

张雯, 张鹏超, 易伯涛, 等. 甘蓝型油菜耐锰毒品种的鉴定及耐性机制解析[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(5): 80-87.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.05.008

甘蓝型油菜耐锰毒品种的鉴定及耐性机制解析

张雯¹, 张鹏超¹, 易伯涛¹, 孙明珠², 戴志刚³,
谢敏⁴, 王创¹, 徐芳森¹, 丁广大¹

1. 华中农业大学资源与环境学院/微量元素研究中心/农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070; 2. 江西省农业技术推广中心, 南昌 330046; 3. 湖北省耕地质量与肥料工作总站, 武汉 430070;
4. 江西省宜春市袁州区农业农村局, 宜春 336099

摘要 为探究酸性土壤中锰毒胁迫对不同油菜品种影响及油菜耐锰毒机制, 以41份甘蓝型油菜品种为材料, 通过营养液培养试验分析其在正常锰和锰毒害条件下的表型, 计算锰毒处理下的总鲜质量与正常处理下的总鲜质量的比值, 鉴定出锰毒耐受品种(manganese toxin tolerant variety, Mn-T) 427和敏感品种(manganese toxin sensitive variety, Mn-S) 907, 并初步解析油菜耐锰毒的生理机制。结果显示, 锰毒胁迫显著抑制敏感品种907生长, 其地上部鲜质量和光合速率显著下降, 叶绿素降解严重, 根系生长受到抑制; 同时, 敏感品种根中活性氧过量积累, 表明其抗氧化系统清除效率低下。相比之下, 耐受品种427表现出显著优势, 其生物量受限小, 能通过增加根长和根表面积等优化根系构型以适应锰毒胁迫, 叶绿素损失较小, 光合作用受锰毒影响小, 并具备更强的抗氧化能力。综上, 与锰毒敏感品种相比, 锰毒耐受品种通过调控根系生长、维持光合作用及增强抗氧化系统以缓解锰毒对其的损伤。

关键词 油菜; 锰毒; 极端品种; 根系; 光合作用; 抗氧化系统

中图分类号 S565.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)05-0080-08

土壤酸化已成为全球农业生产中日益突出的环境问题。在我国, 随着农业集约化程度的提高以及化肥的长期过量施用, 土壤酸化现象愈发严重^[1]。酸性土壤的pH值通常低于5.5, 其酸性条件会引发一系列土壤化学性质的改变, 对农作物的生长和产量造成严重影响^[2-4]。酸性土壤的主要障碍因子是H⁺毒害、铝毒、锰毒、养分(磷、钾、钙、镁、铜、硼等)有效性下降等, 抑制作物生长^[5]。在酸性土壤上, 当土壤氧化还原电位下降或pH值低于5.5时, 锰元素主要以Mn²⁺形态存在, 此时土壤中有效态锰的含量明显上升, 促使植物对其吸收量大幅增加, 进而引发锰毒害现象^[6-8]。我国是农业大国, 深入探究酸性土壤中锰毒对植物的影响以及植物对锰毒的适应机制, 对于保障我国农业可持续发展具有重要的现实意义。

锰是植物正常生命活动所必需的微量元素。作为金属离子, 它通过激活多种酶的活性, 参与调控植

物的生长发育、光合作用、呼吸作用、植物体内氧化还原状况调节等代谢过程^[6,9]。植物主要吸收利用二价锰离子(Mn²⁺)。Mn²⁺被根细胞吸收后, 经共质体途径转运至中柱, 随后通过木质部向上运输至地上部, 并主要富集于叶片等地上部器官, 尤其在细胞壁和液泡中分布显著^[10]。作为植物必需的微量元素, 锰在植物生理过程中主要通过作为金属激活剂或辅因子来调控多种酶的活性, 从而影响植物的代谢活动^[11-12]。

锰缺乏或过量(锰毒害)均会严重影响植物生长。缺锰主要抑制光合作用, 而锰毒害会抑制植株生长, 造成植株矮小和发育迟缓。其症状首先出现在地上部分: 幼叶发生黄化失绿, 老叶则出现暗褐色斑点, 严重时甚至导致植株干枯死亡^[6,12-13]。植物体内锰过量积累产生的毒害表现为生长速率、光合效率和叶绿素含量显著降低, 同时酶活性受到抑制且

收稿日期: 2025-07-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1900705)

张雯, E-mail: zhangw@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 丁广大, E-mail: dgd@mail.hzau.edu.cn

