

## 低温胁迫对红麻细胞质雄性不育系及其保持系的形态 及光合生理的影响

廖小芳<sup>1</sup> 赵艳红<sup>1,2</sup> 周步进<sup>1</sup> 杨健<sup>1</sup> 周瑞阳<sup>1\*</sup>

(1. 广西大学农学院, 南宁 530005; 2. 广西壮族自治区农业科学院经济作物研究所, 南宁 530007)

**摘要** 以7对红麻细胞质雄性不育系及其保持系幼苗为材料,在12℃/6℃(昼/夜)低温胁迫15 d,测定植株形态、光合作用相关参数以及叶绿素含量变化。结果显示:1)持续低温胁迫下,植株生长缓慢,不育系的相对茎粗和叶面积增加量高于保持系。2)随着胁迫时间的延长,叶片的净光合速率和叶绿素(Chl)总量持续降低,气孔导度的变化表现为先下降后上升再下降,而气孔限制值 $L_s$ 和Chl a/Chl b的变化则是先上升后下降。3)利用主成分分析和隶属函数相结合的方法,得出红麻细胞质雄性不育系的耐冷性高于保持系,细胞质雄性不育系/保持系耐冷性较强的组配是F3A/B、917A/B和722A/B,本研究结果对于红麻越冬栽培和耐低温品种选育有重要的参考价值。

**关键词** 红麻; 低温胁迫; 不育系; 保持系; 形态; 光合作用

中图分类号 S 563.5; S 311

文章编号 1007-4333(2013)04-0037-08

文献标志码 A

## Effects of low temperature on morphology and photosynthetic physiologic of CMS and maintain lines of kenaf

LIAO Xiao-fang<sup>1</sup>, ZHAO Yan-hong<sup>1,2</sup>, ZHOU Bu-jin<sup>1</sup>, YANG Jian<sup>1</sup>, ZHOU Rui-yang<sup>1\*</sup>

(1. College of Agronomy, Guangxi University, Nanning 530005, China;

2. Cash Crop Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

**Abstract** Seven groups of CMS and maintain lines of kenaf leaves had been used to investigate the changes of plant's morphological feature, some parameters related to photosynthesis and content of chlorophyll under low temperature stress at 12℃/6℃ (day and night) for 15 days. The results revealed that: 1) The kenaf plant grew slowly, and the increase of stem diameter and leaf area in CMS were greater than those from the maintain lines. 2) Along with the increase of low temperature stress, the  $P_n$  and the total chlorophyll content were decreased; the  $G_s$  showed low-high-low changes, whereas the  $L_s$  and the ratio of Chl a/Chl b increased firstly and then decreased. 3) Principal Component Analysis and membership function had been used to analyze in this research. It was showed that CMS were more tolerant to low temperature stress than their maintain lines; F3A/B, 917A/B and 722A/B were the three strongest groups. The research also provided a valuable suggestion on winter cultivation and cold resistance breeding of kenaf.

**Key words** kenaf; low temperature stress; CMS line; maintain line; morphology; photosynthesis

红麻 (*Hibiscus cannabinus* L.) 是锦葵科木槿属一年生韧皮纤维作物,其韧皮纤维柔软,拉力强,可用于织麻袋和绳索及造纸等。因红麻以收获韧皮纤维或茎秆为栽培目的,播种越早,产量越高。红麻属于短日照喜温作物,播种土温需达12℃,最适生

长温度为25℃,生长期温度越高,生长越快。红麻在春季播种,春季低温主要影响红麻出苗和生长。所以探索低温胁迫下红麻幼苗形态和光合特性的变化可为我国红麻的种植栽培和选育耐低温品种提供理论参考。

收稿日期: 2012-11-27

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-19); 广西研究生教育创新计划(GXU11T32559)

第一作者: 廖小芳, 博士研究生, E-mail: liaoxiaofang12@163.com

通讯作者: 周瑞阳, 教授, 主要从事棉麻作物遗传育种与栽培生理研究, E-mail: ruiyangzhou@yahoo.com.cn

关于红麻形态光合研究, Curtis 等<sup>[1]</sup>研究发现, 在中等盐度胁迫下红麻生长受到影响主要是由于盐胁迫缩小了红麻叶面积的扩展而非光合能力降低。Ashraf 等<sup>[2]</sup>研究在水分胁迫下不同的 2 个红麻栽培品种气体交换的变化特征, 表明水涝能显著降低红麻的净光合速率和水分利用效率, Hossain 等<sup>[3]</sup>研究了种植在沙地上不同红麻品种的生长、光合作用以及生物量的分配关系等。对于低温胁迫对红麻细胞质雄性不育系与保持系只研究了红麻越冬期和苗期耐冷性生理变化的差异<sup>[4-6]</sup>, 均认为低温胁迫条件下红麻不育系的耐冷性强于保持系, 而关于低温胁迫下红麻幼苗形态和光合特性变化的研究到目前为止尚未见报道。

