

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.012

引用格式:李小娥. Pb胁迫对紫花苜蓿种子萌发生理及幼苗抗氧化系统和Pb积累的影响[J]. 草地学报, 2026, 34(5):1691—1700

LI Xiao-e. The Effects of Pb Stress on the Germination Physiology of Alfalfa Seeds, Antioxidant System of Seedlings, and Pb Enrichment Effect[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1691—1700

Pb胁迫对紫花苜蓿种子萌发生理及幼苗抗氧化系统和Pb积累的影响

李小娥

(白银市林业和草原局, 甘肃 白银 730900)

摘要:为探讨Pb胁迫对紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)种子萌发生理及幼苗抗氧化系统和Pb富集效应的影响,设置6个Pb胁迫浓度测定种子萌发生理,设置3个Pb胁迫浓度测定幼苗抗氧化系统活性及Pb含量。结果表明:(1)Pb胁迫抑制了种子的吸胀和萌发,淀粉酶和蛋白水解酶活性下降,可溶性糖、还原性糖、游离脯氨酸和游离氨基酸含量降低。(2)种子萌发期耐Pb适宜浓度为 $\leq 1.84 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,半致死浓度和极限浓度为 $3.93 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $7.29 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。(3) $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫下,幼苗叶片中抗氧化系统活性先升高后下降, $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb胁迫导致抗氧化系统崩溃,氧化损伤加剧。(4)Pb胁迫下,幼苗体内Pb含量显著增加,且根系>茎秆>叶片,仅有少量Pb从地部下向地上部转运。Pb胁迫抑制了种子萌发,幼苗氧化损伤加剧,抗氧化系统崩溃,Pb在幼苗根系中大量富集。研究为利用紫花苜蓿修复Pb污染土壤提供了理论依据。

关键词:紫花苜蓿;Pb胁迫;萌发生理;抗氧化系统;富集效应

中图分类号:X503.23

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1691-10

The Effects of Pb Stress on the Germination Physiology of Alfalfa Seeds, Antioxidant System of Seedlings, and Pb Enrichment Effect

LI Xiao-e

(Baiyin Forestry and Grassland Bureau, Baiyin, Gansu Province 730900, China)

Abstract: This study investigated the effects of Pb stress on the physiology of seed germination and the antioxidant system and Pb accumulation in seedlings of alfalfa (*Medicago sativa*). Six Pb stress concentrations were set to evaluate seed germination physiology, and three Pb stress concentrations were established to assess the activity of the antioxidant system and Pb content in seedlings. The results showed that: (1) Pb stress inhibited seed imbibition and germination, reduced the activities of amylase and protease, and decreased the levels of soluble sugars, reducing sugars, free proline, and free amino acids. (2) The suitable concentration for Pb during seed germination of alfalfa was $\leq 1.84 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, with a half lethal concentration and a limit concentration of $3.93 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ and $7.29 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. (3) Under $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb stress, the antioxidant system activity in seedling leaves initially increased and then decreased. At $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb stress, the antioxidant system collapsed, and oxidative damage intensified. (4) Under Pb stress, Pb content in seedlings significantly increased, with the highest levels in roots, followed by stems and leaves. Only a small amount of Pb translocated from underground to aboveground parts. This indicates that Pb stress inhibited seed germination, exacerbated oxidative damage in seedlings, led to the collapse of the antioxidant system, and caused substantial Pb accumulation in seedling roots. The study provides a theoretical basis for using alfalfa to remediate Pb-contaminated soils.

收稿日期:2025-07-31;修回日期:2025-09-30

基金项目:紫花苜蓿栽培技术推广示范资助

作者简介:李小娥(1973-),女,汉族,甘肃会宁人,本科,高级工程师,主要从事草业研究与管理,E-mail: 1597770937@qq.com

Key words: Alfalfa; Pb Stress; Germination physiology; Antioxidant system; Enrichment effect

随着工业化和城市化的快速发展,重金属污染问题已成为全球性环境问题^[1]。重金属铅(Pb)因其高毒性、难降解性和生物累积性,对人类健康和生态系统构成严重威胁^[2-3]。Pb可通过采矿、冶炼、电子废弃物、含铅汽油及农药不合理使用等多种途径进入生态环境,导致Pb污染日益加剧^[4]。据统计,我国重金属污染的耕地面积超过 2×10^7 hm²,其中Pb超标率高达7.0%,部分地区甚至超过30%,平均占比高达20%,严重影响农业可持续发展^[5-6]。Pb在土壤中稳定性强,长期滞留不仅破坏土壤微生物群落结构,还会通过植物吸收进入食物链,最终危害人体健康^[7-8]。因此,研究Pb胁迫对植物的影响及其耐受机制,对土壤修复和农业安全生产具有重要意义。

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)作为重要的豆科牧草,具有固氮效率高、适应性强、生物量大、营养价值高等特点,在饲料生产、土壤改良和生态修复中广泛应用^[9-10]。研究表明,紫花苜蓿对Pb、Cd、Zn等重金属具有一定的耐受性和富集能力,在重金属污染修复中的潜力巨大^[11-12]。目前,关于Pb胁迫对紫花苜蓿种子萌发、幼苗生长及生理代谢影响的研究,多集中于短期胁迫效应或单一生理指标分析^[13],但其影响机制尚未完全阐明,且缺乏系统性分析,尤其是紫花苜蓿幼苗抗氧化系统的响应机制仍缺乏深入研究,Pb在其体内的富集规律及其在Pb污染土壤中的修复潜力还需进一步深入探讨。

本研究采用紫花苜蓿种子萌发试验和幼苗盆栽生长试验,通过室内模拟Pb胁迫,探讨不同浓度Pb处理对紫花苜蓿种子萌发过程中淀粉转化、蛋白转化的影响,分析紫花苜蓿幼苗抗氧化酶活性及活性氧含量的变化规律,并测定Pb在紫花苜蓿幼苗根、茎、叶中的富集特征和转移特征,旨在揭示紫花苜蓿幼苗对Pb胁迫的生理适应机制,为紫花苜蓿在Pb污染土壤中的修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为‘甘农3号’紫花苜蓿(*Medicago sativa* L. ‘Gannong No. 3’)。Pb胁迫试剂为Pb(NO₃)₂,分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 试验设计

