

低温胁迫对凹叶厚朴光合特性和 相关生理指标的影响

陈剑成¹, 徐雯¹, 祁潇勇¹, 何天友², 郑郁善¹, 陈礼光¹

(1. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学 艺术学院园林学院, 福建 福州 350002)

摘要:以2年生凹叶厚朴幼苗为试材,研究了在不同低温胁迫(-5、0、5、10、15℃,以25℃为对照)下凹叶厚朴生理指标和光合特性的变化。结果表明:随着胁迫温度降低,凹叶厚朴幼苗叶绿素含量下降,净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)逐步降低,光合PSⅡ最大光化学效率(Fv/Fm)、潜在光化学效率(Fv/Fo)、表观电子传递速率(ETR)、光合量子产额(Yield)、光化学淬灭系数(qP)总体呈现递减趋势,而胞间CO₂浓度(Ci)、丙二醛(MDA)含量、细胞质膜透性、非光化学淬灭系数(NPQ)呈上升趋势,质膜在-5℃时受损最严重,大量离子外渗。低温使叶绿素显著降低,PSⅡ反应中心受损,对凹叶厚朴幼苗产生显著光抑制,导致光合作用能力降低。

关键词:凹叶厚朴;低温胁迫;叶绿素;光合特性;生理指标

中图分类号:S 718.43 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2017)16-0147-07

凹叶厚朴(*Magnolia officinalis* subsp. *biloba*)属木兰科(Magnoliaceae)木兰属(*Magnolia*)落叶乔木,其树形雄伟,叶大荫浓,花大美丽,材质轻软易加工,纹理细密美观^[1],是良好的园林绿化树种和工业用材树种。其树皮、根皮、花、种子及芽有极高的药用价值^[2-3],有燥湿健脾、消痰化食、驱风镇痛等治疗功效;干燥后的根皮及树皮是优良的中药材,现全国各地广泛栽培,在华东、华南、华中、西南地区均有分布。

近年来大范围低温、雨雪、冰冻等自然灾害,

导致凹叶厚朴因低温胁迫或者冰雪灾害出现成片死亡。而凹叶厚朴北移推广时,常受冬季的低温伤害,引种成活和栽培丰产受到很大的影响。因此,开展凹叶厚朴抗寒性研究尤为重要。目前对凹叶厚朴的研究仅限于宏观栽培、药理作用等方面,关于凹叶厚朴抗寒性生理机制的研究较少。该研究以2年生凹叶厚朴幼苗为试材,研究其不同温度下生理指标和光合特性的变化,以期了解厚朴低温胁迫的响应机制,并为引种栽培、繁育基地划分、提高栽培质量措施和低温冻害预防提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在福建农林大学林学院温室进行。供试凹叶厚朴为2年生的实生苗,2015年12月选取长势相似、健康无病害的幼苗,株高为(55.3±0.5)cm时移植至塑料盆培养(内径10cm,高25cm),培养基质为混合基质(草木灰:珍珠岩:河沙体积比为

第一作者简介:陈剑成(1989-),男,硕士研究生,研究方向为药用植物的分子生物学与基因工程。E-mail:cjcheng15@139.com.

责任作者:陈礼光(1974-),男,硕士,副教授,现主要从事药用植物栽培与森林培育等研究工作。E-mail:fjclg@126.com.

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2011BAI01B06);福建省科技重点资助项目(2009Y0003)。

收稿日期:2017-02-28

1:1:1),进行正常的栽培管理。

1.2 试验方法

2016年3月15日,选择长势相似、健康无虫害的凹叶厚朴幼苗,置于智能型人工气候箱培养(湿度85%,光照强度 $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,光周期12 h/12 h,温度 $25\ ^\circ\text{C}/16\ ^\circ\text{C}$)适应7 d后,进行持续低温胁迫处理。设置5个温度(-5、0、5、10、15 $^\circ\text{C}$)处理,以 $25\ ^\circ\text{C}$ 为对照(CK),且以 $5\ ^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 速度降温,降温期间湿度、光照条件保持不变,每个温度处理24 h,处理后室温解冻12 h,进行测定,试验重复4次,每次重复5株苗。选择幼苗顶端标记好第3~5片健康的成熟功能叶片,进行光合参数的测定,并用锡箔纸包裹液氮处理后,置于 $-80\ ^\circ\text{C}$ 超低温冰箱储存,测定生理指标。