本研究选用 7 对红麻不育系/保持系为材料, 在 12 °C/6 °C(昼/夜)持续低温胁迫 15 d, 测定其形态和光合参数的变化, 旨在探索红麻不同材料间持续低温胁迫下耐冷性的差异, 为进一步选育耐冷性红麻品种(系)提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究材料

供试材料为周瑞阳等<sup>[7]</sup>选育的 7 对红麻细胞质雄性不育系/保持系, 分别为: P3A/P3B、L23A/L23B、K03A/K03B、917A/917B、722A/722B、763A/763B 和 F3A/F3B, 其不育胞质均来源于红麻野生种 UG93 自然突变株, 同一对组配中其细胞核背景一致。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 材料处理

本研究于 2011 年 10 月在广西大学农学院农场试验地进行, 取上述供试材料的饱满种子, 每份 300 粒用 75% 的酒精杀菌 30 s, 常温浸种 2 h, 然后播到装有基质、蛭石和营养土比例为 1:1:2 的育苗杯中, 每个材料播种 10 个育苗杯, 发芽 1 周左右每个育苗杯保留生长健壮、长势一致的幼苗 5~6 株, 待其长到 7~8 片真叶后移至人工气候箱, 光照强度为 4 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 在人工模拟低温环境 12 °C/6 °C(昼/夜)下进行低温胁迫, 用于测定各项指标。

#### 1.2.2 形态指标的测定

在植株低温胁迫处理 0 和 15 d 时分别进行取材和测定。每个材料随机取样 5 株, 重复 3 次。采

用直尺自子叶节至顶部测量株高, 用游标卡尺测量苗高 1/2 处的茎粗, 用激光叶面积仪(CI-203, 美国)测量供试材料倒 4 和倒 5 功能叶片的叶面积。

#### 1.2.3 叶片光合相关参数的测定

叶片光合参数的测定采用便携式光合作用测定仪(Li-6400, 美国)于低温胁迫 0、5、10 和 15 d 时, 在上午 9:00—11:30 取供试材料倒 4 和倒 5 功能叶, 测量净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )并计算气孔限制值( $L_s$ ), 测定时叶室温度控制在(25±1) °C, 光辐射强度设为 500  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 大气中的  $\text{CO}_2$  浓度为(400±10)  $\mu\text{mol}/\text{L}$ ; 叶绿素含量的测定参照李合生的方法<sup>[8]</sup>, 每个材料随机取样测量 3 次。

#### 1.2.4 数据处理

数据处理用 EXCEL 2007 和 SPSS 18.0 统计软件, 方差分析用 Duncan 新复极差法, 主成分分析和隶属函数分析参照张力等<sup>[9-12]</sup>, 按以下公式计算相关参数:

1) 相对株高(RH) = (胁迫后株高 - 胁迫前株高) / 胁迫前株高;

2) 相对茎粗(RSD) = (胁迫后茎粗 - 胁迫前茎粗) / 胁迫前茎粗;

3) 相对叶面积(RLA) = (胁迫后叶面积 - 胁迫前叶面积) / 胁迫前叶面积;

4) 气孔限制值( $L_s$ ) =  $1 - C_i/C_a$ ;

5) 耐冷系数 = 处理测定值 / 对照测定值;

6) 综合指标隶属函数:  $U(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ ; ( $U(X_{ij})$  表示  $i$  种类  $j$  指标隶属值,  $X_{ij}$  表示  $i$  种类  $j$  综合指标值,  $X_{\max}$ ,  $X_{\min}$  分别表示该指标最大值和最小值)。

7) 各综合指标权重:  $W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j$ ; ( $W_j$  表示  $j$  个公因子在所有公因子的重要程度,  $P_j$  表示  $j$  个公因子的贡献率);

8) 耐冷力综合评价:  $D = \sum_{j=1}^n (U(X_{ij}) * W_j)$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 低温胁迫对红麻幼苗植株形态的影响

持续低温胁迫条件下红麻幼苗相对株高(RH)、相对茎粗(RSD)和相对叶面积(RLA)的变化是植物抵御低温冷害环境能力强弱的直观反映,

由表1可知,在12℃/6℃(昼/夜)持续低温胁迫15 d时,不同材料间相对平均株高的变化量差异显著,其中以K03A和K03B株高增加量变化最大,722A和722B的变化最小,K03A相对株高的增加量是722A的3.9倍。供试材料中相对茎粗的增加量以917A和917B组合的变化最大,其次是K03A和