叶绿素结构遭到破坏^[6,12-17]。锰毒主要通过抑制光合作用和诱导氧化胁迫来影响叶片功能,进而阻碍生物量合成与植株生长。一方面,在光抑制过程中,过量的 Mn^{2+} 会干扰光系统Ⅱ(PSⅡ)中的电子传递,抑制光能转化效率,并诱发大量活性氧(reactive oxygen species, ROS)的生成,这一机制是光抑制理论的关键组成部分^[18];另一方面,锰过量引发强烈氧化胁迫,常导致叶片ROS(如 O_2^- 、 H_2O_2)过量积累,造成细胞质膜损伤^[19]。

我国是油菜生产大国,甘蓝型油菜作为我国主栽的油菜类型,其种植区域广泛分布于长江流域及其以南地区^[20-21]。然而,这些地区的土壤酸化问题较为严重,土壤有效锰含量较高,导致锰毒害也是制约我国油菜产业发展的重要因素之一^[1]。因此,深入研究锰毒害对油菜生产的影响及其适应机制,对推动我国油菜产业的绿色可持续发展具有重要价值^[22]。本研究从41份甘蓝型油菜品种中鉴定出锰毒耐受型品种427和敏感型品种907,在此基础上分析二者在不同锰浓度下的生长、光合特性、叶绿素含量以及抗氧化能力等的差异,旨在揭示不同甘蓝型油菜品种对锰毒胁迫的响应差异及适应机制,为酸性土壤高产油菜品种的选育提供种质资源和理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料与培养方法

以41份甘蓝型油菜品种为材料通过营养液培养试验分析其在正常锰和锰毒害条件下的表型。营养液培养方法参考文献[23]。试验设置正常锰($9.14 \mu\text{mol/L MnCl}_2$)和锰毒处理。锰毒处理为在正常营养液中额外添加 $300 \mu\text{mol/L MnCl}_2$,调pH值至5.0。选取生长5 d大小的油菜幼苗在正常锰和锰毒条件下培养3 d,测定各材料的地上部和根系鲜质量。通过计算相对鲜质量,即锰毒处理下的总鲜质量与正常处理下的总鲜质量的比值,确定耐锰毒品种和锰毒敏感品种。

利用筛选获得的锰毒耐受品种427和敏感品种907通过营养液培养试验进行苗期表型调查。试验设置4个锰浓度梯度(0、9、200、 $500 \mu\text{mol/L MnCl}_2$, pH 5.0)。选取5 d大小的油菜幼苗经各处理后12 d取样,测试各生理指标。光照培养室的光照强度为 $300\sim 320 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,光照周期为16 h光照/8 h黑暗,温度为 24°C ,湿度为 $65\%\sim 80\%$ 。

1.2 根系形态分析

利用根系扫描仪(Epson Perfection V700 Photo)对油菜的根系进行扫描,采用WinRHIZO软件分析提取不同处理下的根系形态参数,包括主根长、侧根数、侧根长、根表面积、根体积、根直径等。将软件参数设置为默认参数。

1.3 光合指标测定

叶片光合能力及光合响应曲线的测定:利用便携式光合系统(CIRAS-3, PPSystems, USA)测定不同处理下油菜叶片的光合参数。光合参数设置如下:叶面温度 25°C 、相对湿度 $60\%\sim 70\%$ 、光照强度 $1200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、气体流速 $300 \text{ mL}/\text{min}$ 。

气体交换参数测定: CO_2 参考设置浓度为 $400 \mu\text{mol}/\text{mol}$,每个叶片测定3~4 min,读数稳定后(± 0.1)记录净光合速率(net photosynthetic rate, P_n)、胞间 CO_2 浓度(intercellular CO_2 concentration, C_i)、气孔导度(stomatal conductance, G_s)和蒸腾速率(transpiration rate, T_r)。

1.4 叶绿素含量测定

称取0.1 g左右的鲜叶,加入10 mg碳酸钙粉末和1.5 mL 80%异丙醇,打样机磨碎样品。在低温(4°C) $12000 \text{ r}/\text{min}$ 离心10 min后,将上清液稀释5倍,以80%异丙醇为空白对照,使用酶标仪分别在663、647、470 nm波长下测定提取液的吸光值,计算叶绿素a、叶绿素和类胡萝卜素的含量^[24]。为防止色素降解,整个提取过程进行低温避光处理。