1.3 项目测定

1.3.1 光合参数及叶绿素荧光参数测定

利用光合系统仪LI-6400(美国LI-cor)于每日09:00—11:30测定光合参数。测定条件:红蓝LED光源,光照强度为 $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, CO_2 浓度为 $(400\pm25)\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 测定胁迫后叶片净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)、胞间 CO_2 浓度(Ci)等光合参数,每处理10次重复。光合参数和叶绿素荧光参数可同时测量,将标记的待测叶用PAR夹暗适应30 min,采用便携式调制型叶绿素荧光仪(OPTI-sciences OS-5p)测定PSII最大光化学效率(F_v/F_m)、PSII的潜在活性(F_v/F_o)、PSII最大量子产量(Yield),在有效的光辐射的条件下测qP(化学淬灭)、NPQ(非化学淬灭)、ETR(电子传递速率)等参数。每株测4片叶,每叶测4个重复,每次重复5株苗,记录并计算均值。

1.3.2 相关生理指标测定

叶绿素含量采用丙酮浸取法测定^[4],质膜透性采用电导率仪(同奥DDT-800)测定^[5],丙二醛(MDA)含量采用北京索莱宝科技公司试剂盒测定。

1.4 数据分析

采用Excel 2003和DPS 7.05软件统计分析数据并作图。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对凹叶厚朴幼叶光合参数的影响

由图1可知,在低温胁迫下,凹叶厚朴幼叶净光合速率(Pn)明显下降,呈递减的趋势。与 $25\ ^\circ\text{C}$ 相比,15、10、5、0、 $-5\ ^\circ\text{C}$ 温度处理后,Pn分别下降了55.06%、87.11%、108.80%、125.59%、143.07%。凹叶厚朴幼叶光合能力随着胁迫温度的降低而下降,在 $5\ ^\circ\text{C}$ 时Pn仅为 $25\ ^\circ\text{C}$ 时的30%,可见厚朴幼苗对 $5\ ^\circ\text{C}$ 抵御低温能力较弱。

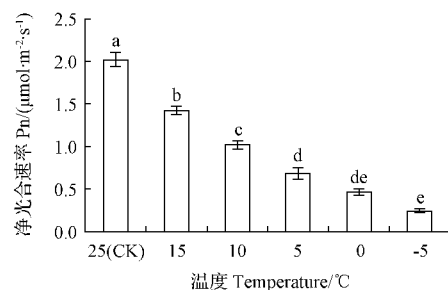


图1 低温胁迫对凹叶厚朴幼叶Pn的变化

Fig. 1 Changes in net photosynthetic rate in leaves of *Magnolia officinalis* under low temperature stress

由图2可知,随着温度的下降,凹叶厚朴叶片气孔导度(Gs)呈逐渐下降的趋势。与 $25\ ^\circ\text{C}$ 相比,15、10、5、0、 $-5\ ^\circ\text{C}$ 温度处理后,Gs分别下降了14.14%、29.69%、46.30%、53.95%、61.25%。多重比较结果表明,10、5、0、 $-5\ ^\circ\text{C}$ 处理与 $25\ ^\circ\text{C}$ 均呈显著差异。胁迫温度影响着凹叶厚朴幼叶的气

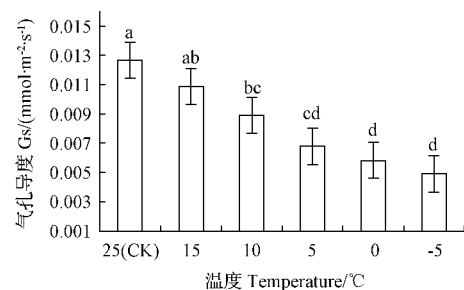


图2 低温胁迫对凹叶厚朴Gs的变化

Fig. 2 Changes in stomatal conductance in leaves of *Magnolia officinalis* under low temperature stress