种子萌发试验:设置6个Pb胁迫浓度,分别为CK(对照,蒸馏水)、T_{0.5}处理(0.5 mmol·L⁻¹)、T_{1.0}处理(1.0 mmol·L⁻¹)、T_{2.0}处理(2.0 mmol·L⁻¹)、T_{4.0}处理(4.0 mmol·L⁻¹)、T_{8.0}处理(8.0 mmol·L⁻¹),每个处理6次重复。试验选取成熟度相同、大小一致、饱满均匀且无病虫害的种子,经0.1% HgCl₂消毒5 min后,置于铺有滤纸的培养皿(直径9 cm)中,每皿100粒种子,每皿加10 mL相对应浓度的Pb(NO₃)₂溶液,然后将培养皿转移到种子发芽箱中进行培养。试验期间,为保证培养皿中Pb胁迫浓度稳定,每隔24 h更换一次对应浓度的Pb(NO₃)₂溶液。发芽期间,每12 h观察并记录一次发芽种子数,以胚根突破种皮作为发芽标准,连续3次无种子发芽则视为发芽结束。于种子萌发第6, 12, 24 h,取样测定种子含水量和吸水速率;于种子萌发第4 d,取样测定种子中淀粉转化和蛋白转化相关指标;种子萌发第10 d,统计种子的发芽势、发芽率,测定胚芽长、胚根长和生物量,并计算种子耐Pb适宜浓度范围、半致死浓度和极限浓度。

幼苗生长试验:设置3个处理,分别为CK(对照,蒸馏水)、T_{2.0}处理(2.0 mmol·L⁻¹)、T_{4.0}处理(4.0 mmol·L⁻¹),每个处理6次重复。将消毒后的种子播种在装有蛭石的培养钵(钵体深度15 cm,上口口径20 cm,下口径15 cm)中,种子出苗后,每个培养钵中定植15株,然后转移至光照培养室培养,待苜蓿幼苗高度达10 cm左右,正式开始试验。试验期间,每个培养钵中每隔2 d浇灌1次相应浓度的Pb(NO₃)₂溶液,连续培养45 d。于幼苗生长的第0, 2, 4, 6, 8, 10 d,取样测定幼苗叶片中抗氧化系统相关指标;于幼苗生长的第0, 5, 10, 15, 30, 45 d,取样测定幼苗整株及根、茎、叶中Pb含量,并计算Pb在幼苗体内的转移系数。

1.3 测定方法

种子含水量和吸水速率按照尹美强等^[14]方法测定;发芽势、发芽率分别以4 d, 10 d内正常发芽种子数计算;胚芽长、胚根长用游标卡尺测量并保留1位小数;生物量测定方法为95℃杀青10 min, 65℃烘干至恒重并称重;耐Pb适宜浓度范围为相对发芽率达到75%以上时相对应的Pb(NO₃)₂溶液浓度范围,半致死浓度、极限浓度分别为相对发芽率为

50%, 10% 时相对应的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液浓度。

α -淀粉酶、 β -淀粉酶和总淀粉酶活性采用 DNS (3,5-二硝基水杨酸) 比色法测定^[15]; 淀粉含量采用 蒽酮显色法测定^[15]; 可溶性糖含量采用 蒽酮显色法测定^[15]; 还原性糖含量采用 DNS (3,5-二硝基水杨酸) 比色法测定^[15]; 蛋白水解酶活性参照 张志刚等^[16]方法测定; 可溶性蛋白含量采用 G-250 (考马斯亮蓝) 显色法^[17]测定; 游离脯氨酸和游离氨基酸含量采用 酸性茚三酮显色法^[15]测定; 抗氧化酶 SOD、APX、GPX 和 CAT 活性参考 周一凡等^[18]方法测定; $\text{O}_2^{\cdot-}$ 、 $\text{OH}^{\cdot}$ 、 H_2O_2 和 MDA 含量参考 任建军等^[19]方法测定。

Pb 含量的测定: 将苜蓿植株依次用自来水、 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$ 、去离子水冲洗干净, 吸干表面水分, 将根、茎、叶分开, 105°C 杀青 15 min, 65°C 烘干至恒重, 用研钵磨细并过 0.25 mm 圆孔筛, 用 HNO_3 — HClO_4 消解后, 用 TAS-990 Super 原子吸收分光光度计测定 Pb 含量。

转运系数的计算: $\text{TF} = C_X / C_Y$, 式中: C_X 为 X 器

官中 Pb 含量, C_Y 为 Y 器官中 Pb 含量。

1.4 统计方法

采用 Microsoft Excel 2013 进行数据分析和图表绘制, 采用 SPSS 19.0 统计分析软件进行显著性分析, 其中百分数(%)数据作反正弦转换之后进行显著性分析, 试验结果以“平均数±标准差”表示, $P < 0.05$ 表示 5% 水平差异显著。

2 结果与分析

2.1 Pb胁迫对紫花苜蓿种子吸胀和萌发的影响

由图 1 可知, 随着 Pb 胁迫浓度的增大, 浸种 6 h, 12 h, 24 h 时紫花苜蓿种子含水量均呈下降趋势; 同时, 浸种 6 h 时紫花苜蓿种子的吸水速率也随着 Pb 胁迫浓度的增大而降低, 而浸种 24 h 时紫花苜蓿种子的吸水速率随着 Pb 胁迫浓度的增大而升高。Pb 胁迫对紫花苜蓿种子的吸胀有明显的抑制作用, 主要表现为对种子吸水速率的抑制, 进而降低种子含水量, 导致紫花苜蓿种子萌发前期水分亏缺。

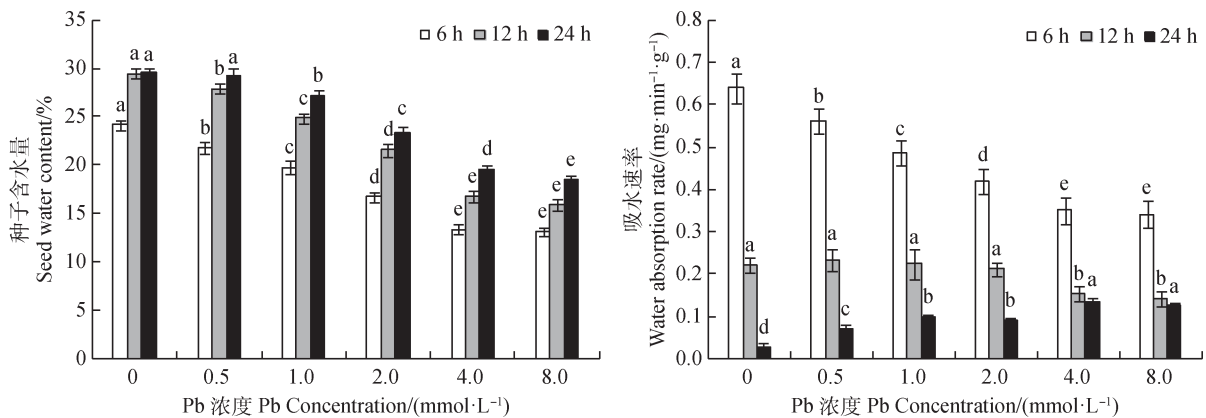


图 1 不同 Pb 胁迫下紫花苜蓿种子萌发期的含水量和吸水速率

Fig. 1 Water content and water absorption rate of alfalfa seeds during germination under different Pb stress levels