K03B。持续低温胁迫各材料红麻叶面积相对变化量差异显著,在不育系与保持系的组合中722A和722B叶面积变化量最大,而917B相对叶面积的增加量最小,比较不育系和保持系材料相对茎粗和相对叶面积的变化量显示,不育系的增加量都高于保持系,但相对株高差异不显著。

表1 低温胁迫对红麻细胞质雄性不育系与保持系幼苗相对株高、相对茎粗和相对叶面积的影响

Table 1 Effects of relative height, stem diameter and leave area of CMS line and its maintainer in kenaf leaves under low temperature stress

材料 Material	形态指标 Morphology indexes		
	相对株高 RH	相对茎粗 RSD	相对叶面积 RLA
P3A	0.19±0.02 de	0.27±0.04 efg	0.18±0.03 cd
P3B	0.18±0.02 de	0.25±0.03 fg	0.19±0.09 bc
L23A	0.19±0.03 de	0.27±0.04 efg	0.18±0.03 cd
L23B	0.25±0.02 c	0.30±0.05 ef	0.23±0.02 ab
K03A	0.39±0.03 a	0.47±0.11 b	0.24±0.03 ab
K03B	0.31±0.03 b	0.40±0.06 c	0.18±0.05 cd
917A	0.29±0.03 b	0.61±0.08 a	0.23±0.05 ab
917B	0.18±0.02 de	0.49±0.04 b	0.01±0.01 f
722A	0.10±0.02 f	0.23±0.03 h	0.26±0.02 a
722B	0.16±0.03 e	0.32±0.05 de	0.22±0.01 abc
763A	0.18±0.03 de	0.40±0.06 c	0.09±0.01 e
763B	0.18±0.03 de	0.31±0.05 de	0.03±0.01 f
F3A	0.16±0.02 e	0.29±0.03 ef	0.14±0.03 d
F3B	0.20±0.02 d	0.37±0.05 cd	0.20±0.02 bc
A 平均值	0.21±0.03	0.36±0.06	0.19±0.50
B 平均值	0.21±0.02	0.31±0.05	0.15±0.30

注:同列小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),下表同。

Note: Different normal letters mean significant difference at 0.05 level. The same as the following tables.

## 2.2 低温胁迫对红麻幼苗生长期光合特性的影响

在持续12℃/6℃(昼/夜)低温胁迫15 d内,红麻幼苗叶片净光合速率( $P_n$ )变化如表2所示。可见低温胁迫15 d导致叶片净光合速率显著下降,但不同材料净光合速率的变化规律不同。P3A、P3B、722A和722B在胁迫5 d后净光合速率下降,胁迫10 d又升高,但胁迫15 d时又一次降低;其他材料

的净光合速率则随着低温胁迫时间的延长持续降低,其中917B和F3A的净光合速率变化幅度最小,而763A和K03A净光合速率变化量最大,分别为胁迫前的16%和30%。比较总体材料不育系和保持在持续低温胁迫5和10 d净光合速率下降程度均低于保持系,说明红麻幼苗在低温胁迫条件下不育系的耐低温能力高于保持系。

表2 持续低温胁迫下红麻细胞质不育系与保持系幼苗叶片净光合速率的变化

Table 2 Changes of net photosynthetic of CMS line and its maintainer in kenaf leaves under low temperature stress ( $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )

材料 Material	胁迫时间/d Stress days			
	0	5	10	15
P3A	12.60±0.62 bcd	7.03±2.54 b	8.51±0.73 abc	3.20±0.82 def
P3B	13.96±2.13 abcd	4.46±1.88 c	6.94±1.27 cd	3.32±0.32 def
L23A	12.44±0.44 bcd	10.03±0.25 a	4.79±0.35 de	3.61±0.72 cdef
L23B	12.47±0.86 bcd	9.67±0.94 a	3.36±0.13 e	2.56±0.72 ef
K03A	12.94±0.63 bcd	10.39±2.04 a	4.64±1.32 de	2.12±1.27 f
K03B	14.61±1.19 abc	11.16±0.94 a	6.16±1.55 cd	2.42±0.46 f
917A	12.21±1.10 cd	10.78±0.57 a	6.82±1.31 cd	4.17±1.60 cde
917B	14.89±1.46 bc	9.15±1.54 ab	8.23±0.88 abc	8.31±0.45 a
722A	11.68±0.68 d	8.93±1.30 ab	10.24±0.25 a	3.60±0.20 cdef
722B	12.22±1.40 cd	7.20±1.00 b	9.84±1.44 ab	4.62±2.01 bcd
763A	15.47±2.34 a	11.41±1.21 ab	9.71±1.06 ab	4.62±0.11 bcd
763B	13.53±1.98 a	11.02±0.45 bc	7.47±1.81 bc	5.09±0.69 bc
F3A	12.33±1.30 a	11.39±0.37 a	10.86±0.56 a	6.07±0.53 b
F3B	11.57±0.63 a	11.16±0.91 ab	9.88±0.41 ab	3.62±0.46 cdef
A 平均值	12.84±1.02	9.94±1.18	7.90±0.80	3.94±0.75
B 平均值	15.15±1.34	10.54±1.09	8.54±1.07	4.84±0.73