孔的开放程度,叶片光合速率与气孔导度具有相关性,气孔导度降低,影响叶片光合速率减小。

由图 3 可知,随着胁迫温度的降低,凹叶厚朴幼叶的胞间 CO₂ 浓度(Ci)呈上升的变化趋势,在-5℃时变化明显。与 25℃相比,15、10、5、0、-5℃处理后,Ci 分别上升了 29.20%、40.87%、53.77%、101.75%、110.56%。胁迫初期造成气孔阻力限制 CO₂ 进入,Ci 变化幅度变化不大,随着胁迫温度的降低,Ci 波动范围较大。说明低温下凹叶厚朴幼叶失去对气孔导度的调节能力。

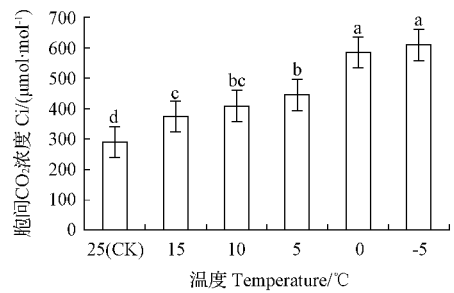


图 3 低温胁迫对凹叶厚朴幼叶 Ci 的变化
Fig. 3 Changes in intercellular CO₂ concentration in leaves of *Magnolia officinalis* under low temperature stress

由图 4 可知,随着胁迫温度的降低,凹叶厚朴幼叶的蒸腾速率(Tr)呈下降的趋势,最小值(0.081 7 mmol·m⁻²·s⁻¹)为-5℃处理。与 25℃相比,-5℃处理后,Tr 下降幅度最大,仅为 25℃的 42.88%。0、5、10、15℃温度处理之间达到差异显著水平($P<0.05$),表明温度降低对叶片蒸腾速率有抑制作用,长时间低温处理严重抑制幼苗的生长发育,影响凹叶厚朴细胞吸水速率,植物缺水程度加剧。

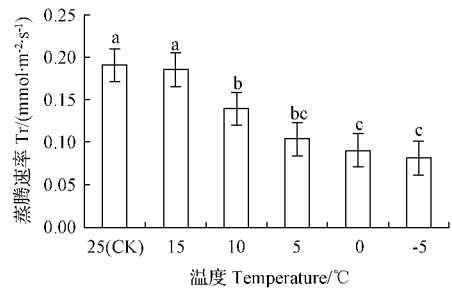


图 4 低温胁迫对凹叶厚朴幼叶 Tr 的变化
Fig. 4 Changes in transpiration rate in leaves of *Magnolia officinalis* under low temperature stress

2.2 生理指标变化相关性分析

表 1 表明,凹叶厚朴幼苗的温度、叶绿素含量与叶片 Pn 呈极显著正相关,凹叶厚朴叶片的质膜相对透性、MDA 含量与叶片 Pn 呈显著负相关。表明温度、叶绿素含量、质膜相对透性和 MDA 含量直接影响凹叶厚朴净光合速率(Pn)变化,温度、叶绿素含量降低及质膜相对透性、MDA 含量的积累均会引起凹叶厚朴光合能力的降低。凹叶厚朴质膜相对透性、丙二醛含量(MDA)与温度呈显著负相关,叶绿素含量、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)与温度呈极显著正相关。表明温度的降低引起相对透性、MDA 增加,低温可能抑制叶绿素的合成,光合生理指标受温度影响较大(暗反应酶 RuBP-Case 活性降低),叶片表现不同程度的萎蔫。此外,凹叶厚朴叶片膜相对透性、MDA 含量与叶绿素含量也有一定的相关性,表明叶绿素合成受阻和降解,与活性氧类物质(ROS)积累导致酶失活有关,质膜相对透性、MDA 可作为抗寒性指示指标。

表 1 低温胁迫凹叶厚朴各生理指标变化的相关性分析

Table 1 Correlative analysis of physiological indexes of *Magnolia officinalis* under low temperature stress

相关系数 Correlation coefficients	温度 Temperature	相对电导率 Relative conductivity	丙二醛含量 MDA content	叶绿素相对含量 SPAD	净光合速率 Pn	气孔导度 Gs	胞间 CO ₂ 浓度 Ci
相对电导率 Relative conductivity	-0.487 *						
丙二醛含量 MDA content	-0.581 *	0.048					
叶绿素相对含量 SPAD	0.825 **	-0.281	-0.437				
净光合速率 Pn	0.991 **	-0.494 *	-0.567 *	0.839 **			
气孔导度 Gs	0.843 **	-0.472 *	-0.320	0.639 **	0.857 **		
胞间 CO ₂ 浓度 Ci	0.912 **	-0.432	-0.607 **	0.794 **	0.885 **	0.759 **	
蒸腾速率 Tr	0.881 **	-0.364	-0.459	0.687 **	0.874 **	0.791 **	0.690 **

