



外源硅预处理对低温胁迫下常春藤生理特性的影响

金红燕, 刘娇, 胡星, 杨雄伟, 黄晓霞*

西南林业大学园林园艺学院, 国家林业与草原局西南风景园林工程技术研究中心, 昆明650224

*通信作者(huangxx@swfu.edu.cn)

摘要: 本文以常用园林地被植物常春藤(*Hedera nepalensis* var. *sinensis*)扦插水培苗为研究材料, 研究不同浓度外源硅预处理对低温(4和1°C)胁迫下常春藤植株光合荧光等生理特性的影响。结果表明: 低温降低常春藤的净光合速率及光合色素含量, 并对其造成了渗透胁迫和氧化胁迫。外源1 mmol·L⁻¹硅预处理可显著提高4和1°C低温下常春藤的净光合速率(P_n)、光系统II的实际光化学量子产量[Y(II)]、最大光化学量子产量(F_v/F_m)及脯氨酸(Pro)含量; 以及显著提高1°C低温下常春藤超氧化物歧化酶(SOD)活性和叶绿素a(Chla)含量。外源2 mmol·L⁻¹硅预处理对常温下常春藤的生长有一定的抑制作用, 表现为 P_n 值、Y(II)值和 F_v/F_m 值的下降, 而对4和1°C低温条件下常春藤的 P_n 值、Y(II)值、 F_v/F_m 值及Chla含量无显著影响。综上所述, 外源1 mmol·L⁻¹的硅预处理可提高低温胁迫下常春藤的光合能力、抗氧化能力及渗透调节能力, 从而减轻低温胁迫对其造成的伤害。因此, 添加适宜浓度的外源硅可作为提高常春藤抗寒性的有效措施。

关键词: 常春藤; 硅; 低温胁迫; 生理特性

Effects of exogenous silicon pretreatment on physiological characteristics of *Hedera nepalensis* var. *sinensis* under low temperature stress

JIN Hongyan, LIU Jiao, HU Xing, YANG Xiongwei, HUANG Xiaoxia*

College of Landscape Architecture and Horticulture, Southwest Forestry University; Southwest Landscape Architecture Engineering Research Center of State Forestry and Grassland Administration, Kunming 650224, China

*Corresponding author (huangxx@swfu.edu.cn)

Abstract: In this paper, the effects of different concentrations of exogenous silicon pretreatment on photosynthesis, fluorescence and other physiological characteristics of *Hedera nepalensis* var. *sinensis* plants under low temperature (4 and 1°C) were studied by using a common garden ground cover plant *Hedera nepalensis* var. *sinensis* as the research material. The results showed that low temperature decreased the net photosynthetic rate and photosynthetic pigment content of *Hedera nepalensis* var. *sinensis*, and caused osmotic and oxidation stress. Pretreatment with exogenous 1 mmol·L⁻¹ silicon significantly increased the net photosynthetic rate (P_n), actual photochemical quantum yield [Y(II)], maximum photochemical quantum yield (F_v/F_m) and proline (Pro) content of *Hedera nepalensis* var. *sinensis* at 4 and 1°C. The activity of superoxide dismutase (SOD) and the content of chlorophyll a(Chla) were significantly increased at 1°C. Exogenous 2 mmol·L⁻¹ silicon pretreatment had a certain inhibitory effect on the growth of *Hedera nepalensis*

收稿 2023-04-27 修定 2023-10-31

资助 云南省高层次人才“青年拔尖人才”(YNWR-QNBJ-2020-222)。

var. *sinensis* at room temperature, which showed a decrease in P_n , $Y(II)$ and F_v/F_m value, but had no significant effect on P_n , $Y(II)$, F_v/F_m value and Chl a content of *Hedera nepalensis* var. *sinensis* at low temperature of 4 and 1°C. In summary, exogenous 1 mmol·L⁻¹ silicon pretreatment can improve the photosynthetic, antioxidant and osmotic regulation capacity of *Hedera nepalensis* var. *sinensis* under low temperature stress, so as to reduce the damage caused by low temperature stress. Therefore, adding appropriate concentration of exogenous silicon can be used as an effective measure to improve the cold resistance of *Hedera nepalensis* var. *sinensis*.

Key words: *Hedera nepalensis* var. *sinensis*; silicon; low temperature stress; physiological characteristics

低温影响植物的生长发育,甚至导致大面积植物受害或者死亡,造成巨大的经济损失(Ding等2019)。研究表明,低温会造成植物叶绿体损伤,导致光合色素降解,降低光化学效率(姜籽竹等2015);低温不仅诱导光抑制,而且抑制光合电子传递和光合磷酸化过程,导致光合速率下降(逯久幸等2022);低温亦使植物体内的活性氧(reactive oxygen species, ROS)增加,造成植物细胞膜脂过氧化,丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量上升,破坏植物正常生理代谢过程,影响植物正常生长(陈茜等2016; Wang等2021)。因此,探讨如何缓解低温对植物光合机构的损伤,维持其正常生理代谢具有重要意义。

硅(Silicon, Si)是地壳中含量较丰富的元素。研究表明,硅可促进高等植物的生长发育,提高高等植物对非生物胁迫的抗性(Etesami和Jeong 2018)。张倩等(2019)及李笑佳等(2019)的研究发现,外源硅可通过抑制光合色素降解以及提高渗透调节能力来增强植物的抗逆性;可促进PSII最大光化学量子产量的增加来增强黄瓜对逆境的适应性(Yin等2019);可提高低温胁迫下植物对CO₂的固定能力和同化效率,加速卡尔文循环(徐呈祥等2019),增强低温下植物的光合能力;可增强植物体内抗氧化酶的活性来清除胁迫产生的过量自由基,提高植物的抗逆性(Oliveira等2020; 郭树勋等2021);可诱导低温下辣椒逆境蛋白基因的表达,增加辣椒逆境蛋白的含量,减轻低温对其造成的伤害(魏小春等2016)。然而,郑世英等(2017)对小麦幼苗的研究表明,硅浓度过高会导致膜脂过氧化产物MDA积累;麻云霞等(2018)对酸枣的研究显示,高浓度的硅会降低逆境下植株的生物量、叶绿素含量以及抗氧化酶活性。因此,外源硅对逆境下植物光合等

