

DOI:10.11686/cyxb2025067

http://cyxb.magtech.com.cn

王若非, 李昕哲, 李祺策, 等. 不同浓度的硅处理对老芒麦苗期抗寒性的影响. 草业学报, 2026, 35(1): 130—139.

WANG Ruo-fei, LI Xin-zhe, LI Qi-ce, *et al.* Effects of different concentrations of silicon on the cold resistance of *Elymus sibiricus* seedlings. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(1): 130—139.

## 不同浓度的硅处理对老芒麦苗期抗寒性的影响

王若非, 李昕哲, 李祺策, 张嘉仪, 王焙钧, 谢文刚\*

(兰州大学草地农业科技学院, 草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:**本研究以老芒麦为材料,旨在评估不同浓度(0、50、100、150和200 mg·L<sup>-1</sup>)纳米硅处理对其苗期抗寒性的影响。通过低温胁迫试验和纳米硅处理,发现在低温胁迫下纳米硅处理显著促进了老芒麦根系的伸长( $P<0.05$ ),而对株高无显著影响( $P>0.05$ )。此外,对试验中各指标全面综合分析表明,和对照相比,200 mg·L<sup>-1</sup>纳米硅处理组老芒麦幼苗的根长、脯氨酸含量、叶绿素含量分别提高了63.2%、178.6%和15.6%,相对电导率、丙二醛含量和脱落酸含量分别降低了17.5%、3.88%和2.23%。综上,纳米硅可通过调节细胞渗透压、维持光合作用效率以及调节植物激素水平等维持植物在低温胁迫下能正常进行生理代谢,以增强植物的抗寒性。本研究为纳米硅在牧草抗寒育种中的应用提供了理论支撑。

**关键词:**纳米硅;老芒麦;苗期;抗寒性

## Effects of different concentrations of silicon on the cold resistance of *Elymus sibiricus* seedlings

WANG Ruo-fei, LI Xin-zhe, LI Qi-ce, ZHANG Jia-yi, WANG Bei-jun, XIE Wen-gang\*

College of Grassland Agricultural Science and Technology of Lanzhou University, State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, Lanzhou 730020, China

**Abstract:** In this study, we evaluated the effects of nano-silicon (nano-Si) at varying concentrations (0, 50, 100, 150, and 200 mg·L<sup>-1</sup>) on the cold resistance of *Elymus sibiricus* during the seedling stage. When seedlings were subjected to a cold treatment, those treated with nano-Si showed significantly enhanced root elongation, compared with that of the control group, but no difference in their plant height. An exhaustive analysis of cold-resistance traits revealed that, compared with the control group, *E. sibiricus* seedlings treated with 200 mg·L<sup>-1</sup> nano-silicon showed markedly higher values for root length, proline content, and chlorophyll content (increased by 63.2%, 178.6%, and 15.6%, respectively), and lower values for several stress-related parameters. Specifically, compared with the control group, the *E. sibiricus* seedlings treated with 200 mg·L<sup>-1</sup> nano-Si had lower relative conductivity, malondialdehyde content, and abscisic acid content (17.5%, 3.88%, and 2.23% lower, respectively). These results indicate that nano-Si regulates cell osmotic pressure, maintains photosynthetic efficiency, and modulates plant hormone levels, thereby preserving physiological metabolism under low-temperature stress and improving cold resistance. The results of this study provide theoretical support for the application of nano-Si to increase the cold

收稿日期:2025-03-04;改回日期:2025-04-15

基金项目:青海省帅才科学家责任制项目(2023-NK-147),财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系,甘肃省首席科学家项目(23ZDKA013)和甘肃省科技重大专项(22ZD6NA007)资助。

作者简介:王若非(2005—),男,湖南衡阳人,本科。E-mail: wangrf2023@lzu.edu.cn

\*通信作者 Corresponding author. E-mail: xiewg@lzu.edu.cn

resistance of forage crops.

**Key words:** nano-silicon; *Elymus sibiricus*; seedling stage; cold resistance

温度是影响植物生长发育的主要环境因素,在西北地区牧草苗期易受低温影响,严重限制牧草种子苗期生长,从而影响牧草在高寒地区的栽培利用<sup>[1-2]</sup>。低温通常指低于植物正常生长范围的环境条件,这种温度变化会影响植物的多个生理过程,如细胞分裂、生长、光合作用、呼吸作用以及激素的平衡等<sup>[3]</sup>。老芒麦(*Elymus sibiricus*),作为禾本科(Poaceae)披碱草属(*Elymus*)的模式种,属于多年生丛生草本植物,具有生长迅速、适口性好、品质优良等特性,是青藏高原亚高山草甸地区的重要牧草,也是人工草地建植和退化草地修复的主推草种<sup>[4]</sup>。在海拔 4000 m 以下的地区,低温和短暂的生长季节对老芒麦生长带来了挑战。低温不仅延长了其生长周期,还可能影响其光合作用效率,从而降低产量和品质<sup>[5]</sup>。因此,探究低温胁迫对老芒麦苗期的影响具有重要意义。

硅是植物生长所需的有益元素,可以与其他必需营养素相互作用并促进其在植物中的吸收和积累<sup>[6]</sup>。纳米硅材料具有优良的硅功能,但由于其独特的物理化学特性(如粒径、浓度、表面修饰等),其对植物的影响可能因不同环境条件而有所不同<sup>[7]</sup>。研究表明,纳米硅通过调节植物体内活性氧自由基的积累,可能会影响植物的酶促及非酶促抗氧化系统,进而影响叶绿素含量、光合作用、蒸腾等理化过程<sup>[8]</sup>。虽然前人已对纳米硅对植物的影响进行了一定的研究,然而针对纳米硅对老芒麦抗寒性影响的研究鲜见报道。为减轻低温胁迫对老芒麦苗期生长发育的影响,探索不同浓度的硅处理对老芒麦苗期抗寒性的影响具有重要意义。因此,本研究通过观测低温胁迫下不同浓度纳米硅处理老芒麦的形态学指标与生理生化指标变化,探究不同浓度的硅处理对老芒麦苗期抗寒性的影响,为寒冷地区老芒麦的种植提供科学依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