1.5 H_2O_2 和 O_2^- 含量测定

采用微量法测定过氧化氢(H_2O_2)、超氧阴离子(O_2^-)的含量,称取约0.1 g新鲜植物组织样品于预冷的1.5 mL离心管中,加入1 mL冷的提取缓冲液,在冰浴条件下充分研磨至匀浆。将匀浆液于 4°C 、 $12000 \text{ r}/\text{min}$ 离心10 min,取上清液用于后续测定。根据试剂盒(索莱宝,北京,中国)说明书对上清液进行过氧化氢(H_2O_2)、超氧阴离子(O_2^-)的含量测定。

1.6 数据统计分析

采用Microsoft Office Excel 2020处理数据,结合Graphpad制作图表,数据统计及方差相关性分析采用SPSS 22软件,文中所有显著性分析均采用Duncan's法。

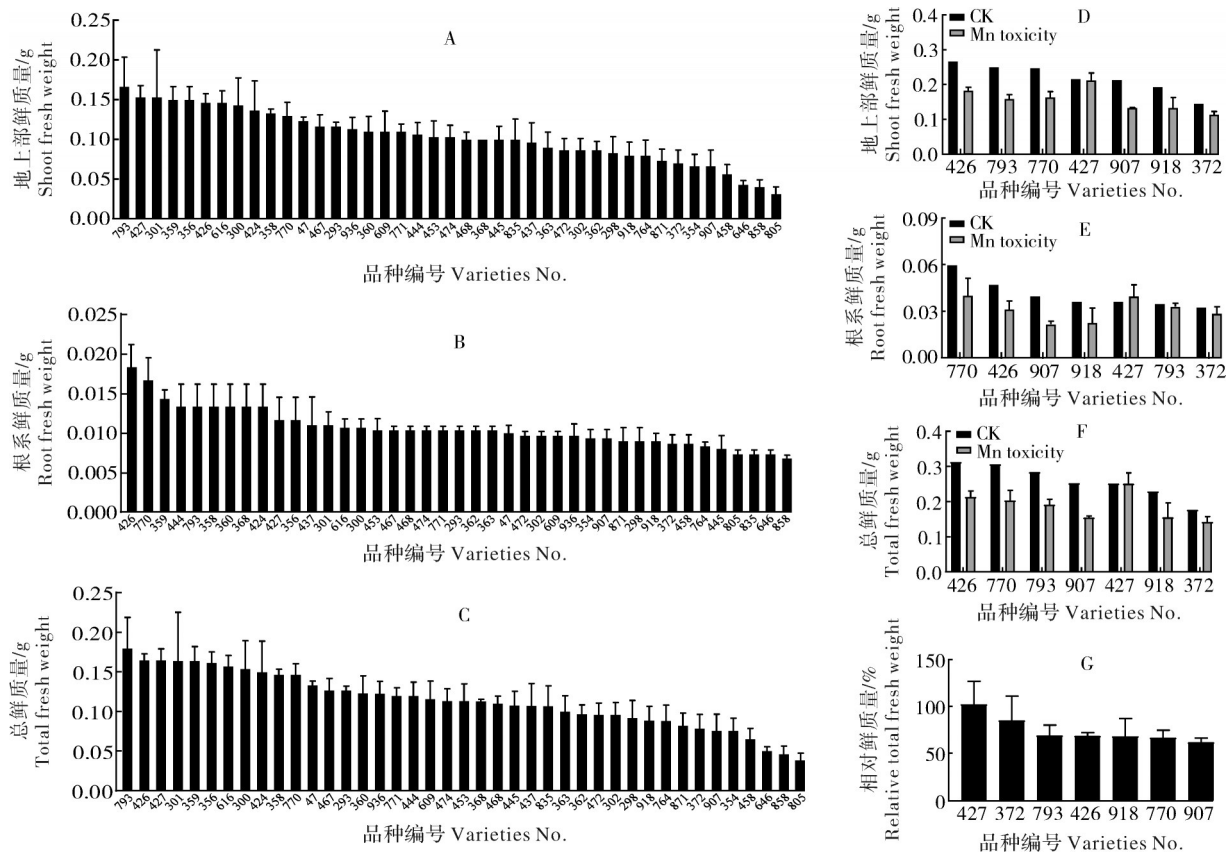
2 结果与分析

2.1 甘蓝型油菜耐锰毒极端品种的筛选

前期通过土培和营养液培养体系初步筛选到41个对酸胁迫响应具有显著差异的甘蓝型油菜品

种^[23]。进一步利用营养液体系对各品种在锰毒胁迫下进行表型调查,旨在鉴定出耐酸耐锰毒的极端品种。结果显示,锰毒胁迫下各材料地上部鲜质量为0.006 7~0.028 9 g/株,根系鲜质量为0.000 4~0.002 7 g/株,不同品种间变化幅度较大,表明品种间锰毒耐受性存在显著差异(图1A~C)。基于地上部、根系和总鲜质量的对比,初步筛选到7个耐锰毒极端品种,编号分别为372、426、427、770、793、907、918。通过比较正常与锰毒条件下各品种鲜质量的