生理代谢的促进效果会受浓度影响。适宜浓度的外源硅可提高逆境下植物的光合能力、渗透调节能力及抗氧化能力,增强植物的抗逆性,超过适宜浓度的硅则会抑制植物生理代谢(陈明灿等2014; 王丽燕2013)。

常春藤(*Hedera nepalensis* var. *sinensis*)为五加科(Araliaceae)常春藤属(*Hedera*)的常绿植物,具有观赏性佳、培育周期短、养护管理成本低等优点,常用于城市绿化及边坡护理,是重要的园林绿化植物。目前已有研究表明常春藤对重金属及盐胁迫等具有较好的耐受性,可作为很好的城市生态修复植物(李琬婷等2019; 李燕等2022)。而关于该植物对低温的耐受性及对其他外源物质的生理响应尚不清楚。因此,本试验拟通过不同浓度外源硅预处理研究常春藤对零上低温胁迫的生理生化响应,以期为提高园林地被植物的耐冷性及优化植物日常养护管理提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试验设计

试验于2022年5月在西南林业大学树木园(25°05' N, 102°76' E)进行。选取长势一致的常春藤[*Hedera nepalensis* K. Koch var. *sinensis* (Tobl) Rehd.],在清水中水培缓苗。待长出新根后选取生长一致的植株移栽到不加蔗糖和琼脂的1/4DKW培养基(杭州百思生物技术有限公司)中进行培养及实验处理。试验在人工气候箱中进行:70%~75%的大气相对湿度,12 h/12 h(昼/夜)光周期。硅浓度及处理温度均通过预实验及参考熊炳平等(2022)的研究确定。

本试验共设定3个硅预处理组,外源硅由Na₂-

SiO₃·9H₂O试剂提供, 设置3个浓度: CK (0 mmol·L⁻¹)、Si1 (1 mmol·L⁻¹)和Si2 (2 mmol·L⁻¹), 每处理组有5个生物学重复。试验分4个阶段, 每个阶段的处理时间和温度如表1所示。其中试验期间每2 d 更换一次处理液, 分别在每一阶段末进行取样并测定各项生理生化指标, 每处理组取5个重复; 试验期间为避免低温胁迫阶段造成高光强胁迫, 第1~2阶段的光照强度为360 μmol·m⁻²·s⁻¹, 第3~4阶段的光照强度调至180 μmol·m⁻²·s⁻¹。

1.2 测定方法

1.2.1 光合参数及叶绿素荧光参数

选取长势一致的植株, 用LI-6400 (美国LI-COR Biosciences公司)便携式光合仪于上午9:00—11:00 选取同一部位成熟功能叶测定常春藤的光合参数, 设置叶室温度为24℃, CO₂浓度为400 μmol·mol⁻¹, 测定光强为360 μmol·m⁻²·s⁻¹, 相对湿度为65%。将常春藤暗适应30 min, 使用Imaging-PAM M-series 叶绿素荧光成像系统(德国WALZ公司)测定叶绿素荧光参数, 设置测量光强为0.5 μmol·m⁻²·s⁻¹, 饱和光脉冲为2 700 μmol·m⁻²·s⁻¹, 脉冲时间40 s, 作用光强度为56 μmol·m⁻²·s⁻¹。

1.2.2 生理指标

光合色素采用丙酮-乙醇(等体积比)混合液浸提法测定, 脯氨酸(proline, Pro)含量采用茚三酮比色法测定, 可溶性蛋白(soluble protein, SP)含量采用考马斯亮蓝染色法测定; 可溶性糖(soluble sugar, SS)和淀粉(starch)含量均用葡萄糖氧化酶法测定; 分别采用氮蓝四唑法、愈创木酚法及紫外吸收法测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(peroxidase, POD)及过氧化氢酶(catalase, CAT)的活性, 采用硫代巴比妥酸法测定MDA含量, 采用紫外吸收法测定抗坏血酸过氧化物酶

(ascorbate peroxidase, APX)活性。

1.2.3 数据统计与分析

数据采用SPSS 26.0软件进行方差齐性和标准化处理, 采用双因素方差分析(two-way ANOVA)来分析硅、低温、硅×低温的交互效应; 再对数据进行一元方差分析(one-way ANOVA), 平均数间的多重比较采用Duncan’s检验方法, *P*<0.05时差异显著; 用Origin 2022作柱状图, 在网站(<https://www.chip-lot.online/>)绘制相关性分析热图。

2 实验结果

2.1 外源硅预处理对低温胁迫下常春藤光合参数的影响

由图1可知, 从第1阶段到第4阶段, 低温下常春藤的净光合速率(*P_n*)呈下降趋势, 而气孔导度(*G_s*)、胞间CO₂浓度(*C_i*)和蒸腾速率(*T_r*)则呈现先升后降的趋势。经Si1处理可使常春藤的光合参数升高, 而Si2处理则会降低其光合参数。硅预处理对低温胁迫下常春藤的*P_n*、*G_s*、*C_i*和*T_r*有显著影响; 经Si1预处理可显著提高低温下常春藤的*P_n*、*C_i*和*T_r*, 在4℃时较CK组分别增加51.9%、16.7%和116.7%, 在1℃时较CK组分别增加253.9%、57.3%和248.6%, *G_s*在4℃时较CK组显著增加123.7%; 然而Si2预处理会导致低温下常春藤的光合参数显著降低, 在4℃时*P_n*、*G_s*、*C_i*和*T_r*较CK组分别显著降低50.3%、60.8%、11.7%和54.1%。以上结果表明Si1预处理可提高低温胁迫下常春藤的光合能力。

