

遮阴和施肥对油茶幼苗叶片抗寒性的影响

王 强¹, 曹胤瑾¹, 余云云¹, 刘桂华^{1*}, 詹文勇²

(1. 安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036; 2. 安徽德昌苗木有限公司, 舒城 231340)

摘 要: 以不同遮阴时间和施肥量处理的油茶幼苗为研究对象, 以其叶片在不同时间(1月、2月、11月和12月)半致死温度的差异为依据, 研究了油茶幼苗叶片的抗寒性对遮阴和施肥的响应。结果表明, 遮阴对翌年1月和2月油茶幼苗叶片的半致死温度没有显著影响, 而对当年11月和12月的半致死温度产生了显著影响。回归模拟的结果表明, 当年11月和12月油茶幼苗叶片半致死温度(y)与遮阴时间(x)遵守 $y=ax^2-bx-c$ ($R^2=0.8987^* \sim 0.9116^*$)模型, 即此时期的半致死温度随遮阴时间增加呈现先降低后升高的变化规律, 表明遮阴时间过长将会降低油茶幼苗的抗寒性。施肥对当年11月和12月及翌年1月和2月油茶幼苗叶片的半致死温度均产生了显著影响。回归模拟结果表明, 不同季节, 油茶幼苗叶片半致死温度(y)与施肥量(x)均遵守 $y=k/(1+a\exp(-(bx+cx^2+dx^3)))$ ($R^2=0.9929^* \sim 0.9994^*$)模型, 表明油茶幼苗叶片的半致死温度对施肥的响应呈现随施肥量增加先降低后趋于稳定的基本趋势, 油茶幼苗叶片的半致死温度不随施用量的增加而无限降低。

关键词: 油茶幼苗叶片; 遮阴; 施肥; 抗寒性

中图分类号: S794.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2017)06-1017-07

Effects of shade and fertilization on cold-resistance of *Camellia oleifera* seedling leaves

WANG Qiang¹, CAO Yinjin¹, YU Yunyun¹, LIU Guihua¹, ZHAN Wenyong²

(1. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

2. Anhui Dechang Seedling Co., Ltd., Shucheng 231340)

Abstract: Based on the difference of the semi-lethal temperature in different time (including January, February, November and December), the effects of shading time and fertilizer amount on cold resistance of *Camellia oleifera* seedling leaves were studied in this paper. The result showed that the shading time had a significant effect on the semi-lethal temperature of *Camellia oleifera* seedling leaves in November and December of the current year, but not for January and February of the next year. Regression simulation revealed that the relationship between the semi-lethal temperature (y) and shading time (x) fitted the mathematical correlation of $y=ax^2-bx-c$ ($R^2=0.8987^* \sim 0.9116^*$), which suggested that with shading time increasing, the semi-lethal temperature dropped in the first stage and then started to increase, indicating that excessive shading time would reduce the cold resistance of *Camellia oleifera* seedling leaves. Fertilization obviously affected the semi-lethal temperature of *Camellia oleifera* seedling leaves in aforementioned four months. Regression analysis demonstrated that, for all time mentioned above, the relationship between semi-lethal temperature (y) and fertilizer amount (x) fitted the model of $y=k/(1+a\exp(-(bx+cx^2+dx^3)))$ ($R^2=0.9929 \sim 0.9994$), which meant that the semi-lethal temperature would gradually decrease to a plateau (instead of infinitely low) with fertilizer amount increasing.

Key words: *Camellia oleifera* seedling leaves; shading; fertilization; cold-resistance

低温伤害是一种全球性的自然灾害。低温胁迫是植物常遇到的一种非生物胁迫, 不仅影响植物的生长发育, 严时可导致植物死亡。因此, 对植物的

抗寒性进行研究, 并采取一定方法提高植物的抗寒能力, 可以在一定程度上降低低温伤害, 使植物正常生长, 提高产量^[1-2]。植物抗寒性与许多因素和机

收稿日期: 2017-03-14

基金项目: 国家“十二五”林业科技支撑项目(2015BAD07B0405)资助。

作者简介: 王 强, 硕士研究生。E-mail: 391516970@qq.com

* 通信作者: 刘桂华, 教授。E-mail: liuguohua@ahau.edu.cn

制有关^[3-5],提高植物抗寒性的措施在生产上越来越多的得到实践^[6]。施用磷钾肥提高植物抗寒能力已经在很多植物物种上得到了印证,但大多数的研究对象都集中在粮食、果蔬等经济作物上^[7-10,26-30]。同时,近年来也出现了通过遮阴缩短日照对植物抗寒性影响的研究报道^[11]。

油茶属喜温植物,在其栽培分布的北缘,低温胁迫往往是其高产稳产的限制因子。因此,选择抗寒品种、采取适宜的培育措施,提高油茶抗寒能力,是实现油茶在其北缘区稳产高产的重要途径。然而,与对农作物的研究不同,目前关于对油茶抗寒性的研究报道相对较少。本研究通过施肥和树冠遮阴处理,定位测定了油茶苗木叶片抗寒指标的差异,研究了2种措施对油茶苗木叶片抗寒性的影响,为油茶苗木和油茶林分的科学培育提供理论依据。