叶片内气孔导度( $G_s$ )的变化反映了碳源对植物的供应,在持续低温胁迫 15 d 内,除材料 L23A、L23B 和 K03B 的  $G_s$  随着低温胁迫时间的延长而持续降低外(表 3),大多数材料  $G_s$  的变化是呈先降低后升高再降低的双谷曲线变化趋势,其中以 917A、

K03B 变化差异较显著,分别比胁迫前降低了 92.42%、90.00% 和 86.84%,而 763A、F3A 变化最小。气孔导度的变化规律表明,持续低温胁迫对红麻幼苗叶片净光合速率降低的影响并不仅仅因为逆境胁迫下气孔关闭造成的,而与植物本身叶肉细胞

表3 持续低温胁迫下红麻不育系和保持系幼苗叶片气孔导度( $G_s$ )的变化Table 3 Changes of stomatal conductance of CMS line and its maintainer in kenaf leaves under low temperature stress ( $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )

材料 Material	胁迫时间/d Stress days			
	0	5	10	15
P3A	0.67±0.05 bcde	0.10±0.04 fg	0.31±0.11 gh	0.11±0.05 bc
P3B	0.61±0.09 cde	0.08±0.03 g	1.03±0.27 cd	0.08±0.02 bc
L23A	0.61±0.11 cde	0.52±0.12 a	0.17±0.03 h	0.07±0.03 c
L23B	0.66±0.18 bcde	0.34±0.09 bcd	0.15±0.03 h	0.05±0.23 c
K03A	0.69±0.05 bcde	0.39±0.06 b	0.84±0.07 de	0.12±0.02 bc
K03B	0.76±0.12 abc	0.38±0.04 b	0.34±0.02 gh	0.10±0.01 bc
917A	0.80±0.05 ab	0.35±0.04 bc	0.71±0.12 def	0.08±0.04 bc
917B	0.88±0.08 a	0.26±0.02 cde	1.21±0.19 c	0.27±0.08 b

续表

材料 Material	胁迫时间/d Stress days			
	0	5	10	15
722A	0.53±0.04 e	0.20±0.01 ef	2.02±0.28 b	0.10±0.01 bc
722B	0.56±0.09 de	0.16±0.38 efg	2.64±0.34 a	0.15±0.00 bc
763A	0.83±0.11 ab	0.21±0.05 e	0.43±0.30 fgh	0.57±0.03 a
763B	0.89±0.09 a	0.20±0.02 ef	0.26±0.03 gh	0.18±0.04 bc
F3A	0.77±0.10 abc	0.24±0.06 de	0.90±0.05 cde	0.55±0.08 a
F3B	0.72±0.15 abcd	0.19±0.02 ef	0.59±0.21 efg	0.26±0.34 b
A 平均值	0.70±0.09	0.29±0.05	0.77±0.14	0.23±0.04
B 平均值	0.72±0.11	0.28±0.07	0.89±0.16	0.16±0.10

光合活性的变化有着密切的关系。

利用公式(4)计算气孔限制值( $L_s$ )可知,低温胁迫 5 d 气孔限制值上升,而胁迫 10 d,除 P3A、L23A、L23B、917A 和 763A 外,其他材料  $L_s$  迅速降低,其中以 763B、722A 和 722B 降低的幅度最大,与胁迫前相比分别降低了 88.89%、81.82%和 83.33%,但在胁迫 15 d 后,气孔限制值又恢复到胁迫前的水

平,表明胁迫初期气孔因素影响了红麻幼苗叶片的生长,而在低温胁迫后期气孔因素的作用减弱。

综合比较持续低温胁迫条件下红麻细胞质雄性不育系和保持系幼苗叶片光合作用相关参数变化的平均值可知,不育系的净光合速率( $P_n$ )和气孔导度( $G_s$ )变化均低于保持系;而两种胞质类型材料的气孔限制值( $L_s$ )变化差异不显著。