采用兰州大学草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室选育的‘兰育 2 号’老芒麦新品系为试验材料,原始编号为 LQ06,选择健康饱满的种子开展试验。

### 1.2 试验设计

采用盆栽法,试验材料于 2024 年 6 月移栽到花盆中,每盆 4 株,在温室环境中培养 30 d。随后,开始低温胁迫与纳米硅处理操作,分别设置低温胁迫组与常温组,同时对低温组与常温组分别进行 5 个纳米硅浓度处理,每个处理 3 个生物学重复,共计 30 个花盆。转移至光照培养箱,接受为期 14 d 的低温胁迫处理,光照培养箱设置参数如下:光暗周期 16 h/8 h;湿度 70%;光照强度:20000 lx;温度:低温组 4 °C(LT),常温组 22 °C(NT),在此期间同步进行纳米硅处理。对照组每 3 d 施以 100 mL 的蒸馏水,而纳米硅处理组则每隔 3 d 施以 100 mL 不同浓度的纳米硅溶液,以保持土壤水分含量大约在 70%。整个处理过程中,共执行了 4 次浇灌操作<sup>[9]</sup>。试验中使用的纳米硅购自上海麦克林生化技术有限公司,形态为白色粉末,粒子直径为 55 nm,纯度达 99.5%。首先,将纳米硅与蒸馏水混合,制备成 SiNP 的母液,并通过 30 min 的超声波振荡处理以确保纳米粒子的均匀分布。随后,通过对母液进行稀释,配制了 5 种不同浓度的 SiNP 溶液,分别为: T<sub>1</sub>: 0 mg·L<sup>-1</sup>、T<sub>2</sub>: 50 mg·L<sup>-1</sup>、T<sub>3</sub>: 100 mg·L<sup>-1</sup>、T<sub>4</sub>: 150 mg·L<sup>-1</sup> 和 T<sub>5</sub>: 200 mg·L<sup>-1</sup>。处理结束后,开始测定各项指标和在每盆材料中选取长势良好的植株的相同位置叶片,进行取样,每盆收集 200 mg 其单株鲜嫩干净叶片组织的混样材料于冻存管中,6 个混样材料,共计 180 个样品。取样后迅速置于液氮速冻,并于 -80 °C 超低温冰箱中保存。首先进行株高、根长和相对电导率的测定,后续进行超氧化物歧化酶活性、丙二醛含量、脯氨酸含量、叶绿素含量、脱落酸含量等的测定。

### 1.3 测量指标与方法

用卷尺测量植株从地面到最高点的自然高度与绝对高度,并求其二者的平均值得到株高(plant height)<sup>[10]</sup>。根长(root length)为用清水轻轻冲洗掉植株根部的土壤,然后用卷尺测量从根尖到根茎交界处的长度<sup>[11]</sup>。相对电

导率(relative conductivity, REC)以电导法用电导率仪(DDSJ-319L, 中国)测定<sup>[12]</sup>。使用甘肃一棵树科技有限公司生产的超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)试剂盒(WST-8法)、植物叶绿素(chlorophyll, Chl)试剂盒(微量法)、丙二醛(malondialdehyde, MDA)试剂盒(微量法)和脯氨酸(proline, Pro)试剂盒(微量法)分别测定SOD活性和Chl、MDA和Pro的含量。使用Wela检测有限公司生产的脱落酸(abscisic acid, ABA)试剂盒测定ABA含量。

#### 1.4 抗寒性综合评价

本研究采用模糊数学领域的隶属函数法,对试验材料的耐寒性进行精确的量化评估,旨在计算各耐寒性指标的隶属函数值,进而对不同浓度纳米硅处理下老芒麦的耐寒性实施了综合性与系统性的评价。在数据处理与分析过程中,本研究依据指标与耐寒性之间的相关性,分别采用了两种计算公式:若指标与耐寒性呈正向关联,则采用公式(1)进行隶属度函数值的计算;若指标与耐寒性呈负向关联,则采用公式(2)进行隶属度函数值的计算<sup>[13-14]</sup>。

$$R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$R(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中: $R(X_i)$ 表示第*i*个指标对应的隶属度函数值,此处 $X_i$ 代表第*i*个指标的试验测量结果( $i=1, 2, \dots, n$ ),而 $X_{\max}$ 与 $X_{\min}$ 分别标记了第*i*个指标在所研究样本集合中的极值,即最大值和最小值。

#### 1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 2021软件进行数据的统计分析、整理以及图表的绘制。借助SPSS Statistics 26.0分析软件,对数据集进行单因素方差分析(ANOVA)。当数据达到 $P < 0.05$ 的显著性水平时,使用Duncan的新复极差法,以进行不同层级间的多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 低温胁迫下不同浓度纳米硅处理对老芒麦形态学指标的影响

**2.1.1 不同浓度纳米硅处理对低温胁迫下老芒麦株高的影响** 经过对各处理组苗期老芒麦株高的测量及分析,结果表明不同浓度纳米硅处理组之间的株高无显著差异( $P > 0.05$ ,图1),在低温与常温条件下相同浓度纳米硅处理组的老芒麦苗期株高平均值表现出极大的相似性,为44.9~49.0 cm,整体平均值为47.4 cm。后续的统计学检验,如方差分析(ANOVA),均一致地证实了这一观察,即各处理组间的株高差异并未达到统计学显著性的标准( $P > 0.05$ ),应用不同浓度的纳米硅对老芒麦苗期的株高增长并未产生显著的分化效应。

**2.1.2 不同浓度纳米硅处理对低温胁迫下老芒麦根长的影响** 与常温下的无纳米硅处理组相比,低温

下的无纳米硅处理组根长增长了39.7%(图2)。随着纳米硅浓度的逐渐升高,低温处理组的根长展现出较为明显的增长趋势,而常温处理组的根长则表现为先增加后减少的趋势。常温条件下,根长在50 mg·L<sup>-1</sup>纳米硅处理下达到最大,为28.47 cm。在低温条件下,根长在200 mg·L<sup>-1</sup>纳米硅处理下达到最高值,为42.80 cm,这一结果与其他处理浓度相比,均存在统计学上的显著差异( $P < 0.05$ )。与同一温度下未施加纳米硅的处理相比,最大根长值显著增加了63.2%,在遭受低温胁迫的情况下,老芒麦的根长普遍长于常温下的对照组。