注: 图中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同

Note: Different letters in the figure indicate significant differences at the 5% level, the same as below

由图 2 可知, 随着 Pb 胁迫浓度的增大, 紫花苜蓿种子的发芽势、发芽率、胚芽长、胚根长和生物量均呈下降趋势, 说明 Pb 胁迫对紫花苜蓿种子的萌发有明显的抑制作用, 且存在显著的浓度效应。以 Pb 胁迫浓度为 x 轴, Pb 胁迫下紫花苜蓿种子的相对发芽率为 y 轴, 作散点图并得出二者之间的回归方程为 $y = -11.929x + 96.938$ ($R^2 = 0.9697$), 根据方程求得, 紫花苜蓿种子萌发期耐 Pb 适宜浓度范围为 $\leq 1.84 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 耐 Pb 半致死浓度为 $3.93 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 耐 Pb 极限浓度为 $7.29 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.2 Pb胁迫对紫花苜蓿种子萌发过程中淀粉转化的影响

由图 3 可知, 随着 Pb 胁迫浓度的增大, 紫花苜蓿种子萌发过程中的 α -淀粉酶、 β -淀粉酶和总淀粉酶活性均呈下降趋势, 抑制了淀粉的降解, 导致淀粉含量随着 Pb 胁迫浓度的增大而升高, 同时也抑制了可溶性糖和还原性糖的积累, 使得可溶性糖和还原性糖含量随着 Pb 胁迫浓度的增大而降低。

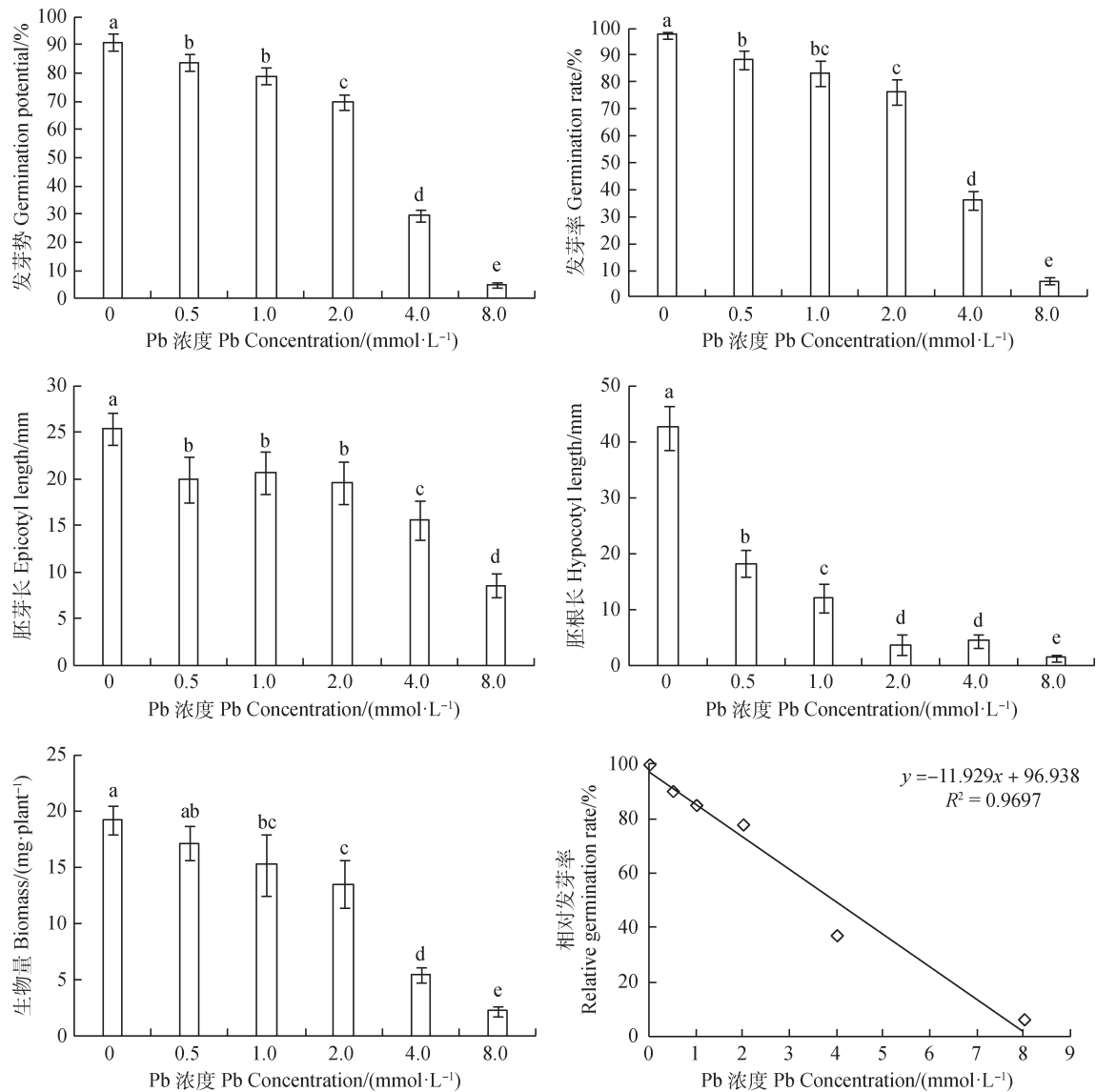


图 2 不同 Pb 胁迫下紫花苜蓿种子的萌发指标

Fig. 2 Germination indices of alfalfa seeds under different Pb stress levels

2.3 Pb胁迫对紫花苜蓿种子萌发过程中蛋白转化的影响

由图 4 可知,随着 Pb 胁迫浓度的增大,紫花苜蓿种子萌发过程中的蛋白水解酶活性呈下降趋势,抑制了可溶性蛋白的水解,导致可溶性蛋白含量随着 Pb 胁迫浓度的增大而升高,同时也抑制了游离脯氨酸和游离氨基酸的积累,使得游离脯氨酸和游离氨基酸含量随着 Pb 胁迫浓度的增大而降低。