2.3 低温胁迫下凹叶厚朴幼叶叶绿素荧光特性

由表 2 可知,随着温度的下降,PSII 最大光化学效率(F_v/F_m)、PSII 潜在活性(F_v/F_o)呈递减的趋势,随着处理温度降低组间差异显著($P < 0.05$)。 F_v/F_m 、 F_v/F_o 反映了光能吸收与转化的效率高低,是 PSII 光合结构受光抑制的重要指标^[6]。表明低温使光合最高速率下降,对 PSII 反应中心造成了损伤。随着温度降低,其光能吸收和转化能力显著下降,光能超出光合作用所需大小,产生光抑制反应,且 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的光抑制程度较大。低温胁迫降低了 PSII 的原初光能捕获能力与光合电子传输能力,形成 NADPH 和 ATP 电子传递链受阻,进而降低光合作用的量子产率,使光合作用同化力降低。ETR、Yield 是评价光合

系统功能的重要指标。随着处理温度降低,ETR、Yield 呈递减趋势,在 $10\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化平缓, $-5\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降趋势明显。说明凹叶厚朴可以适应 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,在 $10\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保持稳定的状态,在 $-5\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 光合作用的量子产率降低。

化学淬灭反映植物消除破坏性氧协调能力,当光能被叶绿素吸收后,吸收光能的叶绿素不能及时消除破坏性的活性氧,天线系统调控光能向光反应中心分配,非化学淬灭系数增加,可能通过叶黄素循环调节能量流向,以热的形式耗散激发能,保护光合器官免遭破坏^[7-8]。表明随着处理温度的降低,qP 呈现递减趋势,而 NPQ 呈上升趋势。qP 在 $-5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 差异显著,变化幅度较大, NPQ 在 $5\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化缓和,其在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 影响较大。

表 2 低温胁迫对凹叶厚朴幼叶叶绿素荧光参数的变化

Table 2 Changes of chlorophyll fluorescence parameters of *Magnolia officinalis* under low temperature stress

叶绿素荧光参数 Chlorophyll fluorescence parameters	温度 Temperature/ $^{\circ}\text{C}$					
	25(CK)	15	10	5	0	-5
F_v/F_m	$0.771\ 6\pm 0.006\ 0a$	$0.763\ 2\pm 0.007\ 2ab$	$0.751\ 6\pm 0.003\ 3b$	$0.745\ 6\pm 0.001\ 1b$	$0.636\ 6\pm 0.004\ 5c$	$0.628\ 4\pm 0.004\ 3c$
F_v/F_o	$3.365\ 5\pm 0.206\ 1a$	$3.103\ 9\pm 0.068\ 4ab$	$2.964\ 7\pm 0.041\ 9abc$	$2.945\ 2\pm 0.409\ 8abc$	$2.528\ 5\pm 0.018\ 0bc$	$2.212\ 3\pm 0.071\ 8c$
ETR	$15.861\ 5\pm 1.131\ 2a$	$15.053\ 0\pm 0.713\ 5ab$	$14.115\ 4\pm 0.734\ 5ab$	$13.353\ 8\pm 0.354\ 6b$	$8.530\ 8\pm 0.324\ 6c$	$8.115\ 4\pm 0.683\ 3c$
Yield	$0.777\ 0\pm 0.027\ 1c$	$0.760\ 3\pm 0.010\ 0b$	$0.738\ 8\pm 0.010\ 5a$	$0.725\ 5\pm 0.012\ 8a$	$0.648\ 8\pm 0.005\ 0a$	$0.525\ 0\pm 0.007\ 5a$
qP	$0.923\ 1\pm 0.002\ 3a$	$0.898\ 7\pm 0.040\ 8a$	$0.897\ 1\pm 0.047\ 4a$	$0.844\ 3\pm 0.045\ 6ab$	$0.765\ 8\pm 0.048\ 0b$	$0.505\ 1\pm 0.030\ 0c$
NPQ	$0.053\ 3\pm 0.011\ 7a$	$0.569\ 2\pm 0.039\ 2ab$	$0.867\ 5\pm 0.075\ 0b$	$0.869\ 2\pm 0.056\ 2b$	$1.019\ 2\pm 0.121\ 8c$	$1.210\ 0\pm 0.093\ 6d$

