

不同浓度锌对Cd胁迫下油菜幼苗生长和光合作用的影响

丁茂文, 张亮亮, 张雨, 欧阳群艳, 朱宗河, 张付贵, 郑文寅, 周可金, 余燕^{*}
(安徽农业大学农学院, 安徽 合肥, 230036)

摘要: 本研究通过水培试验, 探究了镉(Cd)胁迫下外源施加硫酸锌(ZnSO_4)对甘蓝型油菜幼苗生长及生理特性的影响。以两个甘蓝型油菜品种(ANY 1 和 ZHZ 418)为研究对象, 在 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫条件下, 分别施加 0、5、10、25、50、75 和 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Zn, 系统分析了 Zn 对油菜幼苗生长、光合系统及 Cd 积累的影响, 并结合主成分分析和随机森林分析进行综合评价。研究结果表明, Cd 胁迫显著抑制了油菜幼苗的生长和光合作用。两个品种的地上部和地下部生物量、总根长、总根表面积均显著下降, 同时光合速率、蒸腾速率及气孔导度也显著降低。外源施加不同浓度的 Zn 可不同程度缓解 Cd 对油菜幼苗生长和光合作用的抑制作用, 并减少幼苗地上部和根系对 Cd 的吸收。其中, $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn + Cd 处理效果最为显著: 与单独 Cd 处理相比, ANY 1 和 ZHZ 418 的地下部鲜重分别显著提高了 37.84% 和 56.34%, 总根长分别增加 53.50% 和 78.02%, 根系表面积分别提升 56.34% 和 61.73%。此外, 地下部 Cd 含量显著降低 43.40% 和 47.90%。值得注意的是, ANY 1 的 Cd 迁移系数在 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn + Cd 处理下达到峰值, 而 ZHZ 418 则在 $25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn + Cd 处理下达到最高值。然而, 当外源 Zn 浓度超过 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 油菜的生长和光合作用开始受到抑制, 表现为生物量和光合速率逐渐降低, 同时地下部 Cd 含量呈现上升趋势。通过隶属函数分析法评估, $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn + Cd 处理的综合得分最高, 表明该处理能有效促进 Cd 胁迫下油菜幼苗生长并提高其 Cd 耐受能力。综上所述, 在 Cd 胁迫条件下, 适量外源添加 Zn ($10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 可显著促进油菜幼苗生长, 增强光合作用, 提高幼苗对 Cd 毒害的耐受能力。这一发现为重金属污染农田的治理和粮食安全生产提供了重要的理论依据和实践指导。

关键词: 甘蓝型油菜; 镉胁迫; 锌; 根系形态; 光合作用; 镉积累

中图分类号: S565.4

文献标识码: A

Effects of differential Zn concentrations on the growth and photosynthesis of rapeseed seedling under cadmium stress

DING Mao-wen, ZHANG Liang-liang, ZHANG Yu, OUYANG Qun-yan, ZHU Zong-he, ZHANG Fu-gui, ZHENG Wen-yin, ZHOU Ke-jin, YU Yan^{*}
(Anhui Agriculture University, Hefei 230036, China)

Abstract: This study explored the effects of exogenous zinc sulfate (ZnSO_4) application on the growth and physiological characteristics of *Brassica napus* seedlings under cadmium (Cd) stress through a hydroponic experiment. Two *Brassica napus* varieties (ANY 1 and ZHZ 418) were selected as research subjects. Under $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd stress, exogenous Zn was applied at concentrations of 0, 5, 10, 25, 50, 75, and $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. The effects of Zn on seedling growth, photosynthetic system, and Cd accumulation were systematically analyzed, and comprehensive evaluations were conducted using principal component analysis and random forest analysis. The results showed that Cd stress significantly inhibited the growth and photosynthesis of *Brassica napus* seedlings. Both varieties exhibited significant reductions in aboveground and underground biomass, total root length, and total root surface area. Additionally, photosynthetic rate, transpiration rate, and stomatal conductance were all significantly decreased. Exogenous application of different concentrations of Zn alleviated the inhibition of seedling growth and photosynthesis by Cd to varying degrees, and reduced Cd absorption in both the aboveground and root parts of the seedlings. The treat-

收稿日期: 2025-01-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(32201915); 安徽省油料作物产业技术体系“十四五”计划项目; 国家留学基金委项目(202108775007)

作者简介: 丁茂文(2000-), 硕士研究生, 主要从事作物逆境生理生态研究, E-mail: m13196633217@163.com

^{*} 通讯作者: 余燕(1989-), 副教授, 主要从事作物逆境生理生态和养分管理研究, E-mail: yuyan@ahau.edu.cn

ment with $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn + Cd showed the most significant effect: compared to the Cd-only treatment, the underground fresh weight of ANY 1 and ZHZ 418 increased by 37.84% and 56.34%, respectively. The total root length increased by 53.50% and 78.02%, and the root surface area improved by 56.34% and 61.73%, respectively. Furthermore, the Cd content in the underground part decreased significantly by 43.40% and 47.90%, respectively. Notably, the Cd translocation coefficient of ANY 1 peaked under the $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn + Cd treatment, while ZHZ 418 reached its highest value under the $25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn + Cd treatment. However, when the exogenous Zn concentration exceeded $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, the growth and photosynthesis of *Brassica napus* were inhibited, as reflected by the gradual decrease in biomass and photosynthetic rate, and an increase in the Cd content in the underground parts. The evaluation using the membership function analysis showed that the $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn + Cd treatment had the highest comprehensive score, indicating that this treatment effectively promoted seedling growth under Cd stress and enhanced their tolerance to Cd toxicity. In conclusion, under Cd stress, the appropriate addition of exogenous Zn ($10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) significantly promotes the growth of *Brassica napus* seedlings, enhances photosynthesis, and improves their tolerance to Cd toxicity. This finding provides important theoretical and practical guidance for the management of heavy metal-contaminated farmland and food security production.

Key words: *Brassica napus*; Cd stress; Zn; Root morphology; Photosynthesis; Cd accumulation

镉(cadmium, Cd)是一种高生物毒性重金属,其主要来源包括矿业活动和金属冶炼过程^[1,2],根据2014年环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,土壤中无机Cd的点位超标率为7%,位于无机污染物之首^[3]。Cd在环境中的过量积累会对植物生长发育造成严重危害,例如降低叶片的光合效率、抑制根系的正常发育^[4]。此外,Cd易被植物吸收并积累于植株体内,进而通过食物链进入人体,对健康构成威胁^[5,6]。由于Cd具有高度的持久性,即使是低剂量长期暴露,也可能导致肾脏、肺部、骨骼等多种器官的损伤和病变,并诱发多种疾病,严重危害人体健康^[7,8]。因此,Cd污染不仅对生态系统造成破坏,还对公共健康构成了重大挑战。

外源添加调控剂是一种经济有效的管理措施,能够显著缓解植物对Cd的吸收及其毒害效应^[9-11],矿质元素在植物生长发育过程中不仅发挥着重要作用,还可作为治理Cd污染的有效调控剂。Cd胁迫不仅直接抑制植株生长,还会干扰矿质元素的吸收与转运,从而影响作物的产量和品质,对粮食安全构成严重威胁^[12]。已有研究表明,外源添加不同矿质元素对缓解Cd毒害具有显著效果。例如,外源添加铜能够促进Cd胁迫下小油菜的生长,提高光合色素含量,并显著降低油菜叶部和根部的Cd积累^[13],外源添加硒可减轻Cd胁迫对油菜干物质和光合色素的不利影响,同时降低油菜根系和地上部的Cd浓度及迁移系数^[14]。外源添加硅显著减少Cd在油菜茎和根中的积累,并大幅增加根鲜重和茎鲜