2.4 Pb胁迫对紫花苜蓿幼苗叶片抗氧化系统的影响

由图 5 可知,和 CK 相比较,随着 Pb 胁迫时间的增加, T_{2.0} 处理的紫花苜蓿幼苗叶片中 SOD, APX

和 GPX 活性呈先升高后下降的趋势, T_{2.0} 处理的紫花苜蓿幼苗叶片中 CAT 活性及 T_{4.0} 处理的紫花苜蓿幼苗叶片中 SOD, APX, GPX, CAT 活性均呈下降的趋势;同时, T_{2.0} 和 T_{4.0} 处理的紫花苜蓿幼苗叶片中 O₂⁻, OH⁻, H₂O₂, MDA 含量均呈上升的趋势。

2.5 Pb胁迫对紫花苜蓿幼苗体内 Pb 含量及转运的影响

由图 6 可知,和 CK 相比较,随着 Pb 胁迫时间的增加, T_{2.0} 和 T_{4.0} 处理的紫花苜蓿幼苗体内(根、茎、叶及整株) Pb 含量均呈增加的趋势,且根系中的 Pb 含量显著高于茎秆中,茎秆中的 Pb 含量显著高于叶片中。

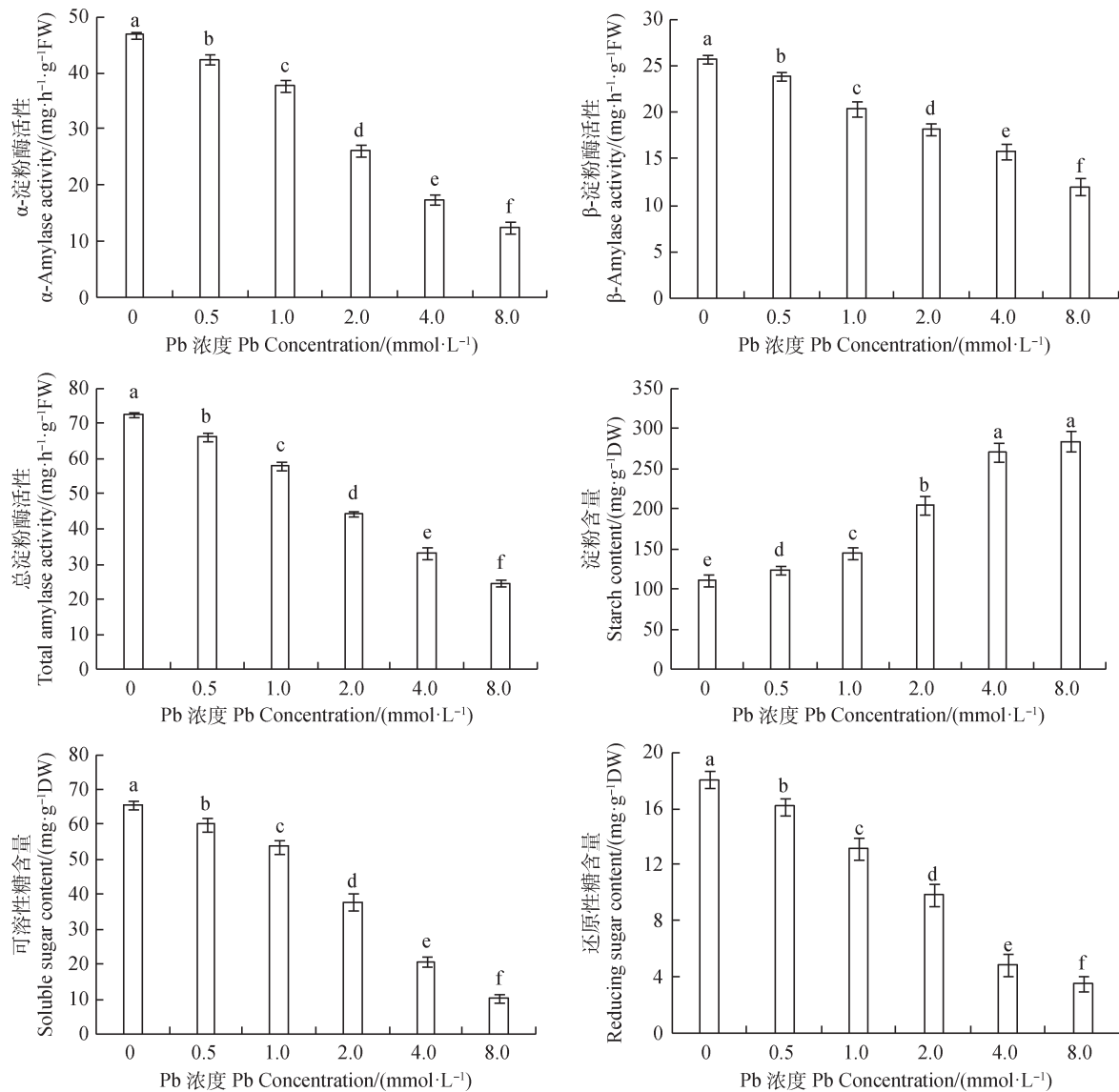


图3 Pb胁迫对紫花苜蓿种子萌发过程中淀粉转化的影响

Fig. 3 Effect of Pb stress on starch conversion during the germination process of alfalfa seeds

由图7可知,和CK相比较,随着Pb胁迫时间的增加, $T_{2.0}$ 和 $T_{4.0}$ 处理的紫花苜蓿幼苗体内Pb由根系向茎秆、由茎秆向叶片的转运系数均呈先升高后降低的趋势,且由根系向茎秆的转运系数显著低于由茎秆向叶片的转运系数, $T_{4.0}$ 处理的紫花苜蓿幼苗体内Pb由根系向茎秆、由茎秆向叶片的转运系数均显著低于 $T_{2.0}$ 处理。

3 讨论

种子萌发是植物生命周期的关键阶段,也是对外界环境最敏感的阶段之一。水分亏缺是影响种子萌发的最主要外部因素,重金属胁迫会直接影响种子的吸胀、酶活性及激素平衡,进而抑制胚根伸长和幼苗生长^[20]。研究表明,Pb胁迫能够抑制紫花