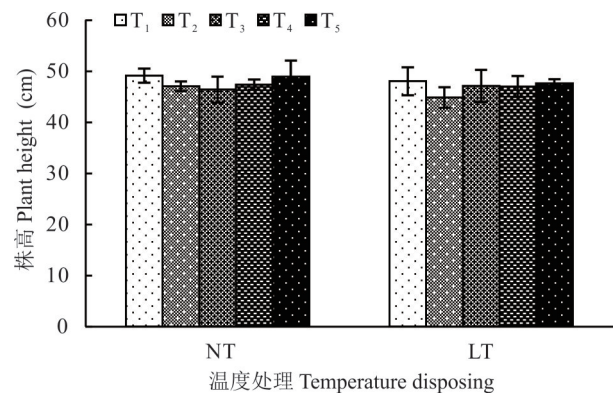


图1 不同浓度纳米硅处理对老芒麦幼苗株高的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of nano-silicon treatments on plant height of *E. sibiricus* seedlings

误差棒为标准差 Error bars represent standard deviation (SD). T<sub>1-5</sub>: 0, 50, 100, 150, 200 mg·L<sup>-1</sup> 纳米硅 Nano silicon. NT: 常温组 (22 °C) Normal temperature group (22 °C); LT: 低温组 (4 °C) Low temperature group (4 °C). 下同 The same below.

## 2.2 低温胁迫下不同浓度纳米硅处理对老芒麦生理生化指标的影响

**2.2.1 不同浓度纳米硅处理对低温胁迫下老芒麦相对电导率的影响** 低温胁迫下,  $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  纳米硅处理下老芒麦幼苗的相对电导率较常温下有明显增长, 增长率达 93.8% (图 3)。在常温处理下, 相对电导率随着纳米硅浓度的增加呈先增加后减少再增加的趋势, 其中, 最低的相对电导率值出现在未添加纳米硅的处理组, 即  $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 为 13.44%。然而, 在低温胁迫的情况下, 老芒麦的相对电导率随着纳米硅浓度的增加而呈下降态势, 其最小值为 20.64%, 较无纳米硅处理组下降了 20.8%, 并且与 0、50、100  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  纳米硅浓度处理组之间的差异达到了统计学上的显著水平 ( $P < 0.05$ )。

**2.2.2 不同浓度纳米硅处理对低温胁迫下老芒麦脯氨酸含量的影响** 在正常生长条件下, 老芒麦体内的脯氨酸含量先增加后减少 (图 4), 展现了一种特定的变化轨迹。然而, 经纳米硅处理后, 脯氨酸含量显著增加, 相较于未处理组, 增加幅度为 58.6%~129.8%。特别是在  $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  纳米硅处理下, 脯氨酸含量达到最高值, 为  $74.64 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , 与对照相比, 差异显著 ( $P < 0.05$ )。在低温胁迫条件下, 脯氨酸含量普遍上升, 以  $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  纳米硅处理组最为显著, 含量达到  $87.14 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , 较未处理的低温对照组增加了 178.6%, 差异显著。值得注意的是, 与常温下相同纳米硅浓度处理组相比, 低温条件下脯氨酸含量的增加更为明显, 增幅达 168.1%。

**2.2.3 不同浓度纳米硅处理对低温胁迫下老芒麦丙二醛含量的影响** 在常温生长环境中, 丙二醛的含量随着纳米硅处理浓度的升高表现出一种特殊的变动轨迹: 初始表现为下降趋势, 随后出现回升 (图 5)。在  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  纳米硅处理水平上, 丙二醛含量降至最小值, 为  $12.86 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ , 然而, 与未经处理的对照组相比, 这一变化无显著差异 ( $P > 0.05$ )。在低温胁迫的情况下, 丙二醛含量的变化模式呈逆向, 即随着纳米硅处理浓度的提高, 含量先上升, 后下降。特别是在  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  纳米硅处理组中, 丙二醛含量达到最大, 为  $23.89 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ , 与其他处理组相比, 差异显著 ( $P < 0.05$ )。进一步分析表明, 当纳米硅浓度提升至  $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 丙二醛含量减少至最低点, 仅为  $13.77 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

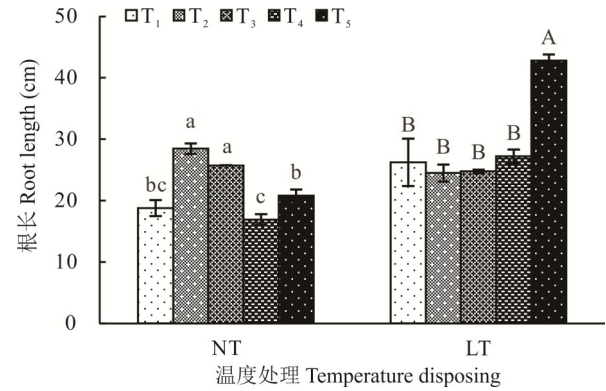


图 2 不同浓度纳米硅处理对老芒麦幼苗根长的影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of nano-silicon treatments on root length of *E. sibiricus* seedlings

不同小写字母表示在常温处理下各组间有显著性差异 ( $P < 0.05$ ); 不同大写字母表示低温处理下各组间有差异显著 ( $P < 0.05$ )。Different lowercase letters indicate significant differences ( $P < 0.05$ ) among groups under normal temperature; Different uppercase letters denote significant differences ( $P < 0.05$ ) among groups under low temperature. 下同 The same below.