重^[15],此外,Cd胁迫下添加铁能够显著促进油菜生长,改善光合作用,并降低植株中Cd的积累^[16]。锌(zinc, Zn)作为植物生长发育所必需的微量元素,参与调控多种生理过程^[8],研究表明,Zn能够促进种子发芽、植株生长和光合作用^[8,17]。由于Zn与Cd的原子结构相似,两者在地球化学上具有强关联性^[18]。Zn与Cd在植物离子吸收通道中存在竞争关系,锌肥的使用可显著抑制作物对Cd的吸收和积累^[19],然而,Zn对植物吸收Cd的作用机制复杂,既可能表现为拮抗作用,也可能存在协同效应^[20],通过土壤添加Zn、种子预处理或叶面喷施等方式,不仅可以促进植物生长,还能最大限度地减少Cd的积累^[2,8,21,22]。本研究通过探究Cd胁迫下外源添加Zn对植物生长发育的影响,旨在为外源添加矿质元素作为缓解植物Cd吸收和毒害的经济有效管理措施提供理论依据。

油菜是我国重要的油料作物,种植广泛,耐Cd性和抗逆境胁迫能力较强,易从土壤中吸收并且富集Cd,因此提高油菜耐Cd性和降低油菜Cd吸收在确保油料安全上具有重要意义^[23,24]。本研究选取ANY 1和ZHZ 418两个甘蓝型油菜品种为试验材料,采用水培体系系统研究Zn调控对Cd胁迫的缓解效应。通过表型观测、光合参数测定及重金属含量分析等多维度指标,重点解析外源Zn干预对油菜幼苗Cd吸收转运的调控作用及其生理响应机制。本研究成果将进一步完善矿质元素互作缓解重金属毒害的理论体系,为建立油料作物安全生产的农艺调控技术提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 材料

供试油菜品种为甘蓝型油菜品种 ANY 1 和 ZHZ 418,由安徽农业大学农学院油菜栽培生理和分子育种实验室提供。

1.2 油菜培养

选取大小均一且颗粒饱满的油菜种子于 1% 的次氯酸钠(NaClO)溶液消毒 30 min 后,用去离子水漂洗 3~5 次,浸种 12 h,放入发芽盒,在 25℃ 黑暗环境下催芽 24 h。催芽后转移至人工气候箱,温度设置为 25℃,光周期设置为光照/黑暗=16 h/8 h,光强度为 14 400 lux。种子露白后均匀铺洒至盛有 1/4 Hoagland(pH 5.5)营养液的水培育苗盆上培养 4 d,待子叶完全展开后,选取长势一致的幼苗转移至盛有 1/2 Hoagland(pH 5.5)营养液的黑色塑料杯中(每盆 5 株),隔四天更换全 Hoagland(pH 5.5)营养液继续培养 4 d 后,添加试验处理,处理 7 天后取样待测。试验过程中,营养液每 4 d 更换一次。全营养液由 1 mmol·L⁻¹ CaCl_2 , 3 mmol·L⁻¹ KNO_3 , 1 mmol·L⁻¹ NaH_2PO_4 , 0.5 mmol·L⁻¹ MgSO_4 , 50 μmol·L⁻¹ Fe-EDTA , 0.5 μmol·L⁻¹ ZnSO_4 , 0.1 μmol·L⁻¹ $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$, 0.1 μmol·L⁻¹ CuSO_4 , 0.5 μmol·L⁻¹ MnSO_4 和 0.25 μmol·L⁻¹ H_3BO_3 组成,Cd 源选用氯化镉($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$),Zn 源选用硫酸锌($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$),所选试剂均为分析纯及以上。

1.3 试验设计

试验在人工气候箱中以水培的方式开展,基于前期实验结果选择所施加 Cd 的浓度(10 μmol·L⁻¹ Cd),Zn 处理浓度分别为 0、5、10、25、50、75、100 μmol·L⁻¹,共设置 8 个处理:① CK(不施 Cd,不施 Zn);② Cd(10 μmol·L⁻¹ Cd);③ 5 Zn + Cd(5 μmol·L⁻¹ Zn + 10 μmol·L⁻¹ Cd);④ 10 Zn + Cd(10 μmol·L⁻¹ Zn + 10 μmol·L⁻¹ Cd);⑤ 25 Zn + Cd(25 μmol·L⁻¹ Zn + 10 μmol·L⁻¹ Cd);⑥ 50 Zn + Cd(50 μmol·L⁻¹ Zn + 10 μmol·L⁻¹ Cd);⑦ 75 Zn + Cd(75 μmol·L⁻¹ Zn + 10 μmol·L⁻¹ Cd);⑧ 100 Zn + Cd(100 μmol·L⁻¹ Zn + 10 μmol·L⁻¹ Cd)。每个处理设置 3 个重复,即种植 3 盆,每盆 5 株,处理 7 d 后取样待测。

1.4 测试指标与方法

1.4.1 生物量的测定 幼苗处理 7 d 后,从植株根茎处分离油菜幼苗的地上部和地下部,用吸水纸吸干多余水分,使用万分位天平(FA2104,上海舜宇恒平科学仪器有限公司)称量幼苗的地上部鲜重(shoot weight, SW)和地下部鲜重(root weight, RW)。

1.4.2 根系形态的测定 每个处理选取三株油菜完整的根系,将其放入盘中,利用根系扫描仪(STD 4800, EPSON)进行根系扫描并获取图像,之后利用图像分析软件(Win-RHIZO 2009)测定油菜的根系结构:总根长(total root length, TRL)、根表面积(root surface area, RSA)、总投影面积(total projected area, TRA)、总根体积(total root volume, TRV)、根尖数(number of root tips, RT)、分枝数(number of root forks, RF)。

1.4.3 SPAD 值和光合参数的测定 取样前 12 h,每个处理随机挑选 15 株油菜幼苗,每株自上而下选取第二片完全展开的光合功能叶片,在日光温室中,利用 Photosynq MultispeQ 多功能植物测量仪测定 SPAD 值,利用 Li-6800 便携式光合测定仪测定各处理油菜叶片光合作用指标,光照强度设置为 1200 μmol·m⁻²·s⁻¹,温度控制在 25℃。指标包括光合速率(photosynthetic rate, P_n)、气孔导度(stomatal conductance, G_s)、胞间 CO₂ 浓度(intercellular CO₂ concentration, C_i)和蒸腾速率(transpiration rate, T_r)。

1.4.4 油菜 Cd 含量的测定 取样后,将油菜幼苗的地下部于 20 mmol·L⁻¹ Na₂-EDTA 溶液中浸泡 20 min,去除根系表面附着离子,之后用去离子水反复冲洗,吸水纸吸干多余水分后与地上部放入信封。将信封放入烘箱中在 105℃ 杀青 30 min,70℃ 烘干至恒重。称取 0.5 g 置于聚四氟乙烯消解管中,加入 10 mL 混酸($\text{HNO}_3:\text{HClO}_4=4:1$, V:V)消解至溶液变澄清,冷却后用 1% 硝酸定容至 50 mL,过滤后使用电感耦合等离子体发射光谱仪(美国 Thermo, iCAP 7400 Series)测定样品 Cd 含量,在此基础上通过计算得出植株 Cd 迁移系数,计算公式如下:

$$\text{Cd 迁移系数} = \frac{\text{植株地上部 Cd 含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})}{\text{植株地下部 Cd 含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})}$$

