

# 不同橡胶树品种耐寒性指标比较及综合评价

原慧芳, 谢江, 周会平, 陈国云, 田耀华<sup>①</sup>

(云南省热带作物科学研究所, 云南 景洪 666100)

**摘要:** 在人工模拟的寒害条件下,对寒害胁迫0、1、2和3 d以及恢复培养1、2、3 d及2个月晴冷型(昼温约25℃、夜温6℃,全自然光)和阴冷型(昼温约25℃、夜温6℃,遮光率50%)寒害处理组橡胶树[*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg.]品种‘RRIM600’、‘云研73-46’(‘Yunyan 73-46’)、‘PR107’和‘93-114’叶片的耐寒性指标(包括光合气体交换参数和部分生理生化指标)进行了比较;在此基础上,对所有耐寒性指标进行了主成分分析,并对各品种的耐寒性进行了综合评价。结果表明:总体来看,寒害胁迫3 d和恢复培养3 d,4个品种的净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)和气孔导度(Gs)显著低于寒害胁迫前(寒害胁迫0 d)水平,而胞间CO<sub>2</sub>浓度(Ci)在寒害胁迫3 d显著高于寒害胁迫前水平并在恢复培养3 d恢复至寒害胁迫前水平;恢复培养2个月,4个品种的Pn、Tr和Gs值恢复至寒害胁迫前水平,而Ci值则高于或显著高于寒害胁迫前水平。4个品种的丙二醛(MDA)含量在寒害胁迫3 d高于寒害胁迫前水平;品种‘RRIM600’和‘云研73-46’的MDA含量在恢复培养3 d显著高于寒害胁迫前水平、在恢复培养2个月恢复至寒害胁迫前水平,而品种‘PR107’和‘93-114’的MDA含量却在恢复培养3 d和2个月显著低于寒害胁迫前水平。寒害胁迫3 d及恢复培养3 d和2个月,4个品种的质膜相对透性显著高于寒害胁迫前水平。实验期间,4个品种的可溶性糖、蔗糖、脯氨酸和可溶性蛋白质含量呈波动变化。主成分分析结果表明:前3个主成分的特征值均大于1,累计贡献率为71.30%,说明这3个主成分可反映橡胶树所有指标的绝大部分信息。根据综合得分,在晴冷型寒害胁迫条件下,品种‘RRIM600’的耐寒性最强、品种‘PR107’的耐寒性最弱,而在阴冷型寒害胁迫条件下恰好相反。研究结果显示在实际生产中应根据各橡胶树品种的耐寒性选择合适种植地。

**关键词:** 橡胶树; 寒害; 光合气体交换参数; 生理生化指标; 耐寒性; 综合评价

中图分类号: Q945.78; S794.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2018)04-0072-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2018.04.08

**Comparison on cold tolerance indexes of different cultivars of *Hevea brasiliensis* and comprehensive evaluation** YUAN Huifang, XIE Jiang, ZHOU Huiping, CHEN Guoyun, TIAN Yaohua<sup>①</sup> (Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong 666100, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2018, 27(4): 72-80

**Abstract:** Under artificial simulated chilling stress condition, leaf cold tolerance indexes (including photosynthetic gas exchange parameters and some physiological and biochemical indexes) of cultivar ‘RRIM600’, ‘Yunyan 73-46’, ‘PR107’, and ‘93-114’ of *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg. in sunny chilling injury (day temperature of about 25℃, night temperature of 6℃, and fully natural light) and cloudy chilling injury (day temperature of about 25℃, night temperature of 6℃, and shading rate of 50%) treatment groups under chilling stress for 0, 1, 2, and 3 d, and recovery culturing for 1, 2, 3 d, and 2 months were compared. On the basis, principal component analysis on all cold tolerance indexes was conducted, and cold tolerance of each cultivar was evaluated comprehensively. The results show that in general, net photosynthetic rate (Pn), transpiration rate (Tr), and stomatal conductance (Gs) of 4 cultivars under chilling stress for 3 d and recovery culturing for 3 d are significantly lower than the levels before chilling stress (chilling stress for 0 d), while intercellular CO<sub>2</sub>

收稿日期: 2017-12-08

基金项目: 云南省热带作物科技创新体系(RF2017-3); 云岭产业技术领军人才(386-1); 云南天然橡胶产业技术体系(2017KJTX008-03)

作者简介: 原慧芳(1978—),女,山西安泽人,硕士,副研究员,主要从事热带作物生理生态研究。

<sup>①</sup>通信作者 E-mail: tyhyhf@126.com

concentration (Ci) under chilling stress for 3 d is significantly higher than the level before chilling stress and restores to the level before chilling stress under recovery culturing for 3 d. Under recovery culturing for 2 months, Pn, Tr, and Gs values of 4 cultivars all restore to the levels before chilling stress, while Ci value is higher or significantly higher than the level before chilling stress. Malondialdehyde (MDA) content of 4 cultivars under chilling stress for 3 d is higher than the level before chilling stress; MDA content of cultivar 'RRIM600' and 'Yunyan 73-46' under recovery culturing for 3 d is significantly higher than the level before chilling stress, and restores to the level before chilling stress under recovery culturing for 2 months, but that of cultivar 'PR107' and '93-114' under recovery culturing for 3 d and 2 months is significantly lower than the level before chilling stress. Under chilling stress for 3 d and recovery culturing for 3 d and 2 months, relative permeability of plasma membrane of 4 cultivars is significantly higher than the level before chilling stress. During the experimental period, contents of soluble sugar, sucrose, proline, and soluble protein of 4 cultivars show a fluctuation change. Principal component analysis results show that eigenvalues of the first three principal components are all greater than 1, and their cumulative contribution rate is 71.30%, indicating that the first three principal components can reflect most informations of all indexes of *H. brasiliensis*. According to comprehensive score, under sunny chilling injury stress condition, cold tolerance of cultivar 'RRIM600' is the strongest, and that of cultivar 'PR107' is the weakest, while it is opposite under cloudy chilling injury stress condition. It is suggested that suitable planting site should be chosen according to cold tolerance of each cultivar of *H. brasiliensis* in actual production.

**Key words:** *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg.; chilling injury; photosynthetic gas exchange parameter; physiological and biochemical index; cold tolerance; comprehensive evaluation

橡胶树 [*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg.] 隶属于大戟科 (Euphobiaceae) 橡胶树属 (*Hevea* Aubl.), 为高大乔木, 原产于南美洲亚马逊河流域 (北纬 5° 至南纬 15°、西经 48° 至 78°), 主要产自巴西、秘鲁、哥伦比亚、委内瑞拉和圭亚那等国<sup>[1]</sup>, 目前已经在中国北纬 17° 以北地区成功栽培。

寒害是制约中国橡胶树种植业的主要瓶颈<sup>[2-6]</sup>。受季风气候影响, 中国橡胶树种植区在冬季和春季常遭遇夜间低温寒害, 致使橡胶树出现霜冻、非正常落叶、枝条枯死、爆皮流胶, 甚至整株死亡等现象, 最终导致橡胶树生育期滞后, 橡胶产量下降<sup>[7-8]</sup>, 因此, 掌握橡胶树各品种的耐寒性对于因地制宜种植橡胶树及减少橡胶树寒害具有重要意义。

西双版纳是中国橡胶树的主要种植区之一。作者在人工模拟的晴冷型和阴冷型寒害胁迫条件下, 对寒害胁迫 1、2 和 3 d 以及恢复培养 1、2 和 3 d 及 2 个月后橡胶树品种 'RRIM600'、'云研 73-46' ('Yunyan 73-46')、'PR107' 和 '93-114' 叶片的光合气体交换参数和部分生理生化指标进行了比较, 据此对各指标进行了主成分分析, 并对各品种的耐寒性进行了综合评价, 以期系统比较晴冷型和阴冷型寒害胁迫条件下橡胶树各品种的耐寒性及其经寒害胁迫后的恢复能力, 从而为橡胶树实际生产中合理规划种植品种及加速耐寒品种选育等提供基础资料。