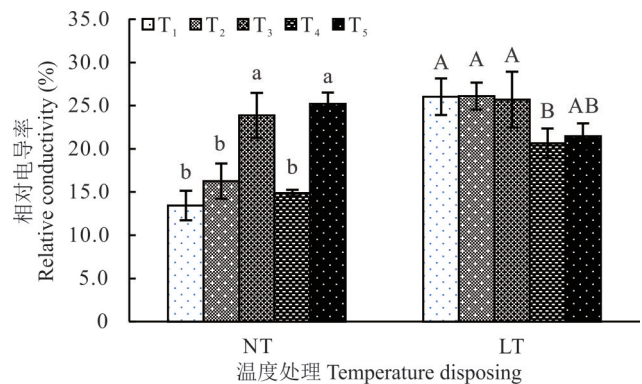


图 3 不同浓度纳米硅处理对老芒麦幼苗相对电导率的影响

Fig. 3 Effects of different concentrations of nano-silicon treatments on the relative conductivity of *E. sibiricus* seedlings

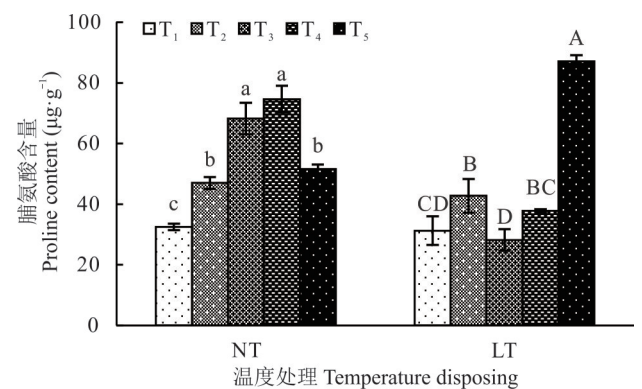


图 4 不同浓度纳米硅处理对老芒麦幼苗脯氨酸含量的影响

Fig. 4 Effects of different concentrations of nano-silicon treatments on proline content of *E. sibiricus* seedlings

**2.2.4 不同浓度纳米硅处理对低温胁迫下老芒麦叶绿素含量的影响** 在常温生长条件下,叶绿素的含量表现出先下降后上升再下降的趋势,150 mg·L<sup>-1</sup>纳米硅处理叶绿素含量最高,为4.00 mg·g<sup>-1</sup>,显著高于其他处理组( $P < 0.05$ ,图6)。相反,在低温胁迫下,叶绿素含量的变动模式与正常生长条件下情形截然不同,表现为随着纳米硅处理浓度的增加,含量先上升后下降再上升。进一步分析低温处理组发现,叶绿素浓度在100 mg·L<sup>-1</sup>纳米硅处理下达到最高,为4.69 mg·g<sup>-1</sup>,与其他处理组相比,差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )。另外,0与150 mg·L<sup>-1</sup>处理组,以及50与200 mg·L<sup>-1</sup>处理组之间的叶绿素含量基本一致,且均未达到统计学上的显著性水平( $P > 0.05$ )。

**2.2.5 不同浓度纳米硅处理对低温胁迫下老芒麦超氧化物歧化酶活性的影响** 在常温生长条件下,超氧化物歧化酶的活性与纳米硅处理浓度之间呈正向关联。超氧化物歧化酶活性在纳米硅浓度为200 mg·L<sup>-1</sup>时达到最高点(图7)。相对而言,在低温处理下,无纳米硅处理组的超氧化物歧化酶活性相较于常温环境有明显提高,增幅约为38.3%。在低温逆境下,超氧化物歧化酶活性的变化轨迹表现出更为复杂的特征:酶活性随着纳米硅浓度的初始增加而增强,随后却呈下降态势。在100 mg·L<sup>-1</sup>纳米硅处理下,超氧化物歧化酶活性达到最高值,为82.95 U·g<sup>-1</sup>,较未使用纳米硅处理组增加了29.5%。并且,这一最高活性与其他处理组相比,均存在统计学上的显著差异( $P < 0.05$ )。

**2.2.6 不同浓度纳米硅处理对低温胁迫下老芒麦脱落酸含量的影响** 在常温生长条件下,老芒麦内脱落酸的浓度随纳米硅浓度增加呈先增加后减少的趋势(图8)。在50 mg·L<sup>-1</sup>纳米硅处理下,脱落酸含量达到最高,为393.06 μg·L<sup>-1</sup>,较无纳米硅处理组,脱落酸含量增加了11.4%,并且与其他处理组差异显著( $P < 0.05$ )。然而,在低温胁迫环境下,老芒麦中脱落酸的含量维持在一定水平,平均值为355.14 μg·L<sup>-1</sup>,150 mg·L<sup>-1</sup>纳米硅处理组与50、200 mg·L<sup>-1</sup>纳米硅处理组有显著差异( $P < 0.05$ ),其他处理组之间的差异并不显著( $P > 0.05$ )。

### 2.3 不同浓度纳米硅处理老芒麦抗寒性综合评价

**2.3.1 不同指标相关性分析** 植株的根长与脯氨酸含量之间存在极显著的线性正相关( $P < 0.01$ ,图9)。超氧化物歧化酶活性与丙二醛含量之间呈显著的正相关( $P < 0.05$ )。根长与超氧化物歧化酶活性、株高呈较弱的

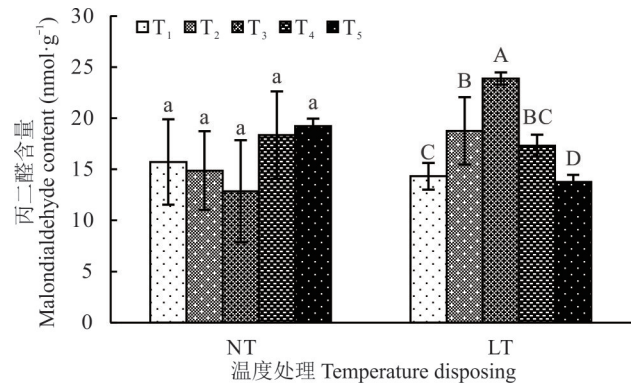


图5 不同浓度纳米硅处理对老芒麦幼苗丙二醛含量的影响  
Fig. 5 Effects of different concentrations of nano-silicon treatments on malondialdehyde content of *E. sibiricus* seedlings