1 试验地概况

试验地处于皖西大别山区东麓的舒城县,位于 $30^{\circ}01'N\sim 31^{\circ}34'N$, $116^{\circ}26'E\sim 117^{\circ}15'E$ 。属北亚热带湿润气候区,日照多年平均为1969h,大于 $10^{\circ}C$ 日照时数为1359h,占全年69%。 $\geq 10^{\circ}C$ 年积温4972.4 $^{\circ}C$,极端最高温度为40.5 $^{\circ}C$,极端最低温度为-17 $^{\circ}C$;最热为7月,最冷为1月;无霜期多年平均224d,初霜日多年平均出现在11月10日,终霜日多年平均出现在3月30日。

2 材料与方法

2.1 试验材料

供试材料为普通油茶1年生幼苗。采用营养钵种植育苗,营养钵盆高25cm、上口径20cm,底径15cm。育苗基质为泥炭土。

2.2 试验方法

试验于2014年2月18日在安徽丘陵舒城县德昌油茶育苗基地内进行。选择生长势基本一致的油茶幼苗定植于营养钵中,1个营养钵中定植1株。将42株油茶幼苗等分为A组(24株)和B组(18株)放置在苗床上,分别对2组幼苗进行遮阴对比试验和施肥对比试验。

施肥组:在油茶定植时,将磷钾复合肥与育苗基质混合均匀。施肥量设置梯度为0、10、13、16、19、22、25和28g·株⁻¹,施肥量0为对照,每个处理重复3次取平均值,并对营养钵做好标记。为了试验的相对准确,除施肥量不一样外,其他管理措施均相同。

遮阴组:遮阴处理采用黑布完全遮盖。于2014

年9月15日到10月15日的每日5:50(为日出时间)开始遮光(10月份推迟到6:10),去除遮阴的时间根据梯度设置。遮阴时间设置梯度为0、0.5、1、1.5、2和2.5h·d⁻¹,遮阴时间0为对照,每个处理重复3次取平均值,并对营养钵做好标记。其他试验环境与施肥组相同。

2.3 取样与测定

分别于当年11月、12月和翌年1月和2月各月15日,在各营养钵中选择充分伸张的功能叶5g左右,用潮湿纱布包裹分别装入密封塑料袋,带回实验室,分别用自来水将叶片冲洗干净,再用去离子水漂洗3次放在滤纸上吸干,再分别将每份叶片分为7组放入密封塑料袋置于超低温冰箱进行低温处理,温度设定梯度分别为0 $^{\circ}C$ 、-3 $^{\circ}C$ 、-6 $^{\circ}C$ 、-9 $^{\circ}C$ 、-12 $^{\circ}C$ 、-15 $^{\circ}C$ 和-18 $^{\circ}C$,每2个温度间降温时间30min,并分别在各个处理温度持续24h。

相对电导率的测定和半致死温度的计算。分别称取低温处理的叶片0.5g(重复3次),放入盛有20mL去离子水的烧杯中,震动摇匀浸泡24h,用雷磁DDS-237电导仪测定电导率,再放入100 $^{\circ}C$ 沸水浴中煮30min,冷却至室温后摇匀再用电导仪测定电导率,相对电导率=浸泡电导率/煮沸电导率 $\times 100\%$;根据不同低温处理下的相对电导率变化与温度的对应关系,利用Logistic $Y=k/(1+ae^{-bx})$ 拟合,求其方程的二阶导数,并令其为零,则可获得曲线的拐点 $X=(\ln a)/b$,即半致死温度 LT_{50} ^[12-14];丙二醛质量摩尔浓度测定采用硫代巴比妥酸法^[15];可溶性糖质量分数测定采用蒽酮比色法^[15];脱落酸的质量摩尔浓度测定采用高效液相色谱法(HPLC)^[16]。

2.4 数据处理

试验数据分析采用SPSS统计分析软件完成,用Excel制表。

3 结果与分析

3.1 遮阴处理对油茶幼苗叶片耐寒性生理指标影响

3.1.1 遮阴处理对叶片半致死温度的影响 从表1看出,一年中不同时期油茶幼苗叶片的半致死温度在不同的遮阴时间下均呈现基本相同的变化规律,即11月的半致死温度值显著高于其他时期,而1月的半致死温度值则显著低于其他时期。12月与2月的半致死温度,两两相比较则无显著差异。从表1还可以看出,一年中相同月份不同遮阴时间下油茶幼苗叶片半致死温度差异程度不同。其中11月、12月的叶片半致死温度在不同遮阴时间之间的差异显著,而翌年1月和2月的叶片半致死温度在不同遮

阴时间之间的差异不显著。从表 2 可知, 11 月和 12 月油茶幼苗叶片半致死温度 (y) 与不同遮阴时间 (x) 的关系, 均遵守 $y = ax^2 - bx - c$ (a 、 b 、 c 为系数), 即在一定的遮阴时间范围内, 遮阴时间越长 (即光照时间缩短), 其叶片半致死温度越低, 但达到一定遮阴时间之后, 叶片半致死温度则随遮阴时间的增长而