1.4.5 数据统计与分析 利用 Microsoft Excel 2019 软件对数据进行整理,采用 SPSS 25.0 对数据进行差异显著性分析(Duncan, $P < 0.05$),使用 GraphPad Prism 8.0.2 和 RStudio 进行作图。主成分分析(principal component analysis, PCA)利用 RStudio 的 factoextra 包进行分析,随机森林分析利用 RStudio 的 rfr 包进行分析,均用 ggplot2 包进行绘图。

2 结果与分析

2.1 Zn 处理对 Cd 胁迫下油菜幼苗生长的影响

由图 1 所示,Cd 胁迫条件下油菜幼苗生长发育受到明显的抑制,ANY 1 地上部和根鲜重分别降低

了34.40%、22.43%, ZHZ 418地上部和根鲜重分别降低了40.62%、29.54%, 表明ANY 1对Cd毒害的耐受性强于ZHZ 418。施加Zn可在不同程度上缓解Cd对油菜幼苗的负面影响, ANY 1在5、10、25 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Zn处理下均可显著增加地上部和地下部鲜重, ZHZ 418在5、10、25、50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Zn处理下显著增加地上部鲜重, 在10、25 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Zn处理下显著增加地下部鲜重, 其中10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Zn处理效果最优, 与Cd处理相比, ANY 1的地上部和根系鲜重显著增加了43.35%、37.84%。ZHZ 418的地上部和根鲜重显著增加了78.02%、56.34%。在大于10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Zn处理下, 两个品种的鲜重开始出现持续性下降。

2.2 Zn处理对Cd胁迫下油菜幼苗根系形态的影响

如图2所示, 在Cd胁迫下, 油菜幼苗的总根长、总根表面积、总投影面积、总根体积、根尖数、分枝数均显著降低, ANY 1的根系指标分别降低了44.33%、29.93%、36.91%、19.90%、63.60%、35.97%, ZHZ 418的根系指标分别降低了37.00%、32.07%、30.58%、32.72%、40.07%、36.61%。施加Zn可以有效促进油菜幼苗根系的生长, 其中10

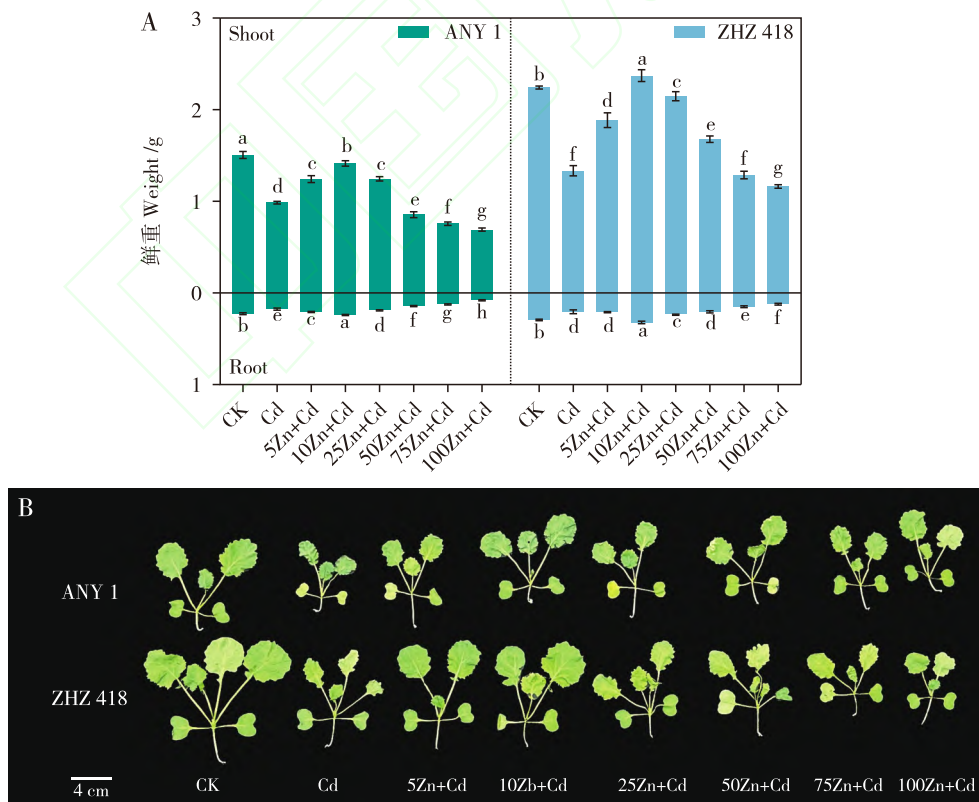
$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Zn施加的效果最优, 与Cd处理相比, ANY 1的根系指标分别显著增加了53.50%、45.93%、40.37%、40.84%、59.58%、57.78%, ZHZ 418的根系指标分别显著增加了61.73%、66.54%、65.02%、74.03%、33.96%、57.40%。

2.3 Zn处理对Cd胁迫下油菜幼苗叶片SPAD值的影响

如图3所示, Cd胁迫下油菜叶片发育受阻, ANY 1 SPAD值显著降低了41.25%, ZHZ 418 SPAD值显著降低了52.14%, 伴随着Zn的加入, 叶片SPAD值呈先上升后下降的趋势, 在10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Zn处理下达到最大值, ANY 1的SPAD值显著上升了58.10%, ZHZ 418的SPAD值显著上升了90.01%。在大于10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Zn处理下, SPAD值开始出现显著下降。

2.4 Zn处理对Cd胁迫下油菜幼苗叶片光合速率的影响

如图4所示, 在Cd胁迫下, 油菜幼苗的 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 均显著降低, ANY 1的 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 显著降低了28.82%、26.87%、48.70%、8.49%, ZHZ 418的 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 显著降低了47.43%、28.88%、31.98%、



注:不同小写字母表示不同处理间差异达到显著水平($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$)

图1 不同浓度Zn对Cd胁迫下油菜幼苗的鲜重(A)和叶片表型(B)的影响

Fig. 1 Effects of Zn concentration on fresh weight (A) and leaf phenotype (B) of rapeseed seedlings under Cd stress