表 4 持续低温胁迫下红麻细胞质雄性不育系和保持系叶片气孔限制值( $L_s$ )的变化

Table 4 Changes of stomatal limitation of CMS line and its maintainer in kenaf leaves under low temperature stress

材料 Material	胁迫时间/d Stress days			
	0	5	10	15
P3A	0.11±0.02 ab	0.32±0.04 d	0.15±0.01 b	0.14±0.01 fgh
P3B	0.12±0.01 a	0.33±0.03 d	0.04±0.02 de	0.20±0.01 bcd
L23A	0.11±0.05 ab	0.11±0.01 h	0.14±0.04 b	0.26±0.03 a
L23B	0.09±0.01 cd	0.16±0.02 g	0.16±0.05 b	0.23±0.03 ab
K03A	0.10±0.01 bc	0.17±0.02 g	0.03±0.02 de	0.17±0.03 cdef
K03B	0.10±0.01 ab	0.17±0.02 g	0.07±0.01 c	0.14±0.06 efgh
917A	0.09±0.00 de	0.18±0.01 fg	0.20±0.01 a	0.19±0.03 cde
917B	0.09±0.01 de	0.22±0.08 e	0.05±0.02 cd	0.17±0.07 cdef
722A	0.11±0.02 ab	0.40±0.03 a	0.03±0.01 de	0.16±0.05 defg
722B	0.12±0.01 a	0.38±0.03 ab	0.02±0.01 de	0.21±0.03 bc
763A	0.11±0.01 ab	0.37±0.03 bc	0.13±0.07 b	0.08±0.04 i
763B	0.09±0.01 de	0.20±0.03 ef	0.01±0.00 e	0.11±0.05 hi
F3A	0.08±0.01 f	0.34±0.09 cd	0.03±0.02 de	0.11±0.01 ghi
F3B	0.09±0.00 de	0.31±0.03 d	0.05±0.00 cd	0.16±0.06 defg
A 平均值	0.10±0.02	0.27±0.03	0.10±0.03	0.16±0.04
B 平均值	0.10±0.01	0.25±0.03	0.06±0.02	0.17±0.04

### 2.3 低温胁迫对红麻幼苗叶绿素含量的影响

持续低温胁迫条件下,除 722A/B、F3A/B 叶绿素总含量变化差异不显著外(表 5),其他材料叶绿素总含量持续降低,其中 P3B、K03A/B 以及 763A 的叶绿素含量在低温胁迫 5 d 时达到最小值,分别是胁迫前的 50%、50% 和 46%,而 L23A/B 和 917A/B 则在低温胁迫 15 d 时叶绿素含量达最低

值,722A/B 和 F3A/B 在整个低温胁迫过程中总叶绿素含量变化不大。持续低温胁迫条件下,Chl a/Chl b 差异显著,呈先升高后降低的变化趋势(表 5),当胁迫 10 d 时 Chl a/Chl b 达到了最大值,其中 L23A 和 763B 的比值变化量最大;在低温胁迫 15 d 时 Chl a/Chl b 变小,除 763B 外,其他材料叶绿素 a/b 均比低温处理前大。

表 5 持续低温胁迫下红麻叶片总叶绿素和 Chl a/Chl b 变化

Table 5 Changes of total chlorophyll and Chl a/Chl b in kenaf leaves under low temperature stress