变化缓慢或略有升高。通过对半致死温度 (y) 与遮阴时间 (x) 的回归方程的求解可知 (表 2), 遮阴缩短光照时间 1.8~1.9 h, 可以显著降低 11、12 月份油茶幼苗叶片的半致死温度, 提高其抗寒能力。同时从表 1 可以看出, 遮阴对翌年 1 月和 2 月油茶幼苗叶片的半致死温度没有显著影响。

表 1 不同遮阴时间叶片半致死温度变化

Table 1 The changes of semi-lethal temperature of *Camellia oleifera* leaves' in different shading time

遮阴时间/h Shading time	半致死温度/°C Semi-lethal temperature			
	11 月 Nov.	12 月 Dec.	1 月 Jan.	2 月 Feb.
0.0	-5.25±0.04 ^{dA}	-7.64±0.13 ^{eB}	-9.40±0.11 ^{aC}	-7.31±0.28 ^{aB}
0.5	-5.62±0.12 ^{cA}	-7.97±0.09 ^{dB}	-9.29±0.17 ^{aC}	-7.24±0.13 ^{aB}
1.0	-6.36±0.13 ^{bA}	-8.23±0.12 ^{cB}	-9.33±0.10 ^{aC}	-7.25±0.09 ^{aB}
1.5	-7.01±0.01 ^{aA}	-8.59±0.13 ^{aB}	-9.30±0.11 ^{aC}	-7.35±0.27 ^{aB}
2.0	-7.09±0.17 ^{aA}	-8.44±0.12 ^{bB}	-9.37±0.14 ^{aC}	-7.18±0.25 ^{aB}
2.5	-6.43±0.16 ^{bA}	-8.31±0.23 ^{bcB}	-9.39±0.10 ^{aC}	-7.87±0.12 ^{aB}

注: 表中数字为“平均值±标准差”; 小写字母表示同列之间的比较, 大写字母表示同行之间比较, 字母相同表示差异不显著, 字母不同表示差异显著。下同。

Note: The data in the table are "mean ± standard deviation"; lowercase letters indicate the comparison between the same column, capital letters indicate the comparison between the same line, the same letter means the difference is not significant, while different letters mean significant difference. The same as below.

表 2 油茶幼苗叶片半致死温度对遮阴处理的响应模型

Table 2 The response models of semi-lethal temperature with shading treatment for *Camellia oleifera* seedlings

时间 Time	回归方程 Fitting equation	半致死温度达最低值的遮阴时间 y_{\min} (x) The shading time of the lowest semi-lethal temperature	拟合度 (R^2) Fitting degree
11 月份 Nov.	$y = 0.5564x^2 - 2.0174x - 5.0468$	-6.88(1.81)	0.8987*
12 月份 Dec.	$y = 0.3686x^2 - 1.2837x - 7.3960$	-8.51(1.74)	0.9116*

注: y_{\min} 为遮阴时间 x 取某值时, 半致死温度最低的值; *表示回归显著。

Note: y_{\min} means when the shading time x takes a value, the lowest value of semi-lethal temperature; "*" means the regression was significant.

表 3 遮阴处理油茶叶片丙二醛 (MDA) 质量摩尔浓度变化

Table 3 The changes of malondialdehyde (MDA) mass molar concentration in *Camellia oleifera* leaves with different shading time

遮阴时间/h Shading time	MDA 质量摩尔浓度/nmol·g ⁻¹ MDA mass molar concentration			
	11 月 Nov.	12 月 Dec.	1 月 Jan.	2 月 Feb.
0.0	33.65±1.21 ^{aD}	39.90±0.72 ^{aB}	41.51±0.58 ^{aA}	37.63±0.34 ^{aC}
0.5	32.77±0.74 ^{bD}	39.43±0.50 ^{bB}	41.16±0.86 ^{aA}	38.19±0.82 ^{aC}
1.0	31.24±0.14 ^{dD}	39.34±0.46 ^{bB}	41.92±0.42 ^{aA}	38.74±0.96 ^{aC}
1.5	29.08±0.82 ^{eD}	38.44±0.73 ^{dC}	42.40±0.38 ^{aA}	39.62±0.52 ^{aB}
2.0	28.66±0.66 ^{dD}	36.90±0.88 ^{eC}	40.64±0.36 ^{aA}	39.94±1.07 ^{aB}
2.5	31.98±1.25 ^{cC}	38.72±0.83 ^{eB}	41.88±0.48 ^{aA}	38.53±0.82 ^{aB}

3.1.2 遮阴处理对叶片丙二醛质量摩尔浓度的影响 植物组织丙二醛质量摩尔浓度与其受低温危害程度存在密切关系, 丙二醛质量摩尔浓度越高, 表明受低温危害的程度越重。表 3 表明, 一年中的不同时期, 经不同遮阴时间处理的油茶幼苗叶片丙二醛质量摩尔浓度由高到低的顺序基本上表现为 1 月、12 月、2 月和 11 月, 这也可以看成是油茶幼苗叶片在试验测定的 4 个月受低温危害程度由重到