苜蓿种子吸水,干扰淀粉酶、蛋白水解酶活性,从而延缓或阻碍胚根伸长^[21],Pb胁迫也能导致种子的线粒体功能破坏,膜脂质过氧化加剧,萌发率显著降低^[22]。本研究结果表明,Pb胁迫显著降低紫花苜蓿种子的吸水速率和含水量,抑制种子吸胀,导致紫花苜蓿种子萌发前期水分亏缺,进而抑制紫花苜蓿种子的萌发,回归分析得出紫花苜蓿种子萌发期耐Pb适宜浓度为 $\leq 1.84 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,半致死浓度和极限浓度分别为 $3.93 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $7.29 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,说明Pb胁迫存在显著的浓度效应,这与符卓旺等^[21]和魏学玲等^[22]的研究结果一致。

重金属胁迫会诱导植物体内产生大量的活性氧(ROS),ROS过量积累导致氧化损伤^[23]。植物体产生氧化胁迫后,抗氧化防御系统会被激活,抗氧

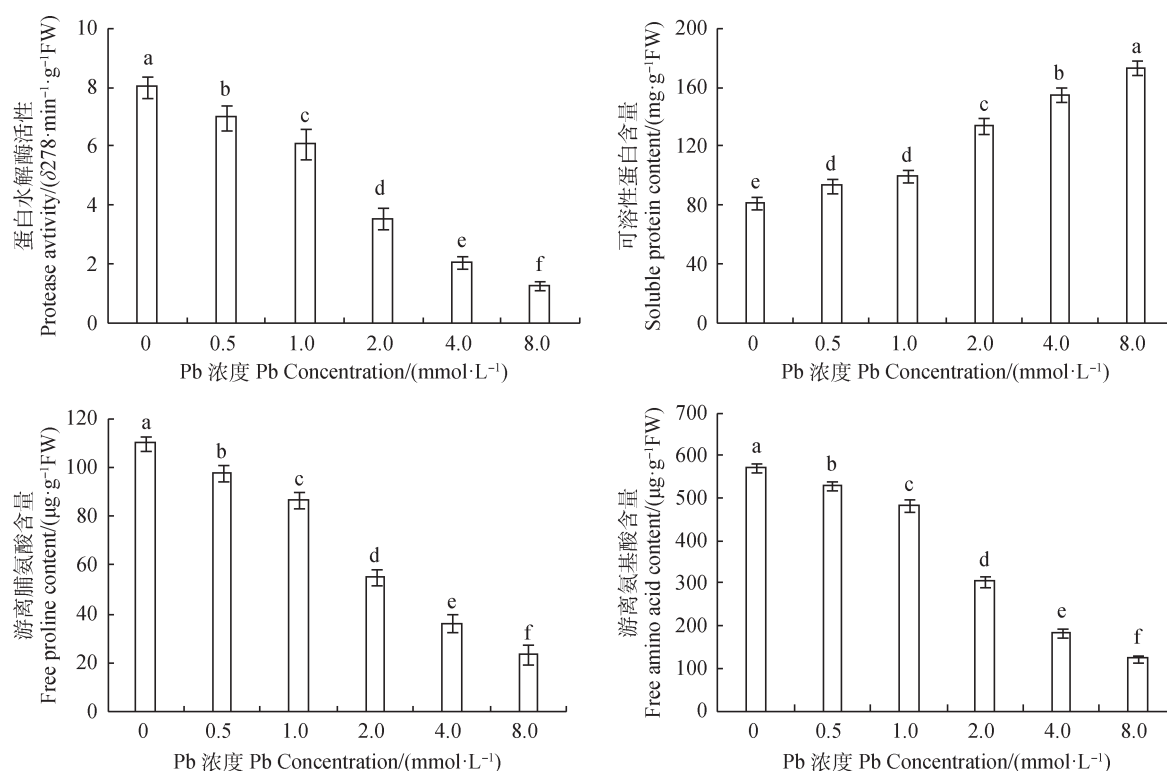


图4 Pb胁迫对紫花苜蓿种子萌发过程中蛋白转化的影响

Fig. 4 Effect of Pb stress on protein transformation during the germination process of alfalfa seeds

化酶活性显著提高^[24-25]。随着重金属胁迫浓度的增加,抗氧化酶活性呈现逐渐上升的趋势,当胁迫浓度过高时,保护酶系统受到破坏,酶活性下降^[26-27]。本研究结果表明,随着时间的增加,2.0 mmol·L⁻¹和4.0 mmol·L⁻¹ Pb胁迫下, O₂^{·-}, OH[·], H₂O₂, MDA含量均呈上升的趋势,说明Pb胁迫对紫花苜蓿幼苗造成了氧化胁迫,同时2.0 mmol·L⁻¹ Pb胁迫下, SOD, APX和GPX活性呈先升高后下降的趋势, CAT活性呈下降的趋势,而4.0 mmol·L⁻¹ Pb胁迫下, SOD, APX, GPX, CAT活性均呈下降的趋势,这和周美利等^[28]的研究结果一致,说明2.0 mmol·L⁻¹ Pb胁迫能够刺激抗氧化酶活性增强,而4.0 mmol·L⁻¹ Pb胁迫则导致抗氧化系统崩溃,加剧紫花苜蓿幼苗的氧化损伤。重金属胁迫下,抗氧化酶系统缓解氧化损伤是一个复杂的生理过程,受植物种类、生长阶段、重金属类型和浓度等多方面因素影响,因此不同Pb浓度下紫花苜蓿抗氧化系统的动态变化规律及其与Pb耐受性的关系仍需作进一步深入研究。

