

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.034

引用格式:戈孟婷,乔丹丹,王新月,等.纳米氧化铈引发对干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发及生理特性的影响[J].草地学报,2026,34(4):1534-1545

GE Meng-ting, QIAO Dan-dan, WANG Xin-yue, et al. Effects of Cerium Oxide Nanoparticle Priming on Seed Germination and Physiological Characteristics of Alfalfa under Drought Stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1534-1545

纳米氧化铈引发对干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发及生理特性的影响

戈孟婷, 乔丹丹, 王新月, 张若琳, 毕明月, 何学青*

(西北农林科技大学草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:干旱胁迫会抑制紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)种子萌发,降低产量。为探究纳米氧化铈(CeO_2NPs)引发对干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发的缓解效应,本研究以紫花苜蓿种子为试验材料,采用浓度分别为0, 50, 100, 150, 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的纳米氧化铈悬浮液在黑暗条件下引发处理24 h,通过15% PEG模拟干旱胁迫,进行种子萌发试验。研究结果显示:15% PEG显著抑制种子萌发,而150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 纳米氧化铈引发可将发芽率提升至77% ($P<0.05$),较未引发处理提高5%,同时缩短平均发芽时间、提高发芽指数并增加幼苗鲜重。生理层面,150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 纳米氧化铈引发处理提高了 α -淀粉酶和 β -淀粉酶活性,显著降低还原糖含量 ($P<0.05$);100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理显著提升抗氧化酶活性,50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理有效降低ROS含量;各浓度处理均显著降低丙二醛含量 ($P<0.05$),并降低脯氨酸和提高可溶性蛋白等渗透调节物质含量。综合分析表明,150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 纳米氧化铈引发对干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发的缓解效果最佳。

关键词:紫花苜蓿;干旱胁迫;纳米氧化铈;种子引发;种子萌发

中图分类号:S541.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1534-12

Effects of Cerium Oxide Nanoparticle Priming on Seed Germination and Physiological Characteristics of Alfalfa under Drought Stress

GE Meng-ting, QIAO Dan-dan, WANG Xin-yue, ZHANG Ruo-lin, BI Mingyue, HE Xue-qing*

(College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China)

Abstract: Drought stress inhibits seed germination of alfalfa (*Medicago sativa* L.) and reduces its yield. This research studied the effects of cerium oxide nanoparticle priming on seed germination and physiological characteristics of alfalfa under drought stress. Alfalfa seeds were used as materials and primed with different concentrations of cerium oxide nanoparticle (CeO_2NPs) solutions (0, 50, 100, 150, 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) in the dark for 24 hours. Drought stress was simulated with 15% PEG to explore the mitigating effect of CeO_2NPs on seed germination. The results showed that 15% PEG significantly inhibited seed germination, while priming with 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ CeO_2NPs increased the germination rate to 77% ($P<0.05$), which was 5% higher than the non-primed treatment. It also shortened the average germination time, increased the germination index, and enhanced the fresh weight of germinated seedlings. At the physiological level, the 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ CeO_2NPs priming treatment increased the activities of α -amylase and β -amylase, and significantly reduced the contents of reducing sugar ($P<0.05$); the 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ treatment significantly improved the activity of antioxidant enzymes; the 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ treatment effectively reduced the ROS content; all concentrations of CeO_2NPs prim-

收稿日期:2025-04-24;修回日期:2025-09-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1300803);大学生科技创新项目(202310712050)资助

作者简介:戈孟婷(1999-),女,汉族,河南南阳人,硕士研究生,主要从事牧草种质资源与逆境生物学研究, E-mail:2022051684@nwafu.edu.cn; *通信作者 Author for correspondence, E-mail:hexueqing@nwsuaf.edu.cn

ing treatments significantly decreased the malondialdehyde content ($P < 0.05$) and the proline content, and increased the soluble protein content as osmotic adjustment substances. Comprehensive analysis indicated that $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ CeO_2NPs priming had the best mitigating effect on alfalfa seed germination under drought stress.

Key words: Alfalfa; Drought stress; Cerium Oxide Nanoparticles; Seed priming; Seed germination

紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 作为“牧草之王”, 因产量高、营养丰富而在畜牧业中占据重要地位, 但其多年生高耗水特性使其对干旱胁迫极为敏感^[1]。干旱不仅抑制种子吸水, 还会降低发芽率、延缓萌发进程, 且胁迫程度与抑制效应呈正相关, 而不同物种的抗旱响应存在显著差异^[2-3]。这一矛盾凸显了改善紫花苜蓿干旱条件下萌发性能的研究价值。

我国丰富的稀土资源 (占世界 80%) 为抗逆研究提供了独特材料^[4]。已有研究证实, 稀土浸种可提升种子活力、促进萌发并增强抗逆性^[5-6], 但这些研究多聚焦传统稀土化合物, 对纳米尺度稀土材料的探索仍显不足。纳米氧化铈 (CeO_2NPs) 因表面 Ce^{3+} 与 Ce^{4+} 的可逆转化特性, 兼具抗氧化与促氧化双重功能^[7], 这种独特性使其在调节植物逆境响应方面展现出潜在优势。

当前, 纳米引发技术因用量少、成本低、环境残留少等特点, 在农业抗逆领域备受关注^[8]。已有研究表明, 纳米氧化铁、二氧化硅引发可改善柳枝稷 (*Panicum virgatum* L.)、玉米 (*Zea mays* L.) 的萌发性能^[9-10], 而纳米氧化铈通过调节抗坏血酸-谷胱甘肽循环、提升淀粉酶活性等途径, 能缓解葡萄 (*Vitis vinifera* L.)、芸薹 (*Brassica rapa* var. *oleifera* DC.) 的逆境损伤^[11-12]。但针对紫花苜蓿, 纳米氧化铈引发能否通过调控生理代谢增强干旱条件下的萌发抗逆性, 尚未明确。紫花苜蓿抗旱性的研究主要集中在干旱胁迫对幼苗形态特征^[13-14]、生理生化反应^[15-16]以及抗旱分子育种^[17-18]等方面, 通过纳米引发等种子播前处理改善紫花苜蓿在干旱胁迫条件下种子活力及生理特性、提高抗旱性方面的研究对紫花苜蓿抗旱栽培具有一定意义。

基于此, 本研究以紫花苜蓿种子为材料, 探究纳米氧化铈引发对干旱胁迫下种子萌发及生理特性的影响, 旨在明确其缓解效应及最优浓度, 为紫花苜蓿抗旱栽培提供理论依据与技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选取采购自江苏千花百魅种业有限公司

的‘皇后’紫花苜蓿种子为供试材料, 保存于 4℃ 低温冰箱。纳米氧化铈颗粒 (CeO_2NPs , 99.5%, 20~50 nm) 采购自罗恩 (Rhawn) 试剂公司, 常温避光保存。

1.2 试验设计

1.2.1 PEG 模拟干旱胁迫浓度筛选 本研究采用聚乙二醇 6000 (PEG-6000) 配制浓度为 0%, 5%, 10%, 15%, 20% 的溶液, 构建梯度干旱胁迫处理组, 分别对应轻度至重度干旱胁迫。选取颗粒饱满、大小均一的种子, 置于铺有双层滤纸的 9 cm 直径培养皿中, 每皿加入 5 mL 对应浓度 PEG 溶液, 放置 50 粒种子, 设 3 次重复。培养皿置于 20℃ 光照培养箱中, 采用 16 h 光照/8 h 黑暗的光周期培养, 以胚根突破种皮 2 mm 为萌发判定标准, 连续 10 d 观察并记录每日萌发数, 计算各项萌发指标。以紫花苜蓿种子萌发指标均值为横坐标、PEG 浓度为纵坐标进行一元二次线性拟合, 确定 PEG 模拟干旱的临界浓度。

1.2.2 种子引发处理 本试验采用逐步稀释法配制纳米氧化铈引发溶液: 称取 200 mg 纳米氧化铈粉末 (精确至 0.1 mg), 加入 1 L 超纯水中, 超声分散 30 min (功率 200 W, 频率 40 kHz) 形成 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 储备液; 取适量母液用超纯水逐级稀释成 50, 100, 150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 工作液, 每次稀释后超声 10 min, 0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组使用等量超纯水作为对照。选取 500 粒大小均一的紫花苜蓿种子, 随机分为 5 组, 每组 100 粒, 分别置于锥形瓶中加入 100 mL 对应浓度纳米氧化铈溶液 (液种比 10:1), 密封后置于 $(10 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 黑暗培养箱中振荡浸种 24 h (振荡频率 120 rpm); 浸种结束后用超纯水冲洗 5 次, 随后平铺于湿润滤纸上, 在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $75\% \pm 5\%$ 的环境中静置 72 h, 期间每 12 h 称量种子总重, 当重量变化 $\leq 0.5\%$ 时视为含水量恢复初始水平, 分装于铝箔袋中 -20°C 冷冻保存, 使用前室温下回温 2 h。