轻的基本时间顺序。从表 3 也可以看出, 在 1 月、2 月和 12 月同期内, 经不同遮阴时间处理的油茶幼苗叶片, 其丙二醛质量摩尔浓度均分别没有显著差异。在 11 月和 12 月, 经不同遮阴处理的油茶幼苗叶片, 其丙二醛质量摩尔浓度存在差异, 其中经 1.5~2.0 h 遮阴处理的叶片, 其丙二醛质量摩尔浓度显著低于同期其他遮阴时间处理的叶片, 说明经 1.5~2.0 h 的遮阴处理, 可能使油茶幼苗叶片在 11

月和12月受到当地低温危害的程度显著降低。

3.1.3 遮阴处理对叶片可溶性糖含量影响 表4表明,油茶幼苗叶片可溶性糖含量由高到低顺序基本上表现为1月、12月、2月和11月。但是在相同月

份,经不同遮阴时间处理的油茶幼苗叶片,其可溶性糖含量均没有显著差异。由此可见,遮阴处理对油茶幼苗叶片可溶性糖没有产生显著影响,油茶幼苗叶片可溶性糖含量变化与季节变化存在相关性。

表4 遮阴处理油茶叶片可溶性糖质量分数的变化

Table 4 The changes of soluble sugar contents in *Camellia oleifera* leaves with different shading time

遮阴时间/h Shading time	可溶性糖质量分数/% Soluble sugar mass fraction			
	11月 Nov.	12月 Dec.	1月 Jan.	2月 Feb.
0.0	4.93±0.16 ^{aC}	5.90±0.24 ^{aB}	6.68±0.26 ^{aA}	5.88±0.13 ^{aB}
0.5	5.06±0.20 ^{aC}	6.17±0.22 ^{aB}	6.71±0.24 ^{aA}	5.91±0.10 ^{aB}
1.0	5.17±0.20 ^{aC}	6.24±0.23 ^{aB}	6.98±0.22 ^{aA}	6.11±0.08 ^{aB}
1.5	5.11±0.23 ^{aC}	6.35±0.26 ^{aB}	6.95±0.20 ^{aA}	5.78±0.13 ^{abB}
2.0	5.34±0.26 ^{aC}	6.36±0.27 ^{aB}	7.07±0.14 ^{aA}	5.95±0.05 ^{aB}
2.5	5.18±0.11 ^{aC}	6.19±0.17 ^{aB}	6.77±0.18 ^{aA}	5.50±0.18 ^{bB}

表5 遮阴处理油茶叶片脱落酸含量的变化

Table 5 The changes of abscisic acid contents in *Camellia oleifera* leaves with different shading time

遮阴时间/h Shading time	脱落酸含量/% Abscisic acid content			
	11月 Nov.	12月 Dec.	1月 Jan.	2月 Feb.
0.0	1 280.59±31.27 ^{dB}	1 685.72±22.49 ^{dB}	1 836.93±31.56 ^{aA}	1 429.27±34.22 ^{aC}
0.5	1 393.04±11.69 ^{dB}	1 687.38±29.67 ^{dB}	1 828.27±18.12 ^{aA}	1 455.80±23.20 ^{aC}
1.0	1 471.12±8.13 ^{dB}	1 716.98±4.19 ^{dB}	1 829.52±14.99 ^{aA}	1 483.05±16.93 ^{aC}
1.5	1 583.26±25.44 ^{bC}	1 759.80±35.21 ^{aB}	1 822.89±28.81 ^{aA}	1 510.81±31.11 ^{aD}
2.0	1 635.15±10.95 ^{aC}	1 734.11±31.15 ^{bB}	1 835.87±13.67 ^{aA}	1 462.53±29.97 ^{aD}
2.5	1 558.71±18.65 ^{cC}	1 698.23±15.11 ^{dB}	1 828.23±8.57 ^{aA}	1 505.51±34.26 ^{aC}

表6 施肥对油茶叶片半致死温度的影响

Table 6 The effects of different amount of fertilizer on the semi-lethal temperature of *Camellia oleifera* leaves

施肥量(x)/g·株 ⁻¹ Amount of fertilizer	半致死温度/°C Semi-lethal temperature			
	11月 Nov.	12月 Dec.	1月 Jan.	2月 Feb.
对照 Control	-5.42±0.11 ^{dA}	-7.89±0.14 ^{dB}	-9.42±0.19 ^{cC}	-7.76±0.10 ^{dB}
10	-5.72±0.10 ^{cA}	-8.11±0.12 ^{dB}	-10.11±0.10 ^{dC}	-8.05±0.05 ^{dB}
13	-5.98±0.07 ^{cA}	-8.47±0.07 ^{dB}	-10.77±0.08 ^{cC}	-8.41±0.18 ^{cB}
16	-6.34±0.08 ^{bA}	-8.85±0.23 ^{bB}	-11.25±0.07 ^{bC}	-8.73±0.13 ^{bB}
19	-6.67±0.21 ^{aA}	-9.28±0.19 ^{aB}	-11.96±0.18 ^{aC}	-9.17±0.10 ^{aB}
22	-6.76±0.14 ^{aA}	-9.39±0.13 ^{aB}	-12.06±0.16 ^{aC}	-9.26±0.16 ^{aB}
25	-6.79±0.11 ^{aA}	-9.42±0.07 ^{aB}	-12.09±0.19 ^{aC}	-9.28±0.25 ^{aB}
28	-6.81±0.13 ^{aA}	-9.46±0.09 ^{aB}	-12.12±0.15 ^{aC}	-9.31±0.08 ^{aB}