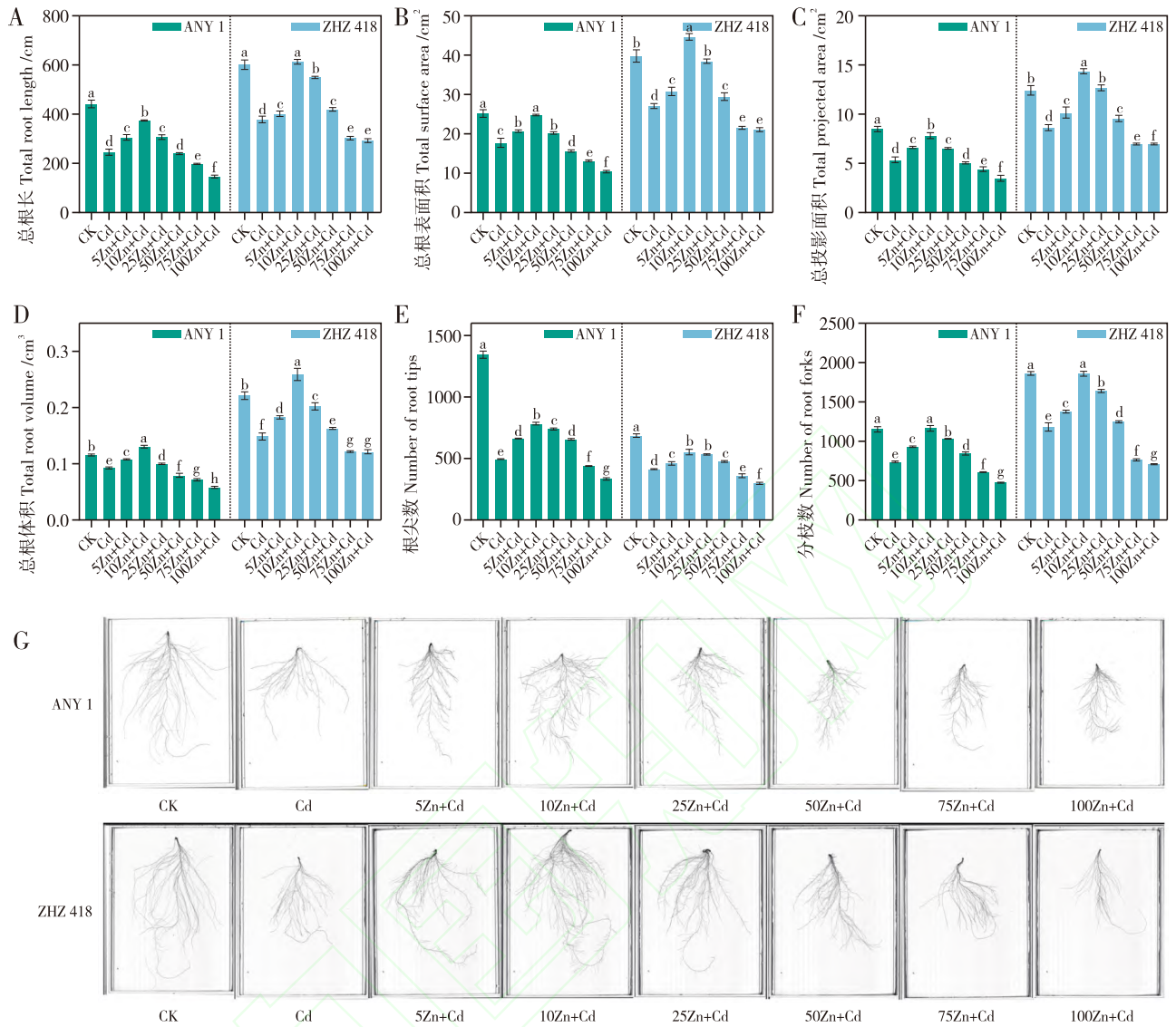


图2 不同浓度 Zn 对 Cd 胁迫下油菜幼苗总根长(A)、总根表面积(B)、总投影面积(C)、总根体积(D)、根尖数(E)、分枝数(F)和根系形态(G)的影响

Fig. 2 Effects of Zn concentrations on Total root length (A), Total surface area (B), Total projected area (C), Total root volume (D), Number of root tips (E), Number of root forks (F) and root morphology (G) of rapeseed seedlings under Cd stress

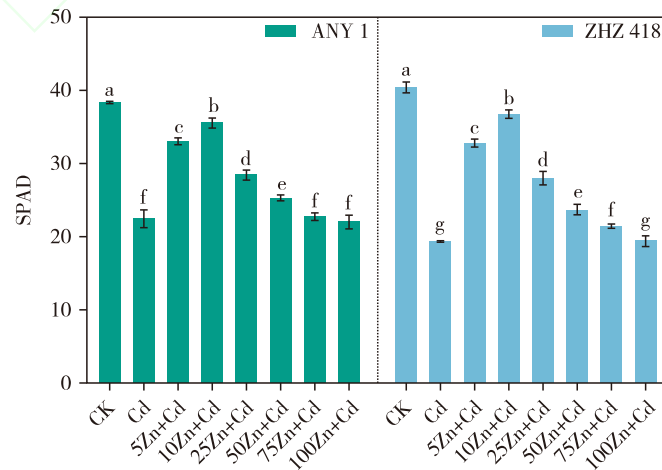


图3 施加不同浓度 Zn 对 Cd 胁迫下油菜幼苗 SPAD 值的影响

Fig. 3 Effects of different concentrations of Zn application on the SPAD of rapeseed seedlings exposed to Cd stress

5.24%。在施加 Zn 后,与 Cd 处理相比呈先上升后下降的趋势,在 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn 处理下 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 达到最大值, ANY 1 显著提升 37.70%、65.35%、151.96%、10.77%, ZHZ 418 显著提升 68.65%、53.65%、41.72%、6.79%。

2.5 Zn 处理对 Cd 胁迫下油菜幼苗 Cd 含量的影响

如图 5 所示,两个品种的地下部 Cd 浓度明显高于地上部, ANY 1 地上部 Cd 含量随 Zn 浓度的增加呈显著下降趋势,地下部分 Cd 含量随 Zn 浓度的增加呈先下降后上升的趋势,在 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Zn 处理下效果最为明显, $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn 处理下 ANY 1 地

下部的 Cd 含量显著降低了 43.40%, ZHZ 418 的地下部的 Cd 含量显著降低了 47.90%。 ANY 1 和 ZHZ 418 的 Cd 迁移系数呈现先上升后下降的趋势, ANY 1 在 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Zn 处理下 Cd 迁移系数达到最大,为 0.63, ZHZ 418 在 $25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Zn 处理下 Cd 迁移系数达到最大,为 0.80。

2.6 Zn 处理对 Cd 胁迫下油菜幼苗各指标之间的主成分分析以及随机森林分析

采用主成分分析探究了外源 Zn 对 Cd 胁迫下油菜幼苗耐 Cd 性的影响,其中 ANY 1 的 PC1 占据了总方差的 77.86%, PC2 占据了总方差的 17.88% (图 6