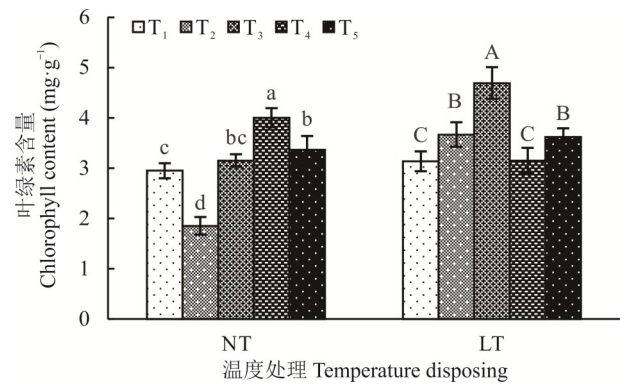


图6 不同浓度纳米硅处理对老芒麦幼苗叶绿素含量的影响  
Fig. 6 Effects of different concentrations of nano-silicon treatments on chlorophyll content of *E. sibiricus* seedlings

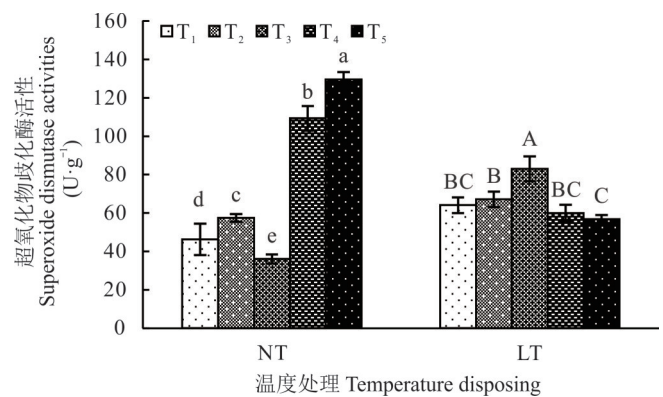


图7 不同浓度纳米硅处理对老芒麦幼苗超氧化物歧化酶活性的影响  
Fig. 7 Effects of different concentrations of nano-silicon treatments on superoxide dismutase activity of *E. sibiricus* seedlings

正相关趋势,同时根长与相对电导率、叶绿素含量、丙二醛含量、脱落酸浓度呈较弱的负相关趋势。叶绿素含量与丙二醛含量、超氧化物歧化酶活性有较强的正相关趋势。超氧化物歧化酶活性与株高、脱落酸浓度呈较弱的正相关趋势。

**2.3.2 不同浓度纳米硅处理下苗期老芒麦抗寒性综合评价** 本研究用6个生理指标作为衡量叶片耐寒性的标准,并运用隶属度函数分析法对经不同纳米硅浓度处理的老芒麦在低温环境中的耐寒性进行了全面评定(表1)。分析结果表明,在低温逆境下,各纳米硅处理组对应的综合评价值为0.2637~0.5266,其中T<sub>5</sub>综合评价值最高,为0.5266,相对而言,T<sub>1</sub>与T<sub>2</sub>处理组在抗寒性上的表现相对较弱,其综合评价值分别为0.2799和0.2637。据此,可以排列抗寒性强弱顺序,依次为T<sub>5</sub>>T<sub>4</sub>>T<sub>3</sub>>T<sub>1</sub>>T<sub>2</sub>。综上,200 mg·L<sup>-1</sup>纳米硅处理下能显著增强供试老芒麦抗寒性。

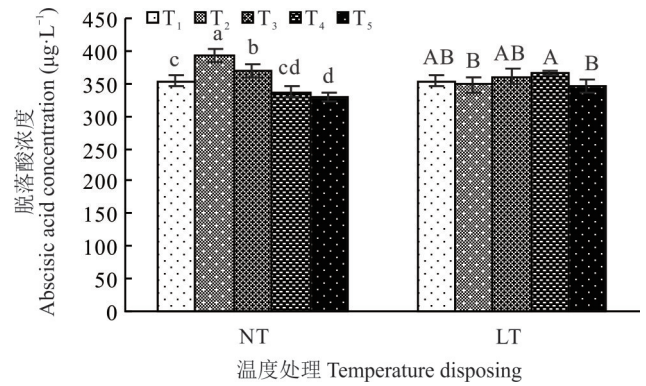


图8 不同浓度纳米硅处理对老芒麦幼苗脱落酸浓度的影响  
Fig. 8 Effects of different concentrations of nano-silicon treatments on abscisic acid concentration in *E. sibiricus* seedlings

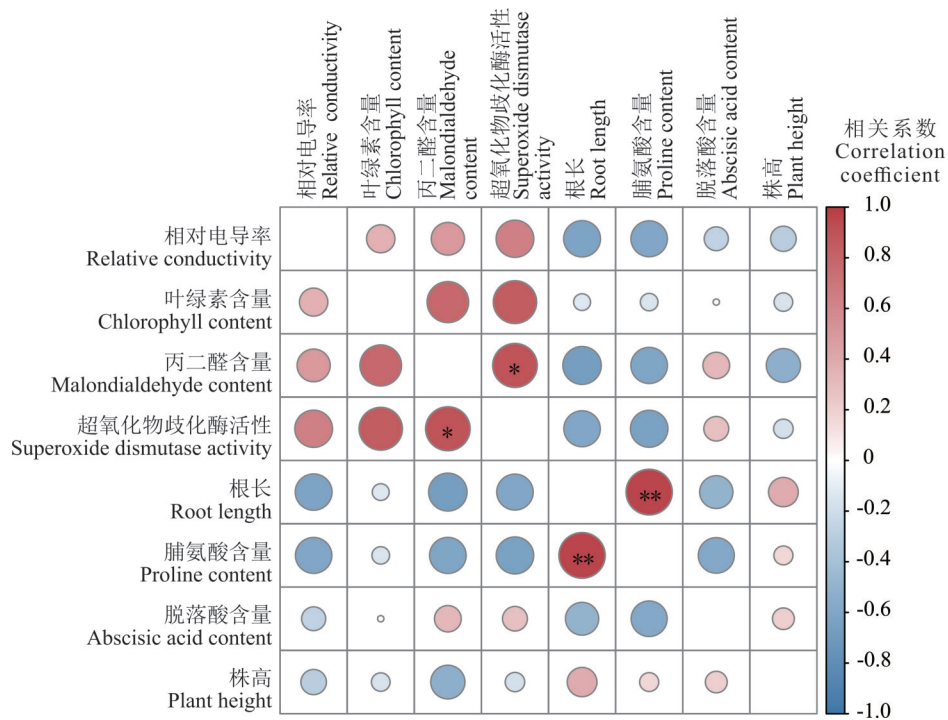


图9 抗寒指标相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis of cold tolerance related traits

\*用以标识变量间存在显著相关性( $P<0.05$ ),而\*\*则指示变量间呈极显著的相关性( $P<0.01$ )。\* was used to identify the significant correlation between variables ( $P<0.05$ ), while \*\* indicated that there was a extremely significant correlation between variables ( $P<0.01$ ).