3.1.4 遮阴处理对叶片脱落酸含量的影响 表5表明,与上述其他指标类似,一年中的不同时期,油茶幼苗叶片脱落酸含量由高到低的顺序也表现为1月份、12月份、2月份和11月份。在1月、2月和12月同期内,经不同遮阴时间处理的油茶幼苗叶片,其脱落酸含量均分别没有显著差异。在11月,经不同遮阴处理的油茶幼苗叶片,其脱落酸含量存在差异,其中经1.5~2.0 h遮阴处理的叶片,其脱落酸含量显著高于同期其他遮阴时间处理的叶片。

3.2 施肥处理对油茶幼苗叶片耐寒性生理指标影响

3.2.1 施肥处理对叶片半致死温度的影响 虽然

施肥量不同,但一年中不同时期油茶幼苗叶片的半致死温度都呈现基本相同的变化规律(见表6),即11月的半致死温度值显著高于其他时期,而翌年1月的半致死温度值则显著低于其他时期。12月与翌年2月的半致死温度,分别两两相比较无显著差异。可见,一年中的不同时期,油茶幼苗叶片的抗寒能力存在差异,其由高到低的顺序为1、12、2和11月。从表6还可以看出,一年中各个相同时期的油茶幼苗叶片半致死温度,在不同施肥量处理之间存在差异,且其差异显著性与其施肥量差异程度有关。对叶片半致死温度(y)与施肥量(x)关

系的模拟结果(表 7)表明,各个时期,油茶幼苗叶片半致死温度(y)与施肥量(x)均遵守 $y=k/(1+a\exp(-(bx+cx^2+dx^3)))$ (式中 k 、 a 、 b 、 c 、 d 为系数)。通过对回归方程的极值求解(表 8)可以看出,一年中的不同时期半致死温度与其施肥量之间存在不同的对应关系,但其变化规律具有相似的趋势,即油茶幼苗叶片的半致死温度对于肥料处理的响应,呈现出随施肥量增加先降低后趋于稳定的基本趋势,表明油茶幼苗叶片的半致死温度不随肥料施用量的增加而无限降低,而是半致死温度最小趋势值均存在一个对应的最佳施肥量。

3.2.2 施肥处理对叶片丙二醛质量摩尔浓度影响

由表 8 可见,类似其他因子,经不同施肥量处理的油茶在一年中的不同时期,叶片丙二醛质量摩尔浓度也有一定的变化规律,其由高到低的顺序均为 1 月、2 月、12 月和 11 月,且其差异程度都达到显著水平,这也是油茶幼苗叶片受低温危害程度由重到轻的时间顺序。在一年中的各个相同时期,经不同施肥量处理后的油茶幼苗叶片,其丙二醛质量摩尔

浓度均存在显著差异。回归模拟结果(表 9)表明,各个时期油茶幼苗叶片丙二醛质量摩尔浓度(y)与施肥量(x)也均遵守 $y=k/(1+a\exp(-(bx+cx^2+dx^3)))$ 。通过对回归方程的极值求解(表 9)同样可以看出,油茶幼苗叶片的丙二醛浓度不随肥料施用量的增加而无限降低,而是在丙二醛质量摩尔浓度趋于最小值时,大体存在 36~38.5 g·株⁻¹的最佳施肥量。

3.2.3 施肥处理对叶片可溶性糖含量的影响 从表 10 可以看出,不同施肥量处理的油茶幼苗叶片内可溶性糖含量同样存在季节差异,其由高到低的顺序 1 月、12 月、2 月和 11 月。时间相同而施肥量不同,油茶幼苗叶片可溶性糖含量则存在不同程度的差异,其差异显著性与其施肥量差异程度有关。回归模拟结果(表 11)表明,各个时期油茶幼苗叶片可溶性糖含量(y)与施肥量(x)的关系,依然均遵守 $y=k/(1+a\exp(-(bx+cx^2+dx^3)))$ 。对回归方程的极值求解(表 11)可以看出,32~34 g·株⁻¹的施肥量大体是不同时期油茶幼苗叶片可溶性糖含量趋于最大值的最佳(最小)施肥量。

表 7 油茶幼苗叶片半致死温度对施肥处理的响应模型

Table 7 The response models of semi-lethal temperature with fertilization treatment for *Camellia oleifera* seedling leaves

时间 Time	回归方程 Fitting equation	R^2	P	最佳施肥量/g·株 ⁻¹ The best amount of fertilizer
11 月份 Nov.	$y=5.5851/(1-0.000009\exp(-(-1.2232x+0.050218x^2-0.000686x^3)))$	0.9994	0.0013	36.102
12 月份 Dec.	$y=7.9242/(1-0.000017\exp(-(-1.1137x+0.045339x^2-0.000615x^3)))$	0.9981	0.0038	36.861
1 月份 Jan.	$y=9.6571/(1-0.000199\exp(-(-0.838629x+0.033766x^2-0.000452x^3)))$	0.9929	0.0142	37.352
2 月份 Feb.	$y=7.8806/(1-0.000017\exp(-(-1.1066x+0.044821x^2-0.000604x^3)))$	0.9954	0.0092	37.103