2.2 外源硅预处理对低温胁迫下常春藤叶绿素荧光参数的影响

由表2可得, 从第1阶段到第4阶段, 常春藤的实际光化学量子产量[Y(II)]、最大光化学量子产量(*F_v*/*F_m*)、非光化学淬灭系数(NPQ)、光化学淬

表1 试验设计
Table 1 Trial design

处理阶段	实验处理	温度(昼/夜)/℃	实验处理时间/d
1	试验初始	25/20	—
2	硅预处理	25/20	15
3	4℃低温处理	4/4	2
4	1℃低温处理	1/1	2

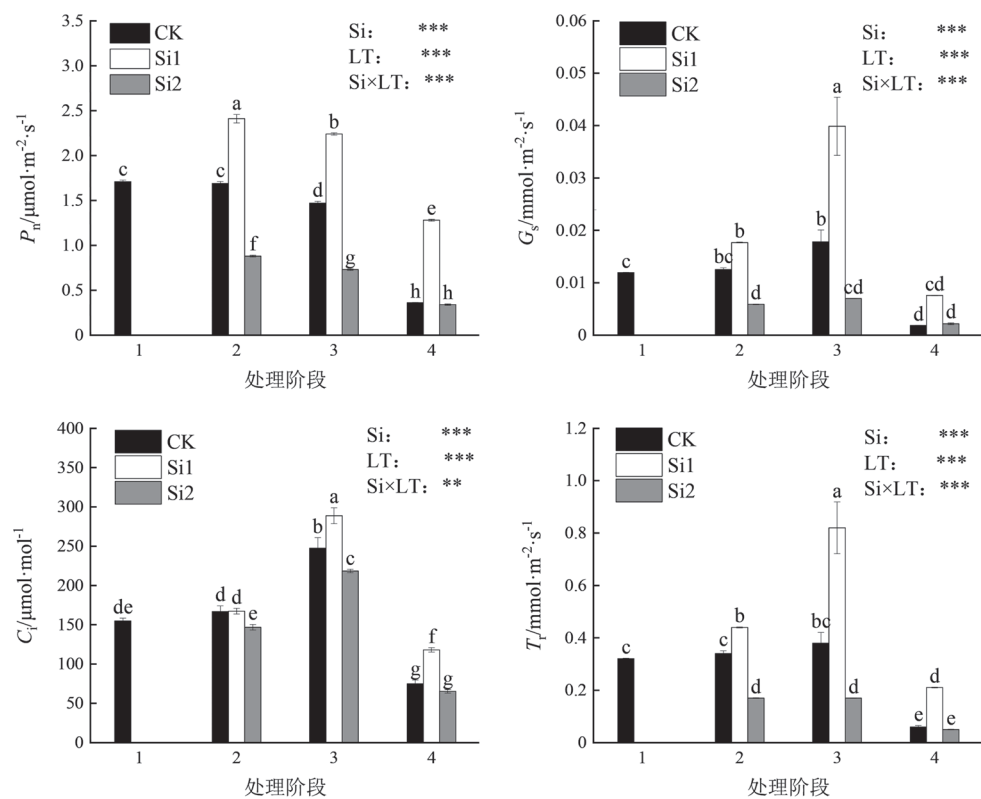


图1 外源硅预处理对低温胁迫下常春藤光合参数的影响

Fig. 1 Effects of exogenous silicon pretreatment on photosynthetic parameters of *H. nepalensis* var. *sinensis* under low temperature stress

*: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$, ***: $P < 0.001$, ns: $P > 0.05$ 。不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。LT表示低温,下同。

表2 外源硅预处理对低温胁迫下常春藤叶绿素荧光参数的影响

Table 2 Effects of exogenous silicon pretreatment on chlorophyll fluorescence parameters of *H. nepalensis* var. *sinensis* under low temperature stress

阶段	处理	F_v/F_m	Y(II)	NPQ	q_p	ETR	F_0
1	CK0	0.69±0.01 ^b	0.295 4±0.004 8 ^{bc}	0.471 4±0.005 3 ^b	0.60±0.01 ^{bc}	6.34±0.19 ^{bc}	0.109 2±0.002 9 ^e
2	CK	0.69±0.00 ^b	0.304 4±0.006 9 ^b	0.475 0±0.006 8 ^b	0.62±0.01 ^b	6.40±0.13 ^{bc}	0.116 1±0.004 0 ^{de}
	Si1	0.74±0.00 ^a	0.332 4±0.013 7 ^a	0.504 6±0.003 5 ^a	0.65±0.01 ^a	6.94±0.15 ^a	0.122 2±0.001 8 ^d
	Si2	0.67±0.01 ^c	0.275 4±0.002 1 ^{cd}	0.441 4±0.015 0 ^c	0.57±0.02 ^d	6.06±0.05 ^c	0.149 4±0.001 6 ^c
3	CK	0.61±0.01 ^d	0.278 2±0.010 3 ^c	0.439 4±0.021 2 ^c	0.58±0.00 ^{cd}	6.04±0.08 ^c	0.148 7±0.001 5 ^c
	Si1	0.70±0.00 ^b	0.308 0±0.004 6 ^b	0.465 0±0.005 1 ^{bc}	0.62±0.01 ^b	6.52±0.04 ^b	0.144 2±0.003 3 ^c
	Si2	0.59±0.00 ^c	0.255 8±0.003 4 ^d	0.328 4±0.003 3 ^c	0.54±0.00 ^c	5.62±0.09 ^d	0.162 3±0.002 8 ^b
4	CK	0.59±0.01 ^c	0.255 0±0.004 4 ^d	0.330 6±0.008 9 ^{dc}	0.54±0.00 ^c	5.70±0.13 ^d	0.166 8±0.002 5 ^b
	Si1	0.60±0.00 ^d	0.296 6±0.008 7 ^{bc}	0.358 0±0.009 0 ^d	0.57±0.01 ^d	6.24±0.04 ^{bc}	0.152 7±0.004 0 ^c
	Si2	0.56±0.00 ^f	0.223 8±0.006 0 ^e	0.262 0±0.002 1 ^f	0.51±0.01 ^e	5.28±0.15 ^e	0.177 6±0.004 9 ^a
P值	Si	***	***	***	***	***	***
	LT	***	***	***	***	***	***
	Si×LT	***	ns	**	ns	ns	***