1.2.3 临界 PEG 浓度模拟干旱胁迫条件下纳米氧化铈梯度引发对紫花苜蓿种子萌发的影响 根据前期试验确定的 PEG 模拟干旱胁迫临界浓度 (15%, w/v), 配制等渗 PEG-6000 溶液模拟干旱胁迫环境。将经不同浓度纳米氧化铈颗粒 (0, 50, 100, 150, 200

mg·L⁻¹)引发处理的紫花苜蓿种子,均匀置于铺有双层滤纸的培养皿中,每皿加入5 mL对应浓度的PEG溶液,使滤纸完全浸润但无积液。培养皿置于20℃光照培养箱中,保持16 h光照/8 h黑暗光周期,每日补充等量PEG溶液以维持渗透压稳定。每个处理设置3次重复,每次重复50粒种子,以胚根突破种皮2 mm为萌发标准,连续记录10 d萌发数。

1.3 测定指标

1.3.1 萌发指标的测定 按照以下公式计算发芽势、发芽率、平均发芽时间和发芽指数^[19]。

发芽势(Germination potential, GP)=第4 d发芽种子数/供试种子数×100%;

发芽率(Germination rate, GR)=第10 d发芽种子数/供试种子数×100%;

平均发芽时间(Mean germination time, MGT)= $\Sigma(Gt \times t) / \Sigma t$, Gt 为在第 t 日内的发芽数, t 为相应天数;

发芽指数(Germination index, GI)= $\Sigma(Gt/t)$, Gt 为在第 t 日内的发芽数, t 为相应天数。

1.3.2 萌发期幼苗生长指标的测定 萌发试验的第10 d,每个处理随机选取15株幼苗测定其根长、苗长,擦干表面水分,称量其鲜重,统计萌发期幼苗的生长情况^[20]。

1.3.3 种子萌发相关生理生化指标的测定 分别称取不同处理的“露白”种子0.5 g,经液氮冷冻研磨后测定生理指标。淀粉酶活性采用DNS法测定^[21],丙二醛含量测定使用硫代巴比妥酸法^[22],脯氨酸含量测定采用茚三酮比色法^[23],可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定^[21],可溶性糖含量测定采用蒽酮-硫酸比色法^[23],超氧化物歧化酶活性测定采用氮蓝四唑光还原法^[21],过氧化物酶活性测定采用愈创木酚法^[21]。

1.4 数据处理

使用Microsoft Excel 2019软件对数据进行整理和计算,使用IBM SPSS Statistics 25进行数据分析,采用单因素方差分析,Duncan法进行多重比较,试验结果以平均值±标准误来表示,使用Origin 2024进行绘图。

用模糊隶属函数值法对不同浓度纳米氧化铈引发处理紫花苜蓿种子进行抗旱性综合评价。先求出各指标在不同浓度引发处理下的具体隶属值,

然后累计各指标隶属函数值并求平均值,最后根据不同浓度引发处理的隶属函数平均值大小评定抗旱性强弱,筛选最适引发处理浓度^[24]。隶属函数值的计算公式如下:

当指标为正向指标时,其隶属度公式为:

$$\mu(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

当指标为负向指标时,其隶属度公式为

$$\mu(X_i) = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min})$$

$\mu(X_i)$ 为计算得到的指标隶属函数值, X_i 为指标原始值, $X_{\max}$ 为各处理中该指标的最大值, $X_{\min}$ 为各处理中该指标的最小值。

正向指标是数据值越大抗旱性越大的指标,负向指标则相反。本研究中负向指标有平均发芽时间、根冠比、超氧阴离子含量、过氧化氢含量和MDA含量,各指标的隶属函数平均值越大,证明该引发处理浓度越能缓解干旱胁迫对紫花苜蓿种子萌发的影响。

2 结果与分析

2.1 不同浓度PEG对紫花苜蓿种子萌发特性的影响

使用不同浓度的PEG溶液模拟干旱胁迫条件,对紫花苜蓿种子萌发的影响结果如图1所示。与对照组(CK)相比,在15%和20%的PEG浓度下,紫花苜蓿的发芽势和发芽率均显著降低($P < 0.05$)。在15%和20%的PEG浓度条件下,发芽势分别下降43.94%和50%。在15%的PEG浓度下,紫花苜蓿种子的发芽率较CK降低20.43%,在20%的PEG浓度下,降低幅度为21.17%。随着PEG浓度的逐渐增大,紫花苜蓿种子的平均发芽时间显著延长,发芽指数显著降低($P < 0.05$),15%与20%PEG浓度下差异不显著。对照组紫花苜蓿种子的平均发芽时间为1.42 d,在10%、15%和20%的PEG浓度条件下,紫花苜蓿种子的平均发芽时间分别为3.19 d、3.99 d和4.82 d,分别是对照组的2.25倍、2.81倍和3.39倍。对照组的发芽指数为37.64,在10%、15%和20%的PEG浓度条件下,发芽指数降为19.20、10.54和8.28。与对照CK相比,浓度为15%和20%的PEG处理显著抑制紫花苜蓿种子萌发,发芽势和发芽率明显下降,平均发芽时间变长,发芽指数显著降低($P < 0.05$),在萌发期结束后,20%浓度条件下的幼苗的生长受到明显抑制,不利于幼苗移栽和成活。

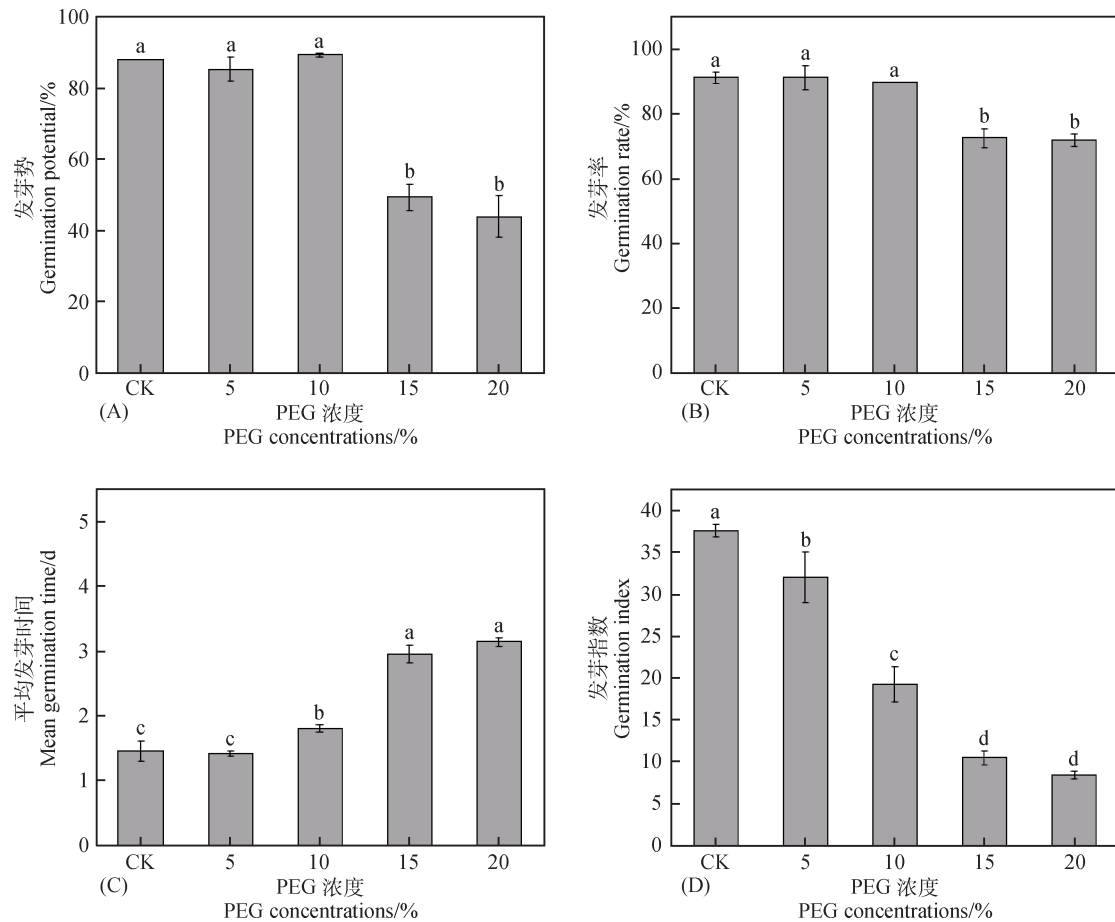


图1 PEG浓度对紫花苜蓿种子萌发特性的影响

Fig. 1 Effects of PEG concentration on germination characteristics of alfalfa seeds