差异并计算相对鲜质量,发现品种427在正常和锰毒条件下地上部、根及总鲜质量均无显著差异,且其相对总鲜质量最高(图1D~G),故确定427为耐锰毒品种;而品种907在2个处理中的地上部、根及总鲜质量均差异较大,相对总鲜质量最低(图1D~G),因此,确定907为锰毒敏感品种。以锰毒耐受品种427和敏感品种907作为锰毒耐性的油菜极端品种进行后续试验。



A: 锰毒处理后的地上部鲜质量; B: 锰毒处理后的根系鲜质量; C: 锰毒处理后的总鲜质量; D: 正常和锰毒处理的地上部鲜质量; E: 正常处理和锰毒处理的根系鲜质量; F: 正常处理和锰毒处理的总鲜质量; G: 相对总鲜质量。 A: Shoot fresh weight under Mn toxicity; B: Root fresh weight under Mn toxicity; C: Total fresh weight under Mn toxicity; D: Shoot fresh weight under normal and Mn toxicity treatments; E: Root fresh weight under normal and Mn toxicity treatments; F: Total fresh weight under normal and Mn toxicity treatments; G: Relative total fresh weight.

图1 41份甘蓝型油菜品种对锰毒胁迫的响应

Fig. 1 Responses of 41 *Brassica napus* varieties to manganese toxicity

2.2 极端品种响应锰毒的表型差异

分析不同锰毒耐性极端品种在不同锰浓度下的生长表型,以正常锰条件($9 \mu\text{mol/L MnCl}_2$)为对照,无锰条件下植株长势显著弱于对照。在 $200 \mu\text{mol/L MnCl}_2$ 胁迫下,锰耐受型品种427表现出显著的耐受性,其生长表型与对照无显著差异;而锰敏感型品种907则表现出显著的生长抑制、植株矮化和叶片萎蔫等症状(图2A)。在 $500 \mu\text{mol/L MnCl}_2$ 胁迫下这种

下降趋势更明显。统计分析表明,锰毒胁迫显著抑制了2个品种的生物量积累。地上部鲜质量降至对照的39.85%~91.62%,根部鲜质量减少至对照的64.41%~93.22%,其中敏感型品种907的生物量损失显著高于耐受型品种427(图2B、C)。

2.3 极端品种根系对锰毒的响应差异

对不同锰浓度处理下油菜苗期根系形态进行分析,发现锰胁迫显著影响油菜根长、根表面积、根尖

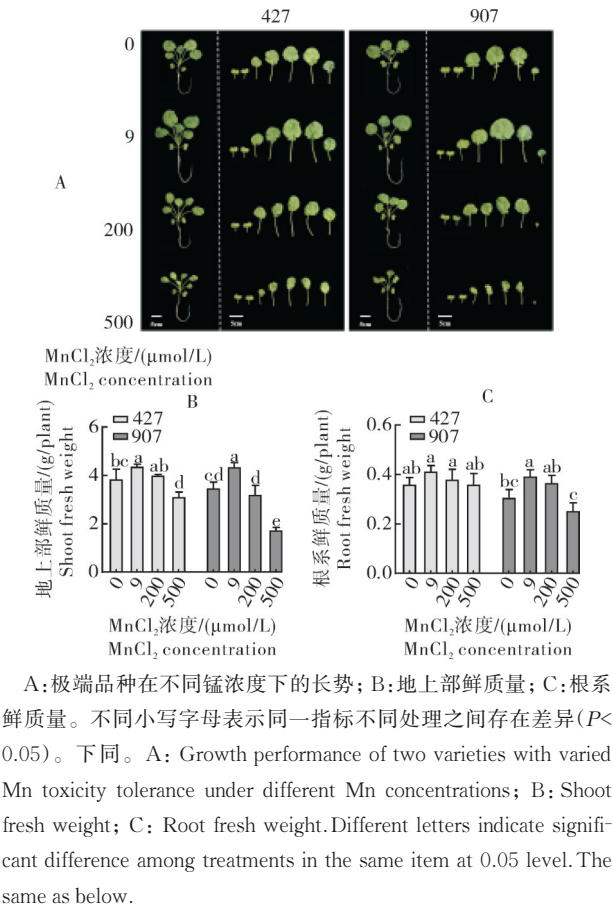


图2 不同锰浓度下两极端品种的表现型差异
Fig. 2 Phenotypic differences between the two extreme varieties at different manganese concentrations