## 1 研究地概况和研究方法

### 1.1 研究地概况

研究地位于西双版纳州云南省热带作物科学研究所试验基地 (北纬 22°00'49"、东经 100°45'51"), 海拔约 570 m, 属于北热带西南季风气候, 有明显的干季 (11 月至翌年 4 月) 和雨季 (5 月至 10 月), 年均温 21.5 °C, 年均空气相对湿度 85%,  $\geq 10$  °C 年积温 8 100.4 °C, 年均蒸发量 1 310.6 mm, 年均降水量 1 161.8 mm<sup>[9]</sup>。

### 1.2 研究材料

于 2012 年 7 月, 选择橡胶树品种 'RRIM600'、'云研 73-46'、'PR107' 和 '93-114' 大小相近的嫁接苗 (2011 年 7 月无性系嫁接), 移栽到高 50 cm、直径 40 cm 的土陶盆内, 每盆 1 株。栽培基质为砖红壤和有机肥的混合基质, 每盆含 18 kg 砖红壤和 500 g 有机肥, 并施入 50 g 复混肥。砖红壤中有机质、全氮、全磷和全钾含量分别为 16.57、1.06、0.31 和 8.90 g · kg<sup>-1</sup>, 速效氮、速效磷和速效钾含量分别为 78.00、14.12 和 113.00 mg · kg<sup>-1</sup>, pH 4.26; 有机肥的总养分含量大于等于 7%, 有机质含量大于等于 40%; 复混肥的总养分含量为 37%,  $m(N) : m(P_2O_5) : m(K_2O) : m(MgO) = 15 : 10 : 12 : 2$ 。

### 1.3 研究方法

1.3.1 寒害处理及恢复培养方法 每个品种选取生长基本一致的样株20株,平均分成2组,每组10株,分别为晴冷型寒害处理组和阴冷型寒害处理组。采取完全随机区组设计,于2013年1月4日开始寒害处理,其中,晴冷型寒害处理条件为昼温约25℃、夜温6℃,全自然光;阴冷型寒害处理条件为昼温约25℃、夜温6℃,遮光率50%,每个处理组的样株均寒害处理3d。寒害处理期间,每日19:00将各处理组样株均移到6℃黑暗冷库中,翌日7:00将晴冷型寒害处理组样株移到全自然光环境中,将阴冷型寒害处理组样株移到覆1层遮阳网的全自然光环境(遮光率50%)中。寒害处理结束后正常培养(即恢复培养)2个月,整个实验期间采取统一水肥管理。

1.3.2 光合气体交换参数测定 利用LI-6400 XT光合作用测定系统(美国LI-COR公司)在寒害胁迫0(寒害胁迫前)、1、2和3d以及恢复培养1、2和3d及2个月的8:30至11:30,在每株样株上选取第2或第3蓬向阳面生长良好的叶片3枚,标记并测定叶片的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )和胞间 $CO_2$ 浓度( $C_i$ ),每枚叶片重复检测3次。测定时,叶室温度25℃,空气相对湿度65%~70%,空气流速 $500 \mu mol \cdot s^{-1}$ , $CO_2$ 浓度 $400 \mu mol \cdot mol^{-1}$ ,光合有效辐射 $1500 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。

1.3.3 生理生化指标测定 每个处理组随机选取样株3株,收集每株标记的3枚叶片及同方向生长良好的叶片,单株叶片混匀。用蒸馏水洗净叶片并吸干表面水分,置于-80℃冰箱中保存、备用。采用硫代巴比妥酸法<sup>[10]280</sup>测定丙二醛含量;采用磺基水杨酸法<sup>[11]258-259</sup>测定脯氨酸含量;采用蒽酮比色法<sup>[11]127-129</sup>测定可溶性糖和蔗糖含量;采用考马斯亮蓝染色法<sup>[10]190-192</sup>测定可溶性蛋白质含量;参照陈建勋等<sup>[12]</sup>的方法,使用上海雷磁DDS-6700电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司)测定质膜相对透性。

### 1.4 数据处理及统计分析

采用SPSS 19.0统计分析软件对数据进行统计和分析,采用方差分析(ANOVA)法进行显著性检验,并采用Duncan's新复极差法进行多重比较( $P < 0.05$ )。基于各指标检测结果进行主成分分析,在此基础上对晴冷型和阴冷型寒害胁迫条件下橡胶树各品种的耐寒性进行综合评价<sup>[13-14]</sup>。

## 2 结果和分析

### 2.1 橡胶树各品种叶片光合气体交换参数的比较

寒害胁迫及恢复培养期间橡胶树各品种叶片光合气体交换参数的比较见表1。由表1可见:在寒害胁迫期间,晴冷型和阴冷型寒害处理组4个品种的净

表1 寒害胁迫及恢复培养期间橡胶树各品种叶片光合气体交换参数的比较( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Comparison on photosynthetic gas exchange parameters of leaf of each cultivar of *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg. during chilling injury stress and recovery culturing periods ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

时间 <sup>2)</sup> Time <sup>2)</sup>	净光合速率/( $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ) Net photosynthetic rate				蒸腾速率/( $mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ) Transpiration rate			
	RRIM600	云研 73-46 Yunyan 73-46	PR107	93-114	RRIM600	云研 73-46 Yunyan 73-46	PR107	93-114
晴冷型寒害处理组 Sunny chilling injury treatment group								
C <sub>0</sub>	5.87±1.16aA	5.68±0.66aA	5.23±0.70aA	5.34±0.63aA	1.71±0.42aA	1.28±0.13aA	1.39±0.21aA	2.14±0.40aA
C <sub>1</sub>	1.22±0.37aB	1.30±0.54aBC	0.79±0.38aCD	1.57±0.24aCD	0.33±0.07aB	0.41±0.10aCD	0.39±0.04aBC	0.42±0.03aCD
C <sub>2</sub>	1.39±0.33aB	0.67±0.19aBC	0.60±0.27bCD	1.00±0.06abDE	0.34±0.04aB	0.29±0.04aD	0.38±0.05aBC	0.41±0.03aCD
C <sub>3</sub>	0.86±0.30aB	0.57±0.12aBC	0.24±0.09bD	0.39±0.11abE	0.44±0.06aB	0.44±0.03aCD	0.27±0.04bC	0.27±0.03bD
R <sub>1</sub>	2.15±0.27aB	1.82±0.46aBC	1.59±0.25aBCD	2.37±0.45aC	0.59±0.04aB	0.60±0.07aBC	0.51±0.08aBC	0.63±0.08aCD
R <sub>2</sub>	1.27±0.37cB	2.02±0.26bcB	2.82±0.45bB	4.01±0.31aB	0.49±0.07bB	0.73±0.08abB	0.72±0.11abB	0.98±0.12aBC
R <sub>3</sub>	2.21±0.45aB	2.24±0.32aB	1.96±0.21aBC	2.43±0.29aC	0.63±0.10aB	0.75±0.07aB	0.65±0.06aB	0.92±0.15aBC
R	5.97±0.17aA	4.84±0.10aA	4.68±1.30aA	4.56±0.62aAB	1.90±0.33aA	1.32±0.13aA	1.11±0.24aA	1.37±0.20aB
阴冷型寒害处理组 Cloudy chilling injury treatment group								
C <sub>0</sub>	6.41±0.54aA	5.59±0.51abA	4.21±0.73bA	5.07±1.18abA	1.52±0.27aA	1.71±0.32aA	1.28±0.15aA	1.44±0.29aA
C <sub>1</sub>	0.72±0.29aC	1.06±0.30aCDE	0.66±0.18aD	1.12±0.35aBC	0.25±0.04bC	0.40±0.06aC	0.33±0.04abB	0.42±0.04aB
C <sub>2</sub>	0.39±0.08aC	0.54±0.14aE	0.66±0.19aD	0.81±0.21aBC	0.23±0.03bC	0.28±0.02bC	0.32±0.03abB	0.41±0.04aB
C <sub>3</sub>	1.30±0.12aC	0.66±0.28bDE	0.12±0.02bD	0.36±0.18bC	0.41±0.02aBC	0.38±0.05aC	0.23±0.01bB	0.37±0.05aB
R <sub>1</sub>	2.70±0.31aB	1.89±0.33abBCD	1.19±0.29bCD	1.56±0.31bBC	0.59±0.04aB	0.60±0.08aBC	0.39±0.04bB	0.48±0.06abB
R <sub>2</sub>	2.45±0.47aB	2.25±0.56aBC	2.33±0.45aBC	2.23±0.49aB	0.67±0.08aB	0.81±0.19aBC	0.54±0.06aB	0.67±0.09aB
R <sub>3</sub>	2.65±0.28aB	2.83±0.47aB	2.53±0.32aB	2.47±0.41aB	0.69±0.06abB	1.01±0.20aB	0.55±0.05bB	0.68±0.09abB
R	6.82±0.95aA	5.71±0.46aA	4.68±0.65aA	6.07±0.82aA	1.57±0.30aA	1.72±0.22aA	1.57±0.63aA	1.48±0.24aA