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$), the same as below

2.2 紫花苜蓿种子萌发的PEG模拟干旱临界浓度筛选

以紫花苜蓿种子萌发各指标的均值为横坐标,不同PEG浓度为纵坐标进行一元二次线性模拟,筛选紫花苜蓿种子萌发的PEG模拟干旱临界浓度,结果如表1所示,假设发芽势为0.50时,通过线性模拟计算得到的PEG鉴别浓度为11.97%,线性拟合方程相关性系数为0.9147;假定发芽率为0.50时,通过线性模拟计算得到的PEG鉴别浓度为18.46%,线性拟合方程相关性系数为0.8062;假定平均发芽时间为3.20 d,为对照组CK的二倍时,通过线性模拟计算得到的PEG鉴别浓度为11.16%,线性拟合方程相关性系数为0.9647;假定发芽指数为16.75,为对照组CK一半时,通过线性模拟计算得到的PEG鉴别浓度为11.85%,线性拟合方程相关性系数为0.9096。综合相关性系数 R^2 来看,拟合程度较高,且这四个萌发指标模拟得到的PEG鉴别浓度均值为13.36%,接近15%。因此,选用15%

浓度的PEG作为后续模拟干旱胁迫对紫花苜蓿种子萌发和幼苗生长影响的处理浓度

2.3 纳米氧化铈引发对干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发特性的影响

如图2所示,在15% PEG模拟干旱胁迫条件下,不同浓度纳米氧化铈引发处理对紫花苜蓿种子萌发的影响存在显著差异($P < 0.05$)。与未引发且正常萌发的对照组(CK)相比,PEG模拟干旱胁迫条件下,紫花苜蓿种子的发芽势、发芽率和发芽指数显著降低,平均发芽时间显著延长($P < 0.05$)。与干旱条件下的对照组(DCK)相比,150和200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米氧化铈引发处理明显提高紫花苜蓿种子的发芽势和发芽率,缩短平均发芽时间,并提高发芽指数。其中150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的纳米氧化铈引发处理使紫花苜蓿种子的发芽势和发芽率达到最高。200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米氧化铈引发处理则使发芽指数达到最高,平均发芽时间最短。

表 1 根据不同 PEG 浓度下种子萌发指标线性拟合确定鉴别浓度

Table 1 Determining the identification concentration according to the linear fitting of seed germination index under different PEG concentrations

指标 Index	线性拟合方程 Linear fitting equation	R^2	指标临界值 Critical value of the index	鉴别浓度 Identification concentration/%
发芽势 Germination potential	$y = -4.1522x^2 - 18.696x + 22.355$	0.9147	0.50	11.97
发芽率 Germination rate	$y = -82.545x^2 + 78.516x - 0.1577$	0.8062	0.50	18.46
平均发芽时间 Mean germination time/d	$y = -0.1378x^2 + 6.5959x - 8.5363$	0.9647	3.20	11.16
发芽指数 Germination index	$y = -0.0039x^2 - 0.4672x + 20.769$	0.9096	16.75	11.85

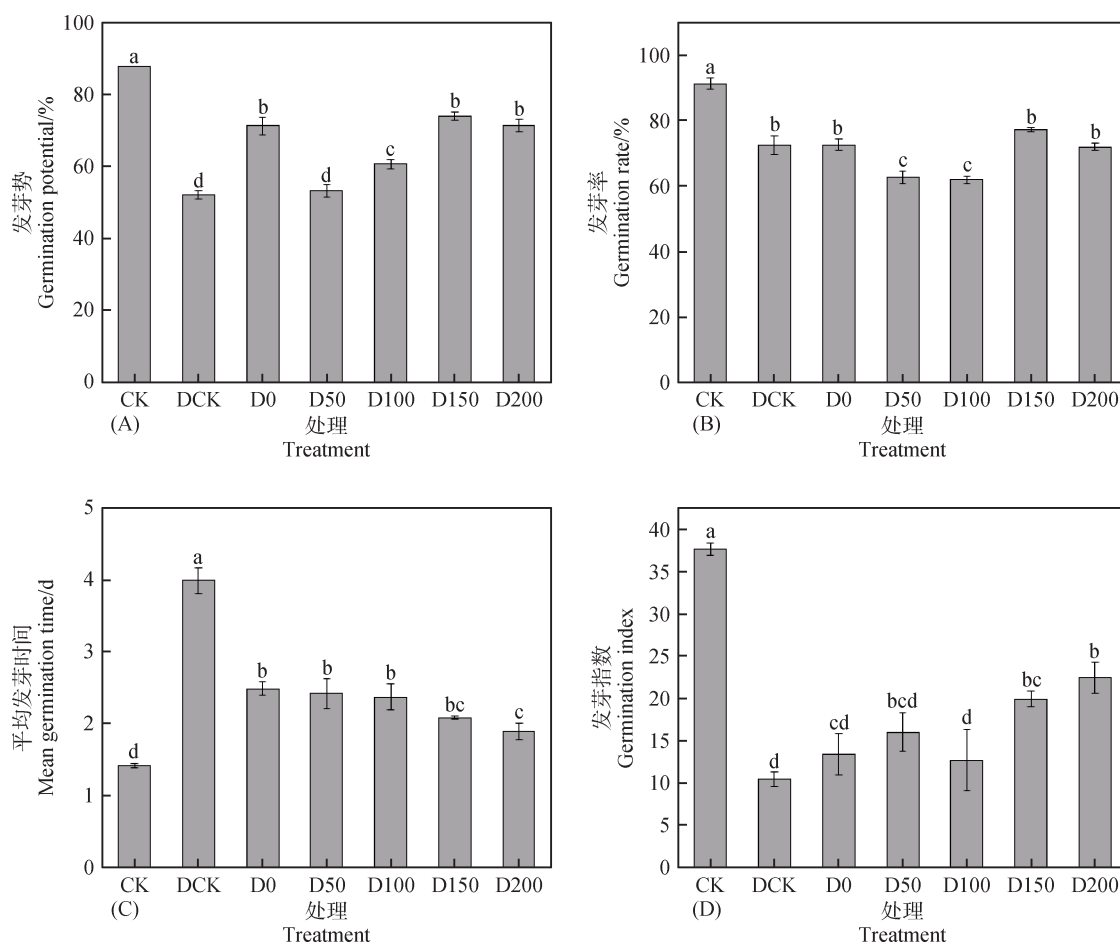


图 2 纳米氧化铈引发浓度对干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发特性的影响

Fig. 2 Effects of CeO_2 nanopriming concentration on seed germination characteristics of alfalfa under drought stress

注:CK代表未引发,D代表干旱胁迫条件下萌发处理,数字代表纳米氧化铈引发溶液浓度,下同

Note: CK represents no priming, D represents germination treatment under drought stress conditions, and the number represents the concentration of CeO_2 nanopriming solution, the same as below

2.4 纳米氧化铈引发对干旱胁迫下紫花苜蓿幼苗生长的影响

纳米氧化铈引发对干旱胁迫下紫花苜蓿幼苗生长的影响结果如表 2 所示,200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米氧化铈引发处理的紫花苜蓿幼苗根长(Root length, RL)和苗长(Seedling length, SL)最长,接近正常处理组 CK,150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米氧化铈引发处理的紫花苜蓿幼苗根长和苗长最短,是对照的 0.79 和

0.78,然而,在 15% PEG 模拟的干旱胁迫条件下,不同浓度纳米氧化铈引发处理对萌发期幼苗的根长和苗长的影响差异不明显。干旱条件下,100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米氧化铈引发处理的紫花苜蓿幼苗根冠比(Root-shoot ratio, R/S ratio)最大,为 6.70,显著高于 CK($P < 0.05$)。然而,在干旱胁迫下紫花苜蓿幼苗鲜重(Fresh weight, FW)显著降低($P < 0.05$),150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米氧化铈引发处理的紫花苜