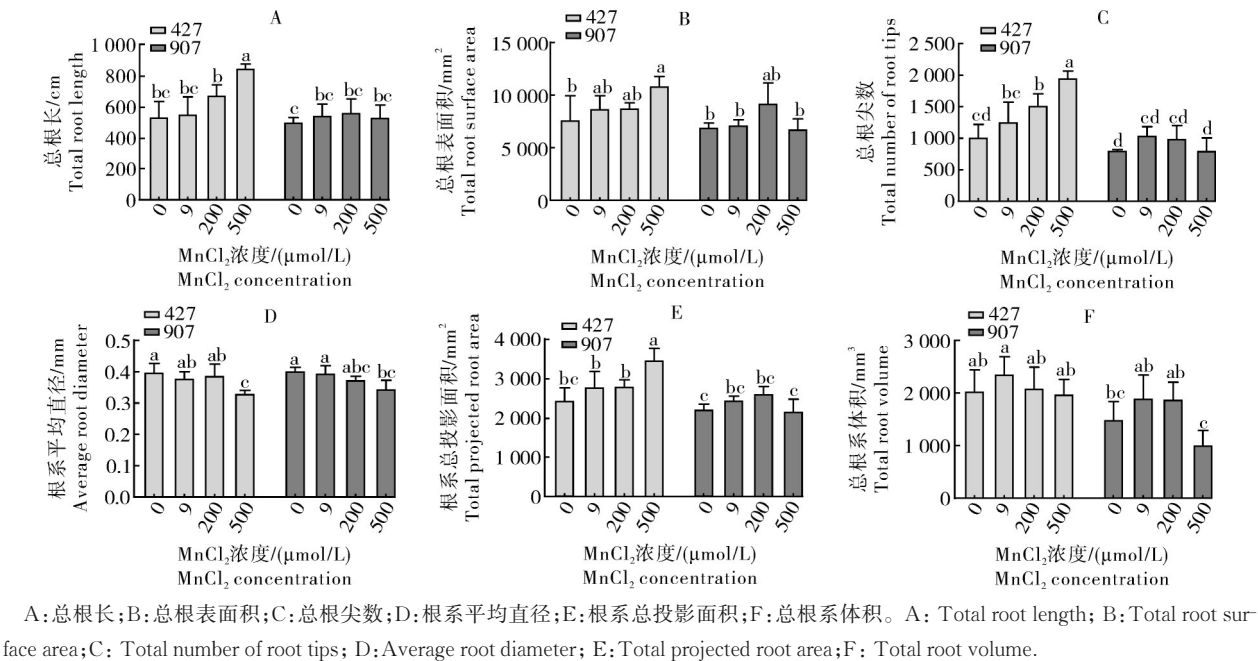


图3 不同锰浓度下两极端品种的根系形态变化
Fig. 3 Changes in root morphology between the two extreme varieties under different manganese concentrations

数、根系总投影面积、平均直径及总根系体积(图3)。在缺锰条件下(0 $\mu\text{mol/L}$ MnCl_2)锰毒敏感品种907和锰毒耐受品种427的总根长均显著下降,降幅达3.18%~7.82%,二者无显著差异。在锰毒条件下(200和500 $\mu\text{mol/L}$ MnCl_2),锰毒耐受品种427的总根长呈增加趋势,而锰毒敏感品种907的总根长则无明显变化(图3A)。除总根长外,不同锰浓度处理还显著影响根表面积、根尖数和根系总投影面积。随着环境中锰浓度的升高,锰毒耐受品种427的根表面积、根尖数和根系总投影面积均随之增加,然而锰毒敏感品种907的大部分根系形态指标包括根表面积、根尖数、根系总投影面积等均随锰浓度增加呈现先升高后降低的趋势。总体而言,在锰毒害条件下锰毒耐受品种427的根系要比锰毒敏感品种907的根系更加发达(图3)。