续表1 Table 1 (Continued)

时间 <sup>2)</sup> Time <sup>2)</sup>	气孔导度/( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) Stomatal conductance				胞间 CO <sub>2</sub> 浓度/( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) Intercellular CO <sub>2</sub> concentration			
	RRIM600	云研 73-46 Yunyan 73-46	PR107	93-114	RRIM600	云研 73-46 Yunyan 73-46	PR107	93-114
晴冷型寒害处理组 Sunny chilling injury treatment group								
C <sub>0</sub>	82.85±26.08aB	115.45±25.69aA	60.43±9.99aB	95.97±20.73aA	221.49±22.45bC	273.61±14.71aABC	206.76±7.94bD	251.32±10.60abBC
C <sub>1</sub>	16.54±2.58aC	23.72±7.47aB	17.63±2.44aC	19.82±1.68aCD	242.48±22.26aBC	273.51±18.42aABC	290.95±27.05aB	224.90±11.95aC
C <sub>2</sub>	19.48±2.71aC	18.14±2.24aB	17.42±2.44aC	18.74±1.61aCD	255.52±13.12abABC	293.04±22.11aAB	290.95±27.05aB	224.90±11.95bC
C <sub>3</sub>	19.01±2.56aC	17.84±1.85aB	12.93±1.84aC	12.86±1.07aD	287.05±17.59bAB	300.43±10.35bA	354.35±6.37aA	309.78±12.18bA
R <sub>1</sub>	25.91±2.01aC	28.81±4.15aB	23.84±3.51aC	29.85±4.88BCD	221.01±9.39bC	260.51±15.40aABC	248.96±5.62abBCD	230.49±8.29abC
R <sub>2</sub>	21.12±2.31cC	31.02±2.41bcB	37.79±6.93bC	53.70±5.92aB	263.38±20.57aABC	247.52±8.32aBC	235.06±56.15aCD	233.41±5.30aC
R <sub>3</sub>	27.58±4.79aC	30.94±2.86aB	36.35±5.89aC	47.03±9.27aBC	249.21±24.24aABC	239.11±5.92aC	234.65±8.17aCD	227.30±6.38aC
R	171.78±34.18aA	109.04±10.58aA	90.85±26.47aA	110.10±18.70aA	307.73±8.81aA	300.56±9.64abA	281.59±1.42bcBC	274.22±4.40cB
阴冷型寒害处理组 Cloudy chilling injury treatment group								
C <sub>0</sub>	102.51±28.82aA	103.68±32.30aA	44.01±6.67aB	61.68±12.67aB	234.82±18.39abBC	253.00±18.25aBCD	201.03±9.79bD	222.84±10.06abB
C <sub>1</sub>	10.89±1.82aB	17.21±2.44aB	13.67±1.45aB	17.81±1.90aC	264.78±28.41aAB	257.49±21.45aBCD	286.94±14.56aB	266.71±27.09aAB
C <sub>2</sub>	12.42±1.59aB	14.32±1.07aB	13.73±1.86aB	17.92±1.98aC	299.71±13.65aA	307.91±15.77aA	286.94±14.56aB	270.62±26.99aAB
C <sub>3</sub>	16.43±1.86aB	14.84±1.92aB	10.28±1.62bB	16.89±2.56aC	228.47±12.36cBC	291.62±17.81bABC	360.43±10.04aA	326.67±22.17abA
R <sub>1</sub>	26.32±1.61aB	26.50±3.99aB	16.90±1.62bB	24.20±2.48aC	191.80±13.18bC	239.95±12.66aD	249.08±16.23aBC	239.42±17.90aB
R <sub>2</sub>	27.18±3.31aB	34.62±8.73aB	26.56±3.16aB	32.79±4.67aC	208.37±11.17bC	245.73±2.85abCD	221.45±14.57abCD	264.37±23.16aAB
R <sub>3</sub>	27.81±4.46aB	43.90±9.89aB	26.56±4.56aB	32.83±5.13aC	200.63±4.34bC	243.30±5.88abCD	220.45±14.15abCD	260.12±22.65aAB
R	128.42±33.10aA	140.50±20.74aB	143.57±64.61aA	116.28±22.30aA	277.96±9.74aAB	295.00±9.51aAB	289.60±11.76aB	275.24±4.89aAB

<sup>1)</sup>同行中不同小写字母表示同一指标在不同品种间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same row indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference of the same index among different cultivars; 同列中不同大写字母表示同一指标在不同时间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different capitals in the same column indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference of the same index among different times.

<sup>2)</sup>C<sub>0</sub>: 寒害胁迫 0 d Chilling stress for 0 d; C<sub>1</sub>: 寒害胁迫 1 d Chilling stress for 1 d; C<sub>2</sub>: 寒害胁迫 2 d Chilling stress for 2 d; C<sub>3</sub>: 寒害胁迫 3 d Chilling stress for 3 d; R<sub>1</sub>: 恢复培养 1 d Recovery culturing for 1 d; R<sub>2</sub>: 恢复培养 2 d Recovery culturing for 2 d; R<sub>3</sub>: 恢复培养 3 d Recovery culturing for 3 d; R: 恢复培养 2 个月 Recovery culturing for 2 months.

光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)和气孔导度(Gs)的变化趋势基本一致,随胁迫时间延长,Pn和Tr值总体上呈持续下降的趋势,而Gs值则总体上呈先下降后平稳的趋势;晴冷型和阴冷型寒害处理组4个品种胞间CO<sub>2</sub>浓度(Ci)的变化趋势明显不同,但基本上高于寒害胁迫前(寒害胁迫0 d)水平。寒害胁迫3 d,晴冷型和阴冷型寒害处理组4个品种的Pn、Tr和Gs值基本上显著( $P < 0.05$ )低于寒害胁迫前水平;而晴冷型和阴冷型寒害处理组品种‘RRIM600’和‘云研73-46’的Ci值基本上不显著高于寒害胁迫前水平,品种‘PR107’和‘93-114’的Ci值显著高于寒害胁迫前水平。

由表1还可见:在恢复培养期间,晴冷型和阴冷型寒害处理组4个品种的Pn、Tr和Gs值有一定回升。恢复培养3 d,晴冷型和阴冷型寒害处理组4个品种的Pn、Tr和Gs值显著低于寒害胁迫前水平,而Ci值接近寒害胁迫前水平。恢复培养2个月,晴冷型和阴冷型寒害处理组4个品种的Pn、Tr、Gs和Ci值基本上与寒害胁迫前水平差异不显著。

