of cuttings	0.734 <sup>**</sup>	0.996 <sup>**</sup>

注: \*\*表示在  $P < 0.01$  水平与对照的显著性。

Note: \*\* indicates significance at  $P < 0.01$  level difference compared with the control.

## 2.6 田间持续干旱试验结果

田间持续干旱试验结果(表 8)表明, 干旱对 10 个古茶树扦插苗均有不同程度伤害。干旱对 GN09 的伤害程度最小, 早死率最低, 株高净增量最高; 其次是 GN07 和 GN05, 其早死率较低, 株

表 8 田间栽培条件下干旱对 10 个古茶树扦插苗生长的影响  
Table 8 The survival rate and growth of cutting seedlings of ten ancient plants under the drought stress in field experiments

资源编号 Germplasm number	早死率/% Death rate of drought	株高净增量/cm Rise of plant height	资源编号 Germplasm number	早死率/% Death rate of drought	株高净增量/cm Rise of plant height
GN01	58.87 $\pm$ 6.09 f	3.00 $\pm$ 0.08 a	GN06	37.11 $\pm$ 3.67 d	4.30 $\pm$ 0.06 b
GN02	28.27 $\pm$ 2.13 c	5.47 $\pm$ 0.18 c	GN07	19.33 $\pm$ 3.12 b	7.73 $\pm$ 0.30 d
GN03	36.01 $\pm$ 1.45 d	4.17 $\pm$ 0.33 b	GN08	49.14 $\pm$ 5.12 e	3.80 $\pm$ 0.01 ab
GN04	39.63 $\pm$ 1.23 d	4.37 $\pm$ 0.07 b	GN09	11.43 $\pm$ 1.05 a	11.10 $\pm$ 0.54 e
GN05	21.03 $\pm$ 4.67 b	7.00 $\pm$ 0.41 d	GN10	28.67 $\pm$ 2.89 c	3.81 $\pm$ 0.01 ab

注: 同列相同字母者表示无显著差异, 小写字母表示 0.05 显著水平。

Note: The same letter indicates to no significant difference in a column, the different small letter within a column indicates to significance at and 0.05 level.

高净增量较高。干旱对材料 GN01 和 GN08 伤害最大，早死率分别为  $58.87\% \pm 6.09\%$  和  $49.14\% \pm 5.12\%$ ，株高净增量均小于 4 cm。田间持续干旱试验验证了基于生理指标的隶属函数综合评价结果（表 5）。

### 3 讨论

#### 3.1 干旱胁迫对古茶树扦插苗叶片生理指标的影响

干旱条件下，植株的叶片持水量越弱，细胞膜受到伤害的程度越大（宋海鹏 等，2010；王宇超 等，2010），植物体内活性氧自由基代谢受阻（陈文荣 等，2012；Liu et al., 2012），光合作用及荧光参数受到一定影响（Patricia et al., 2009）。本研究结果表明，随着干旱胁迫程度的加重，10 个古茶树扦插苗的相对含水量逐渐降低， $H_2O_2$  含量、 $O_2^-$  产生速率、相对电导率和 MDA 含量均呈递增趋势，荧光参数  $F_v/F_m$  则呈现下降趋势；相同水分胁迫处理下各材料的叶片相对含水量和活性氧自由基含量均呈不同程度的差异（表 3），这可能是引起本研究中相对电导率、丙二醛含量和荧光参数等差异的重要原因（Liu et al., 2011）。

#### 3.2 干旱胁迫对古茶树扦插苗叶片气孔特征的影响

有研究表明，在胁迫环境下生长的一些植物叶片的气孔数及分布状况会发生变化，且其气体交换也会受到显著影响（Qiang et al., 2003；Li et al., 2012）。而气孔特征的具体变化则随物种和胁迫程度出现不同的特点（Yang & Wang, 2001；Na et al., 2011）。在本研究中，随着干旱胁迫程度的加重，10 个古茶树扦插苗叶片气孔密度逐渐增大，气孔开放率明显减少，气孔长度和宽度均不同程度的降低，这可能是因为干旱导致气孔关闭，从而降低蒸腾速率，保持水分；同时，叶片同化功能的降低又会影响叶片细胞的伸长，造成叶面积减小，所以气孔密度相对上升，气孔变小（Guerfel et al., 2009；Wang et al., 2012）。