灭系数(q_p)和电子传递速率(ETR)均呈下降趋势, 初始荧光(F_0)则上升。Si1可使常春藤的叶绿素荧光参数增加, 而Si2则会降低其叶绿素荧光参数。硅预处理对低温胁迫下常春藤的 F_v/F_m 、 F_0 和NPQ有显著影响($P<0.01$); 经Si1预处理可使低温下常春藤的Y(II)、 F_v/F_m 、ETR和 q_p 显著提高, 在4℃时较CK组分别增加10.7%、14.8%、7.9%和6.9%, 在1℃时较CK组分别增加15.4%、1.7%、9.5%和5.6%, 1℃时 F_0 较CK组显著降低8.5%。经Si2预处理会导致低温下常春藤的Y(II)、 F_v/F_m 和ETR显著降低, 在4℃时较CK组分别降低7.1%、3.3%和7.0%, 在1℃时较CK组分别降低15.4%、5.1%和7.4%, q_p 在4℃时较CK组降低6.9%, NPQ在1℃时较CK组降低26.9%, F_0 在4℃和1℃时较CK组分别增加9.1%和6.5%。以上结果可知Si1预处理可缓解低温对常春藤光系统II反应中心的活性和功能的伤害, 并提高其光合作用效率。

2.3 外源硅预处理对低温胁迫下常春藤光合色素含量的影响

由表3可发现, 从第1阶段到第4阶段, 常春藤的光合色素含量整体呈下降趋势, 不同浓度外源硅预处理对常春藤的光合色素具有不同影响。Si2

会降低其光合色素含量。经Si1预处理可显著提高低温下常春藤的Chla含量和Chla/Chlb的比值, 在1℃时较CK组显著增加17.9%和10.1%。经Si2预处理会导致低温下常春藤的Chl(a+b)和类胡萝卜素的含量降低, 在4℃时较CK组显著降低15.2%和26.5%, 在1℃时较CK组显著降低15.3%和22.9%; 在4℃时Chla含量较CK组显著降低16.2%。由此可发现, Si1预处理可有效缓解低温对常春藤光合色素含量的降低。

2.4 外源硅预处理对低温胁迫下常春藤渗透调节物质和MDA含量的影响

由表4可知, 从第1阶段到第4阶段, 常春藤的脯氨酸(Pro)含量、可溶性蛋白(SP)含量、可溶性糖(SS)含量、淀粉及MDA的含量呈上升趋势。不同浓度外源硅预处理对常春藤的渗透调节物质含量及MDA含量具有不同影响。Si2处理则会使常春藤的渗透调节物质与MDA含量增加。硅预处理对低温胁迫下常春藤的SP、SS和淀粉有显著影响($P<0.01$); 经Si1预处理可显著提高低温下常春藤Pro、SP、SS和淀粉的含量, 在4℃时较CK组显著增加32.0%、12.0%、9.9%和12.8%, 在1℃时较CK组显著增加28.3%、13.2%、12.4%和14.0%。经Si2

表3 外源硅预处理对低温胁迫下常春藤光合色素含量的影响
Table 3 Effect of exogenous silicon pretreatment on photosynthetic pigment content in *H. nepalensis* var. *sinensis* under low temperature stress

阶段	处理	Chla含量/ mg·g ⁻¹ (FW)	Chlb含量/ mg·g ⁻¹ (FW)	Chla/Chlb	Chl(a+b)含量/ mg·g ⁻¹ (FW)	类胡萝卜素含量/ mg·g ⁻¹ (FW)
1	CK0	2.66±0.09 ^a	1.02±0.03 ^{ab}	2.87±0.09 ^{ab}	3.65±0.04 ^a	0.59±0.01 ^{ab}
2	CK	2.69±0.25 ^a	1.09±0.02 ^a	2.90±0.05 ^a	3.63±0.34 ^a	0.61±0.06 ^a
	Si1	2.69±0.05 ^a	1.08±0.28 ^a	2.87±0.02 ^{ab}	3.69±0.06 ^a	0.60±0.02 ^a
	Si2	2.20±0.08 ^{bcd}	0.84±0.05 ^{abcd}	2.66±0.03 ^{cd}	3.03±0.13 ^{bcd}	0.41±0.01 ^{dc}
3	CK	2.33±0.04 ^b	0.79±0.06 ^{abcd}	2.72±0.01 ^{bc}	3.38±0.13 ^{ab}	0.52±0.01 ^{bc}
	Si1	2.48±0.08 ^{ab}	0.95±0.02 ^{abc}	2.83±0.01 ^{ab}	3.49±0.06 ^a	0.50±0.01 ^c
	Si2	1.96±0.06 ^{cde}	0.76±0.02 ^{bcd}	2.63±0.07 ^{cd}	2.86±0.09 ^{cd}	0.38±0.01 ^c
4	CK	1.90±0.01 ^{de}	0.67±0.02 ^{cd}	2.57±0.06 ^{cd}	3.29±0.09 ^{abc}	0.48±0.01 ^{cd}
	Si1	2.24±0.02 ^{bc}	0.85±0.00 ^{abcd}	2.83±0.02 ^{ab}	3.38±0.11 ^{ab}	0.42±0.03 ^{dc}
	Si2	1.67±0.07 ^c	0.59±0.04 ^d	2.52±0.06 ^d	2.79±0.10 ^d	0.37±0.00 ^c
P值	Si	***	ns	***	**	***
	LT	***	*	*	ns	***
	Si×LT	ns	ns	ns	ns	ns