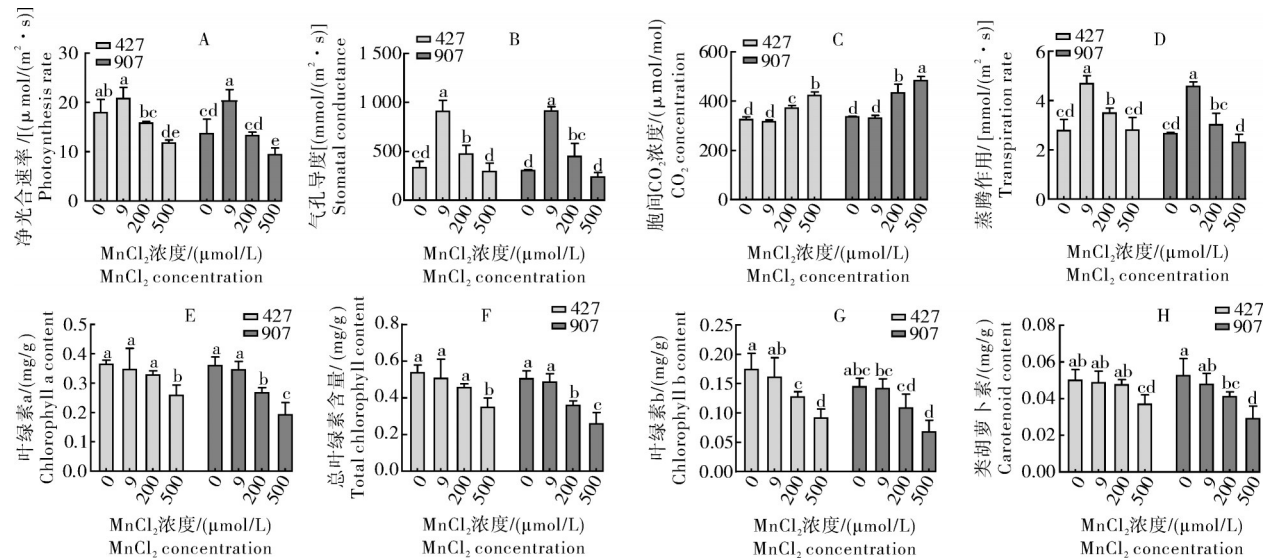
2.4 极端品种响应锰毒的光合作用差异

在不同锰浓度下,2个极端品种的光合能力表现出显著的基因型差异。随着锰浓度的升高,锰毒敏感品种907的净光合速率急剧下降,在500 $\mu\text{mol/L}$ MnCl_2 处理下较对照(9 $\mu\text{mol/L}$ MnCl_2)降低34.25%,表明其光能利用效率严重受损。相比之下,锰毒耐受品种427在500 $\mu\text{mol/L}$ MnCl_2 处理下仍能维持较高的 P_n (降幅为23.81%),说明其光合机构具有较强的锰耐受能力(图4A)。锰浓度变化还显著影响胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)和蒸

腾速率(T_r)。随着锰毒的加剧, C_i 呈显著上升趋势;而 G_s 和 T_r 均在正常锰条件($9 \mu\text{mol/L MnCl}_2$)下降幅度最大,在缺锰或锰毒下均显著降低(图4B、C、D)。上述结果表明,缺锰和锰毒均显著抑制了油菜的光合作用,其机制可能与类囊体膜损伤及电子传递受阻有关,暗示锰胁迫可能导致捕光复合体(light-harvesting complex II, LHC II)稳定性下降。

进一步分析2个极端品种功能叶中的叶绿素含量,结果显示,与正常锰条件($9 \mu\text{mol/L MnCl}_2$)相

比,缺锰($0 \mu\text{mol/L MnCl}_2$)处理对叶片叶绿素相关指标无显著影响;但随着锰浓度的增加,2个品种的叶绿素含量均呈下降趋势。在 $500 \mu\text{mol/L MnCl}_2$ 处理下,叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素及总叶绿素含量较正常锰条件分别下降25.23%~43.99%、42.66%~51.66%、23.61%~38.60%和30.76%~46.22%,且锰毒耐受品种的降幅普遍小于敏感品种(图4E~H),表明锰毒耐受品种的叶绿体结构具有更强的锰毒胁迫缓冲能力。



A:净光合速率;B:气孔导度;C:胞间 CO_2 浓度;D:蒸腾速率;E:叶绿素a含量;F:总叶绿素含量;G:叶绿素b含量;H:类胡萝卜素含量。

A: Photosynthesis rate; B: Stomatal conductance; C: CO_2 concentration; D: Transpiration rate; E: Chlorophyll a content; F: Total chlorophyll content; G: Chlorophyll b content; H: Carotenoid content.