表 8 施肥处理叶片丙二醛(MDA)质量摩尔浓度变化

Table 8 The changes of malondialdehyde (MDA) mass molar concentration in *Camellia oleifera* leaves with fertilization treatment

施肥量(x)/g·株 ⁻¹ Amount of fertilizer	MDA 质量摩尔浓度/nmol·g ⁻¹ MDA mass molar concentration			
	11 月 Nov.	12 月 Dec.	1 月 Jan.	2 月 Feb.
对照 Control	31.32±0.72 ^{ad}	35.87±0.45 ^{ac}	41.40±0.71 ^{aa}	38.13±0.91 ^{ab}
10	30.91±0.50 ^{bd}	34.55±0.56 ^{bc}	39.80±0.45 ^{ba}	37.31±0.57 ^{bb}
13	30.58±0.50 ^{cd}	33.48±0.81 ^{cc}	38.95±0.54 ^{ca}	35.56±0.62 ^{cb}
16	29.73±0.33 ^{dd}	31.77±0.41 ^{dc}	36.97±0.40 ^{da}	33.59±0.41 ^{db}
19	28.58±0.35 ^{ed}	30.33±0.70 ^{ec}	34.55±0.31 ^{ea}	31.35±0.71 ^{eb}
22	28.17±0.63 ^{fd}	30.11±0.78 ^{fc}	33.89±0.30 ^{fa}	30.51±0.25 ^{fb}
25	28.15±0.73 ^{fd}	30.07±0.52 ^{fc}	33.78±0.20 ^{fa}	30.43±0.44 ^{fb}
28	28.13±0.55 ^{fd}	30.03±0.50 ^{fc}	33.69±0.25 ^{fa}	30.34±0.33 ^{fb}

表 9 油茶幼苗叶片丙二醛质量摩尔浓度对施肥处理的响应模型

Table 9 The response models of MDA mass molar concentration with fertilization treatment for *Camellia oleifera* seedling leaves

时间 Time	回归方程 Fitting equation	R^2	P	最佳施肥量/g·株 ⁻¹ The best amount of fertilizer
11 月份 Nov.	$y=31.0048/(1+0.0000002\exp(-(-2.1380x+0.084641x^2-0.001112x^3)))$	0.9986	0.0029	38.058
12 月份 Dec.	$y=34.8510/(1+0.0000004\exp(-(-1.9053x+0.079656x^2-0.001103x^3)))$	0.9991	0.0018	36.109
1 月份 Jan.	$y=40.0212/(1+0.00000012\exp(-(-2.1788x+0.087696x^2-0.001172x^3)))$	0.9984	0.0031	37.413
2 月份 Feb.	$y=37.9227/(1+0.0000002\exp(-(-1.3681x+0.053311x^2-0.000691x^3)))$	0.9984	0.0032	38.575

表 10 施肥处理叶片可溶性糖含量的变化

Table 10 The changes of soluble sugar contents in *Camellia oleifera* leaves with fertilization treatment

施肥量(x)/ g·株 ⁻¹ Amount of fertilizer	可溶性糖质量分数/% Soluble sugar mass fraction			
	11月 Nov.	12月 Dec.	1月 Jan.	2月 Feb.
对照 Control	4.89±0.14 ^{dD}	6.16±0.14 ^{dB}	6.89±0.08 ^{dA}	5.71±0.09 ^{dC}
10	4.98±0.06 ^{dD}	6.19±0.12 ^{dB}	6.95±0.09 ^{cdA}	5.95±0.14 ^{dC}
13	5.14±0.13 ^{cdD}	6.36±0.14 ^{dB}	7.21±0.16 ^{cdA}	6.21±0.10 ^{dC}
16	5.32±0.07 ^{cd}	6.79±0.06 ^{bcB}	7.42±0.05 ^{cA}	6.42±0.05 ^{dC}
19	5.44±0.18 ^{bd}	7.075±0.21 ^{bb}	7.63±0.33 ^{cA}	6.63±0.19 ^{cC}
22	5.51±0.15 ^{abd}	7.37±0.10 ^{ab}	7.75±0.26 ^{bA}	6.75±0.07 ^{bc}
25	5.54±0.12 ^{ad}	7.41±0.17 ^{ab}	7.79±0.12 ^{aA}	6.77±0.10 ^{aC}
28	5.55±0.11 ^{ad}	7.55±0.15 ^{ab}	7.89±0.22 ^{aA}	6.89±0.08 ^{aC}

表 11 油茶幼苗叶片可溶性糖含量对施肥处理的响应模型

Table 11 The response models of soluble sugar contents with fertilization treatment for *Camellia oleifera* seedlings leaves