植物对Pb的吸收和转运能力因植物种类和器官而异。研究表明,大多数重金属在植物体内的分

布呈现根>茎>叶的规律^[29]。本研究结果表明,2.0 mmol·L⁻¹和4.0 mmol·L⁻¹ Pb胁迫下,紫花苜蓿幼苗体内(根、茎、叶及整株)Pb含量均呈增加的趋势,且根系>茎秆>叶片,说明Pb主要积累在紫花苜蓿幼苗的根部。此外,4.0 mmol·L⁻¹ Pb胁迫下,紫花苜蓿幼苗体内Pb由根系向茎秆、由茎秆向叶片的转运系数均显著低于2.0 mmol·L⁻¹ Pb胁迫,说明随着Pb浓度的增加,紫花苜蓿幼苗体内Pb从地下部向地上部的转运也受到抑制,这可能与细胞壁固定、液泡区隔化及螯合蛋白的结合作用有关。也有研究发现,在特定条件下紫花苜蓿可促进Pb向茎叶转运,表明紫花苜蓿可能具备一定的Pb富集潜力^[30]。因此,研究Pb在紫花苜蓿不同器官的分布特征及其可能的解毒机制,对利用紫花苜蓿进行Pb污染土壤修复能够提供新的视角。然而,与超富集植物相比,紫花苜蓿的Pb积累量仍然较低,这和王新等^[11]研究结果相符,说明在实际应用中利用紫花苜蓿修复Pb污染土壤可能还需要结合其他修复技术。

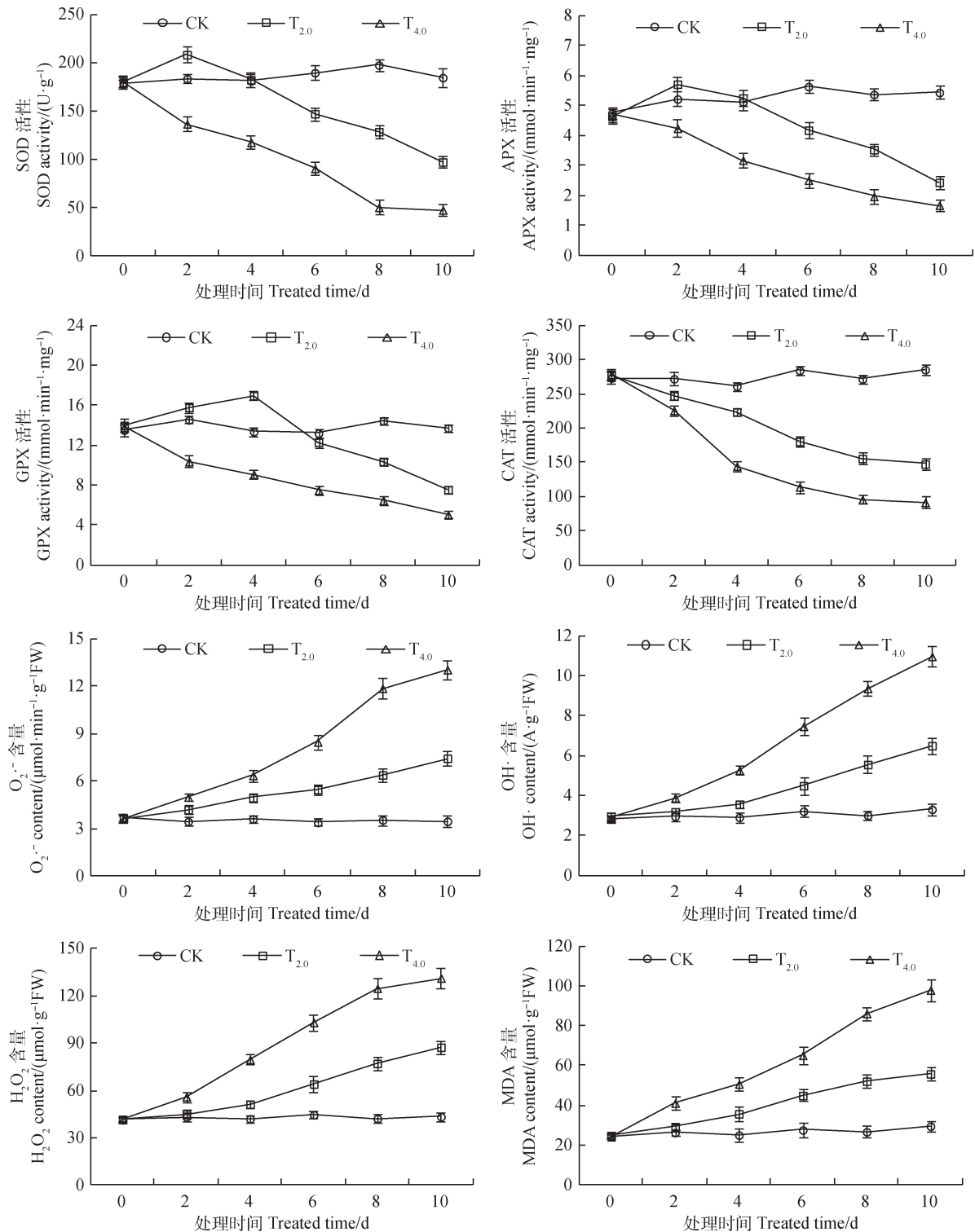


图5 Pb胁迫对紫花苜蓿幼苗叶片抗氧化系统的影响

Fig. 5 Effect of Pb stress on the antioxidant system of alfalfa seedling leaves

4 结论

Pb胁迫显著抑制了紫花苜蓿种子的吸水速率和吸胀作用,同时淀粉降解和蛋白水解受阻,种子萌发受到抑制;紫花苜蓿种子萌发期耐Pb适宜浓度

为 $\leq 1.84 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,半致死浓度和极限浓度分别为 $3.93 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $7.29 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$;Pb胁迫导致紫花苜蓿幼苗的抗氧化系统崩溃,氧化损伤加剧,Pb在紫花苜蓿幼苗根系中大量富集,仅有少量Pb从地下部向地上部转运。