比较而言,在寒害胁迫及恢复培养期间,多数时间4个品种间的Pn、Tr、Gs和Ci值无显著差异,仅少数时间各品种间的Pn、Tr、Gs和Ci值差异显著;并

且,多数时间品种‘RRIM600’的Pn、Tr和Gs值高于品种‘PR107’,而Ci值却低于品种‘PR107’。

## 2.2 橡胶树各品种叶片部分生理生化指标的比较

### 2.2.1 丙二醛含量和质膜相对透性的比较

寒害胁迫及恢复培养期间橡胶树各品种叶片丙二醛(MDA)含量和质膜相对透性(RP)的比较见表2。由表2可见:在寒害胁迫期间,晴冷型寒害处理组品种‘RRIM600’和‘云研73-46’的MDA含量总体上升高;晴冷型寒害处理组品种‘PR107’和‘93-114’,阴冷型寒害处理组4个品种的MDA含量以及晴冷型和阴冷型寒害处理组4个品种的RP值基本上先升高后降低。寒害胁迫3 d,晴冷型和阴冷型寒害处理组4个品种的MDA含量基本上高于寒害胁迫前(寒害胁迫0 d)水平,而其RP值却显著( $P < 0.05$ )高于寒害胁迫前水平。

由表2还可见:在恢复培养期间,晴冷型和阴冷型寒害处理组品种‘RRIM600’和‘云研73-46’的MDA含量均高于寒害胁迫前水平,而品种‘PR107’和‘93-114’的MDA含量均低于寒害胁迫前水平;晴冷型和阴冷型寒害处理组4个品种的RP值基本上高于寒害胁迫前水平。恢复培养3 d,晴冷型和阴冷型寒害处理组品种‘RRIM600’和‘云研73-46’的

MDA 含量以及 4 个品种的 RP 值基本上显著高于寒害胁迫前水平,而晴冷型和阴冷型寒害处理组品种‘PR107’和‘93-114’的 MDA 含量却显著低于寒害胁迫前水平。恢复培养 2 个月,晴冷型和阴冷型寒害处理组品种‘RRIM600’和‘云研 73-46’的 MDA 含量和 RP 值基本上与寒害胁迫前水平差异不显著,而品种‘PR107’和‘93-114’的 MDA 含量显著低于寒害胁迫前水平,RP 值却显著高于寒害胁迫前水平。

比较而言,在寒害胁迫及恢复培养期间,多数时间 4 个品种间的 MDA 含量和 RP 值差异显著。品种‘RRIM600’和‘云研 73-46’的 MDA 含量在寒害胁迫期间总体上显著低于品种‘PR107’和‘93-114’,而在恢复培养期间却总体上高于或显著高于品种‘PR107’和‘93-114’;在寒害胁迫及恢复培养期间,品种‘RRIM600’和‘云研 73-46’的 RP 值高于或显著高于品种‘PR107’和‘93-114’。

表 2 寒害胁迫及恢复培养期间橡胶树各品种叶片丙二醛含量和质膜相对透性的比较 ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison on malondialdehyde content and relative permeability of plasma membrane of leaf of each cultivar of *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg. during chilling injury stress and recovery culturing periods ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

时间 <sup>2)</sup> Time <sup>2)</sup>	丙二醛含量/( $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ ) Malondialdehyde content				质膜相对透性/% Relative permeability of plasma membrane			
	RRIM600	云研 73-46 Yunyan 73-46	PR107	93-114	RRIM600	云研 73-46 Yunyan 73-46	PR107	93-114
晴冷型寒害处理组 Sunny chilling injury treatment group								
C <sub>0</sub>	8.61±0.55bcB	7.78±1.65cA	14.90±0.23aC	13.54±2.54abB	75.19±0.77aB	53.53±0.16bF	51.28±0.39cD	43.85±0.34dE
C <sub>1</sub>	9.62±1.60bAB	10.20±1.39bA	17.64±0.58aAB	16.13±1.23aAB	51.41±0.34bD	62.21±0.57aE	47.25±0.68dD	48.84±0.22cDE
C <sub>2</sub>	8.96±0.42bB	9.83±0.98bA	18.54±0.62aA	17.97±0.90aA	92.79±1.97abA	94.27±1.38aA	85.98±3.00cA	87.45±0.96bcA
C <sub>3</sub>	11.59±0.96bAB	11.69±1.09bA	16.54±0.07aBC	13.73±0.32bB	76.52±3.83aB	88.03±0.99aB	87.95±1.87aA	77.42±6.06aB
R <sub>1</sub>	10.61±0.32aAB	8.31±1.32aA	9.02±0.25aD	9.69±0.24aC	73.56±0.35aB	48.83±0.39bC	46.70±0.36cD	47.28±0.23cDE
R <sub>2</sub>	11.42±0.93aAB	11.61±0.46aA	9.75±0.39abD	8.67±0.56bCD	65.97±1.02bC	74.22±0.40aC	50.68±0.13cD	51.59±0.20cD
R <sub>3</sub>	13.51±0.62aA	10.71±0.12bA	6.80±0.09cE	5.69±0.57cD	64.44±0.79aC	67.29±1.49aD	57.03±0.40bC	60.15±1.40bC
R	9.44±2.91aB	10.49±1.74aA	9.70±1.20aD	9.72±0.26bBC	61.46±0.18aC	53.26±0.80bF	62.45±2.69aB	63.62±0.44aC
阴冷型寒害处理组 Cloudy chilling injury treatment group								
C <sub>0</sub>	5.53±0.82cB	5.40±0.52cD	16.69±1.40aA	10.44±2.72bAB	49.16±0.34aC	49.59±0.71aD	46.34±0.65bD	48.05±0.25abF
C <sub>1</sub>	6.89±0.58dB	8.86±0.65cBC	16.78±0.66aA	13.58±0.40bA	49.18±0.42bC	52.65±0.70aD	49.42±0.49bCD	51.93±0.09aE
C <sub>2</sub>	7.12±0.51bB	8.76±1.22bBC	14.47±1.26aAB	13.73±1.46aA	86.94±1.26aA	86.54±0.98aA	84.99±0.92aA	85.21±1.68aA
C <sub>3</sub>	6.11±1.04cB	8.04±1.33cBCD	13.60±0.89aB	10.81±0.50bAB	83.01±2.24aA	82.80±0.53aA	84.28±0.33aA	80.99±1.54aB
R <sub>1</sub>	6.82±1.54bB	10.81±0.90aB	9.67±0.59aC	7.08±0.36bBC	47.98±3.03abC	53.16±0.93aD	46.56±0.28bD	45.62±0.11bF
R <sub>2</sub>	13.53±0.93aA	14.48±0.87aA	6.05±0.69bD	7.40±0.37bBC	56.64±3.48bB	68.48±1.26aC	49.70±0.16cCD	51.02±0.34bcE
R <sub>3</sub>	11.95±0.85aA	10.86±0.41aB	6.05±0.69bD	4.28±0.38bC	62.60±1.47bB	76.65±3.72aB	56.98±0.46bB	62.73±0.22bC
R	5.77±0.41aB	6.53±0.84cD	6.46±0.53aD	6.67±0.63aCD	59.72±0.74aB	53.54±0.92bD	51.04±2.89bC	55.60±1.28abD

<sup>1)</sup> 同行中不同小写字母表示同一指标在不同品种间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same row indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference of the same index among different cultivars; 同列中不同大写字母表示同一指标在不同时间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different capitals in the same column indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference of the same index among different times.