时间 Time	回归方程 Fitting equation	R ²	P	最佳施肥量/g·株 ⁻¹ The best amount of fertilizer
11月份 Nov.	y=5.5611/(1+0.030967exp(-(0.380627x+0.029002x ² -0.000421x ³)))	0.9999	0.0001	34.444
12月份 Dec.	y=7.6146/(1+0.024229exp(-(0.515034x+0.034338x ² -0.000539x ³)))	0.9956	0.0087	31.853
1月份 Jan.	y=7.9757/(1+0.206586exp(-(0.040862x+0.008823x ² -0.000137x ³)))	0.9973	0.0054	32.201
2月份 Feb.	y=6.9686/(1+0.260009exp(-(0.028990x+0.008406x ² -0.000133x ³)))	0.9950	0.0099	31.602

表 12 施肥处理叶片脱落酸含量的变化

Table 12 The Changes of abscisic acid content in fertilization treating

施肥量(x)/ g·株 ⁻¹ Amount of fertilizer	脱落酸含量/% Abscisic acid content			
	11月 Nov.	12月 Dec.	1月 Jan.	2月 Feb.
对照 Control	1 651.70±18.32 ^{aC}	1 705.72±22.49 ^{aB}	1 836.93±31.56 ^{aA}	1 429.27±34.22 ^{aD}
10	1 665.09±44.03 ^{aC}	1 707.38±29.68 ^{aB}	1 828.27±18.12 ^{aA}	1 455.80±23.20 ^{aD}
13	1 673.20±31.50 ^{aC}	1 696.98±4.19 ^{aB}	1 829.52±14.99 ^{aA}	1 483.05±16.93 ^{aD}
16	1 625.58±24.37 ^{aC}	1 696.23±3.93 ^{aB}	1 822.89±28.81 ^{aA}	1 510.81±31.11 ^{aD}
19	1 655.49±26.42 ^{aC}	1 677.11±31.15 ^{aB}	1 835.87±13.67 ^{aA}	1 462.53±29.97 ^{aD}
22	1 631.43±36.59 ^{aC}	1 694.23±15.11 ^{aB}	1 828.23±18.57 ^{aA}	1 505.51±34.26 ^{aD}
25	1 612.01±7.54 ^{aC}	1 700.31±6.64 ^{aB}	1 839.46±10.37 ^{aA}	1 475.02±45.66 ^{aD}
28	1 658.28±28.32 ^{aC}	1 702.55±12.26 ^{aB}	1 832.56±15.66 ^{aA}	1 465.75±21.15 ^{aD}

3.2.4 施肥处理对叶片脱落酸的含量的影响 从表12可以看出, 尽管各种施肥量处理下的油茶幼苗叶片脱落酸含量都随测定时期不同而不同, 但相同时期不同施肥量处理的油茶幼苗叶片脱落酸含量却不存在显著差异。由此可见, 施肥对油茶幼苗叶片脱落酸含量没有产生显著影响。

4 讨论与结论

遮阴对当年11月和12月的半致死温度产生了显著影响, 而对翌年1月和2月油茶幼苗叶片的半致死温度没有显著影响。通过对当年11月和12月油茶幼树叶片的半致死温度与遮阴时间关系的回归模拟可知, 此期油茶幼苗叶片半致死温度(y)与遮阴时间(x)遵守 $y = ax^2 - bx - c (R^2 = 0.8987^* \sim 0.9116^*)$

模型, 即半致死温度随遮阴时间增加呈现先降低后升高的变化规律, 求解回归方程可知, 11月和12月油茶幼苗叶片半致死温度最低值所对应的遮阴时间为1.7~1.8 h。

施肥对当年11月和12月及翌年1月和2月油茶幼苗叶片的半致死温度均产生了显著影响。回归模拟结果表明, 不同季节, 油茶幼苗叶片半致死温度(y)与施肥量(x)均遵守 $y = k / (1 + a \exp(-(bx + cx^2 + dx^3))) (R^2 = 0.9929^* \sim 0.9994^*)$ 模型, 即油茶幼苗叶片的半致死温度对施肥的响应呈现随施肥量增加先降低后趋于稳定的基本趋势, 表明油茶幼苗叶片的半致死温度不随肥料施用量的增加而无限降低。对回归方程的求解可知, 36~37 g·株⁻¹的施肥量是油茶幼苗叶片半致死温度趋于最低值所对应的施肥量

(最佳施肥量)。

当年 11 月和 12 月油茶幼苗叶片的半致死温度和脱落酸含量在不同遮阴时间之间分别存在显著差异, 且半致死温度和脱落酸含量之间分别存在显著相关 (-0.9706^* 、 -0.9038^*), 而此期同月份叶片可溶性糖含量在不同遮阴时间之间不存在显著差异。由此可见, 此期叶片抗寒性的提高与其脱落酸含量增加有关, 而与可溶性糖含量无关。这一现象与脱落酸含量增加能够提高糖代谢关键酶基因和抗寒基因的表达有关^[17-18]的结论相悖, 而与脱落酸也可通过影响酶促保护系统和脯氨酸等含量的改变而影响抗寒性^[19]的结论有吻合之处, 也与赤霉素、吲哚乙酸和玉米素核苷等含量与脱落酸的比值高低也是影响植物幼苗抗寒性重要原因^[20]的结论有相符之处。