材料 Material	胁迫时间/d Stress days							
	总叶绿素含量/(mg/g) Total chlorophyll				Chl a/Chl b			
	0	5	10	15	0	5	10	15
P3A	2.11 h	2.19 ef	1.97 defg	1.26 fg	2.48 abc	2.67 cdefg	3.41 a	3.06 a
P3B	3.03 bcd	1.66 h	1.76 fg	2.06 de	1.98 bc	2.70 bcdef	3.23 a	2.72 ab
L23A	1.56 i	1.81 gh	1.60 gh	0.75 h	2.03 abc	2.39 fg	4.14 a	1.99 e
L23B	2.90 def	2.40 de	2.20 cde	0.84 gh	2.32 abc	2.34 g	2.71 a	2.16 de
K03A	2.87 def	1.32 i	1.81 efg	2.08 cde	2.47 abc	2.49 efg	3.42 a	2.68 ab
K03B	3.39 a	1.56 hi	1.99 defg	2.25 bcd	2.56 a	2.75 bcde	3.08 a	2.36 bcde
917A	3.21 abc	3.05 a	3.20 a	2.97 a	2.26 abc	2.96 abc	3.16 a	2.63 bc
917B	3.00 cde	2.59 cd	2.53 bc	1.69 ef	1.95 c	2.85 abcd	3.32 a	2.22 cde
722A	3.28 ab	2.93 ab	2.24 cd	2.59 abc	2.18 abc	3.13 a	3.33 a	2.34 bcde
722B	2.91 def	2.05 fg	2.34 cd	2.39 bcd	2.09 abc	3.03 ab	3.18 a	2.48 bcd
763A	2.98 cde	2.71 bc	1.31 h	2.71 ab	2.34 abc	2.57 defg	3.24 a	2.57 bcd
763B	2.65 fg	2.15 ef	2.75 b	1.42 f	2.22 abc	2.59 defg	2.82 a	1.94 e
F3A	2.59 g	2.66 cd	2.05 def	2.17 cde	2.46 abc	2.98 abc	3.65 a	2.34 bcde
F3B	2.73 efg	2.62 cd	2.31 cd	2.36 bcd	2.51 ab	2.84 abcd	3.60 a	2.45 bcd
A 平均值	2.66	2.39	2.03	2.08	2.32	2.74	3.48	2.52
B 平均值	2.94	2.15	2.27	1.86	2.23	2.73	3.13	2.33

### 2.4 红麻幼苗耐冷性的综合分析

不同红麻幼苗材料间各指标变化幅度不尽相同,不能用单项指标的耐冷性来评价红麻不育系与保持系间耐冷性的强弱,利用主成分分析法将所测定的 8 项指标进行综合分析,输出特征向量值较大的前 4 个综合指标,其累计贡献率已达到 88.31%。则其他的综合指标可忽略不计,将 8 个单项指标转换成 4 个新的相互独立的综合指标,分别定义为第 1 至第 4 主成分,其所对应的特征向量表达式如下:

$$C_1 = 0.54 * X_1 + 0.77 * X_2 + 0.47 * X_3 + 0.66 * X_4 - 0.81 * X_5 - 0.34 * X_6 + 0.13 * X_7 + 0.68 * X_8$$

$$C_2 = 0.66 * X_1 + 0.04 * X_2 + 0.82 * X_3 - 0.21 * X_4 + 0.2 * X_5 + 0.76 * X_6 - 0.24 * X_7 - 0.28 * X_8$$

$$C_3 = -0.25 * X_1 + 0.22 * X_2 + 0.17 * X_3 + 0.04 * X_4 + 0.51 * X_5 + 0.31 * X_6 + 0.89 * X_7 + 0.39 * X_8$$

$$C_4 = -0.36 * X_1 + 0.208 * X_2 - 0.1 * X_3 + 0.68 * X_4 + 0.11 * X_5 + 0.42 * X_6 - 0.32 * X_7 - 0.14 * X_8$$

注:  $X_1 \sim X_8$  分别为所测定的 9 个单项指标,依次为:  $P_n$ 、 $G_s$ 、Chl(a+b)、Chl a/Chl b、RH、RSD、RLA 和  $L_s$ 。

将各指标的耐冷系数带入4个主成分分析表达式通过隶属函数综合分析红麻细胞质雄性不育系和保持系耐冷性的强弱。由表6可知,红麻细胞质雄性不育系/保持系耐冷性较强的组配是F3A/B, 917A/B和722A/B,其对应的不育系和保持系的耐冷性也最强。单独比较单对不育系和保持系耐冷性

的强弱,除了P3A和L23A以外,其他材料不育系的耐冷性均强于保持系。分析各主成分各表达式系数可知,表达式 $C_1$ 中系数较大的项数分别代表 $P_n$ ,  $G_s$ 、Chl a/b和 $L_s$ 。可将这些概括为光合特性指标。而在主成分 $C_3$ 表达式中系数较大的项数分别代表RH、RLA。可将这些概括为形态指标。

表6 隶属函数法评价红麻幼苗细胞质雄性不育系与保持系耐冷性差异

Table 6 Difference on cold resistance of CMS line and its maintainer in kenaf leaves by subordinate function value