#### 3.3 古茶树扦插苗的抗旱性评价

众多学者在干旱对植物的生长生理方面的影响方面做了大量的研究，不同性状对干旱胁迫的敏感性存在很大差异（祁旭升 等，2010），评价抗旱性的主要有生理指标、解剖结构参数和农艺性状指标，但不同的研究得出不同的结论。陈文荣等（2012）通过对干旱胁迫下 4 个蓝莓品种的生理指标和气孔特性分析认为与高丛蓝莓抗旱性最为密切的 3 个指标依次为：气孔开放率、电导率和  $O_2^-$  产生速率。刘建宁等（2012）通过对菊苣的抗旱性研究认为叶片含水量、株高、根冠比、细胞膜透性、可溶性糖含量可以作为菊苣抗旱性评价的主要指标。本研究中，10 个古茶树扦插苗叶片 10 项生理指标在干旱胁迫下均有不同程度的变化，与古茶树扦插苗抗旱性密切的 4 个指标依次为 MDA、电导率、气孔开放率和  $O_2^-$  产生速率（平均权重均大于 0.1），因此，这 4 个生理指标可以作为茶树种质资源抗旱性筛选的主要生理指标。

Metcalf 等（2010）和 Michael（2011）的研究认为树木抗旱性是受多种复杂因素的综合影响，是通过多个途径来实现，目前尚未有一个合适的、统一的评价方法（魏秀俭，2005）。对于农作物的抗旱评价，应用较多的有抗旱系数、伤害指数和敏感指数（祁旭升 等，2012），但这些方法均以产量性状为主，须收获后才能进行评价，而茶树作为木本植物，测定成龄茶园产量周期较长，以上方法不宜应用于多年生木本植物的筛选。因此本研究中选用苗期作为试验材料，相对于其它生长周期，苗期鉴定耐旱性具有时间短、可重复性强等优点（陈文荣 等，2012）。本研究中，10 个古茶树扦插苗叶片的几个指标间变化趋势呈现出不一致性，故仅从单一因素来评价植物的抗旱性，存在一定程

度的局限性。隶属函数分析提供了一种多指标测定基础上对材料的特性进行综合评价的方法,可以在一定程度上提高鉴定的准确性(陈文荣等,2012)。本研究选用了客观赋权法来评价各指标的权重并通过隶属函数结合权重计算出综合抗旱值。其综合评价结果表明,10个古茶树扦插苗的耐旱性依次为GN09、GN07、GN05、GN02、GN10、GN04、GN06、GN03、GN08、GN01,其中GN02、GN04、GN05、GN07、GN10隶属函数加权平均值均在0.600以上,为具有抗旱特性的种质资源,GN09隶属函数加权平均值为0.886,为具有强抗旱特性的茶树种质资源。经田间持续干旱试验证明,基于隶属函数结合权重的综合评价结果与田间持续干旱结果一致。可见,隶属函数结合权重的评价方法使得评价结果更为全面,具有较好的可靠性及应用价值,可以在生产实践中应用于茶树等多年生木本植物的抗旱种质资源的早期筛选。

### 3.4 古茶树单株叶片解剖结构的抗旱性评价

植物的抗旱性与叶片上下表皮细胞厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅栏组织/海绵组织厚度、叶片CTR值等几个结构参数指标有密切的相关性(李晓储等,2006;史晓霞等,2008),而单一指标(如栅栏组织或海绵组织厚度)往往会随着样品所处生态条件和生理状态的不同而发生变化(简令成等,1986),但叶片CTR具有品种特异稳定性,同一植物品种在不同栽培和环境条件下,叶片CTR是稳定的。抗旱性强的植物品种较抗旱性弱的品种CTR大(简令成等,1986;史晓霞等,2008;金龙飞等,2012),且栅海比在0.60以上为抗逆性较强的材料(苏印泉和张军侠,1997)。本研究中,古茶树单株GN02、GN04、GN05、GN07和GN09叶片栅海比均在0.6以上,尤其是单株GN09最大为0.89,且GN02、GN04、GN05、GN07和GN09古茶树单株叶片CTR均在0.3以上,为抗旱性茶树种质资源,这与对古茶树扦插苗基于生理指标的抗旱性评价结果基本一致。相关分析进一步印证了这种一致性。