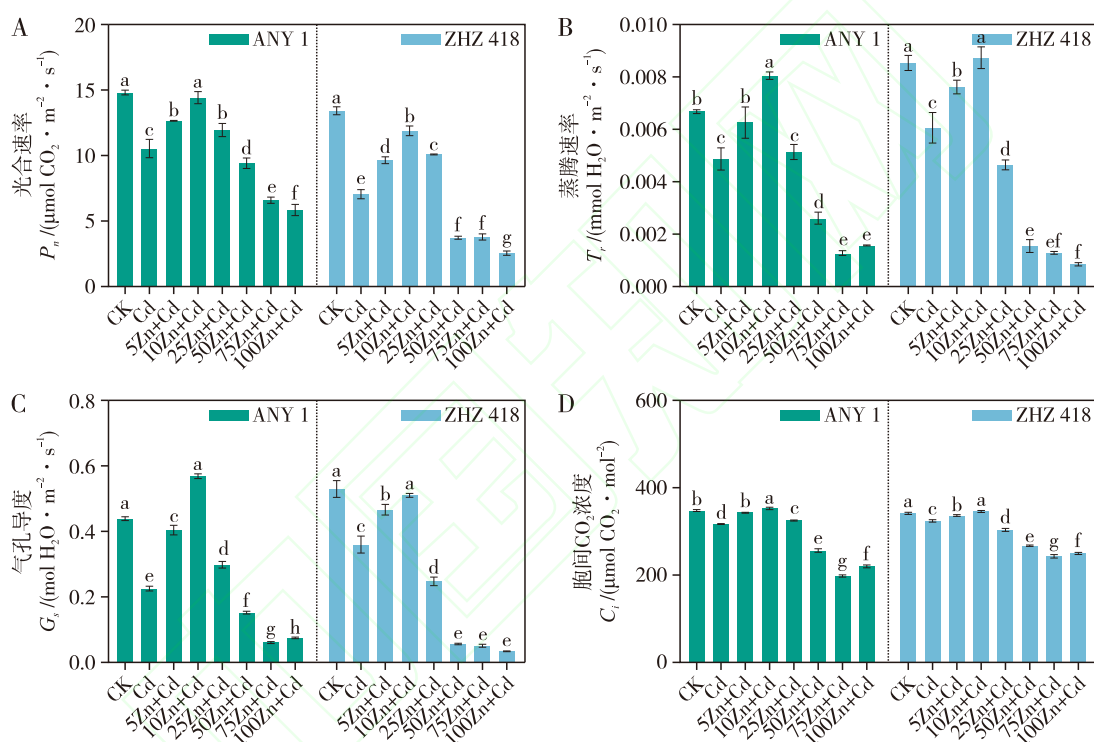


图 4 不同浓度 Zn 对 Cd 胁迫下油菜幼苗光合速率(A)、蒸腾速率(B)、气孔导度(C)和胞间 CO_2 浓度(D)的影响

Fig. 4 Effects of Zn on photosynthetic rate (A), transpiration rate (B), stomatal conductance (C) and Intercellular CO_2 concentration (D) of rapeseed seedlings under Cd stress

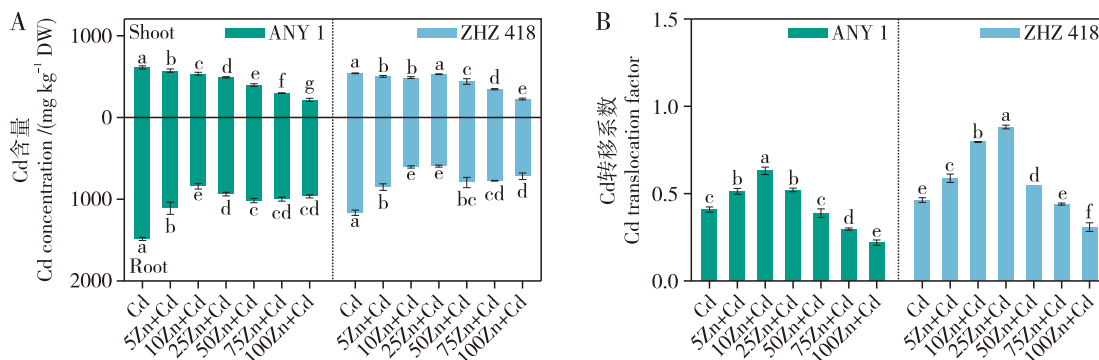


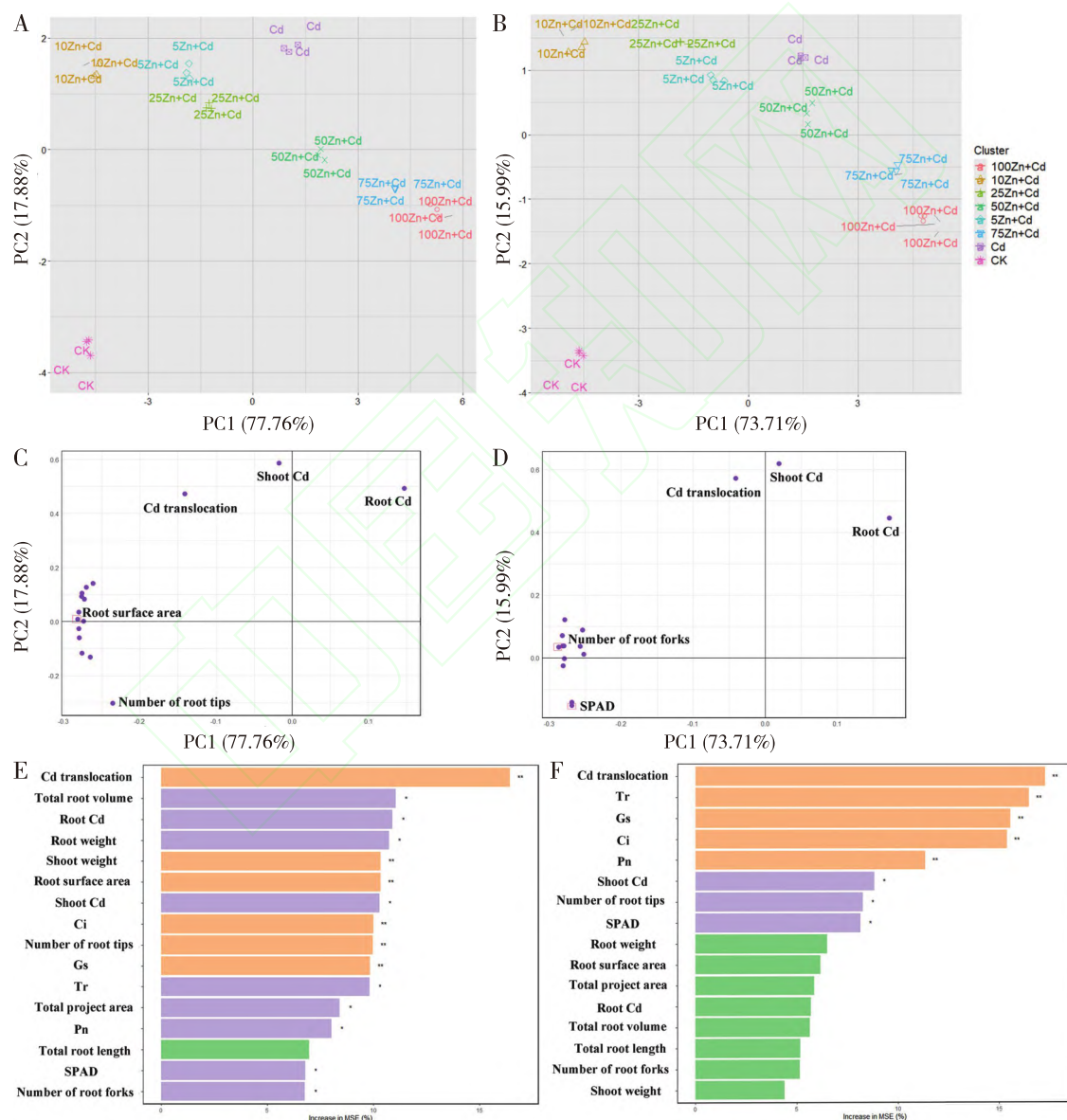
图 5 不同浓度 Zn 对 Cd 胁迫下油菜幼苗 Cd 含量(A)和 Cd 转移系数(B)的影响

Fig. 5 Effects of different concentrations of Zn on Cd concentration (A) and Cd translocation factor (B) of rape seedlings under Cd stress

A), ZHZ 418 的 PC1 占据了总方差的 73.71%、PC2 占据了总方差的 15.99%(图 6 B), 两个品种各处理分离显著(图 6 AB), 其中, ANY 1 与 ZHZ 418 的地下部 Cd 含量均对 PC1 有较大的贡献, 地上部 Cd 含量均对 PC2 有较大的贡献, ANY 1 的根表面积与 PC1 之间呈较大的负相关性, 根尖数与 PC2 之间呈较大的负相关性。ZHZ 418 的分枝数与 PC1 呈较大的负相关性, SPAD 与 PC2 呈较大的负相关性(图 6 CD)。