材料 Material	综合指标值 Comprehensive index				隶属函数值 Subordinate function value				D值	排序	A+B 排序
	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$			
P3A	3.58	1.88	1.47	0.28	0.26	0.24	0.33	0.25	0.26	12	
P3B	3.83	1.86	1.49	0.56	0.37	0.23	0.35	0.85	0.39	7	
L23A	3.18	1.36	1.31	0.59	0.07	0.00	0.16	0.92	0.18	10	7
L23B	3.44	1.85	1.62	0.16	0.19	0.22	0.49	0.01	0.24	13	
K03A	3.04	2.15	1.50	0.53	0.01	0.36	0.36	0.78	0.28	9	6
K03B	3.02	2.32	1.38	0.35	0.00	0.43	0.24	0.40	0.22	11	
917A	4.69	3.58	2.11	0.26	0.76	1.00	1.00	0.21	0.80	2	2
917B	4.27	2.72	1.53	0.63	0.57	0.61	0.39	1.00	0.60	4	
722A	5.21	2.86	1.86	0.42	1.00	0.68	0.74	0.55	0.80	3	1
722B	5.10	2.54	1.87	0.63	0.95	0.53	0.75	1.01	0.80	1	
763A	3.89	2.59	1.51	0.33	0.40	0.55	0.37	0.36	0.43	8	5
763B	3.27	2.51	1.15	0.27	0.12	0.52	0.00	0.24	0.22	14	
F3A	4.54	2.60	1.65	0.19	0.70	0.56	0.52	0.07	0.54	5	3
F3B	4.29	2.79	1.71	0.16	0.58	0.64	0.58	0.00	0.52	6	
贡献率	0.35	0.24	0.18	0.12							
权重						0.39	0.27	0.20	0.13		

### 3 讨论

#### 3.1 低温胁迫对红麻幼苗植株形态的影响

低温胁迫对红麻幼苗的影响大多数表现在植株的外部形态<sup>[13-15]</sup>和净光合能力的变化<sup>[16-17]</sup>。王孝宣等<sup>[18]</sup>研究表明,低于12℃时,番茄生长受到抑制,株高、叶长和叶宽的生长速度减慢。本研究结果表明,在12℃/6℃(昼/夜)持续低温胁迫下,红麻幼苗植株生长缓慢,净光合( $P_n$ )能力降低。本研究不论是从植株形态的变化和净光合能力下降程度不育系耐低温能力都强于保持系,说明红麻野生种UG93自然突变株的细胞质耐冷性强于其他细胞质类型,从P3A、P3B、722A和722B的 $P_n$ 在低温胁迫期间变化规律说明,植物受低温胁迫的影响不仅与

植物叶片本身相关,还与低温胁迫时间长短有关<sup>[19]</sup>;低温初期对红麻幼苗 $P_n$ 产生了不利影响,随着低温胁迫时间的延长产生了逆境诱导作用,幼苗 $P_n$ 升高,但随着处理时间的延长,低温逆境再次对光合作用产生抑制,幼苗 $P_n$ 降低。

#### 3.2 低温胁迫对红麻幼苗光合特性的影响

低温引起净光合速率降低可分为2个方面:第一,通过植物体内生理过程间接影响光合作用,如降低水分利用效率,增加气孔扩散阻力和气孔限制值等;第二,影响光合细胞的活性和结构,如叶绿体亚显微结构<sup>[20]</sup>,叶绿素及叶绿素a/b变化等<sup>[21]</sup>。刘慧英等<sup>[22]</sup>认为低温胁迫使植物叶绿体结构遭到破坏,叶绿素含量下降。本研究中,低温胁迫前期(5~10 d)红麻幼苗叶片Chl a/Chl b增大,一般认

为 Chl a/Chl b 增大有利于维持较大比例的中心色素,有利于光合作用中心对光能的即时转换,避免形成过剩光能和造成光氧化破坏<sup>[23-24]</sup>,这是植物适应低温弱光并增强抗逆性的表现。比较所有不育系与保持系 Chl a/Chl b 显示,不育系的 Chl a/Chl b 大于保持系,表明不育系耐低温能力高于保持系,从光合生理角度验证了 UG93 自然突变株的细胞质耐冷性较强。

气孔导度( $G_s$ )和气孔限制值( $L_s$ )的变化可作为净光合速率降低的判断依据<sup>[25]</sup>。本研究中, $G_s$ 和 $L_s$ 两者具有相反的变化趋势,表明 $G_s$ 降低和 $L_s$ 升高降低了叶肉细胞中 $CO_2$ 的含量,是气孔因素造成光合速率降低;而胁迫后期 $G_s$ 增高和 $L_s$ 降低则是受非气孔因素影响<sup>[26]</sup>。不论是从植株形态还是光合相关参数的变化,不育系的耐冷力均强于保持系,究其原因需要从红麻幼苗叶肉细胞超微结构的变化或是分子蛋白质水平进行研究。