本研究中发现抗旱性最强的古茶种质资源GN09材料,其原生地立地土壤为保水性能较差的紫色砂土类型,立地年平均降雨量为1038.4mm,这些立地微环境均比其他古茶资源的立地环境恶劣,其抗旱机制可能是在生命系统长期的发展中,形成了在生理代谢、形态解剖等方面与其所处时空的微环境条件相吻合的生态适应特征,并在变化的环境因子影响下产生相应的生态进化趋向(祖元刚等,2000),究竟是否如此还有待于进一步研究证明。

## References

- Chen Wen-rong, Zeng Wei-wei, Li Yun-xia, Li Yong-qiang, Guo Wei-dong. 2012. The physiological responds of highbush blueberry to drought stress and the comprehensive evaluation on their drought resistance capacity. *Acta Horticulturae Sinica*, 39 (4): 637 - 646. (in Chinese)
- 陈文荣, 曾玮玮, 李云霞, 李永强, 郭卫东. 2012. 高丛蓝莓对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性综合评价. *园艺学报*, 39 (4): 637 - 646.
- Cheng Qi-yue. 2010. Structure entropy weight method to confirm the weight of evaluating index. *Systems Engineering Theory & Practice*, 30 (7): 1225 - 1228. (in Chinese)
- 程启月. 2010. 评测指标权重确定的结构熵权法. *系统工程理论与实践*, 30 (7): 1225 - 1228.
- Guerfel Mokhtar, Baccouri Olfa, Boujnah Dalenda, Chaibi Wided, Zarrouk Mokhtar. 2009. Impacts of water stress on gas exchange, water relations, chlorophyll content and leaf structure in the two main Tunisian olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae*, 119 (3): 257 - 263.
- Guo Chun-fang. 2008. Physiological response and molecular basis of tea plant (*Camellia sinensis*) exposed to water stress [Ph. D. Dissertation]. Fujian: Fujian Agriculture and Forestry University. (in Chinese)
- 郭春芳. 2008. 水分胁迫下茶树的生理响应及其分子基础[博士论文]. 福建: 福建农林大学.
- Guo Chun-fang, Sun Yun, Zhang Mu-qing. 2008. Photosynthetic characteristics and water use efficiency of tea plant under different soil moisture condition. *Journal of Fujian College of Forestry*, 28 (4): 333 - 337. (in Chinese)
- 郭春芳, 孙云, 张木清. 2008. 不同土壤水分对茶树光合作用与水分利用效率的影响. *福建林学院学报*, 28 (4): 333 - 337.