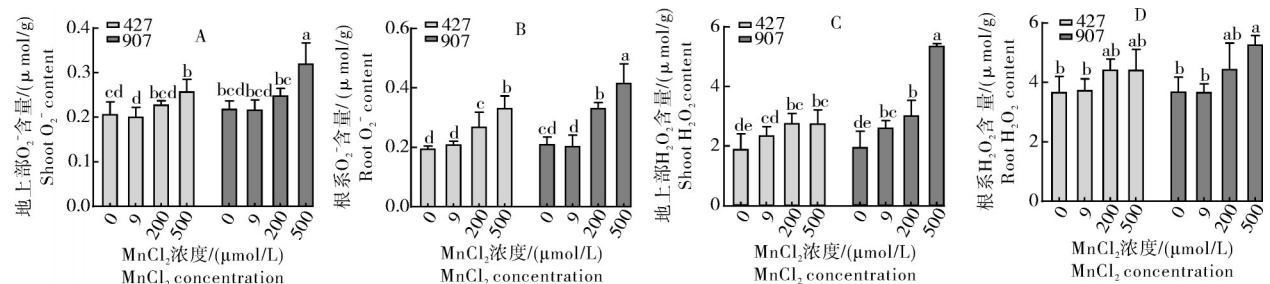
图4 不同锰浓度下两极端品种的光合参数及叶绿素含量

Fig. 4 Photosynthetic parameters and chlorophyll content of the two extreme varieties at different manganese concentrations

2.5 极端品种在不同锰浓度下 H_2O_2 和 O_2^- 的含量

2个极端品种的 H_2O_2 和 O_2^- 含量随着锰浓度的增加表现出显著差异(图5)。在缺锰处理下,与正常锰条件相比无论根系还是地上部活性氧的积累 H_2O_2

和 O_2^- 含量均无显著差异,表明植物体内活性氧水平不受缺锰条件的影响。然而,在锰毒处理后地上部和根系 H_2O_2 和 O_2^- 的含量显著增加,并且在锰毒浓度为 $500 \mu\text{mol/L MnCl}_2$ 时呈现显著差异,表明在锰



A:地上部 O_2^- 含量;B:根系 O_2^- 含量;C:地上部 H_2O_2 含量;D:根系 H_2O_2 含量。A: Shoot O_2^- content; B: Root O_2^- content; C: Shoot H_2O_2 content; D: Root H_2O_2 content.

图5 不同锰浓度下2个极端品种的活性氧含量

Fig. 5 Reactive oxygen species content of the two extreme varieties at different manganese concentrations

毒处理(500 $\mu\text{mol/L}$ MnCl_2)时其氧化胁迫更为严重。根系活性氧(ROS)分析显示,锰毒条件下2个品种均通过激活抗氧化系统响应胁迫,与正常锰条件相比,500 $\mu\text{mol/L}$ MnCl_2 处理下,极端品种根系的 O_2^- 含量分别增加58.21%和102.24%, H_2O_2 含量分别增加18.18%和43.31%(图5)。地上部活性氧的结果与根系趋势一致,在500 $\mu\text{mol/L}$ MnCl_2 处理下活性氧积累显著高于正常锰条件,且敏感品种与耐性品种相比具有更高水平的ROS爆发(图5)。这一结果表明敏感品种细胞遭受到更严重的氧化损伤。

3 讨论

土壤酸化是我国乃至全球农业生产中面临的严峻挑战^[1,25-26]。我国油菜主产区土壤酸化现象日益加剧,导致土壤中锰的生物有效性显著增加,油菜锰毒害时有发生^[2,4,20-21,26-27]。研究表明,小麦对锰毒胁迫的响应存在显著的基因型差异。随着锰浓度的升高,锰毒敏感品种的地上部和根干质量显著降低,毒害症状明显加剧,而耐受品种的毒害症状较轻^[28]。此外,研究人员在有效锰含量较高的酸性土壤上对150个水稻重组自交系的长势进行了调查,成功鉴定出多个锰毒抗性的基因型,该研究利用自然土壤模拟田间生产条件,为作物抗性育种提供了切实可行的筛选途径^[29]。杨曙^[26]将田间试验和水培试验相结合,筛选出锰敏感及抗性基因型,建立了多平台协同评估体系,为不同作物锰毒耐性研究提供了综合性的分析思路。本研究通过锰毒营养液体系对前期筛选获得的极端材料进行验证,最终成功鉴定出2个锰毒耐性极端品种,为后续研究提供了关键的试验材料(图1)。