随机森林分析结果表明, 在 ANY 1 中, Cd 迁移系数、地上部分鲜重、总根表面积、胞间 CO_2 浓度、根

尖数、气孔导度的显著性最强($P < 0.01$), Cd 迁移系数的长度最长, 说明 Cd 迁移系数对结果的重要性最高, 其次是总根体积、地下部 Cd 含量、地下部鲜重, ZHZ 418 中, Cd 迁移系数、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、光合速率的显著性最强($P < 0.01$), Cd 迁移系数的长度最长, 对结果重要性最高, 其次是蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、光合速率, 综合来看, Cd 迁移系数对两个品种的耐 Cd 性的影响最大, 是评价两个品种耐 Cd 性的最重要指标(图 6 EF)。



注: A、C 和 E 为 ANY 1, B、D 和 F 为 ZHZ 418, 横纵坐标分别表示样品在对应主成分的得分

Note: A, C and E are ANY 1, B, D and F are ZHZ 418, and the horizontal and vertical coordinates respectively indicate the score of the sample in the corresponding principal component

图 6 Cd 胁迫下施 Zn 对油菜幼苗各指标变化的主成分分析(A~D)及随机森林分析(E)和(F)

Fig. 6 Principal component analysis (A~D) and random forest analysis (E) and (F) of changes of indexes of rapeseed seedlings under Cd stress induced by Zn application

2.7 不同浓度 Zn 对 Cd 胁迫下油菜耐受性的综合评价

如表 1 所示,使用隶属函数分析法对不同处理下油菜幼苗的各指标进行综合评价,数据显示,Cd 胁迫下施加不同浓度 Zn 后 ANY 1 的耐受指数由强到弱依次为:10 Zn + Cd、5 Zn + Cd、25 Zn + Cd,ZHZ 418 为:10 Zn + Cd、25 Zn + Cd、5 Zn + Cd,两个品种均在 10 Zn + Cd 处理下效果最佳。

3 讨论与结论

3.1 外源添加 Zn 对 Cd 胁迫下油菜生长的影响

鲜重和根系形态是衡量植物生长状况的基本指标^[24]。本研究通过对油菜幼苗生长指标的测定,发现 Cd 胁迫显著影响油菜幼苗的生长。根系是植物最先接触 Cd 胁迫的部位,也是植物生长代谢的关键区域,承担着水分和养分的吸收与积累^[13,25],因此,根系的生长状况是 Cd 毒害的一个重要表征。研究表明,Cd 胁迫显著抑制了油菜幼苗的生长,具体表现为油菜幼苗的总根长、总根表面积、总根体积、总投影面积、根尖数和分枝数均显著下降。根系生长受抑制可能通过影响植物水分和养分的吸收与运输,从而影响地上部的正常生长^[26],此外,根系吸收的 Cd 还可以通过木质部运输至地上部,进而影响到地上部的正常生长^[27]。本研究的结果也表明,油菜幼苗的地上部生长和光合作用均受到 Cd 胁迫的抑制,这与已有研究结果一致^[28,29]。Zn 在多种酶的结构和催化功能中发挥着关键作用,是植物生长必需的微量营养素^[30]。在逆境胁迫下,适量补充 Zn 可以有效缓解植物根系的损伤,并增加地上部分生物量^[22,31],然而,高浓度的 Zn 则会对植物生长产生抑制作用^[32,33]。本试验的结果也显示,低浓度 Zn 能够显著提高油菜幼苗的生物量,而高浓度 Zn 则会对生物量造成抑制。在 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn 的处理下,油菜幼苗在 Cd 胁迫下的生长表现最佳。

3.2 外源添加 Zn 对 Cd 胁迫下油菜光合系统的影响

光合作用是植物合成富含能量的化合物的过

程,是植物各类生化和生理过程中最终的碳合成途径,也是植物生命活动的基础^[21]。因此光合作用被认为是研究植物对重金属胁迫的生理反应的有力工具^[34]。本试验结果表明,Cd 胁迫导致油菜幼苗的 SPAD、 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 显著降低,这一现象与其他处于 Cd 胁迫下的小麦、水稻、玉米等作物的研究结果一致。Cd 毒性可能通过破坏铁的吸收,进而降低叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量^[35]。此外,Cd 还会增强有毒离子和活性氧(ROS)的生成,导致光合色素的分解和减少。Cd 对叶绿体和类囊体膜的损害与叶绿素合成相关酶的活动并行,并会激活与叶绿素分解和 ROS 产生相关的酶,这些都会导致叶绿素的合成和含量降低^[8,36]。Cd 对油菜叶绿素含量和光合作用的负面影响已被多项研究证实^[37]。另一方面,Cd 作为一种有效的光合作用抑制剂,通过气孔关闭、光合装置损伤、集光复合体和光系统 I 与 II 的破坏来抑制植物的光合作用^[35]。外源添加 Zn 在改善植物光合作用方面已有广泛研究。Zn 在叶绿素合成、氮(N)代谢、碳固定及代谢酶和蛋白质的合成与保护中具有重要作用^[38]。因此,Zn 能够增加氮的吸收,并在叶绿素合成过程中发挥关键作用^[39]。此外,Zn 还能够保护叶绿素前体,促进叶绿素的合成。已有研究表明,外源适量添加 Zn 可以显著增强植物的光合作用^[40]。然而,在 Cd 浓度过高的情况下,Zn 的施用会增加小麦、水稻和玉米的气体交换参数,但高浓度的 Zn 也可能导致叶绿素含量下降,同时抑制光合速率。这主要是由于高浓度 Zn 不仅会导致叶绿体结构的紊乱,还会抑制叶绿素的合成,进而加速其降解^[41]。在本研究中,施用 Zn 显著提高了油菜幼苗的 SPAD、 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r ,其中 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn 处理的效果最佳。然而,当 Zn 浓度过高时,油菜幼苗的 SPAD、 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 开始下降,表现出 Zn 过量的负面效应。

3.3 外源添加 Zn 对 Cd 胁迫下油菜 Cd 吸收的影响

Zn 和 Cd 属于同族化学元素,具有相似的化学

表 1 Cd 胁迫下不同浓度 Zn 处理对油菜幼苗耐受性的综合评价

Table 1 Comprehensive evaluation of tolerance of rapeseed seedlings treated with different concentrations of Zn under Cd stress

处理	Cd 处理	Zn 处理	ANY 1 综合得分	排序	ZHZ 418 综合得分	排序
Treatment	Cd treatment ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	Zn concentration ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	ANY 1 Comprehensive score	Sort	ZHZ 418 Comprehensive score	Sort
5 Zn + Cd	10	5	0.683836089	2	0.576188796	3
10 Zn + Cd	10	10	0.839731241	1	0.8986812	1
25 Zn + Cd	10	25	0.646270905	3	0.720433758	2
50 Zn + Cd	10	50	0.417294214	4	0.485823629	4
75 Zn + Cd	10	75	0.259387757	5	0.231087031	5
100 Zn + Cd	10	100	0.125096998	6	0.133941471	6