蓿种子在干旱胁迫下幼苗鲜重最大,是处理组 DCK 的 1.58 倍。

表 2 纳米氧化铈引发浓度对干旱胁迫下紫花苜蓿萌发幼苗生长的影响

Table 2 Effects of CeO₂ nanoprimer concentration on the growth of alfalfa germination seedlings under drought stress

处理 Treatment	根长 Root length/ cm	苗长 Seedling length/cm	根冠比 Root top ratio	鲜重 Fresh weight/ mg
CK	3.20±0.09 ^a	3.78±0.09 ^a	5.38±0.09 ^b	21.97±1.14 ^a
DCK	2.99±0.26 ^a	3.44±0.29 ^a	6.28±0.22 ^a	6.02±0.51 ^d
D0	2.72±0.38 ^a	3.18±0.43 ^a	5.44±0.35 ^b	5.52±0.15 ^d
D50	2.74±0.28 ^a	3.16±0.31 ^a	6.09±0.30 ^{ab}	7.10±0.45 ^{cd}
D100	2.94±0.29 ^a	3.36±0.32 ^a	6.70±0.29 ^a	8.01±0.56 ^{bc}
D150	2.52±0.25 ^a	2.95±0.29 ^a	5.51±0.20 ^b	9.49±0.58 ^b
D200	3.31±0.26 ^a	3.83±0.30 ^a	6.38±0.18 ^a	8.75±0.78 ^{bc}

注:表中数据为均值±标准误,不同小写字母表示差异显著性 ($P<0.05$)
Note: The data in the table are mean±standard error, and different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$)

2.5 纳米氧化铈引发对干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发淀粉酶活性及糖类物质含量的影响

如图 3 所示在干旱胁迫条件下,与对照组 DCK 相比,紫花苜蓿种子的 α -淀粉酶(α -amylase, α -AL)和 β -淀粉酶活性(β -amylase, β -AL)均显著提高($P<0.05$)。其中,100 mg·L⁻¹纳米氧化铈引发处理的种子 α -淀粉酶活性最高,而 150 mg·L⁻¹处理后 β -淀粉酶活性最高。在干旱条件下,50 mg·L⁻¹氧化铈引发处理后可溶性糖含量(Soluble sugar, SS)最高,显著高于对照组 DCK($P<0.05$)。在 100 mg·L⁻¹处理时,可溶性糖含量下降。萌发种子中的还原糖含量(Reducing sugar, ReS),经引发处理后显著降低($P<0.05$)。其中 100 mg·L⁻¹纳米氧化铈引发处理的种子,还原糖含量最低。结果表明 100 mg·L⁻¹和 150 mg·L⁻¹浓度纳米氧化铈引发处理可有效提高紫花苜蓿种子在干旱胁迫下的淀粉酶活性,从而增加可溶性糖的产生,尽管还原糖含量有所降低,但可能反映了种子在逆境条件下能量代谢的变化。

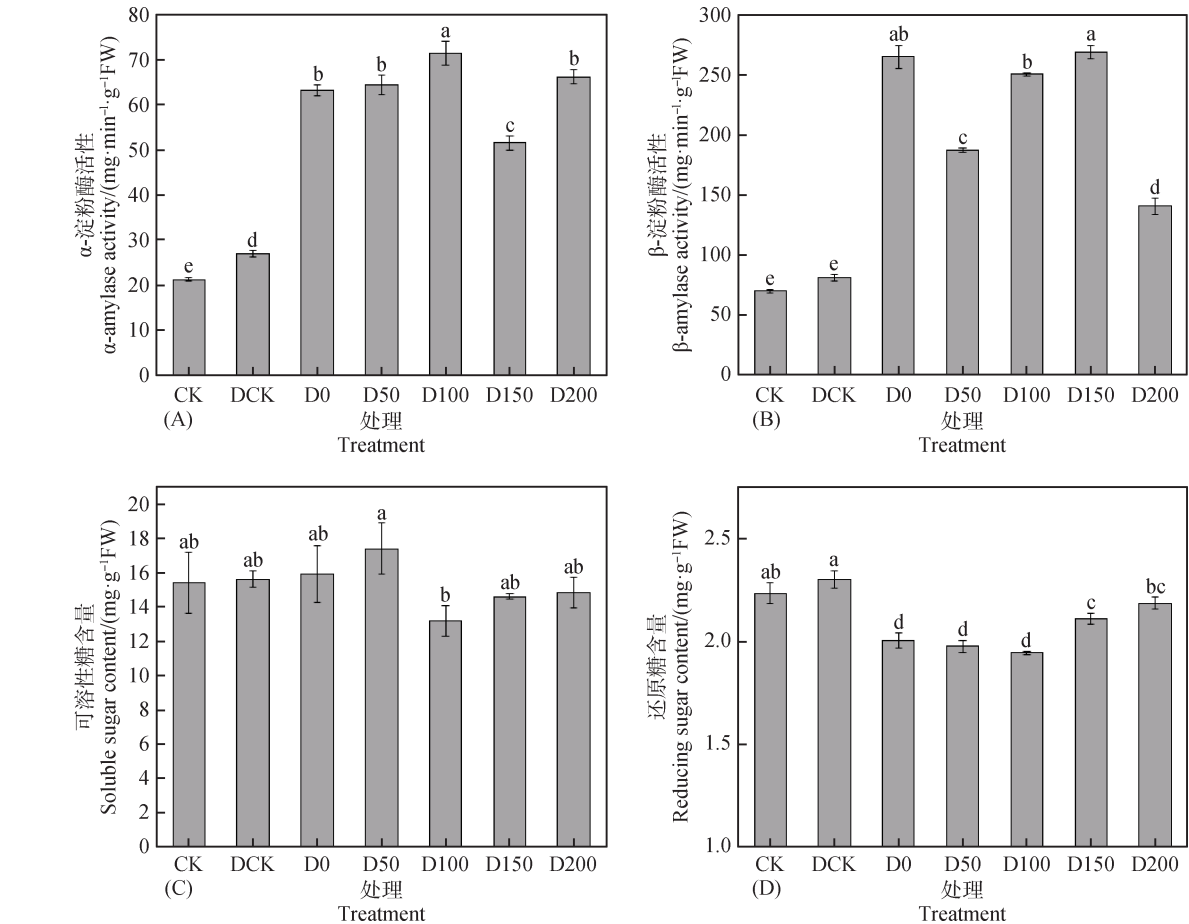


图 3 纳米氧化铈引发浓度对干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发淀粉酶活性及糖类含量的影响

Fig. 3 Effects of CeO₂ nanoprimer concentration on amylase activity and sugar content during seed germination of alfalfa under drought stress

2.6 纳米氧化铈引发对干旱胁迫下紫花苜蓿萌发种子抗氧化酶活性及ROS含量的影响

纳米氧化铈引发影响干旱胁迫下紫花苜蓿萌发种子抗氧化酶活性及ROS含量,结果如图4所示。在干旱胁迫条件下,与对照组DCK相比,紫花苜蓿萌发种子的超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)和过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性均显著提高($P < 0.05$)。当纳米氧化铈引发处理浓度达到 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, SOD和POD活性最高,分别为 $44\ 611.15 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ FW}$ 和 $1200.36 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在干旱胁迫

条件下,与对照组DCK相比,紫花苜蓿萌发种子的超氧阴离子(O_2^-)和过氧化氢(H_2O_2)含量均显著降低($P < 0.05$)。其中, $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米氧化铈引发处理的超氧阴离子含量最低,为 $68.92 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW}$,而 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米氧化铈引发处理的过氧化氢含量最低,为 $0.13 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW}$ 。这些结果表明,纳米氧化铈引发处理,特别是在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度下,能够有效降低干旱胁迫下紫花苜蓿萌发种子内的ROS含量,并增强抗氧化酶活性,从而提高萌发种子的抗氧化能力和抗旱性。