### 3.3 隶属函数法综合评价红麻幼苗耐冷性

利用主成分分析和模糊隶属函数相结合的方法对供试材料进行耐冷性分析得出:同种组配中红麻不育系的耐冷性高于保持系,说明来源于红麻野生种 UG93 自然突变株细胞质耐冷性强于保持系,而不同的材料间耐冷性差异较大,则是由于红麻幼苗是通过核质互作的相互关系来抵御低温冷害。本研究中也筛选得到了耐冷性较强的 3 组材料分别为 F3A/B、917A/B 和 722A/B,这为今后红麻越冬栽培和为多年生育种种质创新提供了理论参考依据。

## 参 考 文 献

- [1] Curtis P S, Lauchli A. The role of leaf area development and photosynthetic capacity in determining growth of kenaf under moderate salt stress[J]. Aust J Plant Physiol, 1986, 13: 553-565
- [2] Ashraf M, Arfan M. Gas exchange characteristics and water relations in two cultivars of *Hibiscus esulentus* under waterlogging[J]. Biologia Plantarum, 2005, 49(3): 459-462
- [3] Hossain M D, Hauge M M, et al. Growth, photosynthesis and biomass allocation of different kenaf (*Hibiscus camabinus* L.) accessions grown on sandy soil[J]. Australian Journal of Crop Science, 2012, 6(3): 480-487
- [4] 黄其椿. 红麻雄性不育系与保持系抗寒性鉴定与越冬栽培研究[D]. 南宁: 广西大学, 2009
- [5] 周琼, 李正文, 周瑞阳. 红麻雄性不育系、保持系及杂交 F<sub>1</sub> 代越冬期间抗寒性的比较研究[J]. 热带作物学报, 2011, 32(1): 79-82
- [6] 廖小芳, 周步进, 杨健, 等. 红麻细胞质雄性不育系与保持系苗期耐冷生理研究[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(3): 49-56
- [7] 周瑞阳. 麻雄性不育株的发现[J]. 中国农业科学, 2002, 35(2): 212
- [8] 李合生. 植物生理生化实验原理和测定技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 165-258
- [9] 张力. SPSS 13.0 在生物统计中的应用[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 159-164
- [10] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2000: 162-194
- [11] 白志英, 李存东, 孙红春, 等. 小麦代换系抗旱生理指标的主成分分析及综合评价[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4264-4272
- [12] 周联东, 张学舜, 刘俊恒, 等. 利用隶属函数综合评价玉米杂交种[J]. 作物杂志, 2004(5): 18-19
- [13] 刘颖. 低温胁迫下白三叶不同品种形态和生理适应性研究[D]. 沈阳: 东北农业大学, 2008
- [14] 曹克友. 低温弱光对辣椒(*Capsicum annuum* L.)“三系”形态和生理生化影响的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008
- [15] 段曦, 魏佑营, 曹克友, 等. 低温弱光对 CMS 三系辣椒幼苗形态指标与冷害指数的影响[J]. 山东农业科学, 2012, 44(3): 33-35
- [16] 徐刚, 刘涛, 高文瑞, 等. ALA 对低温胁迫下辣椒植株生长及光合特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(3): 612-616
- [17] 杨盛昌, 林鹏, 中须贺常雄. 5℃ 夜间低温对红树幼苗光合速率和蒸腾速率的影响[J]. 植物研究, 2001, 21(4): 587-591
- [18] 王孝宣, 李树德, 东惠茹, 等. 低温胁迫对番茄苗期和花期若干性状的影响[J]. 园艺学报, 1996, 23(4): 349-354
- [19] 张红梅, 余纪柱, 金海军. 低温弱光对黄瓜植株生长、光合特性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(3): 339-342
- [20] Ai Xizhen, Guo Yankui, Ma Xingzhuang, et al. Photosynthetic characteristics and ultrastructure of chloroplast of cucumber under low light intensity in solar greenhouse [J]. Agri Sci China, 2004, 3(2): 129-135
- [21] 郁继华, 舒英杰, 吕军芬, 等. 低温弱光对茄子幼苗光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2004, 24(5): 831-836
- [22] 刘慧英, 朱祝军, 吕国华, 等. 低温胁迫下西瓜嫁接苗的生理变化与耐冷性关系的研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(11): 1325-1329
- [23] 颀建明, 颀敏华, 郁继华, 等. 低温弱光下辣椒叶片光合色素的变化及与品种耐性的关系[J]. 中国蔬菜, 2008(4): 12-16
- [24] 陈启林, 山仑, 程智慧. 低温下光照对黄瓜叶片光合特性的影响[J]. 中国农业科学, 2001, 34(6): 632-636
- [25] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. 植物生理学通讯, 1997, 33(4): 241-244
- [26] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002: 84-98

责任编辑: 袁文业