表4 外源硅预处理对低温胁迫下常春藤渗透调节物质和MDA含量的影响
Table 4 Effects of exogenous silicon pretreatment on osmotic regulatory substances and MDA contents in *H. nepalensis* var. *sinensis* under low temperature stress

阶段	处理	脯氨酸含量/ μg·g ⁻¹	可溶性蛋白含量/ μg·g ⁻¹	可溶性糖含量/ mg·g ⁻¹	淀粉含量/ mg·g ⁻¹	MDA含量/ nmol·g ⁻¹ (FW)
1	CK0	44.15±7.43 ^c	15.59±0.46 ^c	203.76±1.98 ^f	184.32±3.04 ^c	15.11±0.76 ^c
2	CK	45.34±8.13 ^c	15.54±0.30 ^c	207.53±2.54 ^f	185.95±3.30 ^c	15.29±0.56 ^c
	Si1	43.91±2.15 ^c	15.69±0.17 ^c	211.53±4.24 ^f	187.61±1.10 ^c	15.58±0.42 ^c
	Si2	51.76±2.64 ^{de}	17.71±0.58 ^d	237.16±1.26 ^c	198.13±2.21 ^d	17.97±0.96 ^d
3	CK	57.04±1.12 ^{cde}	17.93±0.24 ^d	254.98±6.98 ^d	239.72±1.86 ^c	19.19±0.61 ^{cd}
	Si1	75.32±3.34 ^{ab}	20.08±0.34 ^c	280.34±2.52 ^c	270.36±3.27 ^b	18.04±0.89 ^d
	Si2	59.40±5.69 ^{cd}	18.39±0.23 ^d	258.31±2.56 ^d	236.13±3.03 ^c	21.16±0.52 ^{bc}
4	CK	68.01±2.07 ^{bc}	22.26±0.33 ^b	298.47±3.25 ^b	278.74±3.00 ^b	22.36±0.21 ^b
	Si1	87.23±1.04 ^a	25.20±0.18 ^a	335.53±3.67 ^a	317.84±2.77 ^a	20.83±0.82 ^{bc}
	Si2	67.57±1.05 ^{bc}	22.46±0.40 ^b	286.31±6.73 ^c	273.69±3.46 ^b	24.72±0.34 ^a
<i>P</i>	Si	ns	***	***	***	***
	LT	***	***	***	***	***
	Si×LT	ns	***	***	***	ns

预处理会显著降低低温下常春藤SS含量, 在1℃时较CK组显著降低4.2%, 而MDA含量在1℃时较CK组显著增加10.6%。以上结果可知Si1预处理可有效增加常春藤的渗透调节物质含量来缓解低温胁迫。

2.5 外源硅预处理对低温胁迫下常春藤抗氧化酶活性的影响

由图2可看出, 从第1阶段到第4阶段, 常春藤的抗氧化酶活性呈上升趋势。不同浓度外源硅处理常春藤的抗氧化酶活性具有不同变化。硅预处理对低温胁迫下常春藤的SOD、APX、POD和CAT有显著影响($P<0.05$); 经Si1预处理可显著提高低温下常春藤的抗氧化酶活性, 在4℃时CAT和POD活性较CK组显著增加36.6%及61.8%, 在1℃时, SOD、APX、POD和CAT的活性较CK组分别增加12.0%、25.4%、80.3%和21.8%。由此可知, Si1预处理可增加常春藤的抗氧化酶活性来抵御低温胁迫。

2.6 外源硅预处理对低温胁迫下常春藤生理指标相关性分析

如图3所示, 初始荧光 F_0 与所测渗透调节物质含量呈显著正相关。所测渗透调节物质含量与抗氧化酶活性呈显著正相关。MDA含量与渗透调节

物质含量呈显著正相关, 与APX抗氧化酶活性呈显著正相关, 与光合色素含量呈显著负相关。

3 讨论

叶绿素含量、光合参数及叶绿素荧光参数的变化均可反映植物的光合能力。本研究中, 低温使常春藤的叶绿素含量、 P_n 值、 F_v/F_m 及Y(II)值降低, F_0 值显著上升。这可能是由于低温诱导细胞膜脂过氧化, 导致叶绿体类囊体膜蛋白组分的稳态水平降低, 影响叶绿素的合成(董文科等2019), 另外, 可能是低温导致植物叶片气孔关闭, 进而阻碍CO₂进入植物叶片, 降低光合碳同化效率, 还会影响光合器官结构及活性, 导致PSII反应中心被破坏及PSII放氧复合体脱离或者不可逆的失活(杨美森等2012), 进而影响植物的光合作用。本研究中, 1 mmol·L⁻¹的硅预处理可显著缓解低温胁迫下常春藤叶绿素含量、 P_n 值、 F_v/F_m 值、Y(II)值和ETR值的降低。这可能是因为低浓度的外源硅可提高植物膜系统及叶绿体在低温胁迫下的稳定性, 诱导叶绿素合成所需酶活性的提高, 促进叶绿素合成, 还可降低光系统的复合物及外周天线的损伤程度, 提高CO₂的固定能力与同化效率, 并提高光合电子