### 3 讨论

#### 3.1 不同浓度纳米硅处理对老芒麦根系生长和渗透调节系统的影响

对根系生长的进一步分析揭示,低温条件下根会不断伸长以获得更多营养物质与水分以抵抗逆境与维持正常生长,同时脯氨酸的累积对于维持根部的水平衡和促进生长动力是必不可少的<sup>[15]</sup>。研究显示,脯氨酸的累积不仅发生在叶片中以应对逆境,其在根部的累积同样发挥关键作用。例如,在甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)幼苗经历

表1 不同浓度纳米硅处理下苗期老芒麦抗寒性隶属函数值及综合评价

Table 1 Membership function value and comprehensive evaluation of cold resistance of *E. sibiricus* under different concentrations of nano-silicon treatments

处理 Treatment	隶属函数值 Subordinate function values						综合评价价值 Comprehensive evaluation value	排序 Rank
	相对电导率 Relative conductivity	脯氨酸 Proline	丙二醛 Malondialdehyde	叶绿素 Chlorophyll	超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase	脱落酸 Abscisic acid		
T <sub>1</sub>	0.0129	0.0523	0.9451	0	0.2796	0.3893	0.2799	4
T <sub>2</sub>	0	0.2471	0.5071	0.3419	0.3951	0.0912	0.2637	5
T <sub>3</sub>	0.0776	0	0	1.0000	1.0000	0.6945	0.4620	3
T <sub>4</sub>	1.0000	0.1629	0.6491	0.0110	0.1250	1.0000	0.4913	2
T <sub>5</sub>	0.8463	1.0000	1.0000	0.3133	0	0	0.5266	1

T<sub>1~5</sub>: 0, 50, 100, 150, 200 mg·L<sup>-1</sup> 纳米硅 Nano silicon.

轻度干旱胁迫的情况下,其根系生长的促进与脯氨酸等渗透调节物质的累积紧密相关<sup>[16]</sup>。此外,已有研究显示,外源施用脯氨酸可以显著促进植物根系的生长速度和长度<sup>[17]</sup>。本研究得出结果与这些研究结果一致,进一步证实了脯氨酸可以促进根的生长。

渗透调节物质脯氨酸在植物对抗低温胁迫的过程中起到了至关重要的作用。它通过减少细胞渗透压,有效防止了细胞水分的流失,从而减轻了低温对细胞结构的损伤<sup>[18]</sup>。在植物根系生长与渗透调节的互动中,脯氨酸的累积显著增强了植物对不利环境的适应力。本研究观察到,在正常温度下,老芒麦的根长和脯氨酸含量随着纳米硅处理浓度的增加呈先上升后下降的变化趋势;而在低温胁迫条件下,根长与脯氨酸含量在200 mg·L<sup>-1</sup>的处理浓度下达到最大值。这一现象表明,纳米硅处理能有效增强老芒麦在低温逆境中的生长潜力,与隶属函数综合评价结果相符合。

### 3.2 不同浓度纳米硅处理对老芒麦叶绿素含量和植物激素的影响

脱落酸是一种重要的植物激素,在植物对胁迫环境抗逆性中发挥重要作用。在逆境条件下,脱落酸增强了叶绿素氧化酶的活性,促进了叶绿素的分解,结果使叶绿素含量水平下降<sup>[19]</sup>。本研究中,在常温环境条件下,50 mg·L<sup>-1</sup>处理组的脱落酸浓度达到峰值,与此同时,该组的叶绿素含量降至最低。这一观察结果显示了脱落酸可能对叶绿素的合成或稳定具有抑制作用,这与前人的研究结论相吻合。基于此,本研究推断在不利环境中,叶绿素的浓度可能会呈下降的趋势。值得注意的是,在低温胁迫下,叶绿素含量随着纳米硅处理浓度的增加呈先上升后下降的模式,这表明外源纳米硅可能有助于减缓叶绿素的分解,从而在植物抵御寒冷的生理机制中发挥有益作用。

### 3.3 不同浓度纳米硅处理对老芒麦细胞通透性和超氧化物歧化酶的影响

低温胁迫条件下,植物细胞膜易遭受脂质过氧化作用,其中丙二醛是这一过程的标志性代谢产物<sup>[20]</sup>。丙二醛含量的上升通常表明细胞膜完整性的破坏和透性的提升,进而引起相对电导率的升高<sup>[21]</sup>。因此,丙二醛的浓度变化和相对电导率常被用作评估细胞膜损伤程度的标准<sup>[22-23]</sup>。研究表明,野生垂穗披碱草(*Elymus nutans*)在遭受低温胁迫时,丙二醛含量和相对电导率的增加表明细胞膜受到损伤,本研究结果与前人研究成果相符<sup>[24]</sup>。在本研究中,低温胁迫下,观察到相对电导率明显高于常温状态,但随着纳米硅处理浓度的提升,相对电导率呈下降趋势,并在150 mg·L<sup>-1</sup>纳米硅处理下达到最低点,表明纳米硅处理可能对细胞膜具有保护作用,从而提高了老芒麦对低温胁迫的抵抗力。观察结果与先前研究结果一致,即低温条件下,植物细胞膜的透性增强,丙二醛含量亦随之升高。

超氧化物歧化酶作为一种关键的抗氧化酶,在清除体内活性氧自由基和防止细胞膜氧化损伤方面发挥着重要作用<sup>[25-26]</sup>。超氧化物歧化酶活性的降低会导致活性氧自由基的积累,加剧脂质过氧化,进而提升丙二醛含量<sup>[27]</sup>。在本研究中,常温条件下,超氧化物歧化酶活性与丙二醛含量呈正向关联,并在200 mg·L<sup>-1</sup>纳米硅处理下达到峰值。然而,在低温胁迫下,超氧化物歧化酶活性和丙二醛含量随着纳米硅浓度的增加呈先上升后下降的模