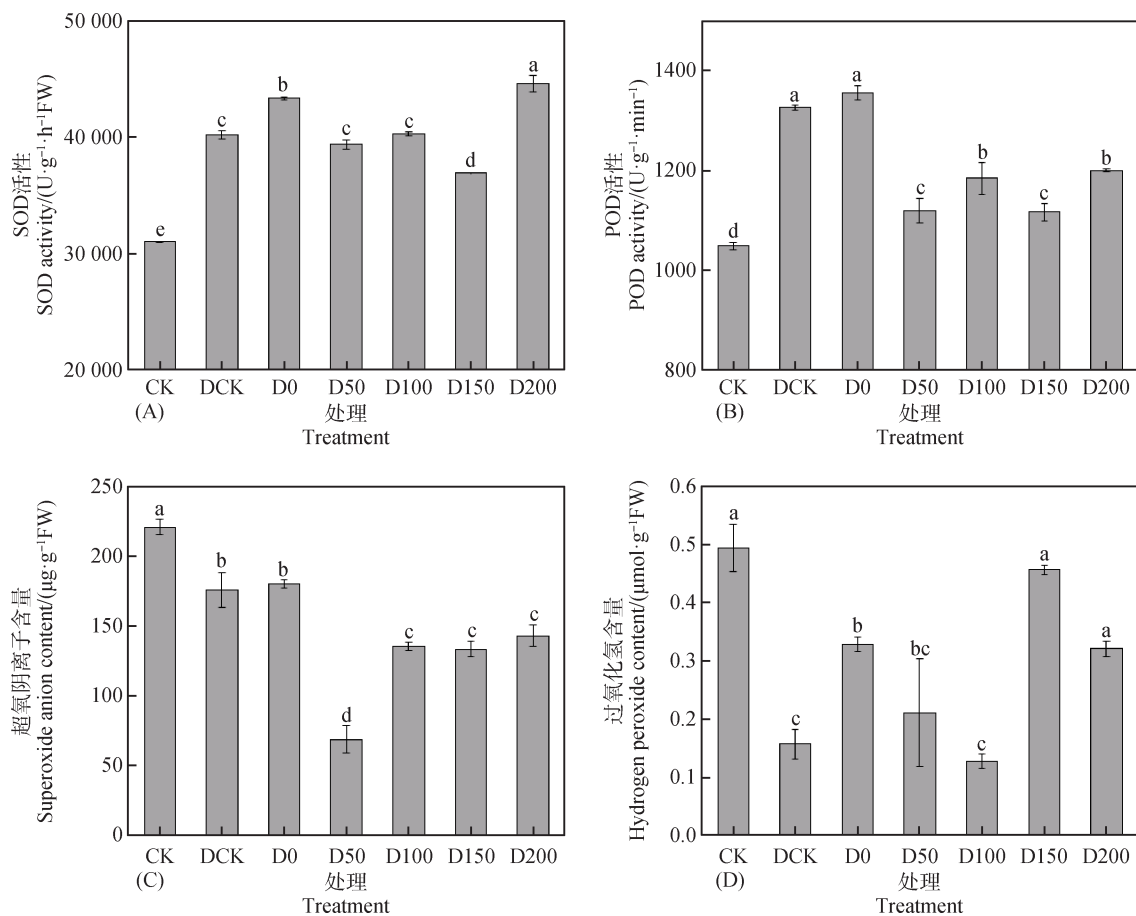


图4 纳米氧化铈引发对干旱胁迫下紫花苜蓿萌发种子抗氧化酶活性及ROS含量的影响

Fig. 4 Effects of CeO_2 nanoprimer on antioxidant enzyme activity and ROS content of alfalfa germination seeds under drought stress

2.7 纳米氧化铈引发对干旱胁迫下紫花苜蓿萌发种子丙二醛及渗透调节物质含量的影响

根据图5,在干旱胁迫下,经纳米氧化铈引发的紫花苜蓿种子MDA含量显著降低($P < 0.05$),其中 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米氧化铈处理的种子MDA含量最低,为 $32.38 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW}$,仅为对照组DCK的0.48倍。干旱条件下,引发处理使种子

的脯氨酸(Proline, Pro)含量显著降低($P < 0.05$),但 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米氧化铈处理的种子脯氨酸含量最高,达0.08%,有助于维持较低的渗透势,影响种子吸水。同时,引发处理使种子的可溶性蛋白(Soluble protein, SP)含量显著增加($P < 0.05$),其中 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米氧化铈处理的种子可溶性蛋白含量最高,为 $122.21 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW}$ 。

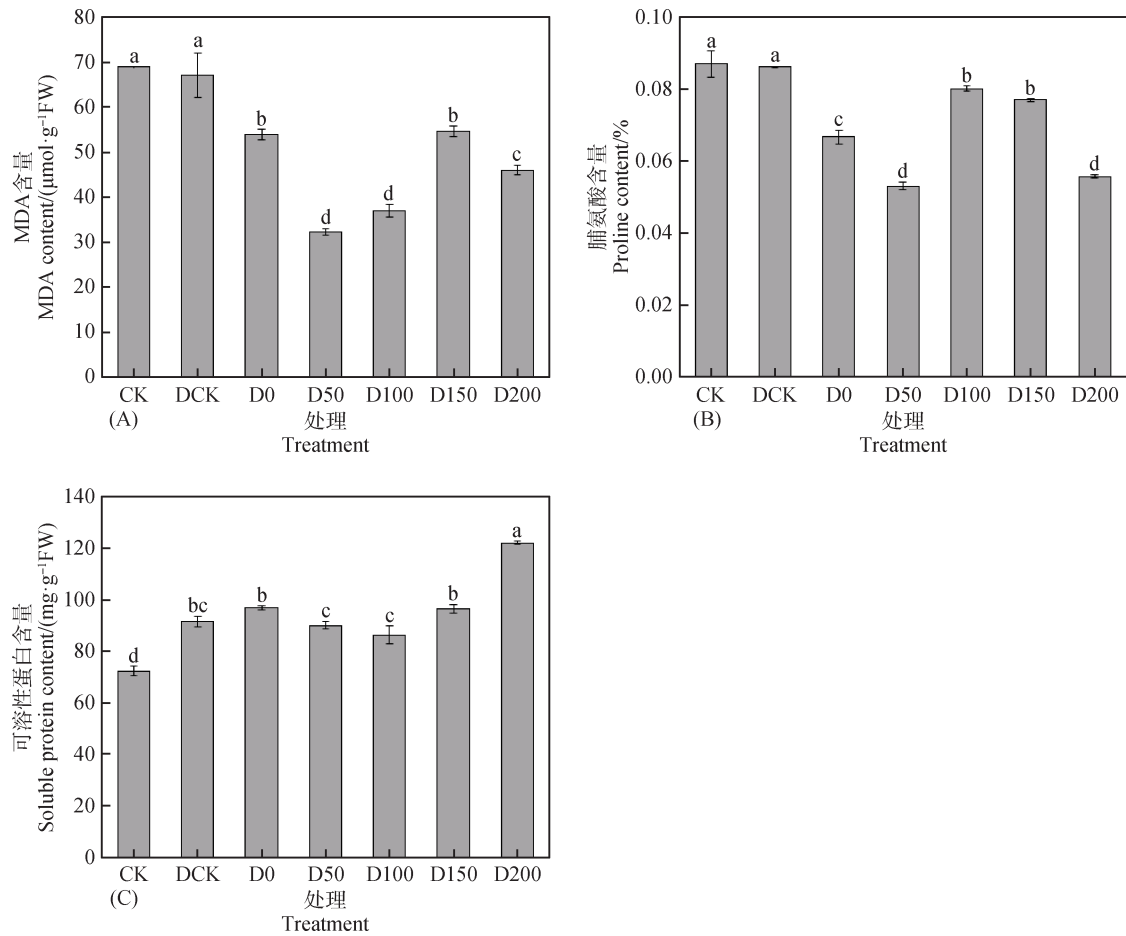


图5 纳米氧化铈引发对干旱胁迫下紫花苜蓿萌发种子丙二醛(MDA)及渗透调节物质含量的影响

Fig. 5 Effects of CeO_2 nanoprimering on malondialdehyde (MDA) content and osmotic adjustment substance content of alfalfa germination seeds under drought stress