- Habermann G, Ellsworth P F V, Cazotoc J L, Sim oa E, Bierasa A C. 2011. Comparative gas exchange performance during the wet season of three brazilian styrax species under habitat conditions of cerrado vegetation types differing in soil water availability and crown density. *Flora*, 206: 351 - 359.
- Hu Biao-lin, Yu Shou-wu, Wan Yong, Zhang Zheng, Qiu Bing-yu, Xie Jian-kun. 2007. Drought-resistance identification of Dongxiang common wild rice (*Oryza rufipogon* Griff.) in whole growth period. *Acta Agronomica Sinica*, 33 (3): 425 - 432. (in Chinese)  
胡标林, 余守武, 万勇, 张铮, 邱兵余, 谢建坤. 2007. 东乡普通野生稻全生育期抗旱性鉴定. *作物学报*, 33 (3): 425 - 432.
- Huang H G, Li T Q, Tian S K, Gupta D K, Zhang X, Yang X E. 2008. Role of EDTA in alleviating lead toxicity in accumulator species of *Sedum alfredii* H. *Bioresource Technology*, 99: 6088 - 6096.
- Jian Ling-cheng, Sun De-lan, Shi Guo-xiong, Zeng Qiu-tao. 1986. The relationship between leaf tissue cell structure and cold resistance of different varieties. *Acta Horticulturae Sinica*, 13 (3): 163 - 167. (in Chinese)  
简令成, 孙德兰, 施国雄, 曾秋涛. 1986. 不同柑橘种类叶片组织的细胞结构与抗寒性的关系. *园艺学报*, 13 (3): 163 - 167.
- Jin Long-fei, Fan Fei, Luo Xuan, Gao Ai-ping, Li Shao-peng, Li Xin-guo. 2012. Studies on leaf anatomical structures of mango and its relations to drought resistance. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 25 (1): 232 - 235. (in Chinese)  
金龙飞, 范飞, 罗轩, 高爱平, 李绍鹏, 李新国. 2012. 芒果叶片解剖结构与抗旱性的关系. *西南农业学报*, 25 (1): 232 - 235.
- Jin X F, Yang X E, Ejazul I, Liu D, Mahmood Q. 2008. Effects of cadmium on ultrastructure and antioxidative defense system in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator ecotypes of *Sedum alfredii* Hance. *Journal of Hazardous Materials*, 156: 387 - 397.
- Kong Zhao-sheng, Wu Yun-shuai, Yue Ai-qin, Li Gui-quan, Peng Yong-kang. 2001. Comprehensive analysis of physiological indexes for drought resistance in different soybean varieties. *Acta Agriculturae Boreall-sinica*, 16 (3): 40 - 45. (in Chinese)  
孔照胜, 武云帅, 岳爱琴, 李贵全, 彭永康. 2001. 不同大豆品种抗旱性生理指标综合分析. *华北农学报*, 16 (3): 40 - 45.
- Li Q, Yu L, Deng Y, Li W, Li M, Cao J H. 2012. Leaf epidermal characters of *Lonicera japonica* and *Lonicera confuse* and their ecology adaptation. *Journal of Forestry research*, 18 (2): 103 - 108.
- Li Xiao-chu, Huang Li-bin, Zhang Yong-bing, He Kai-yue. 2006. Studies on leaf anatomic indexes and their relations to drought resistance of the four species of *Michelia*. *Forest Research*, 19 (2): 177 - 181. (in Chinese)  