式,这可能是植物在低温逆境初期启动的自卫反应,以减轻损伤。随着低温胁迫的进一步发展,植物体内自由基的积累超出其防御系统的清除能力,导致保护性酶系统受损,超氧化物歧化酶活性急剧下降。在甘蔗(*Saccharum officinarum*)低温处理的研究中,随着处理时间的延长,超氧化物歧化酶活性的降低与丙二醛含量的显著增加相伴随,进一步证实了超氧化物歧化酶活性降低是低温胁迫下膜脂氧化的关键因素,本研究的发现与前人<sup>[28]</sup>研究基本相吻合,表明丙二醛和超氧化物歧化酶在植物抗寒性调节机制中的重要性。

#### 4 结论

试验结果表明,在低温胁迫条件下,纳米硅处理显著促进了老芒麦根系的伸长,而对株高无显著影响。此外,纳米硅处理影响了多种生理生化指标,表明纳米硅可能通过调节细胞渗透压、清除活性氧、维持光合作用效率以及调节植物激素水平等多重机制来增强植物的抗寒性。抗寒性综合评价结果显示,200 mg·L<sup>-1</sup>处理下老芒麦抗寒性最强。本研究为纳米硅对老芒麦抗寒性育种,尤其是有望为老芒麦及其他牧草苗期抵御低温灾害、保障正常生长提供技术支撑。

#### 参考文献 References:

- [1] He Y T, Hu Y, Duan H R, *et al.* Comprehensive evaluation of cold resistance of four *Elymus* forage varieties at the seedling stage. *Pratacultural Science*, 2024, 41(10): 2377–2388.  
何永涛, 胡宇, 段慧荣, 等. 披碱草属4个牧草品种苗期抗寒性综合评价. *草业科学*, 2024, 41(10): 2377–2388.
- [2] Zhang L. Climate adaptability analysis of returning farmland to forestry and grassland in central Gansu——taking Dingxi city as an example. *Gansu Science and Technology*, 2020, 36(18): 152–156, 137.  
张玲. 甘肃中部退耕还林还草气候适应性分析——以定西市为例. *甘肃科技*, 2020, 36(18): 152–156, 137.
- [3] Du H, Zhang L J, Zhu Q N, *et al.* Current situation of research on equipment and technology for facility temperature regulation. *Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2024, 65(7): 53–58.  
杜涵, 张丽娟, 朱倩楠, 等. 设施温度调控装置装备与技术研究现状. *宁夏农林科技*, 2024, 65(7): 53–58.
- [4] Shi J Y, Wang Y F, Mao P S. Effect of PEG priming on antioxidant physiology of deteriorated siberian wildrye seeds during imbibition. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(12): 24–32.  
石金玉, 王一帆, 毛培胜. PEG引发对老芒麦劣变种子吸胀过程中抗氧化生理的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(12): 24–32.
- [5] Mao P S, Han J G, Wu X C. Effects of harvest time on seed yield of Siberian wildrye. *Acta Agrestia Sinica*, 2003, 11(1): 33–37.  
毛培胜, 韩建国, 吴喜才. 收获时间对老芒麦种子产量的影响. *草地学报*, 2003, 11(1): 33–37.
- [6] Liu X Y, Wang C X, Ye Q, *et al.* Research progress on the wound-healing mechanism and methods of tuber and root crop. *Acta Horticulturae Sinica*, 2024, 51(12): 2962–2976.  
刘晓宇, 王彩霞, 叶麒, 等. 薯类愈伤机制及其愈伤方法研究进展. *园艺学报*, 2024, 51(12): 2962–2976.
- [7] Feng Y M, Nong W, Chen X Y, *et al.* Physiological mechanism of aluminum tolerance of rice root border cells and root tips induced by nano silica biomineralization deposition. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(24): 4871–4883.  
冯英明, 农伟, 陈醒韵, 等. 纳米硅生物矿化沉积赋予水稻根边缘细胞及根尖耐铝性的生理机制. *中国农业科学*, 2024, 57(24): 4871–4883.
- [8] Ji C, Guo S X, Zhao Y L, *et al.* Effect of nano-silicon on tomato root conformation and soil enzyme activity under low temperature stress. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 70(4): 17–22.  
姬晨, 郭树勋, 赵晏俐, 等. 纳米硅对低温胁迫下番茄根系构型及土壤酶活性的影响. *陕西农业科学*, 2024, 70(4): 17–22.
- [9] Deng H H, Mo X L, Zhu X H, *et al.* Research progress on the effects of nano-silicon materials on plant growth and environmental response. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2024, 65(6): 1496–1501.  
邓欢欢, 莫小丽, 朱星辉, 等. 纳米硅材料对植物生长发育和环境响应的影响研究进展. *浙江农业科学*, 2024, 65(6): 1496–1501.
- [10] Wei Y X, Li T, Huang J, *et al.* Effect of soaking cuttings with chlormequat on *Manihot esculenta* Crantz growth at the seedling stage. *Seed*, 2024, 43(5): 16–23.  
魏云霞, 李天, 黄洁, 等. 矮壮素浸种对木薯苗期生长的影响. *种子*, 2024, 43(5): 16–23.