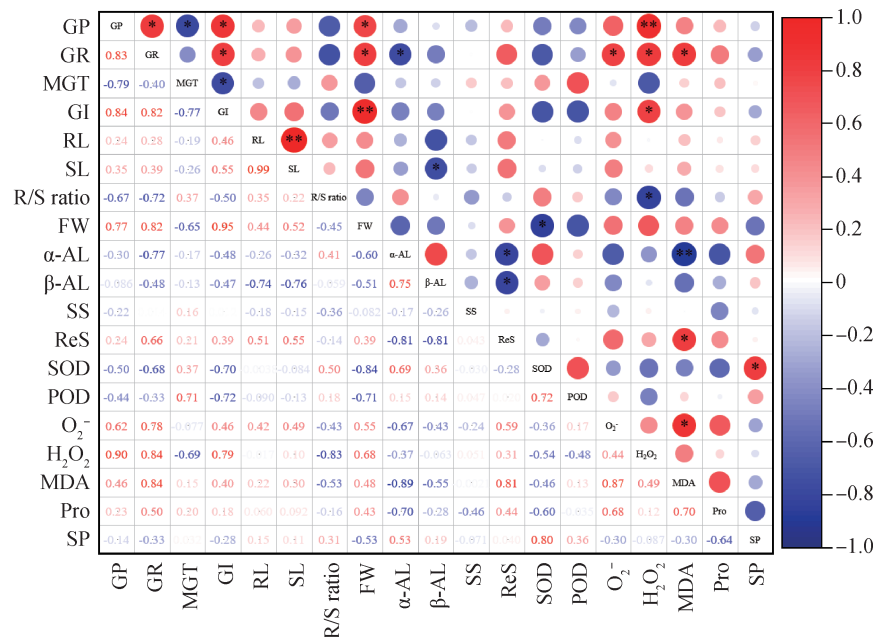
2.8 干旱胁迫条件下经纳米氧化铈引发处理的紫花苜蓿萌发种子各指标相关性分析

由图6可知,在干旱胁迫条件下,紫花苜蓿种子发芽势(GP)与发芽率(GR)、幼苗鲜重(FW)显著正相关($P < 0.05$),与过氧化氢含量(H_2O_2)极显著正相关($P < 0.01$),与平均发芽时间(MGT)显著负相关($P < 0.05$)。发芽率与发芽指数(GI)、幼苗鲜重、超氧自由基阴离子含量(O_2^-)、过氧化氢含量和丙二醛含量(MDA)显著正相关($P < 0.05$),与 α -淀粉酶活性(α -AL)显著负相关($P < 0.05$)。平均发芽时间与发芽指数呈显著负相关($P < 0.05$)。发芽指数与幼苗鲜重极显著正相关($P < 0.01$),与超氧阴离子含量显著正相关($P < 0.05$)。幼苗根长与苗长极显著正相关($P < 0.01$)。幼苗苗长与 α -淀粉酶活性显著负相关($P < 0.05$)。幼苗根冠比与过氧化氢含量显著负相关($P < 0.05$)。幼苗鲜重与超氧化物歧化酶活性(SOD)显著负相关($P < 0.05$)。 α -淀粉酶活性与还原糖含量(ReS)显著负相关($P <$

0.05),与丙二醛含量极显著负相关($P < 0.01$)。 β -淀粉酶活性(β -AL)与还原糖含量显著负相关($P < 0.05$)。还原糖含量与丙二醛含量显著正相关($P < 0.05$)。超氧化物歧化酶活性与可溶性蛋白含量(SP)显著正相关($P < 0.05$)。超氧阴离子含量与丙二醛含量显著正相关($P < 0.05$)。

2.9 干旱胁迫条件下经纳米氧化铈引发处理的紫花苜蓿萌发种子各指标隶属函数分析

干旱胁迫条件下经纳米氧化铈引发处理的紫花苜蓿萌发种子各指标隶属函数分析结果如表3所示,在干旱胁迫条件下,200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的纳米氧化铈引发处理的隶属函数平均值最大,其次是水引发,100和150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 引发并列,50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 引发的隶属函数平均值在引发处理组中最小,表明缓解干旱胁迫对紫花苜蓿种子萌发及生长生理特性的影响效果从大到小依次是200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 引发、水引发、100和150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 引发、50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 引发。



* $P < 0.05$ ** $P \leq 0.01$

图 6 干旱胁迫条件下经纳米氧化铈引发处理的紫花苜蓿萌发种子各指标相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of various indicators of germinating seeds of alfalfa treated with CeO_2 nanopriming under drought stress
注: GP, 发芽势; GR, 发芽率; MGT, 平均发芽时间; GI, 发芽指数; RL, 根长; SL, 苗长; R/S-ratio, 根冠比; FW, 鲜重; α -AL, α -淀粉酶活性; β -AL, β -淀粉酶活性; SS, 可溶性糖含量; ReS, 还原糖含量; SOD, 超氧化物歧化酶活性; POD, 过氧化物歧化酶活性; O_2^- , 超氧自由基阴离子含量; H_2O_2 , 过氧化氢含量; MDA, 丙二醛含量; Pro, 脯氨酸含量; SP, 可溶性蛋白含量

Note: GP, germination potential; GR, germination rate; MGT, average germination time; GI, germination index; RL, root length; SL, seedling length; R/S-ratio, root-shoot ratio; FW, fresh weight; α -AL, α -amylase activity; β -AL, β -amylase activity; SS, soluble sugar content; ReS, reducing sugar content; SOD, superoxide dismutase activity; POD, superoxide dismutase activity; O_2^- , superoxide radical anion content; H_2O_2 , hydrogen peroxide content; MDA, MDA content; Pro, Proline content; SP, Soluble protein content

表 3 干旱胁迫条件下经纳米氧化铈引发处理的紫花苜蓿萌发种子各指标隶属函数分析

Table 3 Membership function analysis of each index of alfalfa germination seeds treated with CeO_2 nanopriming under drought stress

处理 Treatment	CK	DCK	D0	D50	D100	D150	D200
发芽势 Germination potential	1.00	0.00	0.54	0.04	0.24	0.61	0.54
发芽率 Germination rate	1.00	0.36	0.36	0.02	0.00	0.52	0.34
平均发芽时间 Mean germination time	1.00	0.00	0.59	0.61	0.63	0.74	0.82
发芽指数 Germination index	1.00	0.00	0.11	0.21	0.08	0.35	0.44
根长 Root length	0.86	0.60	0.25	0.28	0.53	0.00	1.00
苗长 Seedling length	0.95	0.56	0.26	0.24	0.47	0.00	1.00
根冠比 Root top ratio	1.00	0.32	0.96	0.46	0.00	0.90	0.24
鲜重 Fresh weight	1.00	0.03	0.00	0.10	0.15	0.24	0.20
α -淀粉酶活性 α -amylase activity	0.00	0.11	0.84	0.86	1.00	0.60	0.90
β -淀粉酶活性 β -amylase activity	0.00	0.06	0.98	0.59	0.91	1.00	0.36
可溶性糖含量 Soluble carbohydrate content	0.53	0.58	0.65	1.00	0.00	0.34	0.40
还原糖含量 Reducing sugar content	0.81	1.00	0.16	0.09	0.00	0.47	0.68
SOD 活性 SOD activity	0.00	0.68	0.91	0.62	0.69	0.44	1.00
POD 活性 POD activity	0.00	0.90	1.00	0.23	0.44	0.22	0.49
超氧阴离子含量 Superoxide anion content	0.00	0.30	0.27	1.00	0.56	0.58	0.51
过氧化氢含量 Hydrogen peroxide content	0.00	0.92	0.45	0.77	1.00	0.10	0.47
MDA 含量 MDA content	0.00	0.05	0.41	1.00	0.87	0.39	0.63
脯氨酸含量 Proline content	1.00	0.98	0.40	0.00	0.80	0.71	0.08
可溶性蛋白含量 Soluble protein the content	0.00	0.38	0.49	0.35	0.28	0.48	1.00
隶属函数平均值 Membership function average value	0.53	0.41	0.51	0.45	0.46	0.46	0.58
抗旱性排序 Drought resistance rank	2	6	3	5	4	4	1

3 讨论

3.1 PEG模拟干旱胁迫对紫花苜蓿种子萌发的影响特征

PEG-6000 通过高渗透压环境模拟干旱胁迫时,对种子萌发的影响普遍呈现“低促高抑”的浓度效应,数据显示,与对照相比,5%PEG处理的紫花苜蓿种子发芽率略有提高,10%PEG处理提高了种子的发芽势,15%PEG处理下,紫花苜蓿的发芽势、发芽率分别较对照下降,发芽指数下降,平均发芽时间延长。这与黄洁琼等^[3,25]研究结果一致,表明高浓度PEG可通过抑制种子吸水、延缓代谢启动,显著阻碍萌发进程。干旱胁迫延长平均发芽时间的现象,与白三叶(*Trifolium repens* L.)草在10%以上PEG处理中的表现相符^[26],反映出逆境下种子代谢启动的延迟效应。通过线性拟合筛选临界胁迫浓度时,与紫花苜蓿种子萌发相关的四项指标模拟得到的PEG鉴别浓度均值为13.36%,接近15%;同时考虑到20%PEG处理会严重抑制幼苗生长,不利于后续生理指标观测,最终确定15%PEG为适宜的干旱胁迫模拟浓度。