<sup>2)</sup> C<sub>0</sub>: 寒害胁迫 0 d Chilling stress for 0 d; C<sub>1</sub>: 寒害胁迫 1 d Chilling stress for 1 d; C<sub>2</sub>: 寒害胁迫 2 d Chilling stress for 2 d; C<sub>3</sub>: 寒害胁迫 3 d Chilling stress for 3 d; R<sub>1</sub>: 恢复培养 1 d Recovery culturing for 1 d; R<sub>2</sub>: 恢复培养 2 d Recovery culturing for 2 d; R<sub>3</sub>: 恢复培养 3 d Recovery culturing for 3 d; R: 恢复培养 2 个月 Recovery culturing for 2 months.

2.2.2 可溶性糖和蔗糖含量的比较 寒害胁迫及恢复培养期间橡胶树各品种叶片可溶性糖 (SS) 和蔗糖 (Suc) 含量的比较见表 3。由表 3 可见: 整个实验期间, 各品种的 SS 和 Suc 含量均呈波动变化。在寒害胁迫期间, 晴冷型和阴冷型寒害处理组品种‘RRIM600’和‘云研 73-46’的 SS 含量以及品种‘PR107’和‘93-114’的 Suc 含量基本上高于寒害胁迫前水平, 并在寒害胁迫 3 d 显著高于寒害胁迫前水平; 而晴冷型和阴冷型寒害处理组品种‘PR107’和‘93-114’的 SS 含量以及晴冷型寒害处理组品种‘RRIM600’和‘云研 73-46’的 Suc 含量则低于寒害

胁迫前水平, 并在寒害胁迫 3 d 总体上显著低于寒害胁迫前水平。

由表 3 还可见: 在恢复培养期间, 晴冷型和阴冷型寒害处理组品种‘RRIM600’和‘云研 73-46’的 SS 含量总体上高于寒害胁迫前水平, 而品种‘PR107’和‘93-114’的 SS 含量总体上低于寒害胁迫前水平; 晴冷型和阴冷型寒害处理组 4 个品种的 Suc 含量总体上低于寒害胁迫前水平。恢复培养 3 d, 晴冷型和阴冷型寒害处理组品种‘RRIM600’和‘云研 73-46’的 SS 含量显著高于寒害胁迫前水平, 而其 Suc 含量以及晴冷型和阴冷型寒害处理组品种‘PR107’和

‘93-114’的 SS 和 Suc 含量总体上显著低于寒害胁迫前水平。恢复培养 2 个月, 晴冷型寒害处理组品种 ‘RRIM600’ 和 ‘云研 73-46’ 的 SS 含量, 阴冷型寒害处理组 4 个品种的 SS 含量和晴冷型寒害处理组品种 ‘RRIM600’ 的 Suc 含量显著低于寒害胁迫前水平, 其

余晴冷型和阴冷型寒害处理组各品种的 SS 和 Suc 含量基本上显著高于寒害胁迫前水平。

比较而言, 在寒害胁迫及恢复培养期间, 多数时间 4 个品种间的 SS 和 Suc 含量差异显著。

表 3 寒害胁迫及恢复培养期间橡胶树各品种叶片可溶性糖和蔗糖含量的比较 ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 3 Comparison on soluble sugar and sucrose contents in leaf of each cultivar of *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg. during chilling injury stress and recovery culturing periods ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

时间 <sup>2)</sup> Time <sup>2)</sup>	可溶性糖含量/(mg · g <sup>-1</sup> ) Soluble sugar content				蔗糖含量/(mg · g <sup>-1</sup> ) Sucrose content			
	RRIM600	云研 73-46 Yunyan 73-46	PR107	93-114	RRIM600	云研 73-46 Yunyan 73-46	PR107	93-114
晴冷型寒害处理组 Sunny chilling injury treatment group								
C <sub>0</sub>	13.66±0.59bC	10.61±0.17cE	15.08±0.39abB	15.18±0.50aB	30.41±0.74aA	17.91±0.76cC	22.55±0.78bC	22.87±0.40bB
C <sub>1</sub>	13.89±0.35bBC	11.93±0.19cC	11.90±0.12cC	15.19±0.45aB	26.07±3.45aAB	22.41±0.68aB	24.55±0.37aBC	21.74±0.22aBC
C <sub>2</sub>	14.82±0.23aAB	13.64±0.03bB	10.00±0.03dD	11.44±0.03cD	22.55±0.48bBC	14.85±0.29cD	30.43±1.55aA	28.35±1.07aA
C <sub>3</sub>	14.97±0.36aA	15.20±0.15aA	8.93±0.03cE	11.75±0.16bCD	17.13±0.45cD	18.70±0.43cC	25.99±0.56bB	28.27±0.98aA
R <sub>1</sub>	12.25±0.07aD	8.97±0.16cG	10.40±0.17bD	10.44±0.16bE	24.74±0.12aBC	21.57±0.54bB	17.56±0.16cD	20.57±0.38bCD
R <sub>2</sub>	13.30±0.18aC	9.77±0.14dF	10.40±0.15cD	12.50±0.10bC	24.85±0.12aBC	14.77±0.27bD	11.60±0.16cE	15.15±0.19bE
R <sub>3</sub>	14.12±0.17aABC	11.12±0.15cD	7.35±0.43dF	12.40±0.06bC	20.16±0.27aCD	17.18±0.49cC	17.86±0.10bCD	18.56±0.07bD
R	8.61±0.08cE	9.02±0.21cG	16.12±0.43bA	17.90±0.37aA	20.60±2.67aCD	25.42±0.38aA	23.42±2.28aBC	26.26±1.11aA
阴冷型寒害处理组 Cloudy chilling injury treatment group								
C <sub>0</sub>	10.39±0.30cE	10.47±0.09cD	13.17±0.06aA	11.93±0.13bB	19.84±0.46abB	18.81±0.85abC	20.06±0.31aDE	18.02±0.49bD
C <sub>1</sub>	12.30±0.36bBC	12.41±0.22bB	12.49±0.05bAB	13.33±0.20aA	24.66±2.02aA	22.68±0.59aA	22.39±0.81aCD	15.67±0.54bD
C <sub>2</sub>	11.85±0.06bC	12.99±0.12aA	9.75±0.13cBCD	9.34±0.06dD	14.72±0.22cC	20.68±0.86bABC	28.64±1.48aB	26.48±0.40aB
C <sub>3</sub>	13.29±0.09aA	11.00±0.05aC	11.58±2.40aABC	11.10±0.16aC	11.60±0.28bC	11.00±0.12bE	23.14±1.70aC	20.81±0.45aC
R <sub>1</sub>	11.79±0.12aC	9.59±0.15bE	9.58±0.14bCD	9.19±0.07bD	18.46±0.69aB	19.70±1.11aBC	17.51±0.39aEF	11.82±0.12bE
R <sub>2</sub>	12.45±0.04aB	9.61±0.17cE	11.13±0.17bABCD	8.58±0.03cE	21.08±0.66aB	15.75±0.28bD	15.61±0.12bF	9.49±0.26cE
R <sub>3</sub>	11.07±0.16aD	11.34±0.13aC	8.57±0.03cD	9.53±0.07bD	13.09±0.20cC	7.81±0.12dF	17.18±0.03bEF	21.03±0.10aC
R	2.44±0.11cF	2.74±0.06cF	4.19±0.05bE	4.88±0.14aF	21.00±1.62cB	21.71±0.86cAB	36.91±1.02aA	31.27±2.27bA

<sup>1)</sup> 同行中不同小写字母表示同一指标在不同品种间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same row indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference of the same index among different cultivars; 同列中不同大写字母表示同一指标在不同时间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different capitals in the same column indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference of the same index among different times.

<sup>2)</sup> C<sub>0</sub>: 寒害胁迫 0 d Chilling stress for 0 d; C<sub>1</sub>: 寒害胁迫 1 d Chilling stress for 1 d; C<sub>2</sub>: 寒害胁迫 2 d Chilling stress for 2 d; C<sub>3</sub>: 寒害胁迫 3 d Chilling stress for 3 d; R<sub>1</sub>: 恢复培养 1 d Recovery culturing for 1 d; R<sub>2</sub>: 恢复培养 2 d Recovery culturing for 2 d; R<sub>3</sub>: 恢复培养 3 d Recovery culturing for 3 d; R: 恢复培养 2 个月 Recovery culturing for 2 months.