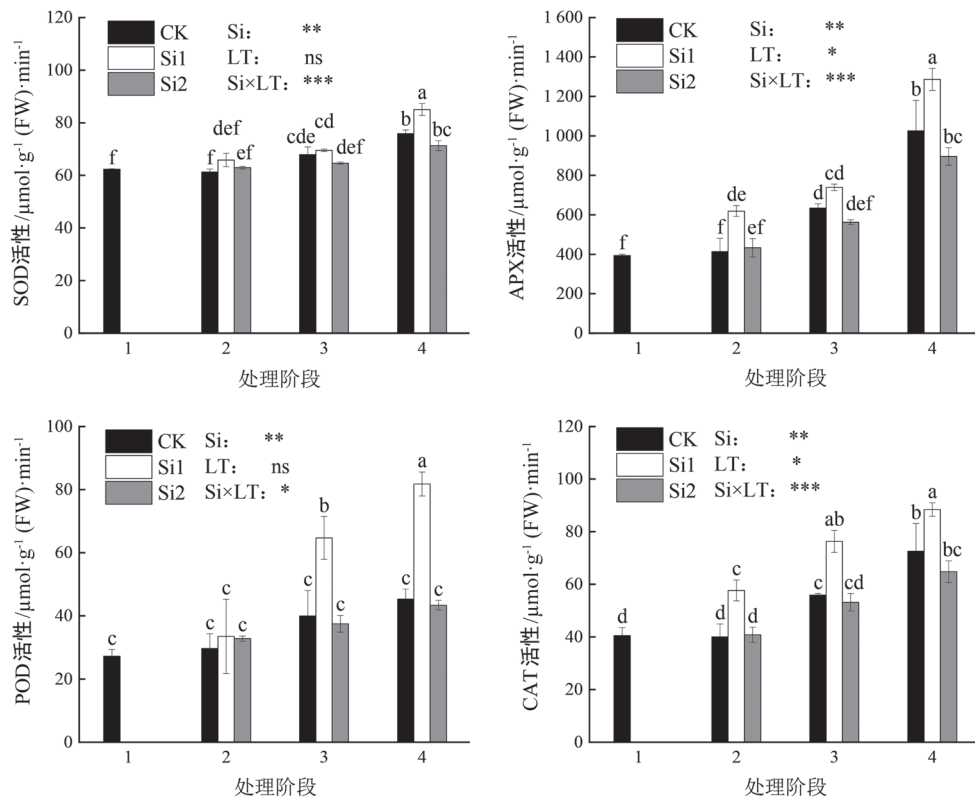


图2 外源硅预处理对低温胁迫下常春藤抗氧化酶活性的影响

Fig. 2 Effects of exogenous silicon pretreatment on antioxidant enzyme activities in *H. nepalensis* var. *sinensis* under low temperature stress

传递速率, 最终增强光能利用率、缓解产物反馈抑制、加速卡尔文循环, 从而提高植物的光合能力。徐呈祥等(2019)对檀香紫檀苗的研究以及郭树勋等(2021)对番茄的研究与本研究相似, 均发现外源硅处理可减轻低温胁迫对植物光合机构的损伤及光合能力的抑制。然而, 本研究发现, 高浓度外源硅会降低常春藤的叶绿素含量及光合能力。该结果与麻云霞等(2018)对酸枣的研究一致, 均发现高浓度的硅处理会降低植物光合速率, 这可能是由于硅处理浓度以及植物种类的差异导致的结果。

逆境下植物会产生大量的ROS, ROS积累到一定的数量会引起细胞膜脂过氧化, 其主要产物为MDA。而植物可通过增加体内抗氧化酶活性等方式清除过量的ROS。本试验中, 低温下常春藤的MDA含量和抗氧化酶活性增加, 且相关性分析结果表明, MDA含量与抗氧化酶活性之间存在显著

正相关。这可能是低温对植物造成了氧化胁迫, 植物增加体内的抗氧化酶活性, 以此减轻氧化胁迫对植物造成的伤害(王旺田等2023)。施加 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硅预处理能够提高低温胁迫下常春藤的抗氧化酶活性。这可能是由于适宜浓度的硅可通过上调植物的抗氧化酶相关基因的相对表达来提高体内抗氧化酶的活性, 以此增强常春藤的SOD、POD、CAT酶促活性氧清除系统的能力, 将积累的 H_2O_2 分解为 H_2O 和 O_2 , 这与李笑佳等(2019)对棉花和Monika等(2021)对花生的研究结果相似, 均发现外源硅处理可提高逆境下植物的抗氧化能力。此外, 本研究发现, 高浓度的硅会增加常春藤的膜脂过氧化程度, 这与郑世英等(2017)的研究结果一致, 可能是由于高浓度的硅产生了氧化胁迫。

植物可增加体内的脯氨酸和可溶性蛋白等渗透调节物质的含量来维持细胞内外渗透势的平衡,

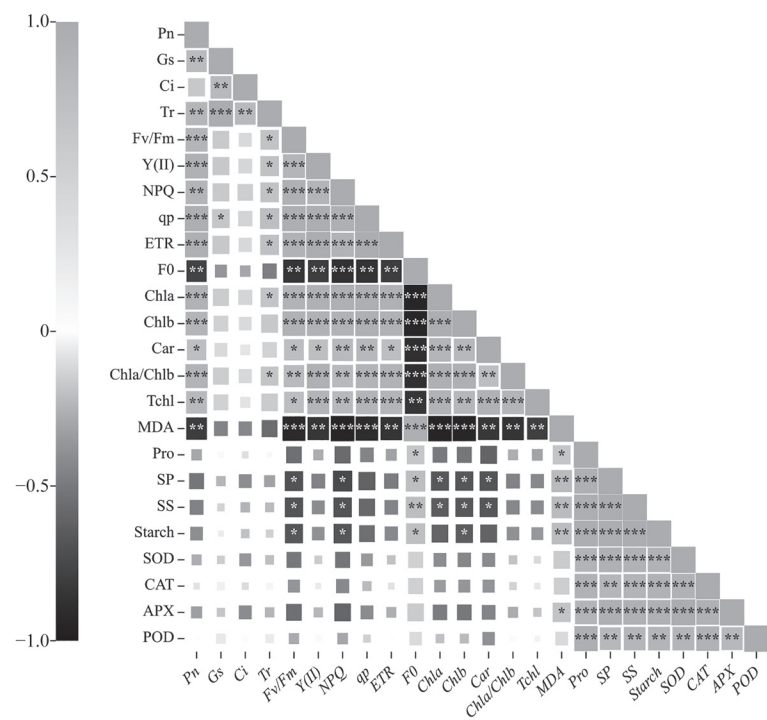


图3 常春藤生理指标的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of *H. nepalensis* var. *sinensis* physiological index

*: $P \leq 0.05$, **: $P \leq 0.01$, ***: $P \leq 0.001$.