3.2 纳米氧化铈引发对干旱条件下紫花苜蓿萌发特性的缓解效应

纳米氧化铈引发对干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发的改善作用呈现浓度依赖性。其中150 mg·L⁻¹处理表现最优,将发芽率提升至77%,较未引发处理提高5%,同时显著缩短平均发芽时间、提高发芽指数,并使幼苗鲜重达到9.49 mg,为干旱对照组的1.58倍;200 mg·L⁻¹处理则在发芽指数提升和平均发芽时间缩短方面表现突出,但发芽率略低于150 mg·L⁻¹处理。这与Lizzi等^[27]发现纳米氧化铈促进植物种子萌发的浓度效应规律一致,即中等浓度处理通常能达到最佳萌发促进效果。推测其核心机制可能包括两方面:一是纳米颗粒通过改变种皮通透性^[6],增强种子在干旱胁迫下的吸水能力,为萌发启动提供基础水分条件;二是引发处理加速种子内部预萌发代谢,提前激活关键生理过程,从而缩短萌发滞后时间^[28]。值得注意的是,150 mg·L⁻¹处理虽显著提高幼苗鲜重,但对根长和苗长无明显促进作用,这与Tian等^[29]在玉米种子引发研究中观察到的“生物量分配优先于器官伸长”现象相似,可能反映了紫花苜蓿在干旱逆境下“先保生存、后求生长”的适应策略。

3.3 纳米氧化铈对紫花苜蓿种子萌发期碳水化合物代谢的调控作用

淀粉酶活性的提升是纳米氧化铈引发改善干旱胁迫下种子萌发的重要生理基础。干旱条件下,100 mg·L⁻¹处理使 α -淀粉酶活性达到最高,150 mg·L⁻¹处理则显著增强 β -淀粉酶活性,两类淀粉酶的协同激活加速了淀粉水解,为种子萌发提供必要的碳源和能量。这与曾伟航等^[30]发现的“引发处理通过提高淀粉酶活性缓解干旱对萌发的抑制”结论一致,表明碳水化合物代谢的激活是种子抗逆萌发的关键环节。本研究中淀粉酶活性与糖类物质含量呈现非同步变化:50 mg·L⁻¹处理的可溶性糖含量最高,100 mg·L⁻¹处理后可溶性糖含量下降,且所有引发处理均显著降低还原糖含量。这一特殊现象可能与紫花苜蓿种子的胚乳结构特性有关^[31],淀粉水解产生的可溶性糖优先用于幼苗呼吸供能,而非积累储存,导致可溶性糖含量未随酶活性同步升高;而还原糖含量的降低则可能反映了其向其他抗逆相关代谢产物的转化,体现了干旱胁迫下能量代谢的定向分配策略。

3.4 纳米氧化铈对紫花苜蓿种子萌发期氧化应激与膜稳定性的改善机制

纳米氧化铈凭借Ce³⁺与Ce⁴⁺的可逆转化特性,在调节植物抗氧化系统中发挥双重作用^[7],本研究结果充分印证了这一特性。在酶促抗氧化层面,200 mg·L⁻¹处理使SOD、POD活性分别达到44 611.15 U·g⁻¹·h⁻¹ FW和1200.36 U·g⁻¹·min⁻¹,显著高于其他处理;在非酶促清除层面,50 mg·L⁻¹处理将超氧阴离子含量降至68.92 μ g·g⁻¹ FW,100 mg·L⁻¹处理使过氧化氢含量低至0.13 μ mol·g⁻¹ FW,两类效应共同减少了活性氧(ROS)的积累。这与Gohari等^[11]在葡萄盐胁迫研究中发现的“纳米氧化铈通过增强抗氧化酶活性与直接清除ROS缓解逆境损伤”的机制一致。氧化应激的减轻直接改善了细胞膜稳定性:所有纳米氧化铈处理均显著降低丙二醛(MDA)含量,其中50 mg·L⁻¹处理的MDA含量仅为干旱对照组的0.48倍,表明膜脂过氧化程度得到有效抑制。

3.5 纳米氧化铈对紫花苜蓿种子萌发期渗透调节系统的优化效应

渗透调节物质的含量变化体现了紫花苜蓿种子

对于干旱胁迫的适应策略,而纳米氧化铈引发优化了这一调节过程。在脯氨酸代谢方面,除 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理保持较高脯氨酸含量以维持渗透势外,其余浓度处理均显著降低脯氨酸水平,这可能是因为纳米引发通过其他途径改善了细胞渗透压,减少了对脯氨酸的依赖,与 Li 等^[31]发现的“抗逆调节物质的替代性积累”现象相符。在可溶性蛋白积累方面, $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理使可溶性蛋白含量达到 $122.21 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW}$, 显著高于其他处理,且相关性分析显示 SOD 活性与可溶性蛋白含量呈显著正相关,表明可溶性蛋白不仅作为渗透调节物质,还可能参与抗氧化系统的协同防御,这些变化共同维持了细胞的水分平衡与结构稳定^[32]。

3.6 多指标协同作用的内在关联与浓度效应综合分析

相关性分析揭示了萌发指标、生理指标间的复杂协同关系:发芽势与发芽率、幼苗鲜重呈显著正相关,表明高萌发活力为幼苗生长提供了基础;发芽指数与幼苗鲜重呈极显著正相关,印证了萌发质量对后期生长的决定性作用;而 α -淀粉酶活性与 MDA 含量的极显著负相关,则体现了代谢活性与膜稳定性的相互支撑。这些关联表明,纳米氧化铈对于干旱胁迫的缓解是萌发特性、碳代谢、抗氧化系统、渗透调节等多维度协同作用的结果^[33-36]。通过模糊隶属函数法进行综合评价发现, $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理的隶属函数平均值最高(0.58), $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理与 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理并列第三(0.46)。水引发处理的抗旱性效果虽然优于一定浓度的纳米氧化铈引发处理,但水不具备纳米材料的特殊性质,且结合实际萌发效果来看, $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理在发芽率、幼苗鲜重等核心生产指标上表现最优,且在淀粉酶活性提升、ROS 清除、渗透调节优化等关键生理过程中均发挥有效作用,更符合农业生产中“萌发质量与抗逆性兼顾”的需求。因此,综合生理效应与实际应用价值, $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 是纳米氧化铈引发缓解紫花苜蓿干旱胁迫的最优浓度。

4 结论

PEG 模拟干旱胁迫对紫花苜蓿种子萌发的影响存在“低促高抑”的现象,本研究模拟干旱胁迫的 PEG-6000 鉴别浓度为 15%。在 15% PEG 模拟干旱胁迫条件下, $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米氧化铈引发能缩短

平均发芽时间,提高发芽指数,帮助清除干旱胁迫产生的 ROS,降低 MDA 含量,影响渗透调节物质含量,在一定程度上能缓解干旱对紫花苜蓿种子萌发抑制作用,从而提高紫花苜蓿种子萌发的抗旱性。