2.2.3 可溶性蛋白质和脯氨酸含量的比较 寒害胁迫及恢复培养期间橡胶树各品种叶片可溶性蛋白质 (SP) 和脯氨酸 (Pro) 含量的比较见表 4。由表 4 可见: 在整个实验期间, 各品种的 SP 和 Pro 含量均呈波动变化。在寒害胁迫期间, 阴冷型寒害处理组品种 ‘RRIM600’ 的 SP 含量以及晴冷型和阴冷型寒害处理组品种 ‘PR107’ 和 ‘93-114’ 的 Pro 含量低于寒害胁迫前水平; 而晴冷型寒害处理组品种 ‘RRIM600’ 及晴冷型和阴冷型寒害处理组品种 ‘云研 73-46’、‘PR107’ 和 ‘93-114’ 的 SP 含量, 以及晴冷型和阴冷型寒害处理组品种 ‘RRIM600’ 和 ‘云研 73-46’ 的 Pro 含量基本上高于寒害胁迫前水平。寒害胁迫 3 d, 晴冷型和阴冷型寒害处理组品种 ‘PR107’ 和 ‘93-114’ 的 SP 含量以及阴冷型寒害处理组品种

‘RRIM600’ 和 ‘云研 73-46’ 的 Pro 含量显著高于寒害胁迫前水平; 而晴冷型和阴冷型寒害处理组品种 ‘PR107’ 和 ‘93-114’ 的 Pro 含量则显著低于寒害胁迫前水平。

由表 4 还可见: 恢复培养 3 d 内, 晴冷型寒害处理组品种 ‘RRIM600’ 和 ‘云研 73-46’ 的 SP 含量, 阴冷型寒害处理组品种 ‘云研 73-46’ 的 SP 含量, 以及晴冷型和阴冷型寒害处理组品种 ‘RRIM600’ 和 ‘云研 73-46’ 的 Pro 含量基本上高于寒害胁迫前水平; 而晴冷型和阴冷型寒害处理组品种 ‘PR107’ 和 ‘93-114’ 的 SP 和 Pro 含量则基本上低于寒害胁迫前水平。恢复培养 2 个月, 晴冷型和阴冷型寒害处理组 4 个品种的 SP 含量以及晴冷型和阴冷型寒害处理组品种 ‘PR107’ 和 ‘93-114’ 的 Pro 含量显著高于寒

害胁迫前水平,而晴冷型和阴冷型寒害处理组品种‘RRIM600’和‘云研73-46’的Pro含量与寒害胁迫前水平差异不显著。

比较而言,在寒害胁迫及恢复培养期间,多数时间4个品种间的SP和Pro含量差异显著。品种‘RRIM600’和‘云研73-46’的SP含量在寒害胁迫

期间总体上显著低于品种‘PR107’和‘93-114’,而在恢复培养期间高于或显著高于品种‘PR107’和‘93-114’;品种‘RRIM600’和‘云研73-46’的Pro含量仅在寒害胁迫初期低于品种‘PR107’和‘93-114’,而在寒害胁迫2和3d及恢复培养期间高于或显著高于品种‘PR107’和‘93-114’。

表4 寒害胁迫及恢复培养期间橡胶树各品种叶片可溶性蛋白质和脯氨酸含量的比较( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 4 Comparison on soluble protein and proline contents in leaf of each cultivar of *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg. during chilling injury stress and recovery culturing periods ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

时间 <sup>2)</sup> Time <sup>2)</sup>	可溶性蛋白质含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Soluble protein content				脯氨酸含量/(μg·g <sup>-1</sup> ) Proline content			
	RRIM600	云研73-46 Yunyan 73-46	PR107	93-114	RRIM600	云研73-46 Yunyan 73-46	PR107	93-114
晴冷型寒害处理组 Sunny chilling injury treatment group								
C <sub>0</sub>	9.35±0.21bAB	10.36±0.19bC	10.82±0.15bC	12.86±0.95aB	139.42±22.59bCD	100.75±8.02bCD	229.46±26.02aA	201.87±9.76aB
C <sub>1</sub>	9.69±0.68bAB	12.06±0.15aA	10.92±0.50abC	10.53±0.23bC	65.15±3.20bE	139.54±30.17aBCD	112.32±16.64abBC	97.67±12.63abD
C <sub>2</sub>	9.75±0.18cAB	10.34±0.16cC	14.79±0.13bB	15.60±0.25aA	177.48±22.67aC	149.15±17.82aBC	78.58±1.19bCD	65.89±1.29cE
C <sub>3</sub>	8.90±0.21cB	10.38±0.19bC	15.59±0.29aA	14.92±0.16aA	142.13±8.14aCD	109.86±5.61bCD	63.92±1.45cD	125.87±15.16abC
R <sub>1</sub>	10.52±0.58aA	10.61±0.27aBC	8.25±0.13bE	8.31±0.24bDE	190.78±43.34aC	200.64±19.97aAB	139.54±8.17aB	127.97±9.55aC
R <sub>2</sub>	9.94±0.22aAB	10.05±0.22aC	8.17±0.19bE	8.74±0.16bD	373.21±6.40aA	232.54±33.07bA	221.08±23.60bA	137.08±5.12cC
R <sub>3</sub>	10.35±0.25aA	11.52±0.69aAB	10.02±0.19aD	10.81±0.44aC	311.79±10.20aB	253.35±13.71bA	259.14±13.20bA	247.19±4.14bA
R	7.56±0.13aC	7.74±0.30aD	7.42±0.13aF	7.37±0.07aE	98.53±5.13aDE	84.86±5.56bD	52.34±0.64cD	56.65±0.96cF
阴冷型寒害处理组 Cloudy chilling injury treatment group								
C <sub>0</sub>	10.43±0.32bcA	9.63±0.30cB	11.88±0.36aB	11.34±0.56abC	90.40±1.69cD	93.85±3.58cC	220.22±13.10aA	166.64±21.54bB
C <sub>1</sub>	10.03±0.65bAB	10.06±0.22bAB	12.19±0.07aB	11.65±0.21aC	113.93±1.60cCD	80.92±1.72dC	201.87±6.77aAB	149.77±5.29bB
C <sub>2</sub>	9.07±0.27cB	10.10±0.16bAB	14.86±0.16aA	14.95±0.14aB	367.90±10.40aA	198.91±32.65bB	70.69±0.65cC	57.52±0.93cCD
C <sub>3</sub>	10.28±0.16cA	10.27±0.26cAB	15.24±0.25bA	16.17±0.33aA	167.87±37.62bBC	271.46±22.76aA	84.86±0.98cC	78.45±1.07cCD
R <sub>1</sub>	10.09±0.04aAB	10.44±0.23aAB	7.89±0.18bD	8.11±0.09bEF	166.03±17.41aBC	108.38±5.46bC	172.80±17.19aB	94.71±2.56bC
R <sub>2</sub>	10.14±0.28aAB	10.66±0.42aA	7.98±0.06bD	8.59±0.24bE	366.42±22.64aA	302.49±21.55bA	202.11±20.08cAB	264.93±0.54bA
R <sub>3</sub>	10.27±0.39aA	10.60±0.10aA	10.49±0.40aC	9.90±0.21aD	190.17±20.22bB	201.50±10.78bB	181.67±11.28bB	288.70±26.33aA
R	7.56±0.17aC	7.28±0.15aC	7.33±0.07aD	7.40±0.06aF	93.36±4.45aD	75.62±4.41bC	52.96±0.54cC	52.84±0.69cD

<sup>1)</sup> 同行中不同小写字母表示同一指标在不同品种间差异显著( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same row indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference of the same index among different cultivars; 同列中不同大写字母表示同一指标在不同时间差异显著( $P < 0.05$ ) Different capitals in the same column indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference of the same index among different times.