2.4 低温胁迫下凹叶厚朴幼叶的生理生化指标

2.4.1 叶绿素含量的变化

由图 5 可知,随着处理温度的降低,凹叶厚朴幼叶叶绿素含量呈下降的趋势。 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时幼叶叶绿素含量为 $4.23\text{ mg}\cdot\text{dm}^{-2}$ 。与 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比,15、10、5、0、 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度处理后,叶绿素含量分别下降了 9.44%、18.40%、24.70%、29.30%、40.44%,在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为最低值($2.46\text{ mg}\cdot\text{dm}^{-2}$)仅为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 59.56%。表明低温影响了凹叶厚朴幼叶叶绿素的生物合成和降解,在一定程度上影响了光合速率变化。

2.4.2 丙二醛(MDA)含量的变化

图 6 表明,随着处理温度降低,凹叶厚朴幼叶 MDA 含量呈上升趋势。15、10、5、0、 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度处理后,MDA 含量分别为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 111.2%、147.3%、170.6%、192.6%、215.6%,在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 MDA 含量

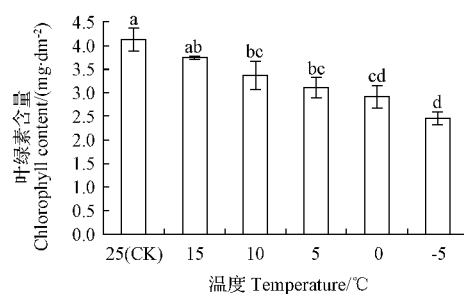


图 5 低胁迫对凹叶厚朴叶绿素相对含量的变化

Fig. 5 Changes of chlorophyll content in leaves of *Magnolia officinalis* under low temperature stress

积累达到最高。多重比较结果表明,15 $^{\circ}\text{C}$ 与 25 $^{\circ}\text{C}$ 差异不显著,10、5、0、 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 均与 25 $^{\circ}\text{C}$ 差异显著($P < 0.05$),表明严重低温使凹叶厚朴幼叶质膜氧化程度严重,质膜的损害程度加深。

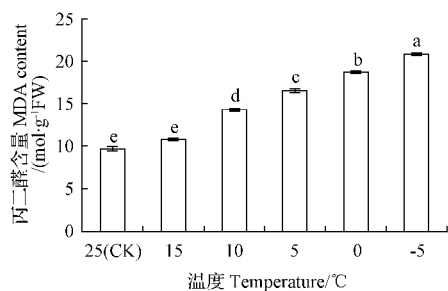


图 6 低温胁迫对凹叶厚朴 MDA 含量变化

Fig. 6 Changes of malondialdehyde content in leaves of *Magnolia officinalis* under low temperature stress

2.5 低温胁迫下凹叶厚朴的幼叶质膜透性

图 7 表明,随着处理温度的降低,相对电导率呈逐渐上升的趋势,在 -5°C 时相对电导率达到最大,是 25°C 的 1.67 倍,说明大量的电解质和非电解质外渗, -5°C 对细胞质膜透性和其结构组分破坏较大,凹叶厚朴受到冷冻伤害。经方差分析表明, 25°C 与 15°C 、 10°C 、 5°C 、 0°C 差异不显著, -5°C 与 25°C 差异显著。

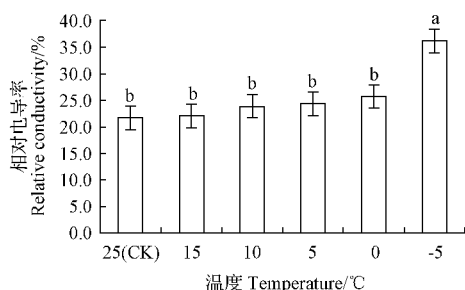


图 7 低温胁迫对凹叶厚朴相对电导率的变化

Fig. 7 Changes of relative conductivity in leaves of *Magnolia officinalis* under low temperature stress