当年 11 月和 12 月及翌年 1 月和 2 月油茶幼苗叶片的半致死温度和可溶性糖含量在不同施肥量处理之间分别存在显著差异, 而此期各月份不同施肥量处理叶片脱落酸含量不存在显著差异。由此表明, 此期叶片抗寒性的提高与其可溶性糖含量增加有关, 而与脱落酸含量无关。这一现象与可溶性糖含量增加了细胞质浓度, 提高细胞渗透压, 冰点下降, 最终提高了幼苗的抗寒能力^[21-22]的结论相似, 与钾肥有利于降低呼吸速率和水分损失, 保护细胞膜的水化层, 从而增强植物对低温的抗性^[8,23-25,29]的结论也有吻合之处。

参考文献:

- 曹慧明, 史作民, 周晓波, 等. 植物对低温环境的响应及其抗寒性研究综述[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 310-314.
- 刘彤, 祝佳媛, 李鹏, 等. 秋冬季自然降温过程中东北红豆杉幼苗的生理生化特性[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(2): 51-56.
- TURNER J, MITCHELL S J. The effect of short day treatments on containerized Douglas-fir morphology, physiology and phenology[J]. New Forests, 2003, 26(3): 279-295.
- MANCUSO S, PAOLO NICESE F, MASI E, et al. Comparing fractal analysis, electrical impedance and electrolyte leakage for the assessment of cold tolerance in *Callistemon* and *Grevillea* spp.[J]. J Hort Sci Biotech, 2004, 79(4): 627-632.
- BECK E H, HEIM R, HANSEN J. Plant resistance to cold stress: mechanisms and environmental signals triggering frost hardening and dehardening[J]. J Biosciences, 2004, 29(4): 449-459.
- 何香, 克热木·伊力, 买合木提·卡热. 叶面施肥对提高库尔勒香梨抗寒相关性的研究[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(8): 1401-1407.
- 徐呈祥. 提高植物抗寒性的机理研究进展[J]. 生态学, 2012, 32(24): 7966-7980.
- 王贺正, 陈明灿, 贺文闯, 等. 磷钾对小麦幼苗抗寒性的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(1): 141-145.
- 魏文慧, 孙万仓, 郭秀娟, 等. 氮磷钾肥对西北寒旱区冬油菜越冬率、产量及经济性状的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(2): 122-125.
- 罗宪. 钾肥对直播密植枣品质及抗寒性的影响[D]. 塔里木: 塔里木大学, 2013.
- 刘辉. 短日照对抗寒锻炼期间金叶女贞抗寒性与电阻抗参数的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2008.
- 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- 王玲, 王春雷, 马喜娟, 等. 锦带花新品种抗寒性[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(12): 43-46.
- 芦建国, 杨金红, 武翠红. 山东地区引种的 5 种石楠属植物抗寒性比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32(5): 153-156.
- 李合生, 孙群, 赵世杰. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- 杨杨, 范蓓, 生吉萍, 等. 高效液相色谱法测定芒果皮中脱落酸的含量[J]. 食品工业科技, 2014(2): 76-79.
- 王孝宣, 李树德, 东惠茹, 等. 番茄品种耐寒性与 ABA 和可溶性糖含量的关系[J]. 园艺学报, 1998, 25(1): 56-60.
- 刘丽杰. 低温下 ABA 调控冬小麦糖代谢及抗寒基因表达的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
- 贾庆虎. ABA 对黄瓜幼苗抗冷性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007.
- 黄杏, 陈明辉, 杨丽涛, 等. 低温胁迫下外源 ABA 对甘蔗幼苗抗寒性及内源激素的影响[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(4): 6-11.
- 王淑杰, 王家民, 李亚东, 等. 可溶性全蛋白、可溶性糖含量与葡萄抗寒性关系的研究[J]. 北方园艺, 1996(2): 77-78.
- 刘艳, 赵虎成, 李雄, 等. 梨枝条中淀粉、还原糖及脂类物质动态变化与抗寒性的关系[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2002, 23(1): 57-60.
- 游明鸿, 刘金平, 毛凯, 等. 钾肥对提高假俭草抗寒性作用的研究[J]. 草业科学, 2005, 22(2): 67-70.
- 刘勇, 陈艳, 张志毅, 等. 不同施肥处理对三倍体毛白杨苗木生长及抗寒性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(1): 39-44.
- 祝燕. 秋季施肥对长白落叶松苗木质量的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- 祝燕, 李国雷, 李庆梅, 等. 持续供氮对长白落叶松播种苗木生长及抗寒性的影响[J]. 南京林业大学学报, 2013, 37(1): 44-48.
- 克热木·伊力, 何香, 帕丽达·牙合甫. 不同施肥量对库尔勒香梨抗寒性的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2012, 35(1): 18-21.
- 罗丽雯, 江明艳, 陈其兵. 磷对慈竹抗寒性的影响研究[J]. 竹子研究汇刊, 2011, 30(3): 24-28.
- 何香. 不同施肥处理对库尔勒香梨树体营养积累与抗寒性的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012.
- 徐正华, 张晓红, 陈秀斌. 不同栽培措施对油菜抗寒性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2012, 31(6): 661-667.