<sup>2)</sup> C<sub>0</sub>: 寒害胁迫0d Chilling stress for 0 d; C<sub>1</sub>: 寒害胁迫1d Chilling stress for 1 d; C<sub>2</sub>: 寒害胁迫2d Chilling stress for 2 d; C<sub>3</sub>: 寒害胁迫3d Chilling stress for 3 d; R<sub>1</sub>: 恢复培养1d Recovery culturing for 1 d; R<sub>2</sub>: 恢复培养2d Recovery culturing for 2 d; R<sub>3</sub>: 恢复培养3d Recovery culturing for 3 d; R: 恢复培养2个月 Recovery culturing for 2 months.

### 2.3 橡胶树叶片各指标的主成分分析

基于晴冷型和阴冷型寒害胁迫及恢复培养期间橡胶树各品种叶片光合气体交换参数和部分生理生化指标的检测结果进行主成分分析,结果见表5。由表5可见:前3个主成分的特征值均大于1,并且,前3个主成分的累计贡献率为71.30%,说明前3个主成分可反映橡胶树各指标的绝大部分信息。第1主成分中,净光合速率、气孔导度和蒸腾速率的载荷较高,分别为0.93、0.91和0.89;第2主成分中,蔗糖含量、胞间CO<sub>2</sub>浓度和脯氨酸含量的载荷较高,分别为0.76、0.68和-0.66;第3主成分中,丙二醛含量和可溶性糖含量的载荷较高,分别为0.63和0.62。

### 2.4 橡胶树各品种耐寒性的综合评价

根据上述主成分分析结果,获得的第1主成分的拟合方程为 $Z_1 = -0.34X_1 - 0.25X_2 - 0.09X_3 - 0.22X_4 + 0.03X_5 - 0.30X_6 + 0.48X_7 + 0.47X_8 - 0.11X_9 + 0.46X_{10}$ ,第2主成分的拟合方程为 $Z_2 = 0.30X_1 + 0.26X_2 - 0.46X_3 - 0.12X_4 + 0.53X_5 + 0.23X_6 + 0.08X_7 + 0.23X_8 + 0.47X_9 + 0.14X_{10}$ ,第3主成分的拟合方程为 $Z_3 = 0.16X_1 + 0.56X_2 + 0.02X_3 + 0.55X_4 + 0.18X_5 - 0.28X_6 + 0.19X_7 + 0.01X_8 - 0.41X_9 + 0.19X_{10}$ 。式中, $X_1$ 为可溶性蛋白质含量, $X_2$ 为丙二醛含量, $X_3$ 为脯氨酸含量, $X_4$ 为可溶性糖含量, $X_5$ 为蔗糖含量, $X_6$ 为质膜相对透性, $X_7$ 为净光合速率, $X_8$ 为气孔导度, $X_9$ 为胞间CO<sub>2</sub>

表 5 寒害胁迫及恢复培养期间橡胶树叶片光合气体交换参数和部分生理生化指标的主成分分析

Table 5 Principal component analysis on photosynthetic gas exchange parameters and some physiological and biochemical indexes of leaf of *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg. during chilling injury stress and recovery culturing periods

主成分 Principal component	载荷 <sup>1)</sup> Load <sup>1)</sup>										特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	Pn	Tr	Gs	Ci	MDA	RP	SS	Suc	SP	Pro			
1	0.93	0.89	0.91	-0.22	-0.49	-0.59	-0.42	0.06	-0.66	-0.18	3.77	37.74	37.74
2	0.11	0.20	0.34	0.68	0.37	0.33	-0.17	0.76	0.44	-0.66	2.10	20.95	58.69
3	0.21	0.22	0.01	-0.46	0.63	-0.31	0.62	0.20	0.18	0.02	1.26	12.62	71.30

<sup>1)</sup> Pn: 净光合速率 Net photosynthetic rate; Tr: 蒸腾速率 Transpiration rate; Gs: 气孔导度 Stomatal conductance; Ci: 胞间 CO<sub>2</sub> 浓度 Intercellular CO<sub>2</sub> concentration; MDA: 丙二醛含量 Malondialdehyde content; RP: 质膜相对透性 Relative permeability of plasma membrane; SS: 可溶性糖含量 Soluble sugar content; Suc: 蔗糖含量 Sucrose content; SP: 可溶性蛋白质含量 Soluble protein content; Pro: 脯氨酸含量 Proline content.

浓度,  $X_{10}$  为蒸腾速率,  $Z_1$ 、 $Z_2$  和  $Z_3$  分别为第 1、第 2 和第 3 主成分的分。

根据第 1、第 2 和第 3 主成分的分, 计算晴冷型和阴冷型寒害胁迫条件下供试橡胶树各品种耐寒性的综合得分 ( $Q$ ), 计算公式为  $Q = (3.77Z_1 + 2.10Z_2 + 1.26Z_3) / (3.77 + 2.10 + 1.26)$ , 结果见表 6。由表 6 可见: 晴冷型寒害胁迫条件下各品种的  $Q$  值由高到低依次为 ‘RRIM600’、‘云研 73-46’、‘93-114’、‘PR107’; 阴冷型寒害胁迫条件下各品种的  $Q$  值由高到低依次为 ‘PR107’、‘云研 73-46’、‘93-114’、‘RRIM600’。

表 6 晴冷型和阴冷型寒害胁迫条件下橡胶树各品种耐寒性的综合评价<sup>1)</sup>  
Table 6 Comprehensive evaluation on cold tolerance of each cultivar of *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg. under sunny and cloudy chilling injury stress conditions<sup>1)</sup>

品种 Cultivar	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Q$	排序 Order
晴冷型寒害胁迫条件下 Under sunny chilling injury stress condition					
RRIM600	4.13	1.72	-0.53	2.59	1
云研 73-46 Yunyan 73-46	2.64	1.57	-0.23	1.82	3
PR107	1.65	0.88	0.82	1.28	4
93-114	2.16	0.84	2.80	1.88	2
阴冷型寒害胁迫条件下 Under cloudy chilling injury stress condition					
RRIM600	4.21	1.08	-2.01	2.19	4
云研 73-46 Yunyan 73-46	4.42	1.45	-1.88	2.43	3
PR107	4.12	2.76	-1.19	2.78	1
93-114	3.87	1.98	-1.05	2.44	2

<sup>1)</sup>  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$ : 分别为第 1、第 2 和第 3 主成分的分 Scores of the first, the second, and the third principal components, respectively;  $Q$ : 综合得分 Comprehensive score.