3 结论与讨论

低温是限制凹叶厚朴生长和分布的重要环境因子之一。低温对植物光合作用的影响是多方面,而光合作用是物质和能量代谢最基本的途径,对植物生长与高效丰产有直接的影响,是反映植物生长状况的指标^[9]。植物在适应低温条件过程中,发生一系列生理生化变化,例如活性氧的积累,细胞质膜系统相变^[10-11]、叶绿素生物合成和

降解^[12-13]、叶片光合能力的下降^[14],呼吸作用变化、甚至光抑制,调整植物光合特性,形成适应低温胁迫生理生化特性。

低温影响植物叶片生长发育和叶片光合功能,导致生长发育缓慢,对于原产于热带、亚热带地区对低温抵抗能力较弱的植物影响较大。该试验研究了凹叶厚朴在低温(15°C 、 10°C 、 5°C 、 0°C 、 -5°C)条件下各项生理生化指标和光合特性的变化趋势,研究低温胁迫下凹叶厚朴生理反应及响应机制。

该试验中,随着胁迫温度的降低,质膜相对透性逐渐变大,细胞电解质大量渗透,细胞受损害越严重,这与邓令毅等^[16]研究结果相同。质膜相对透性、MDA 含量是反映逆境下植物胁迫程度有效指标。低温下凹叶厚朴的质膜相对透性和 MDA 含量逐渐升高,表现出相同的规律。说明低温下植物细胞水平功能发生紊乱,质膜受伤害程度随温度降低逐渐加深,这与林宁等^[17]对格木低温胁迫下质膜透性和 MDA 含量变化规律一致。

低温胁迫会引起植物气孔的关闭,限制 CO_2 的运输和水分的流失,进而影响植物 Pn 和 Tr ^[18]。通常低温逆境引起 Pn 下降有 2 个因素:一是气孔因素,另外一个是非气孔因素。该试验中,随着温度的下降,厚朴幼叶 Pn 、 Gs 和 Tr 均呈下降趋势,而叶片胞间 CO_2 浓度(Ci)随胁迫温度的下降呈上升趋势,说明低温胁迫下厚朴幼叶植株抑制气体交换与 CO_2 吸收,减少 CO_2 同化供应,由此表明厚朴幼叶 Pn 下降的原因是非气孔因素。这与王兆等^[19]对彩叶草低温下胁迫机制相同,而与邵毅等^[20]对杨梅光合抑制因素不同,可能与不同植物在不同温度下反应有所不同。该试验中,低温下凹叶厚朴幼叶 Tr 变化幅度较大,说明植物对低温敏感,气孔开闭受环境的影响,气孔开放程度对维持植物正常功能有着重要作用。

在 $0\sim 15^{\circ}\text{C}$ 时,凹叶厚朴幼苗叶片的 Fv/Fm 、 Fv/Fo 显著下降,表明叶绿素参与光合作用的光能降低,PSII 潜在活性受到破坏,PSII 反应中心天线色素吸收了多余光能不能及时以热形式耗散激发能,光合机构遭到一定程度破坏,在 -5°C 与 25°C 差异显著($P<0.05$)。在 $0\sim 15^{\circ}\text{C}$ 未见凹叶厚朴幼叶表观有明显伤害,而在严重低温 -5°C 叶片出现水渍冻害。

PSII 最大光化学效率降低是光合系统受损害程度的显著特征^[21]; qP 反映的是 PS II 反应中心的开放程度。qP 参数越大, PS II 天线色素吸收的光能用于光化学光能捕获和电子传递的份额越大, 则 PS II 的实际电子传递活性愈大^[22-23]。NPQ 反映的类囊体膜上 QA 重新氧化的程度^[24], 不能用于光合电子传递而耗散热能的变化^[25]。在逆境环境下, 植物叶片 PS II 反应中心活性超出一定的胁迫范围和修复速度, 造成 PS II 失活, 严重影响光系统间分配平衡, 破坏光化学连锁反应^[26]。该试验中, 随着温度降低, ETR、Yield 与 qP 显著下降, 而 NPQ 显著上升, 表明 PS II 反应中心失活使得天线色素原初捕光能力减弱, 用于 CO₂ 固定的传递电子减少, 植物低温胁迫受到光抑制, 参与光化学反应的光能部分显著减少, 为避免 PS II 受到破坏, 非化学热耗散增加。与香木莲幼苗在低温胁迫下研究相同, 其光合作用发生气孔抑制, 气孔导度(Gs)和净光合速率(Pn)下降, 光化学效率下降^[20,27], ETR 显著下降; 而广玉兰在-4℃低温, 其叶片幼苗光合速率、气孔导度和蒸腾速率下降, 而羧化效率(CE)显著下降, 进而光合速率降低。说明随胁迫温度的降低, 其幼苗叶片的 ETR 显著下降, Fv/Fm 显著下降, Fo 显著上升^[21]。该试验数据表明, 随着胁迫温度的降低, 凹叶厚朴幼叶 NPQ 升高, 是植物光和系统应对胁迫光损害的自我保护的机制。