提高细胞膜的稳定性,以抵抗渗透胁迫。本试验也得出相似结果,常春藤遭受低温胁迫后,其叶片的渗透调节物质含量显著增加。相关性分析显示渗透调节物质含量与MDA含量呈现显著正相关。这可能是由于低温破坏了细胞膜结构,致使细胞内物质外流,进而导致电解质泄漏,打破了植物细胞内外渗透压的平衡,植物通过增加渗透调节物质的含量来维持细胞的稳定性(熊炳平等2022)。然而,1 mmol·L⁻¹的硅预处理可以提高低温胁迫下常春藤的脯氨酸含量、可溶性蛋白及可溶性糖的含量。这可能是因为硅可增加植物细胞壁的强度和韧性,进而提高渗透能力,有助于植物细胞保持内外渗透压的平衡(郑凯翔等2020)。硅和可溶性蛋白在吸收水分上具有协同作用,沉积在根系的硅胶颗粒具有较大的吸附表面积,可增加细胞的束缚水占比,而可溶性蛋白吸水性强,可降低细胞冰点,增大细胞水合度(郭树勋等2021),进而提高植物对低温环境的适应性。然而,本研究中高浓度的硅不能提高低温下常春藤渗透调节物质的含量。这可

能是由于硅浓度过高反而引起了渗透胁迫(陈明灿等2014)。

本研究发现,外源施加1 mmol·L⁻¹的硅预处理可有效提高低温胁迫下叶绿素含量、 P_n 值、 F_v/F_m 比值和Y(II)值,脯氨酸和可溶性蛋白含量以及抗氧化酶活性显著增加,膜脂过氧化程度显著降低;而2 mmol·L⁻¹的硅预处理对低温胁迫下常春藤的光合能力、渗透调节及抗氧化能力无明显改善作用。综上,添加适宜浓度的外源硅可作为缓解低温对常春藤植物伤害的有效措施,为园林植物生产管理提供科学的理论依据。

参考文献(References)

Chen MC, Wang HZ, Yao FR, et al (2014). Effect of silicon on growth and physiological traits of wheat seedling. *Guangdong Agric Sci*, 41 (21): 7–10 (in Chinese with English abstract) [陈明灿, 王贺正, 姚孚荣等(2014). 硅对小麦幼苗生长及部分生理指标的影响. *广东农业科学*, 41 (21): 7–10]

Chen Q, Zhou ZH, Wang RQ, et al (2016). Effects of low tem-

- perature on antioxidant ability in *Ilex verticillata* leaves. J Trop Subtrop Bot, 24 (6): 689–695 (in Chinese with English abstract) [陈茜, 周之涵, 王瑞琪等(2016). 低温处理对北美冬青叶片抗氧化能力的影响. 热带亚热带植物学报, 24 (6): 689–695]
- Ding YL, Shi YT, Yang SH (2019). Advances and challenges in uncovering cold tolerance regulatory mechanisms in plants. New Phytol, 222 (4): 1690–1704
- Dong WK, Ma X, Zhou XW, et al (2019). Effects of exogenous glycine betaine on the physiological characteristics in *Medicago sativa* seedlings under low-temperature stress. Acta Agrest Sin, 27 (1): 130–140 (in Chinese with English abstract) [董文科, 马祥, 周学文等(2019). 外源甜菜碱对低温胁迫下紫花苜蓿幼苗生理特性的影响. 草地学报, 27 (1): 130–140]
- Etesami H, Jeong BR (2018). Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. Ecotoxicol Environ Saf, 147: 881–896
- Guo SX, Yang R, Hu XH, et al (2021). Effects of exogenous silicon on the growth and physiological characteristics of *Lycopersicon esculentum* Mill. seedlings under different low temperature stress. J Shanxi Agric Univ (Nat Sci), 41 (4): 50–57 (in Chinese with English abstract) [郭树勋, 杨然, 胡晓辉等(2021). 外源硅对不同低温胁迫下番茄根系生长及生理特性的影响. 山西农业大学学报(自然科学版), 41 (4): 50–57]
- Jiang ZZ, Zhu HG, Zhang Q, et al (2015). Progress of influence of low temperature stress on plant photosynthesis. Crop, (3): 23–28 (in Chinese with English abstract) [姜籽竹, 朱恒光, 张倩等(2015). 低温胁迫下植物光合作用的研究进展. 作物杂志, (3): 23–28]
- Li WT, Huang X, Cheng XM, et al (2019). Effects of lead stress on growth and physiological characteristics of *Hedera nepalensis* var. *sinensis*. J Yunnan Agric Univ (Nat Sci), 34 (1): 103–109 (in Chinese with English abstract) [李琬婷, 黄轩, 程小毛等(2019). 铅胁迫对中华常春藤生长和生理特性的影响. 云南农业大学学报(自然科学), 34 (1): 103–109]
- Li XJ, Zhang Q, Zhang SY (2019). Effects of exogenous silicon on photosynthesis, fluorescence and antioxidant enzyme activity of cotton seedlings under salt stress. Xinjiang Agric Sci, 56 (5): 873–881 (in Chinese with English abstract) [李笑佳, 张倩, 张淑英(2019). 外源硅对盐胁迫下棉花幼苗光合、荧光及抗氧化酶活性的影响. 新疆农业科学, 56 (5): 873–881]
- Li Y, Zhang M, Ning P, et al (2022). Effects of exogenous NO on the physiological characteristics of *Hedera nepalensis* var. *sinensis* under salt stress. Plant Physiol J, 58 (1): 207–213 (in Chinese with English abstract) [李燕, 张敏, 宁朋等(2022). 外源NO对盐胁迫下中华常春藤生理特性的影响. 植物生理学报, 58 (1): 207–213]
- Lu JX, Miao RT, Wang SQ, et al (2022). Analysis of photosystem features in autumn chrysanthemum leaves under low temperature stress. Plant Physiol J, 58 (2): 425–434 (in Chinese with English abstract) [逯久幸, 苗润田, 王司琦等(2022). 低温胁迫下秋菊叶片光系统特性分析. 植物生理学报, 58 (2): 425–434]
- Ma YX, Li GT, Zhang HW, et al (2018). Effects of exogenous silicon on growth physiological and biochemical characteristics of *Zizyphus jujube* plant. Jiangsu Agric Sci, 34 (5): 1113–1119 (in Chinese with English abstract) [麻云霞, 李钢铁, 张宏武等(2018). 外源硅对酸枣生长和生理生化特征的影响. 江苏农业学报, 34 (5): 1113–1119]
- Monika P, Dhara F, Kumar AP (2021). Silicon-induced mitigation of drought stress in peanut genotypes (*Arachis hypogaea* L.) through ion homeostasis, modulations of antioxidative defense system, and metabolic regulations. Plant Physiol Biochem, 166: 290–313
- Oliveira KR, Jonas PSJ, Bennett SJ, et al (2020). Exogenous silicon and salicylic acid applications improve tolerance to boron toxicity in field pea cultivars by intensifying antioxidant defence systems. Ecotoxicol Environ Saf, 201 (C): 110778
- Wang LY (2013). Effects of silicon on salt tolerance of wild soybean seedlings and its mechanism. Soybean Sci, 32 (5): 659–663 (in Chinese with English abstract) [王丽燕(2013). 硅对野生大豆幼苗耐盐性的影响及其机制研究. 大豆科学, 32 (5): 659–663]
- Wang WT, Li B, Zhao JP, et al (2023). Effects of exogenous SA on antioxidant enzyme activities and endogenous SA content in wine grapevine seedlings under low temperature stress. Agric Res Arid Areas, 41 (1): 78–85 (in Chinese with English abstract) [王旺田, 李斌, 赵俊鹏等(2023). 低温胁迫下外源SA对酿酒葡萄幼苗抗氧化酶活性及内源SA含量的影响. 干旱地区农业研究, 41 (1): 78–85]
- Wang WX, Du J, Chen LM, et al (2021). Transcriptomic, proteomic, and physiological comparative analyses of flooding mitigation of the damage induced by low-temperature stress in direct seeded early indica rice at the seedling stage. BMC Genomics, 22: 176–176
- Wei XC, Yao QJ, Yuan YX, et al (2016). Expression analysis of silicon on *CaLEA5* in *Capsicum annuum* L. under low temperature stress. Genomics Appl Biol, 35 (12): 3487–3492 (in Chinese with English abstract) [魏小春, 姚秋菊, 原玉香等(2016). 硅对辣椒 $CaLEA5$ 基因低温胁迫下表达分析. 基因组学与应用生物学, 35 (12): 3487–3492]
- Xiong BP, Lei DF, Liu JQ, et al (2022). Physiological re-