参考文献

- [1] HANSON B, PUTNAM D, SNYDER R. Deficit irrigation of alfalfa as a strategy for providing water for water-short areas[J]. *Agricultural water management*, 2007, 93(1-2): 73-80
- [2] 徐熙, 何兵, 谭春燕, 等. 干旱胁迫下贵州野生大豆种子萌发微结构观察[J]. *种子*, 2025, 44(1): 170-177
XU X, HE B, TAN C Y, et al. Observation on seed germination microstructure of wild *Glycine max* in Guizhou under drought stress[J]. *Seed*, 2025, 44(1): 170-177
- [3] 黄洁琼, 翟佳兴, 王颖, 等. 褪黑素对于干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(8): 2575-2583
HUANG J Q, ZHAI J X, WANG Y, et al. Effect of melatonin on seed germination and physiological characteristics of alfalfa seedlings under drought stress[J]. *Acta Agraria Sinica*, 2024, 32(8): 2575-2583
- [4] 高永生, 陈集双. 盐胁迫下镉对小麦幼苗叶片抗氧化系统活性的影响[J]. *中国稀土学报*, 2005, 23(4): 490-495
GAO Y S, CHEN J S. Effects of La^{3+} on antioxidant system in wheat seedling leaves under salt stress[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2005, 23(4): 490-495
- [5] 杨军, 刘向生, 王甲辰, 等. 我国稀土农用现状、发展趋势及对策[J]. *稀土信息*, 2009(4): 29-31
YANG J, LIU X S, WANG J C, et al. Present situation, development trend and countermeasures of rare earth agriculture in China[J]. *Rare Earth Information*, 2009(4): 29-31
- [6] GAO J Z, LIU Y Z, ZHAO D H, et al. CeO_2NP priming enhances the seed vigor of alfalfa (*Medicago sativa*) under salt stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1264698
- [7] DHALL A, SELF W. Cerium oxide nanoparticles: a brief review of their synthesis methods and biomedical applications [J]. *Antioxidants*, 2018, 7(8): 97
- [8] LEE J H J, KASOTE D M. Nano-priming for inducing salinity tolerance, disease resistance, yield attributes, and alleviating heavy metal toxicity in plants[J]. *Plants*, 2024, 13(3): 446
- [9] 孙运府. 纳米铁引发对柳枝稷种子萌发特性及抗旱性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021: 47-48
SUN Y F. Effects of nanoprimering with iron oxide (III) on seed germination and drought resistance of switchgrass (*Panicum virgatum*) [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021: 47-48
- [10] SHELAR A, SINGH A V, MAHARJAN R S, et al. Sustainable agriculture through multidisciplinary seed nanoprimering: prospects of opportunities and challenges[J]. *Cells*, 2021, 10(9): 2428
- [11] GOHARI G, ZAREEI E, ROSTAMI H, et al. Protective effects of cerium oxide nanoparticles in grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. flame seedless under salt stress conditions[J]. *Eco-toxicology and Environmental Safety*, 2021, 220: 112402
- [12] KHAN M N, LI Y H, KHAN Z, et al. Nanoceria seed priming enhanced salt tolerance in rapeseed through modulating ROS homeostasis and α -amylase activities[J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2021, 19(1): 276

- [13] 赵海明,游永亮,李源,等. 紫花苜蓿资源抗旱性鉴定评价方法研究[J]. 草地学报,2017,25(6):1308-1316
ZHAO H M, YOU Y L, LI Y, et al. Study on evaluation method of drought resistance of alfalfa resources [J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(6):1308-1316
- [14] ERICE G, LOUAHLIA S, IRIGOYEN J J, et al. Biomass partitioning, morphology and water status of four alfalfa genotypes submitted to progressive drought and subsequent recovery[J]. Journal of Plant Physiology, 2010, 167(2):114-120
- [15] 李丹丹. 干旱胁迫对紫花苜蓿生理生化和黄酮类化合物含量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020:49-50
LI D D. Effects of drought stress on physiology and biochemistry and content of *Medicago sativa* [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020:49-50
- [16] HOSSEINI BOLDAJI S A, KHAVARI-NEJAD R A, HASSAN SAJEDI R, et al. Water availability effects on antioxidant enzyme activities, lipid peroxidation, and reducing sugar contents of alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2012, 34(3):1177-1186
- [17] 才华,李淳馨,丛春龙,等. MsRCI2A/B/C 基因超量表达对紫花苜蓿耐旱性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(2):57-66,74
CAI H, LI C X, CONG C L, et al. Effect of overexpression of MsRCI2A/B/C genes on drought tolerance of alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2022, 50(2):57-66,74
- [18] ARSHAD M, FEYISSA B A, AMYOT L, et al. microRNA156 improves drought stress tolerance in alfalfa (*Medicago sativa*) by silencing *SPL13* [J]. Plant Science, 2017, 258:122-136
- [19] 宋克晓. 绿色合成纳米银引发对紫花苜蓿种子萌发及幼苗生理特性影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2022:25-26
SONG K X. Nanoprimering with green synthesis of silver effects on the germination and physiological characteristics of alfalfa (*Medicago sativa* L.) [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022:25-26
- [20] 高金柱. 稀土纳米引发对紫花苜蓿盐胁迫下种子萌发及幼苗生长的影响机制[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2023:23-24
GAO J Z. The effect mechanism of rare earth nanoprimering on seed germination and seedling growth of alfalfa under salt stress [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023:23-24
- [21] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006:144-148
GAO J F. Experimental guidance for plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:144-148
- [22] ZHANG P, HU Y, ZHOU R J, et al. The antioxidant system response to drought-stressed *Diospyros lotus* treated with exogenous melatonin[J]. PeerJ, 2022, 10:e13936
- [23] 陈洁. 外源褪黑素对干旱胁迫下紫花苜蓿生长和生理性状的影响[D]. 南京:南京农业大学,2019:10-11
CHEN J. Effects of exogenous melatonin on growth and physiological characteristics of alfalfa under drought stress[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019:10-11
- [24] 李灿东. 大豆种质资源耐密性评价及鉴定指标筛选[J]. 大豆科学,2020,39(5):688-695
LI C D. Evaluation of density-tolerance in soybean germplasm resources and screening of its identification indexes [J]. Soybean Science, 2020, 39(5):688-695
- [25] 王江银,徐婉宁,苏洋,等. PEG-6000 模拟干旱胁迫下 5 份苜蓿材料萌发期抗旱性鉴定与比较[J]. 畜牧与饲料科学,2023,44(2):81-91
WANG J Y, XU W N, SU Y, et al. Characterization and comparison of drought resistance of five alfalfa varieties during germination period under PEG-6000 simulated drought stress [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2023, 44(2):81-91
- [26] 刘伟,常征,黄勇. 不同胁迫条件下白花三叶草种子的萌发特性[J]. 文山学院学报,2019,32(6):14-18
LIU W, CHANG Z, HUANG Y. Germination characteristics of *Trifolium repens* seeds under different stresses [J]. Journal of Wenshan University, 2019, 32(6):14-18
- [27] LIZZI D, MATTIELLO A, PIANI B, et al. Germination and early development of three spontaneous plant species exposed to nanoceria (nCeO₂) with different concentrations and particle sizes [J]. Nanomaterials, 2020, 10(12):2534
- [28] FAROOQ M, AZIZ T, UR REHMAN H, et al. Evaluating surface drying and re-drying for wheat seed priming with polyamines: effects on emergence, early seedling growth and starch metabolism [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2011, 33(5):1707-1713
- [29] TIAN Y, GUAN B, ZHOU D W, et al. Responses of seed germination, seedling growth, and seed yield traits to seed pretreatment in maize (*Zea mays* L.) [J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014(1):834630
- [30] 曾伟航,程碧真,彭燕,等. 甘露糖浸种对干旱胁迫下白三叶种子萌发及抗旱性的影响[J]. 草业学报,2019,28(7):112-122
ZENG W H, CHENG B Z, PENG Y, et al. Effects on germination and seedling drought tolerance in white clover of seed soaking with mannose [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(7):112-122
- [31] LI C-N, SRIVASTAVA M K, NONG Q, et al. Mechanism of tolerance to drought in sugarcane plant enhanced by foliage dressing of abscisic acid under water stress: mechanism of tolerance to drought in sugarcane plant enhanced by foliage dressing of abscisic acid under water stress [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(5):863-870
- [32] 钟婷玮. 干旱胁迫下碳纳米材料对小麦幼苗生长的影响[D]. 秦皇岛:河北科技师范学院,2023:45-46
ZHONG T W. Effects of carbon nanomaterials on growth of wheat seedlings under drought stress [D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology, 2023:45-46
- [33] SI A J, SUN Z W, LI Z K, et al. A genome wide association study revealed key single nucleotide polymorphisms/genes associated with seed germination in *Gossypium hirsutum* L [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:844946
- [34] BAFOIL M, LE RU A, MERBAHI N, et al. New insights of low-temperature plasma effects on germination of three genotypes of *Arabidopsis thaliana* seeds under osmotic and saline stresses [J]. Scientific Reports, 2019, 9:8649
- [35] GU Z C, HU C J, GAN Y X, et al. Role of microbes in alleviating crop drought stress: a review [J]. Plants, 2024, 13(3):384
- [36] DELLA NOCE B, MARTINS DA SILVA R, DE CARVALHO UHL M V, et al. Redox imbalance induces remodeling of glucose metabolism in *Rhipicephalus microplus* embryonic cell line [J]. The Journal of Biological Chemistry, 2022, 298(3):101599