性质、相同的价态和相似的离子半径^[42]。尽管 Cd 和 Zn 在土壤溶液中的可用性和流动性不同,植物对它们的潜在吸收也有所不同,但植物通常会通过减少这些金属向地上部分的转运来防止它们对地上部分造成损伤。根系是植物与 Cd 直接接触的部位,因此根系中的 Cd 含量通常高于地上部分^[43-45]。由于 Cd 与 Zn 的化学性质相似,以及 Zn 和 Cd 之间的拮抗作用,植物可能通过相同的途径吸收这两种元素。有研究表明,植物在 Zn 和 Cd 同时存在的情况下,更倾向于吸收 Zn^[17,46-48],因此施用 Zn 可以有效降低 Cd 的吸收和运输,减少 Cd 的含量、毒性效应以及其在植物体内的积累^[49]。本试验发现 Cd 毒性显著提高了油菜幼苗地上部分和根系的 Cd 含量,而 Zn 的施加则显著降低了这两部分的 Cd 含量。Cd 在溶液中以 Cd²⁺的形式存在,因此营养液中的 Ca²⁺、Fe²⁺、Mn²⁺、Zn²⁺、Mg²⁺等离子会与 Cd²⁺竞争相关的离子通道和转运位点^[21,22]。尽管施用 Zn 对油菜抑制 Cd 从根系向地上部分的转运效果有限,但在不同 Zn 浓度的处理下,Cd 的转运系数呈现先上升后下降的趋势。这可能是因为施用 Zn 时,油菜根部对 Cd²⁺的被动运输有所增加。随着 Zn 含量的提高,油菜可能会产生更多与 Zn²⁺相关的转运蛋白,这些转运载体也可能增加 Cd²⁺的转运^[50,51]。

4 结论

Cd 对油菜的生长具有显著的不利影响,具体表现为根系结构异常、植物生长受阻、光合系统紊乱以及植株中 Cd 的过量积累。外源添加 Zn 可以显著提高 Cd 胁迫下油菜幼苗的生物量、根系指标和光合参数,同时降低 Cd 在植物中的积累,有效缓解 Cd 胁迫对油菜幼苗生长的毒害作用。通过随机森林分析发现,Cd 迁移系数对油菜耐 Cd 性的影响较为显著,是研究油菜耐 Cd 性的重要指标。在 Cd 胁迫条件下,外源添加 10 μmol·L⁻¹的 Zn 对植株生长最为有利。本研究通过初步的指标筛选,确定了最适宜的 Zn 浓度,为未来更深入的试验提供了基础数据。

参考文献:

- [1] Boussen S, Soubrand M, Bril H, et al. Transfer of lead, zinc and cadmium from mine tailings to wheat (*Triticum aestivum*) in carbonated Mediterranean (Northern Tunisia) soils [J]. *Geoderma*, 2013, 192: 227-236. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.08.029.
- [2] Usman M, Zia-ur-Rehman M, Rizwan M, et al. Effect of soil texture and zinc oxide nanoparticles on growth and accumulation of cadmium by wheat: a life cycle study [J]. *Environ Res*, 2023, 216: 114397. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114397.
- [3] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等.《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(9): 1689-1692. DOI: 10.11654/jaes.2017-1220.
- [4] Ma X C, Yang H B, Bu Y F, et al. Genome-wide identification of PLATZ genes related to cadmium tolerance in *Populus trichocarpa* and characterization of the role of Pt-PLATZ3 in phytoremediation of cadmium [J]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 228: 732-743. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.12.176.
- [5] Lin Y S, Ho W C, Caffrey J L, et al. Low serum zinc is associated with elevated risk of cadmium nephrotoxicity [J]. *Environ Res*, 2014, 134: 33-38. DOI: 10.1016/j.envres.2014.06.013.
- [6] Yu Y, Alseekh S, Zhu Z, et al. Multiomics and biotechnologies for understanding and influencing cadmium accumulation and stress response in plants [J]. *Plant Biotechnol J*, 2024, 22(10): 2641-2659. DOI: 10.1111/pbi.14379.
- [7] Yi Q S, Wang Y, Yi C, et al. Agronomic and ionomics indicators of high-yield, mineral-dense, and low-Cd grains of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2023, 261: 115120. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2023.115120.
- [8] Clemens S, Aarts M G M, Thomine S, et al. Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning [J]. *Trends Plant Sci*, 2013, 18(2): 92-99. DOI: 10.1016/j.tplants.2012.08.003.
- [9] Sarwar N, Ishaq W, Farid G, et al. Zinc-cadmium interactions: impact on wheat physiology and mineral acquisition [J]. *Ecotoxicol and Environ Saf*, 2015, 122: 528-536. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.09.011.
- [10] Li Y L, Gao C, Rong S S, et al. Combining mercapto-functionalized palygorskite with zinc affect cadmium phytoavailability and soil microbial activity in rhizosphere soil [J]. *Land Degrad Dev*, 2022, 33(1): 193-203. DOI: 10.1002/ldr.4137.
- [11] 张连科. 生物炭基复合材料对铅镉复合污染土壤的稳定化作用及机制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019. DOI: 10.27393/d.cnki.gxazu.2019.000005.
- [12] 时鹏涛, 罗义灿, 秦玉燕, 等. 镉胁迫对湘两优 900 及其再生稻米镉和矿质元素积累的影响 [J]. *山东农业科学*, 2023, 55(12): 127-133. DOI: 10.14083/j.issn.1001-4942.2023.12.017.
- [13] 王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 等. 纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响 [J]. *环境科学*, 2023, 44(9): 5204-5213. DOI: 10.13227/j.