该研究发现, -5~15℃处理下凹叶厚朴幼叶 Pn 下降幅度较大(图1), PS II 最大光化学效率(Fv/Fm)与其相似(表1), 叶片光合能力下降与厚朴幼叶的叶绿素下降呈极显著正相关性。这表明低温胁迫使叶绿素的降解导致叶片 PSII 活性的下降, 为了保护光合机构避免光合色素吸收过多的光能引起二次伤害有关^[28-30](表1), 解释了低温伤害引起叶绿素降解导致叶片光合活性不可逆性。低温胁迫条件凹叶厚朴的光合参数、叶绿素荧光参数、温度、质膜相对透性、丙二醛(MDA)含量等生理指标发生了相应变化, 叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)等光合生理指标呈显著下降, Gs、Ci 同时下降, 表明叶肉细胞中光合作用明显降低, 这与林祥磊等^[31]研究结论相同, 是对低温逆境的反应。质膜相对透性、MDA 含量与膜系统抵御低

温损伤能力存在一定的相关性, 为植株低温光保护机制中相关基因及抗寒性的研究提供技术参考, 对凹叶厚朴造林应用和冻害预防有重要意义。

参考文献

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [2] 中华人民共和国卫生部药典会. 中华人民共和国药典一部[S]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [3] 刘可云, 董志, 朱毅. 厚朴酚与和厚朴酚的药理学研究现状[J]. 中成药, 2006, 28(5): 716-719.
- [4] 张其德. 测定叶绿素的几种方法[J]. 植物学报, 1985, 3(5): 60-64.
- [5] 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, 2006: 64-66.
- [6] CONSTANT S, PEREWOSKA I, ALFONSO M, et al. Expression of the *psbA* gene during photoinhibition and recovery in *Synechocystis* PCC 6714: Inhibition and damage of transcriptional and translational machinery prevent the restoration of photosystem II activity[J]. Plant Molecular Biology, 1997, 34(1): 1-13.
- [7] KRAMER D M, JOHNSON G, KIIRATS O, et al. New fluorescence parameters for the determination of QA redox state and excitation energy fluxes[J]. Photosynthesis Research, 2004, 79(2): 209-218.
- [8] OZTURK I, OTTOSEN C O, RITZ C. The effect of temperature on photosynthetic induction under fluctuating light in *Chrysanthemum morifolium* [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2012, 35(4): 1179-1188.
- [9] 武维华. 植物生理学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2008: 462-469.
- [10] STEWART J M, GUINN G. Chilling injury and nucleotide changes in young cotton plants[J]. Plant Physiology, 1971, 48(2): 166-70.
- [11] BOWLER C, INZ D, DHALLUIN K, et al. Superoxide dismutase enhances tolerance of freezing stress in transgenic alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Plant Physiology, 1993, 103(4): 1155-1163.
- [12] MOON B Y, HIGASHI S, COMBOS Z, et al. Unsaturation of the membrane lipids of chloroplasts stabilizes the photosynthetic machinery against low-temperature photo inhibition in transgenic tobacco plants[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 1995, 92: 6219-6223.
- [13] LEIPNER J, STAMP P, FRACHEBOUD Y. Artificially increased ascorbate content affects zeaxanthin formation but not thermal energy dissipation or degradation of antioxidants during cold-induced photooxidative stress in maize leaves[J]. Planta, 2000, 210(6): 964-969.
- [14] ROSSINI S, CASAZZA A P, ENGELMANN E C, et al.

Suppression of both ELIP1 and ELIP2 in *Arabidopsis* does not affect tolerance to photoinhibition and photooxidative stress[J]. *Plant Physiology*, 2006, 141(4): 1264-1273.