李晓储, 黄利斌, 张永兵, 何开跃. 2006. 四种含笑叶解剖性状与抗旱性的研究. *林业科学研究*, 19 (2): 177 - 181.
- Liu C C, Liu Y G, Guo K, Fan D Y, Li G Q, Zheng Y R, Yu L F, Yang R. 2011. Effect of drought on pigments, osmotic adjustment and antioxidant enzymes in six woody plant species in Karst habitats of southwestern China. *Environmental and Experimental Botany*, 71: 174 - 183.
- Liu B H, Li M J, Cheng L, Liang D, Zou Y J, Ma F W. 2012. Influence of rootstock on antioxidant system in leaves and roots of young apple trees in response to drought stress. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92 (12): 2421 - 2427.
- Liu Jian-ning, Shi Yong-hong, Hou Zhi-hong, Wang Yun-qi, Li peng, Xing Ya-liang, Wu Xin-ming, Zhang Yan. 2012. Drought resistance evaluation of four seedling chicory. *Prataculturae Sinica*, 21 (2): 241 - 248. (in Chinese)  
刘建宁, 石永红, 侯志宏, 王运琦, 李鹏, 邢亚亮, 吴欣明, 张燕. 2012. 4份菊苣种质材料苗期抗旱性评价. *草业学报*, 21 (2): 241 - 248.
- Long Wei, Wen Shi-zhi, Zhang Dong-lin, Sun You-ping. 2010. Morphological and ecophysiological responses of *Camellia* cultivars to different irrigation levels. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 30 (8): 41 - 63. (in Chinese)  
龙维, 文仕知, 张冬林, 孙友平. 2010. 不同灌溉水平下两个茶属植物品种的形态和生理反应. *中南林业科技大学学报*, 30 (8): 41 - 63.
- Metcalf D B, Meir P, Arago L E O C, Lobo-do-Vale R, Galbraith D, Fisher R A, Chaves M M, Maroco J P, da Costa A C L, de Almeida S S, Braga A P, Gonoalves P H L, de Athaydes J, daCosta M, Portela T T B, de Oliveira A A R, Malhi Y, Williams M. 2010. Shifts in plant respiration and carbon use efficiency at a large-scale drought experiment in the eastern Amazon. *New Phytologist*, 187 (3): 608 - 621.
- Michael G R. 2011. Tree responses to drought. *Tree Physiology*, 31 (3): 237 - 239.
- Na D C, Wang W D, Yang L J, Zhang J, Ren C Q, Chai T T. 2011. Effect of water stress on the structure and chlorophyll content of *Sedum tatarinowii* Maxim leaves. *Medicinal Plant*, 2 (9): 40 - 42.
- Netto L, Jayaram K, Puthur J. 2010. Clonal variation of tea [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] in countering water deficiency. *Physiol Mol Biol Plants*, 16 (4): 359 - 367.
- Patricia Prieto, Josep Peuelas, Joan Llusà, Dolores Asensio, Marc Estiarte. 2009. Effects of long-term experimental night-time warming and drought on photosynthesis,  $F_v/F_m$  and stomatal conductance in the dominant species of a Mediterranean shrubland. *Acta Physiologiae Plantarum*, 31 (4):