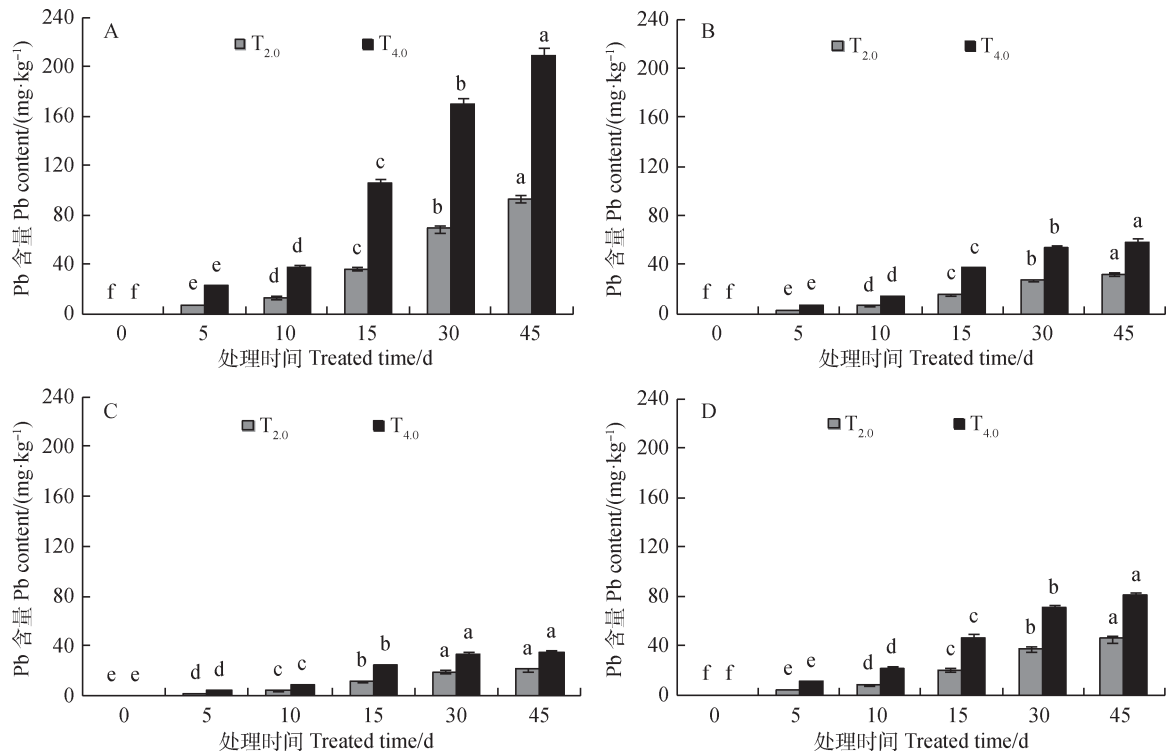


图6 Pb胁迫对紫花苜蓿幼苗体内(A:根,B:茎,C:叶,D:整株)Pb含量的影响

Fig. 6 Effect of Pb stress on Pb content in alfalfa seedlings (A: root, B: stem, C: leaf, D: whole plant)

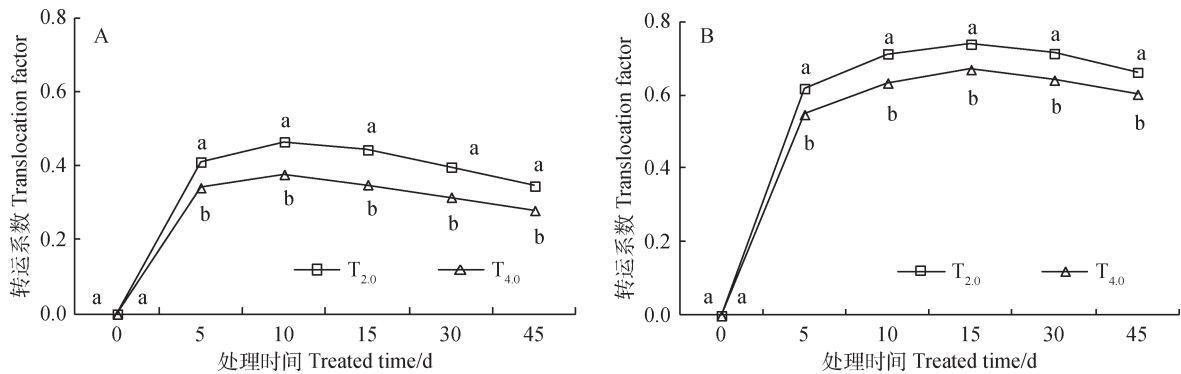


图7 Pb胁迫对紫花苜蓿幼苗体内(A:根→茎,B:茎→叶)Pb转运的影响

Fig. 7 Effect of Pb stress on Pb transport in *Medicago sativa* seedlings (A: root→stem, B: stem→leaf)

参考文献

- [1] 苑新悦, 刘宇恒, 于保刚, 等. Pb、Cd胁迫下CaCl₂与24-EBL对菊苣幼苗的缓解效应[J]. 草地学报, 2025, 33(11): 3827-3836
YUAN X Y, LIU Y H, YU B G, et al. The alleviating effects of CaCl₂ and 24-EBL on chicory seedlings under Pb and Cd stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(11): 3827-3836
- [2] 周迪, 王梅, 高学振, 等. 铅污染农田土壤修复后的环境容量及风险演变[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(11): 2583-2594
ZHOU D, WANG M, GAO X Z, et al. Soil environmental capacity and risk evolution of a typical Pb-contaminated farmland after remediation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(11): 2583-2594

- [3] МИНЕЕВ В, АЛЕКСЕЕВ А, 陆宝树. 农业化学条件下重金属铅与环境污染[J]. 土壤学进展, 1984, 12(6): 37-43
МИНЕЕВ В, АЛЕКСЕЕВ А, LU B S. Heavy metal lead and environmental pollution under the condition of agricultural chemistry[J]. Advances in Soil Science, 1984, 12(6): 37-43
- [4] ZHANG B C, JIA T Z, PENG S Z, et al. Spatial distribution, source identification, and risk assessment of heavy metals in the cultivated soil of the Qinghai-Tibet Plateau region: case study on Huzhu County[J]. Global Ecology and Conservation, 2022, 35: e02073
- [5] 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm
Report on the national general survey of soil contamination [EB/OL]. (2014-04-17). http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm

- [6] ZHAO F J, MA Y B, ZHU Y G, et al. Soil contamination in China: current status and mitigation strategies[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(2): 750-759
- [7] 刘娟, 李洋, 张敏, 等. 滇东农田土壤铅污染健康风险评价及基准研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 241-250
- LIU J, LI Y, ZHANG M, et al. Health risk assessment and benchmark of lead pollution in agricultural soils in East Yunnan, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 241-250
- [8] 陈婷, 龙胜楼, 孙媛媛, 等. 镉/铅低积累水稻品种筛选及其人体健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(5): 1178-1189
- CHEN T, LONG S L, SUN Y Y, et al. Screening and human health risk assessment of rice varieties with cadmium/lead low accumulation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2025, 44(5): 1178-1189
- [9] 宋曦, 王金成, 井明博, 等. 紫花苜蓿对陇东黄土高原油污土壤场地生态修复的综合响应[J]. 草业科学, 2019, 36(7): 1754-1764
- SONG X, WANG J C, JING M B, et al. Comprehensive response of *Medicago sativa* when used to ecologically remediate a site in the eastern region of the Loess Plateau contaminated with different concentrations of oil[J]. Pratacultural Science, 2019, 36(7): 1754-1764
- [10] 珊丹, 郭建英, 荣浩, 等. 基于隶属函数法的草原区金属矿山废弃地生态修复植物筛选[J]. 生态科学, 2024, 43(6): 158-168
- SHAN D, GUO J Y, RONG H, et al. Plant screening of ecological restoration in steppe metal mine wasteland based on subordinate membership function method[J]. Ecological Science, 2024, 43(6): 158-168
- [11] 王新, 贾永锋. 紫花苜蓿对土壤重金属富集及污染修复的潜力[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 932-935
- WANG X, JIA Y F. Heavy metals accumulation and phytoremediation of alfalfa in contaminated soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(4): 932-935
- [12] 湛天丽. 贵州铜仁汞矿区农田土壤重金属污染风险评估和紫花苜蓿修复效果[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017: 1-2
- ZHAN T L. Risk assessment and *Medicago sativa* remediation of agricultural soil contaminated with heavy metal in mercury mine area in Tongren, Guizhou Province [D]. Guiyang: Guizhou University, 2017: 1-2
- [13] 李庆玺, 段新慧, 赵志丽, 等. 铅污染下草类植物的生理响应和富集特性研究进展[J]. 草地学报, 2024, 32(12): 3670-3679
- LI Q X, DUAN X H, ZHAO Z L, et al. Research progress on physiological responses and enrichment characteristics of herbaceous plants under lead contamination [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(12): 3670-3679
- [14] 尹美强, 王栋, 王金荣, 等. 外源一氧化氮对盐胁迫下高粱种子萌发及淀粉转化的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(22): 4119-4128
- YIN M Q, WANG D, WANG J R, et al. Effects of exogenous nitric oxide on seed germination and starch transformation of sorghum seeds under salt stress[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(22): 4119-4128
- [15] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 62-63, 64-67, 151-153
- ZOU Q. Experimental guide to plant physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 62-63, 64-67, 151-153
- [16] 张志刚, 芮琪, 徐朗莱. 小麦叶片老化期间的内肽酶与 H_2O_2 的关系[J]. 植物学报, 2001, 43(2): 127-131
- ZHANG Z G, RUI Q, XU L L. Relationship between endopeptidase and H_2O_2 during the aging of wheat leaf[J]. Acta Botanica Sinica, 2001, 43(2): 127-131
- [17] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 132-133, 159-160
- ZHANG Z L, QU W J. Experimental guide to plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 132-133, 159-160
- [18] 周一凡, 杨钊, 隋晓青, 等. 2,4-表油菜素内酯对盐胁迫下无芒雀麦生理特性的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(11): 3732-3740
- ZHOU Y F, YANG Z, SUI X Q, et al. Effect of 2,4-epibrassinolide on the physiological properties of *Bromus inermis* under salt stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(11): 3732-3740
- [19] 任建军, 王菲, 李尹琳, 等. 盐酸脱绒处理对白羊草种子抗氧化性能的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(6): 1862-1868
- REN J J, WANG F, LI Y L, et al. Effects of delinting treatment with hydrochloric acid on oxidation resistance of *Bothriochloa ischaemum* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(6): 1862-1868
- [20] 覃勇荣, 赵贞涛, 刘旭辉, 等. 重金属胁迫对不同种源任豆种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(12): 156-162
- QIN Y R, ZHAO Z T, LIU X H, et al. Impacts of heavy metal stress on seed germination and seedling growth of *Zenia insignis* from different provenances [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(12): 156-162
- [21] 符卓旺, 彭娟, 朱洁, 等. 铅对紫花苜蓿种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3): 303-306
- FU Z W, PENG J, ZHU J, et al. Effects of lead on seed germination and seedling growth of alfalfa [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(3): 303-306
- [22] 魏学玲. 重金属铅胁迫对小麦种子萌发及幼苗生理生化特性的影响[D]. 兰州: 西北师范大学, 2010: 2-3
- WEI X L. Effects of lead stress on wheat seed germination and seedlings physiological and biochemical properties [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2010: 2-3
- [23] 何洁, 高钰婷, 贺鑫, 等. 重金属 Zn 和 Cd 对翅碱蓬生长及抗氧化酶系统的影响[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 312-320
- HE J, GAO Y T, HE X, et al. The effect of Zn and Cd on growth and antioxidant enzymes activity of *Suaeda heteroptera* Kitagawa [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(1): 312-320
- [24] 王若男, 乜兰春, 张双双, 等. 植物抗重金属胁迫研究进展[J]. 园艺学报, 2019, 46(1): 157-170

- WANG R N, NIE L C, ZHANG S S, et al. Research progress of plant resistance to heavy metal stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2019, 46(1):157-170
- [25] BISWAS K, ADHIKARI S, TARAFDAR A, et al. Reactive oxygen species and antioxidant defence systems in plants: role and crosstalk under biotic stress[M]. *Sustainable agriculture in the era of climate change*. Cham:Springer International Publishing, 2020.:265-292
- [26] CHAËBENE Z, HAKIM I R, RORAT A, et al. Copper toxicity and date palm (*Phoenix dactylifera*) seedling tolerance: monitoring of related biomarkers[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2018, 37(3):797-806
- [27] LIU Y L, CHEN J, LU S N, et al. Increased lead and cadmium tolerance of *Typha angustifolia* from Huaihe River is associated with enhanced phytochelatin synthesis and improved antioxidant capacity[J]. *Environmental Technology*, 2016, 37(21):2743-2749
- [28] 周美利, 沈广爽, 赵瑞瑞, 等. 铅胁迫对紫穗槐光合作用及生理生化特征的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(3):286-292
- ZHOU M L, SHEN G S, ZHAO R R, et al. Effects of lead stress on photosynthesis and physiological and biochemical characteristics of *Amorpha fruticosa* [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(3):286-292
- [29] 段德超, 于明革, 施积炎. 植物对铅的吸收、转运、累积和解毒机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1):287-296
- DUAN D C, YU M G, SHI J Y. Research advances in uptake, translocation, accumulation and detoxification of Pb in plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1):287-296
- [30] 叶春和. 紫花苜蓿对铅污染土壤修复能力及其机理的研究[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(4):331-334
- YE C H. Phytoremediation of Pb-contaminated soil with alfalfa: capacity and mechanisms[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(4):331-334

(责任编辑 刘婷婷)