[15] 刘辉,郭延平,胡美君. 杨梅光合作用的低温光抑制[J]. 热带亚热带植物学报, 2005(4): 338-342.

[16] 邓令毅,王洪春. 葡萄的抗寒性与质膜透性[J]. 植物生理学报, 1984(2): 14-18.

[17] 林宁,刘昆成,於艳萍,等. 低温胁迫对格木幼苗生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2012(24): 87-90.

[18] 杨猛,魏玲,胡萌,等. 低温胁迫对玉米幼苗光合特性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(1): 66-71.

[19] 王兆,刘晓曦,郑国华. 低温胁迫对彩叶草光合作用及叶绿素荧光的影响[J]. 浙江农业学报, 2014, 2(1): 49-56.

[20] 邵毅,叶文文,徐凯. 温度胁迫对杨梅光合作用的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(16): 161-166.

[21] 周建,杨立峰,郝峰鸽,等. 低温胁迫对广玉兰幼苗光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北植物学报, 2009, 29(1): 136-142.

[22] ALLEN D J, ORT D R. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plant [J]. *Trends in Plant Science*, 2001, 6(1): 36-42.

[23] LIANG L H, MEI X, LIN F, et al. Effect of low temperature stress on tissue structure and physiological index of cashew young leaves[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(1): 317-320.

[24] WANG C G, WANG X, CANG J, et al. Effect of low tempera-

ture stress on cold resistance ability of rice seedlings[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2004, 35(2): 205-207.

[25] MAXWELL K, JOHNSON G N. Chlorophyll fluorescence-a practical guide[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(345): 659-668.

[26] ADAMS W W, ZARTER C R, EBBERT V, et al. Photoprotective strategies of overwintering evergreens[J]. *Bio Science*, 2004, 54(1): 41-49.

[27] 黎明,李福秀,马焕成,等. 香木莲对短时低温胁迫处理的生理生态响应[J]. 北方园艺, 2006(1): 37-39.

[28] DEM M, ADAMS B, ADAMS W W. Photoprotection and other responses of plants to high light stress[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1992, 43: 599-626.

[29] GRATANI L, PESOLI P. Relationship between photosynthetic activity and chlorophyll content in an isolated *Quercus ilex* tree during the year[J]. *Photosynthetica*, 1998, 35(3): 445-451.

[30] USUDA H, KU M, EDWARDS G E, et al. Rates of photosynthesis relative to activity of photosynthetic enzymes, chlorophyll and soluble protein content among ten C4 species[J]. *Functional Plant Biology*, 1984, 11(6): 509-517.

[31] 林祥磊,许振柱,王玉辉,等. 羊草(*Leymus chinensis*)叶片光合参数对干旱与复水的响应机理与模拟[J]. 生态学报, 2008(10): 4718-4724.

Effect of Low Temperature Stress on Photosynthesis Physiology of *Magnolia officinalis* subsp. *biloba*

CHEN Jiancheng¹, XU Wen¹, QI Xiaoyong¹, HE Tianyou², ZHENG Yushan¹, CHEN Liguang¹

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002; 2. College of Art & Landscape Architecture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002)

Abstract: The 2-year-old *Magnolia officinalis* was used as test material, the photosynthetic characteristics of -5, 0, 5, 10, 15, 25 °C (CK) were studied by artificial low temperature stress. The results showed that the net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs) and transpiration rate (Tr) decreased gradually with the decrease of stress temperature, the decrease of chlorophyll content. The highest photo-chemical efficiency (Fv/Fm), potential photo-chemical efficiency (Fv/Fo), apparent electron transport rate (ETR), photosynthetic quantum yield (Yield) and photo-chemical quenching coefficient (qP) of photosynthetic PSII showed a decreasing trend. Ci, malondialdehyde (MDA) content, cytoplasmic membrane permeability and non-photo-chemical quenching coefficient (NPQ) increased, then plasma membrane was the most serious damage at -5 °C, a large number of ion percolated. Low temperature of chlorophyll significantly reduced, PSII reaction center damage, the leaves of *Magnolia officinalis* seedlings significantly inhibited light, resulting in reduced photosynthetic capacity.

Keywords: *Magnolia officinalis*; low temperature stress; chlorophyll; photosynthesis and photosynthetic characteristics; physiological index