729 - 739.

- Perez-Martin A, Flexas J, Ribas-Carbó M, Bota J, Tomás M, Infante J M, Diaz-Espejo A. 2009. Interactive effects of soil water deficit and air vapour pressure deficit on mesophyll conductance to CO<sub>2</sub> in *Vitis vinifera* and *Olea europaea*. *Journal of Experimental Botany*, 60: 2391 - 2405.
- Qi Xu-sheng, Liu Zhang-xiong, Guan Rong-xia, Wang Xing-rong, Gou Zuo-wang, Chang Ru-zhen, Qiu Li-juan. 2012. Comparison of evaluation methods for drought-resistance at soybean adult stage. *Acta Agronomica Sinica*, 38 (4): 665 - 674. (in Chinese)
- 祁旭升, 刘章雄, 关荣霞, 王兴荣, 苟作旺, 常汝镇, 邱丽娟. 2012. 大豆成株期抗旱性鉴定评价方法研究. *作物学报*, 38 (4): 665 - 674.
- Qi Xu-sheng, Wang Xing-rong, Xu Jun, Zhang Jian-ping, Mi Jun. 2010. Drought-resistance evaluation of flax germplasm at adult plant stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 43 (15): 3076 - 3087. (in Chinese)
- 祁旭升, 王兴荣, 许 军, 张建平, 米 君. 2010. 胡麻种质资源成株期抗旱性评价. *中国农业科学*, 43 (15): 3076 - 3087.
- Qiang W Y, Wang X L, Chen T, Feng H Y, An L Z, He Y Q, Wang G. 2003. Variations of stomatal density and carbon isotope values of *Picea crassifolia* at different altitudes in the Qilian Mountains. *Trees-Structure and Function*, 17: 258 - 262.
- Shi Xiao-xia, Zhang Guo-fan, Meng lin, Mao Pei-chun, Liu Zi-xue. 2008. Relationship between the leaf tissue characteristic and drought resistance of *Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch.). *Bulletin of Botanical Research*, 28 (5): 584 - 588. (in Chinese)
- 史晓霞, 张国芳, 孟 林, 毛培春, 刘自学. 2008. 马蔺叶片解剖结构特征与其抗旱性关系研究. *植物研究*, 28 (5): 584 - 588.
- Song Hai-peng, Liu Jun, Li Xiu-ling, Zhao Hai-ming, Yang Zhi-min. 2010. Effect of drought stress on physiological indexes of 5 *Sedum* species. *Pratacultural Science*, 27 (1): 11 - 15. (in Chinese)
- 宋海鹏, 刘 君, 李秀玲, 赵海明, 杨志民. 2010. 干旱胁迫对 5 种景天属植物生理指标的影响. *草业科学*, 27 (1): 11 - 15.
- Upadhyaya H, Panda S K. 2004. Responses of *Camellia sinensis* to drought and rehydration. *Biologia Plantarum*, 48 (4): 597 - 600.
- Wang Qing-sen, Huang Jian, Chen Chang-song, Wu Guang-yuan, Zeng Ming-sen, Huang Chun-mei, Chen Rong-bing. 2009. Relationship between leaf structure of tea germplasm and its resistance to *Aleurocanthus spiniferus* (Quaintance). *Journal of Tea Science*, 29 (1): 60 - 66. (in Chinese)
- 王庆森, 黄 建, 陈常颂, 吴光远, 曾明森, 黄春梅, 陈荣冰. 2009. 茶树种质叶片组织结构与其对黑刺粉虱抗性的关系. *茶叶科学*, 29 (1): 60 - 66.
- Wang Yu-chao, Wang De-xiang, Peng Shao-bing, He Fan. 2010. Effects of drought stress on physiological characteristics of woody saltbush. *Scientia Silvae Sinicae*, 46 (1): 61 - 67. (in Chinese)
- 王宇超, 王得祥, 彭少兵, 何 帆. 2010. 干旱胁迫对木本滨藜生理特性的影响. *林业科学*, 46 (1): 61 - 67.
- Wang Z X, Chen L, Ai J, Qin H Y, Liu Y X, Xu P L, Jiao Z Q, Zhao Y, Zhang Q T. 2012. Photosynthesis and activity of photosystem II in response to drought stress in amur grape (*Vitis amurensis* Rupr.). *Photosynthetica*, 50 (2): 189 - 196.
- Wei Yuan, Yu Li-fei. 2010. Physiological responses of *Broussonetia papyrifera* seedlings to soil drought stress in southwest Karst region. *Research of Soil and Water Conservation*, 17 (2): 164 - 167. (in Chinese)
- 魏 媛, 喻理飞. 2010. 西南喀斯特地区构树苗木对土壤干旱胁迫的生理响应. *水土保持研究*, 17 (2): 164 - 167.
- Wei Xiu-jian. 2005. The drought tolerance analysis of maize inbred lines by fuzzy administering function. *Shandong Agricultural Sciences*, (2): 25 - 27. (in Chinese)
- 魏秀俭. 2005. 玉米自交系耐旱性的模糊隶属函数法分析. *山东农业科学*, (2): 25 - 27.
- Yang H M, Wang G X. 2001. Leaf stomatal densities and distribution in *Triticum aestivum* under drought and CO<sub>2</sub> enrichment. *Acta Phytocologica Sinica*, 25: 312 - 316.
- Su Yin-quan, Zhang Jun-xia. 1997. Research of leaf comparative anatomy and relationship with resistance of 10 tea tree species. *Journal of Northwest Forestry College*, 13 (4): 1 - 8. (in Chinese)
- 苏印泉, 张军侠. 1997. 10 种茶树叶片比较解剖学及与抗性关系的研究. *西北林学院学报*, 13 (4): 1 - 8.
- Zhuang Wan-fang. 1981. Where is the origin of tea in China. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 7 (3): 111 - 114. (in Chinese)
- 庄晚芳. 1981. 茶树原产于我国何地. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 7 (3): 111 - 114.
- Zu Yuan-gang, Sun Mei, Kang Le. 2000. The molecular mechanism of ecology and ecological evolution. Beijing: Higher Education Press: 3 - 4. (in Chinese)
- 祖元刚, 孙 梅, 康 乐. 2000. 生态适应与生态进化的分子机理. 北京: 高等教育出版社: 3 - 4.