### 3 讨论和结论

光合速率能够直接反映植物光合系统的功能, 指示植物光合系统的工作状况, 温度和光照为其最主要的影响因子<sup>[15]</sup>。与许多研究结果<sup>[16-20]</sup>相似, 随着寒

害胁迫时间的延长, 供试橡胶树各品种叶片的净光合速率 (Pn)、蒸腾速率 (Tr) 和气孔导度 (Gs) 持续下降, 这是因为低温改变了植物光合系统的组成成分, 使叶片气孔开度发生变化, 从而影响植株的光合和蒸腾作用, 进而使光合产物的运输、转化和累积等受阻, 导致光合速率下降。在恢复培养期间, 橡胶树各品种的 Pn、Tr 和 Gs 值均有一定回升, 表明恢复培养期间橡胶树叶体内的色素合成有所恢复, 叶片光合作用不断增强。总体来看, 晴冷型寒害处理组橡胶树各品种叶片的 Pn、Tr 和 Gs 值均低于阴冷型寒害处理组, 说明适当遮光能够缓解寒害对橡胶树植株的伤害, 增强植株的抗寒能力。

在寒害环境中, 植物的细胞膜发生改变, 细胞膜透性增大, 一系列生理和代谢功能出现紊乱, 如有机物运输受阻、渗透调节物质积累、活性氧大量产生、引起细胞氧化等<sup>[21-27]</sup>。总体来看, 晴冷型和阴冷型寒害处理组橡胶树各品种叶片的丙二醛 (MDA) 含量和质膜相对透性 (RP) 在寒害胁迫 3 d 内基本上高于寒害胁迫前 (寒害胁迫 0 d) 水平, 并在恢复培养期间有所恢复, 且晴冷型寒害处理组各品种的 MDA 含量和 RP 值基本上高于阴冷型寒害处理组, 表明遮光可缓解寒害对橡胶树植株叶片细胞的伤害。从晴冷型和阴冷型寒害处理组橡胶树各品种叶片的可溶性糖、蔗糖、可溶性蛋白质和脯氨酸含量的变化幅度来看, 品种 ‘RRIM600’ 在晴冷型寒害胁迫条件下耐性较强, 而品种 ‘PR107’ 在阴冷型寒害胁迫条件下耐性较强; 而品种 ‘云研 73-46’ 和 ‘93-114’ 在晴冷型和阴冷型寒害胁迫条件下耐性居中。说明在寒害胁迫条件下橡胶树各品种通过不断启动相应的生理途径来维持机体的代谢平衡<sup>[22]</sup>, 呈现多系统的综合生理反应过程。

由于供试橡胶树各品种叶片各指标在寒害胁迫及恢复培养期间变化各异, 且各指标间的相关性不



同,因此,采用单一指标很难全面且准确地反映各品种的耐寒性。为了更准确地分析各品种的耐寒性,作者采用主成分分析法对供试橡胶树各品种进行了综合评价,以期用较少的指标反映所有指标的绝大部分信息<sup>[28-30]</sup>,评价结果不仅能弥补单一指标分析结果的片面性,而且能更准确地反映实际情况。根据供试橡胶树各品种的综合得分,晴冷型寒害胁迫条件下各品种的耐寒性由强到弱依次为‘RRIM600’、‘云研73-46’、‘93-114’、‘PR107’,阴冷型寒害胁迫条件下各品种的耐寒性由强到弱依次为‘PR107’、‘云研73-46’、‘93-114’、‘RRIM600’。

云南省橡胶树种植区大多为山地或盆地,因此,根据橡胶树各品种对环境条件的要求进行宜地种植非常必要。在实际生产中,为了减少寒害对植株的伤害,建议根据橡胶树各品种的耐寒性选择合适种植地,其中,品种‘云研73-46’和‘93-114’在阳坡和阴坡均可种植,品种‘RRIM600’适宜种植在阳坡,而品种‘PR107’更适宜种植在阴坡。

#### 参考文献:

- [1] 田耀华,原慧芳,龙云峰,等.生长光强对六个橡胶树品种幼苗光合特性的影响[J].热带亚热带植物学报,2012,20(3):270-276.
- [2] 江爱良.云南南部、西南部生态气候和橡胶树的引种[J].中国农业气象,1995,16(5):26-31.
- [3] 吴俊.云南橡胶树气候生态适应性分析[J].资源与环境科学,2011(19):308-309,320.
- [4] TIAN Y H, YUAN H F, XIE J, et al. Effect of diurnal irradiance on night-chilling tolerance of six rubber cultivars [J]. *Photosynthetica*, 2016, 54(3): 374-380.
- [5] 沈利宗.云南河口垦区的冬季低温与橡胶树寒害[J].云南热作科技,1991,14(1):12-19.
- [6] 刘少军,周广胜,房世波.1961—2010年中国橡胶寒害的时空分布特征[J].生态学杂志,2015,34(5):1282-1288.
- [7] 何康,黄宗道.热带北缘橡胶树栽培[M].广州:广东科技出版社,1987:110-112.
- [8] 江爱良,钱平.西双版纳坡地冬季夜间冷却过程与橡胶树寒害关系的研究[J].热带作物学报,1985,6(2):1-12.
- [9] 原慧芳,肖荣才,黄菁,等.东试早柚对不同保水处理的生理响应及综合评价[J].浙江农业学报,2016,28(4):586-594.
- [10] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].2版.北京:高等教育出版社,2006.
- [11] 张志良,翟伟菁.植物生理学实验指导[M].3版.北京:高等教育出版社,2007.
- [12] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导[M].2版.广州:华南理工大学出版社,2002:64-65.
- [13] 白志英,李存东,孙红春,等.小麦代换系抗旱生理指标的成分分析及综合评价[J].中国农业科学,2008,41(12):4264-4272.
- [14] 孙敬爽,贾桂霞,陶霞娟,等.越冬过程中刺柏属4树种叶片生理指标变化及适应性综合评价[J].植物资源与环境学报,2013,22(2):59-66.
- [15] 刘栓桃,董艳敏,卢亚楠,等.低温弱光对两个西葫芦品种幼苗光合速率及叶绿素荧光参数的影响[J].华北农学报,2009,24(2):139-143.
- [16] 邵怡若,许建新,薛立,等.低温胁迫时间对4种幼苗生理生化及光合特性的影响[J].生态学报,2013,33(14):4237-4247.
- [17] 许楠,孙广玉.低温锻炼后桑树幼苗光合作用和抗氧化酶对冷胁迫的响应[J].应用生态学报,2009,20(4):761-766.
- [18] 冯玉龙,曹坤芳,冯志立,等.夜间低温对不同光强下生长的两种热带树苗光合作用的影响[J].植物生理与分子生物学学报,2002,28(6):433-440.
- [19] 蔡志全,曹坤芳,冯玉龙,等.夜间低温胁迫对两种生长光强下藤黄幼苗叶片荧光特征和活性氧代谢的影响[J].应用生态学报,2003,14(3):326-331.
- [20] 梁芳,郑成淑,孙宪芝,等.低温弱光胁迫及恢复对切花菊光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J].应用生态学报,2010,21(1):29-35.
- [21] 张帆,万雪琴,朱小琼,等.自然低温对慈竹和撑绿杂交竹生理特性的影响[J].浙江农林大学学报,2012,29(1):17-22.
- [22] 颜建明,郁继华,颜敏华,等.低温弱光下辣椒3种渗透调节物质含量变化及其与品种耐性的关系[J].西北植物学报,2009,29(1):105-110.
- [23] 李铁冰,杨顺强,任广鑫,等.低温处理下不同禾本科牧草的生理变化及其抗寒性比较[J].生态学报,2009,29(3):1341-1347.
- [24] 曾光辉,周琳,黎星辉.自然越冬期间茶树叶片生理生化指标和解剖结构的变化[J].植物资源与环境学报,2017,26(1):63-68.
- [25] 李叶云,舒锡婷,周月琴,等.自然越冬过程中3个茶树品种的生理特性变化及抗寒性评价[J].植物资源与环境学报,2014,23(3):52-58.
- [26] 平晓燕,周莉.华南地区经济林果寒害研究进展[J].中国生态农业学报,2018,26(4):467-469.
- [27] 罗萍,贺军军,姚艳丽,等.低温对不同耐寒性橡胶树叶片抗氧化能力的影响[J].西北植物学报,2014,34(2):311-317.
- [28] 韩泽群,姜波.加工番茄品种多性状综合评价方法研究[J].中国农业科学,2014,47(2):357-365.
- [29] 曾宪海,安锋,蔡明道,等.高渗胁迫后橡胶树萌发芽苗抗旱性主成分及隶属函数分析[J].中国农学通报,2010,26(1):260-264.
- [30] 王益民,张珂,许飞华,等.不同品种枸杞子营养成分分析及评价[J].食品科学,2014,35(1):34-38.

(责任编辑:佟金凤)