- [11] Chen X M, Tang Y K, Yin J J, *et al.* Effect of colonization of manganese oxidizing bacteria on the removal of manganese and ammonia nitrogen from water by floating plant *Pistia stratiotes*. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2024, 52(20): 59–64.  
陈学敏, 唐艳葵, 尹涓涓, 等. 锰氧化细菌定殖对漂浮植物大藻去除水中锰和氨氮的影响. *安徽农业科学*, 2024, 52(20): 59–64.
- [12] Zhu R J, Wen M M, Lang H S, *et al.* Physiological and biochemical response and related gene expression of Hongyang kiwifruit seedlings under salt stress. *Journal of Fruit Science*, 2024, 41(11): 2224–2234.  
朱润洁, 闻蒙蒙, 郎红珊, 等. 红阳猕猴桃盐胁迫下生理生化响应及相关基因表达分析. *果树学报*, 2024, 41(11): 2224–2234.
- [13] Shu X, Su X L, Yan L J, *et al.* Effects of exogenous salicylic acid on seed germination and seedling of *Elymus sibiricus* under NaCl stress. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(1): 87–96.  
舒欣, 苏晓丽, 闫利军, 等. 外源水杨酸对 NaCl 胁迫下老芒麦种子萌发和幼苗的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(1): 87–96.
- [14] Wang M, Li L, Jia R, *et al.* Evaluation of physiological characteristics and cold resistance of 10 alfalfa varieties under low temperature stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(6): 76–88.  
王敏, 李莉, 贾蓉, 等. 10 种紫花苜蓿在低温胁迫下的生理特性及耐寒性评价. *草业学报*, 2024, 33(6): 76–88.
- [15] Liu B H, Sa R N, Ge B B, *et al.* Growth-promoting effects of rhizosphere growth promoting bacteria A2 on germination and seedling stage of wheat under water stress. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(29): 64–69.  
刘炳花, 萨日娜, 葛蓓宇, 等. 在水分胁迫下根际促生菌 A2 对小麦萌芽期和苗期的促生效应. *中国农学通报*, 2016, 32(29): 64–69.
- [16] Ge Y, Lin W H, Gao H Y. Research progress on drought resistance of Chinese medicinal plant licorice and its application in desertification control. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2024, 14(9): 49–51.  
戈艳, 蔺万煌, 高鸿永. 中药材甘草植物抗旱性及其在沙漠治理中研究进展. *农业灾害研究*, 2024, 14(9): 49–51.
- [17] Zhao J S, Rao Y, Ren H M, *et al.* Effects of different amino acid water-soluble fertilizers on the growth and yield of *Schisandra chinensis*. *Modernizing Agriculture*, 2024(10): 21–23.  
赵峻生, 饶悦, 任鸿濛, 等. 不同氨基酸水溶肥对五味子生长和产量的影响. *现代化农业*, 2024(10): 21–23.
- [18] Bao X P, Wang M X, Cui L, *et al.* Evaluation on correlations of three kinds of osmoregulation substances in tea fresh leaves with low temperature during winter and spring respectively and their difference among cultivars. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(19): 3807–3817.  
薄晓培, 王梦馨, 崔林, 等. 茶树 3 类渗透调节物质与冬春低温相关性及其品种间的差异评价. *中国农业科学*, 2016, 49(19): 3807–3817.
- [19] Chen Y E, Liang Q L. Research progress in the effects of plant abscisic acid and its receptor gene *PYL9*. *Biotechnology Bulletin*, 2024, 40(12): 1–11.  
陈应娥, 梁巧兰. 植物脱落酸及其受体基因 *PYL9* 的作用研究进展. *生物技术通报*, 2024, 40(12): 1–11.
- [20] He S X, Lai Y P, Yang L, *et al.* Progress in studies on cold stress tolerance of rice. *Journal of Xichang University (Natural Science Edition)*, 2024, 38(1): 7–13.  
何思序, 赖运平, 杨林, 等. 水稻耐低温研究进展. *西昌学院学报(自然科学版)*, 2024, 38(1): 7–13.
- [21] Chen Y, Zhang X, Liu J, *et al.* Effects of cold stress on plant growth and physiological characteristics in *Lindera megaphylla* seedlings. *Plant Physiology Journal*, 2024, 60(12): 1759–1768.  
陈云, 张新, 刘静, 等. 低温胁迫对黑壳楠幼苗生长及生理特性的影响. *植物生理学报*, 2024, 60(12): 1759–1768.
- [22] Zhang F, Li Y Z, Li M F, *et al.* Comprehensive evaluation of high temperature and high heat resistance of 22 *Medicago sativa* L. varieties. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2024(6): 14–26.  
张菲, 李英主, 李明峰, 等. 耐热性紫花苜蓿新品种(系)筛选及其响应高温胁迫的生理机制研究. *草学*, 2024(6): 14–26.
- [23] Zeng L L, Zhang Z X, Li X S, *et al.* Physiological effects of low temperature on 3 *Camellia* varieties. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2024, 37(4): 428–432.  
曾岚岚, 张钟心, 李学松, 等. 3 个品种油茶对低温的生理响应. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2024, 37(4): 428–432.
- [24] Luo X, Yan L J, Li D X, *et al.* Screening and evaluation of drought resistance of wild *Elymus nutans* Griseb. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(7): 2158–2168.  
罗鑫, 闫利军, 李达旭, 等. 野生垂穗披碱草种质资源抗旱性筛选与评价. *草地学报*, 2024, 32(7): 2158–2168.
- [25] Zhu H X, Zhang L, Cheng L, *et al.* Preliminary study on the herbicidal mechanism of *Fusarium avenaceum* HY-041. *Journal of*

Anhui Agricultural University, 2024, 51(6): 955—960.

朱海霞, 张乐, 程亮, 等. 燕麦镰刀菌 HY-041 除草机理的初步研究. 安徽农业大学学报, 2024, 51(6): 955—960.

- [26] Wu Z B, Li A S, Fu S H, *et al.* Research progress on quality components and efficacy of tea plant flowers. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2024, 30(7): 94—98.

吴钊豹, 李安生, 付仕皓, 等. 茶树花的品质成分及功效研究进展. 安徽农学通报, 2024, 30(7): 94—98.

- [27] Li T X. Allelopathy and its mechanism of extract solution of *Vaccinium fragile* on *Quercus acutissima* in burned forestlands. *Northern Horticulture*, 2016(13): 77—81.

李天星. 火烧迹地土千年健对麻栎化感作用及其机理研究. 北方园艺, 2016(13): 77—81.

- [28] Wang H, Adila·Adili, Yang N B, *et al.* Correlation between secondary metabolites, protective enzymes in sugarcane and its borer-resistance property. *Sugarcane and Canesugar*, 2021, 50(6): 7—13.

王辉, 阿迪拉·阿迪力, 杨乃博, 等. 甘蔗中次生代谢产物和保护酶与螟虫抗性的相关性研究. 甘蔗糖业, 2021, 50(6): 7—13.