- sponse of *Hedera nepalensis* var. *sinensis* to exogenous abscisic acid under low temperature stress. North Hort, (3): 71–78 (in Chinese with English abstract) [熊炳平, 雷泞菲, 刘金渠等(2022). 低温胁迫下常春藤对外源脱落酸的生理响应. 北方园艺, (3): 71–78]
- Xu CX, Ma YP, Dan SY, et al (2019). Effects of silicon on the growth and photosynthetic physiology of *Pterocarpus santalinus* L. f seedlings after cold stress. J Trop Subtrop Bot, 27 (2): 139–148 (in Chinese with English abstract) [徐呈祥, 马艳萍, 旦书艳等(2019). 硅对低温胁迫后檀香紫檀苗木生长和光合生理的影响. 热带亚热带植物学报, 27 (2): 139–148]
- Yang MS, Wang YF, Qian XX, et al (2012). Effects of exogenous nitric oxide on growth, antioxidant system and photosynthetic characteristics in seedling of cotton cultivar under Chilling injury stress. Sci Agric Sin, 45 (15): 3058–3067 (in chinese with English abstract) [杨美森, 王雅芳, 干秀霞等(2012). 外源一氧化氮对冷害胁迫下棉花幼苗生长、抗氧化系统和光合特性的影响. 中国农业科学, 45 (15): 3058–3067]
- Yin JL, Jia JH, Lian ZY, et al (2019). Silicon enhances the salt tolerance of cucumber through increasing polyamine accumulation and decreasing oxidative damage. Ecotoxicol Environ Saf, 169: 8–17
- Zhang Q, Li XJ, Zhang SY (2019). Effects of silicon on growth and osmotic regulation system of cotton seedlings under salt stress. Acta Agric Boreali-Sin, 34 (6): 110–117 (in Chinese with English abstract) [张倩, 李笑佳, 张淑英(2019). 硅对盐胁迫下棉花幼苗生长和渗透调节系统的影响. 华北农学报, 34 (6): 110–117]
- Zheng KX, Wang WT, Liu WY, et al (2020). Exogenous silicon regulated the physiological characteristics of grapes responses to low temperature stress. Mol Plant Breeding, 18 (3): 1013–1019 (in Chinese with English abstract) [郑凯翔, 王旺田, 刘文瑜等(2020). 外源硅调控葡萄生理特性对低温胁迫的响应. 分子植物育种, 18 (3): 1013–1019]
- Zheng SY, Zheng JF, Xu J, et al (2017). Effects of exogenous silicon on plant growth and activity of anti-oxidative enzymes in wheat seedlings under drought stress. Agric Res Arid Areas, 35 (2): 74–78 (in Chinese with English abstract) [郑世英, 郑建峰, 徐建等(2017). 外源硅对PEG胁迫下小麦幼苗生长及抗氧化酶活性的影响. 干旱地区农业研究, 35 (2): 74–78]