- hjkx.202209211.
- [14] 张立, 王杰. 不同硒形态对镉胁迫下油菜镉亚细胞分布、化学形态及硒累积的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(17): 259–264. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2022.17.042.
- [15] Zhao S P, Kamran M, Rizwan M, et al. Regulation of proline metabolism, AsA-GSH cycle, cadmium uptake and subcellular distribution in *Brassica napus* L. under the effect of nano-silicon [J]. Environ Pollut, 2023, 335: 122321. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.122321.
- [16] Okla M K, Saleem M H, Saleh I A, et al. Foliar application of iron-lysine to boost growth attributes, photosynthetic pigments and biochemical defense system in canola (*Brassica napus* L.) under cadmium stress [J]. BMC Plant Biol, 2023, 23(1): 648. DOI: 10.1186/s12870-023-04672-3.
- [17] Cao M M, Lv W X, Wang F, et al. Foliar application of zinc oxide nanoparticles alleviates phenanthrene and cadmium-induced phytotoxicity in lettuce: regulation of plant-rhizosphere-microbial long distance [J]. Environ Sci Technol, 2025, 59(1): 730–743. DOI: 10.1021/acs.est.4c07881.
- [18] Mir R A, Bhat B A, Yousuf H, et al. Multidimensional role of silicon to activate resilient plant growth and to mitigate abiotic stress [J]. Front Plant Sci, 2022, 13: 819658. DOI: 10.3389/fpls.2022.819658.
- [19] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, et al. Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat seedlings [J]. Physiol Plant, 2002, 116(1): 73–78. DOI: 10.1034/j.1399-3054.2002.1160109.x.
- [20] He S Y, Yang X E, He Z L, et al. Morphological and physiological responses of plants to cadmium toxicity: a review [J]. Pedosphere, 2017, 27(3): 421–438. DOI: 10.1016/S1002-0160(17)60339-4.
- [21] Zhou J, Zhang C, Du B Y, et al. Effects of zinc application on cadmium (Cd) accumulation and plant growth through modulation of the antioxidant system and translocation of Cd in low- and high-Cd wheat cultivars [J]. Environ Pollut, 2020, 265: 115045. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115045.
- [22] Tanveer Y, Jahangir S, Shah Z A, et al. Zinc oxide nanoparticles mediated biostimulant impact on cadmium detoxification and in silico analysis of zinc oxide-cadmium networks in *Zea mays* L. regulome [J]. Environ Pollut, 2023, 316 (Pt 2): 120641. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120641.
- [23] 余燕, 贺原, 邹翔宇, 等. 双低甘蓝型油菜“油蔬两用”开发利用现状与展望[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(05): 921–929. DOI: 10.19802/j.issn.1007-9084.2021167.
- [24] 邹翔宇, 岳文丽, 贺原, 等. 菜薹镉低积累“油蔬两用”油菜品种筛选及海藻糖对其镉积累和品质的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 774–785. DOI: 10.11654/jaes.2023-0493.
- [25] 魏畅, 马耀武, 张振宇, 等. 硅锌互作对镉胁迫下玉米生长及生理参数的影响 [J]. 环境科学, 2025, 1–17. DOI: 10.13227/j.hjkx.202401119.
- [26] Behtash F, Amini T, Mousavi S B, et al. Efficiency of zinc in alleviating cadmium toxicity in hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Ferdos) [J]. BMC Plant Biol, 2024, 24(1): 648. DOI: 10.1186/s12870-024-05325-9.
- [27] Algethami J S, Ibrahim M, Javed W, et al. Efficacy of Fe-BC in enhancing growth, photosynthesis, nutrition, and alleviating the toxicity of Cd and Cr in rapeseed (*Brassica napus* L.): a tool for managing the environment and attaining sustainable agriculture [J]. Environ Technol Innov, 2024, 36: 103789. DOI: 10.1016/j.eti.2024.103789.
- [28] Li X P, Liu K Z, He X Y, et al. Mutual effects of zinc concentration and ratio of red-blue light on growth and nutritional quality of flowering Chinese cabbage sprouts [J]. Horticulturae, 2023, 9(2): 226. DOI: 10.3390/horticulturae9020226.
- [29] Rajab H, Khan M S, Wirtz M, et al. Sulfur metabolic engineering enhances cadmium stress tolerance and root to shoot iron translocation in *Brassica napus* L. [J]. Plant Physiol Biochem, 2020, 152: 32–43. DOI: 10.1016/j.plaphy.2020.04.017.
- [30] Thiébaud N, Hanikenne M. Zinc deficiency responses: bridging the gap between *Arabidopsis* and dicotyledonous crops [J]. J Exp Bot, 2022, 73(6): 1699–1716. DOI: 10.1093/jxb/erab491.
- [31] Ramzan M, Ayub F, Shah A A, et al. Synergistic effect of zinc oxide nanoparticles and *Moringa oleifera* leaf extract alleviates cadmium toxicity in *Linum usitatissimum*: antioxidants and physiochemical studies [J]. Front Plant Sci, 2022, 13: 900347. DOI: 10.3389/fpls.2022.900347.
- [32] Iftikhar A, Ali S, Yasmeen T, et al. Effect of gibberellic acid on growth, photosynthesis and antioxidant defense system of wheat under zinc oxide nanoparticle stress [J]. Environ Pollut, 2019, 254 (Pt B): 113109. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113109.
- [33] Michael P I, Krishnaswamy M. The effect of zinc stress combined with high irradiance stress on membrane damage and antioxidative response in bean seedlings [J]. Environ Exp Bot, 2011, 74: 171–177. DOI: 10.1016/j.env-

- expbot.2011.05.016.
- [34] Adil M F, Sehar S, Han Z G, et al. Zinc alleviates cadmium toxicity by modulating photosynthesis, ROS homeostasis, and cation flux kinetics in rice [J]. *Environ Pollut*, 2020, 265 (Pt B): 114979. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114979.
- [35] Azimi F, Oraei M, Gohari G, et al. Chitosan-selenium nanoparticles (Cs-Se NPs) modulate the photosynthesis parameters, antioxidant enzymes activities and essential oils in *Dracocephalum moldavica* L. under cadmium toxicity stress [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2021, 167: 257–268. DOI: 10.1016/j.plaphy.2021.08.013.
- [36] Haider F U, Cai L Q, Coulter J A, et al. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2021, 211: 111887. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111887.
- [37] 汪洪, 赵士诚, 夏文建, 等. 不同浓度镉胁迫对玉米幼苗光合作用、脂质过氧化和抗氧化酶活性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2008(1): 36–42.
- [38] Yu H T, Zhen J, Leng J Y, et al. Zinc as a countermeasure for cadmium toxicity [J]. *Acta Pharmacol Sin*, 2021, 42 (3): 340–346. DOI: 10.1038/s41401-020-0396-4.
- [39] Faizan M, Bhat J A, Hessini K, et al. Zinc oxide nanoparticles alleviates the adverse effects of cadmium stress on *Oryza sativa* via modulation of the photosynthesis and antioxidant defense system [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2021, 220: 112401. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112401.
- [40] Perveen S, Saeed M, Parveen A, et al. Modulation of growth and key physiobiochemical attributes after foliar application of zinc sulphate (ZnSO_4) on wheat (*Triticum aestivum* L.) under cadmium (Cd) stress [J]. *Physiol Mol Biol Plants*, 2020, 26 (9): 1787–1797. DOI: 10.1007/s12298-020-00861-8.
- [41] 张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 等. 稀土元素铈对锌胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应 [J]. *环境科学*, 2024, 45 (2): 1141–1149. DOI: 10.13227/j.hjks.202304090.
- [42] 李虹呈, 王倩倩, 贾润语, 等. 外源锌对水稻各部位镉吸收与累积的拮抗效应 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38 (12): 4854–4863. DOI: 10.13671/j.hjkxb.2018.0356.
- [43] Abbas T, Rizwan M, Ali S, et al. Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a soil with aged contamination [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2017, 140: 37–47. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.02.028.
- [44] Tran T M, Lee J U. Biosorption of Cd by an indigenous Cd-resistant bacterium isolated from soil contaminated with Cd [J]. *Geosci J*, 2024, 28 (1): 15–25. DOI: 10.1007/s12303-023-0031-8.
- [45] Sohail, Sawati L, Ferrari E, et al. Molecular effects of biogenic zinc nanoparticles on the growth and development of *Brassica napus* L. revealed by proteomics and transcriptomics [J]. *Front Plant Sci*, 2022, 13: 798751. DOI: 10.3389/fpls.2022.798751.
- [46] Adil M F, Sehar S, Chen G, et al. Cadmium-zinc cross-talk delineates toxicity tolerance in rice via differential genes expression and physiological/ultrastructural adjustments [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2020, 190: 110076. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.110076.
- [47] Du J, Guo Z Y, Li R H, et al. Screening of Chinese mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars for the phytoremediation of Cd and Zn based on the plant physiological mechanisms [J]. *Environ Pollut*, 2020, 261: 114213. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114213.
- [48] Palali Delen S, Lee J, Yang J L. Improving the metal composition of plants for reduced Cd and increased Zn content: molecular mechanisms and genetic regulations [J]. *Cereal Res Commun*, 2024, 52 (3): 901–918. DOI: 10.1007/s42976-023-00453-8.
- [49] Rizwan M, Ali S, Rehman M Z U, et al. A critical review on the effects of zinc at toxic levels of cadmium in plants [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2019, 26 (7): 6279–6289. DOI: 10.1007/s11356-019-04174-6.
- [50] Niu S, Wang T Q, Yang Y, et al. Effect of zinc fertilizer application on cadmium accumulation in wheat grain and its application risk [J]. *Huan Jing Ke Xue*, 2023, 44 (2): 984–990. DOI: 10.13227/j.hjks.202204185.
- [51] 姚澄, 周天宇, 樊广萍, 等. 不同锌肥对土壤镉有效性及小麦镉吸收转运的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(1): 19–29.

(责任编辑:胡志勇)