本研究表明,锰毒胁迫抑制了不同油菜品种的生长,主要表现为生物量积累受阻和植株萎蔫等,其地上部和根部鲜质量均显著下降(图2)。值得注意的是,敏感品种的生物量下降幅度显著高于耐受品种,表明不同油菜品种对锰毒的耐受能力存在显著差异(图2)。在根系形态方面,锰胁迫显著影响根长和根表面积等根系形态参数。其中,耐受品种随着锰浓度的增加总根长也呈现增加的趋势,而敏感品种则无明显变化(图3)。这一结果表明,耐受品种可能通过调整根系结构,增强对水分和养分的吸收能力,以维持植物在锰毒环境中的生长,从而展现出更强的适应性^[6]。

锰是植物进行光合作用不可缺少的元素之一,

作为叶绿体的重要组成部分,参与构成叶绿体膜、光合电子传递和水光解过程^[6,8,11-12,23-27]。本研究结果显示,随着锰浓度的升高,敏感品种的净光合速率急剧下降,而耐受品种仍能维持较高的光合速率。此外,锰胁迫还显著影响胞间 CO_2 浓度、气孔导度和蒸腾速率(图4)。表明耐受品种在锰胁迫下能够保持较好的光合性能,从而维持较高的生物量积累。叶绿素作为光合作用的关键色素,在2个极端品种中的含量虽均有所下降,但耐受品种的降幅普遍小于敏感品种(图4),进一步证明耐受品种在锰胁迫下具有更好的光合性能。在植物细胞代谢过程中, H_2O_2 和 O_2^- 作为核心ROS成员,直接驱动氧化损伤的级联反应^[11,19]。本研究发现,随着锰毒浓度的升高, H_2O_2 和 O_2^- 的含量显著增加,且敏感品种的氧化胁迫更为严重(图5)。说明耐受品种具有更强的抗氧化能力,能够更有效地清除过量的ROS,从而减轻氧化胁迫对植物的伤害^[11]。

综上,本研究通过筛选获得锰毒耐受品种和锰毒敏感品种,系统比较了锰毒胁迫对油菜生长的影响以及品种间的差异。结果表明,耐锰品种在锰胁迫下可通过维持更优的根系构型、较高的光合效率、相对稳定的叶绿素含量以及更高效的抗氧化防御系统,显著缓解锰毒害带来的生长抑制。本研究结果可为今后选育适宜酸性土壤种植的高产、耐逆油菜品种提供理论依据和种质资源。

参考文献 References

- [1] 赵学强,潘贤章,马海艺,等.中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J].土壤学报,2023,60(5):1248-1263. ZHAO X Q, PAN X Z, MA H Y, et al. Scientific issues and strategies of acid soil use in China[J]. Acta pedologica sinica, 2023, 60(5): 1248-1263 (in Chinese with English abstract).
- [2] KOCHIAN L V, PIÑEROS M A, LIU J P, et al. Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance[J]. Annual review of plant biology, 2015, 66: 571-598.
- [3] LIU C Y, JIANG M T, YUAN M M, et al. Root microbiota confers rice resistance to aluminium toxicity and phosphorus deficiency in acidic soils [J]. Nature food, 2023, 4 (10): 912-924.
- [4] MUNYANEZA V, ZHANG W, HAIDER S, et al. Strategies for alleviating aluminum toxicity in soils and plants [J]. Plant and soil, 2024, 504(1): 167-190.
- [5] SHAO J F, YAMAJI N, SHEN R F, et al. The key to Mn homeostasis in plants: regulation of Mn transporters [J]. Trends in plant science, 2017, 22(3): 215-224.
- [6] FERNANDO D R, LYNCH J P. Manganese phytotoxicity:

- new light on an old problem[J]. *Annals of botany*, 2015, 116(3):313-319.
- [7] 张玲玉,赵学强,沈仁芳.土壤酸化及其生态效应[J].生态学杂志, 2019, 38(6):1900-1908. ZHANG L Y, ZHAO X Q, SHEN R F. Soil acidification and its ecological effects[J]. *Chinese journal of ecology*, 2019, 38(6):1900-1908 (in Chinese with English abstract).
- [8] LI P, SONG A L, LI Z J, et al. Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating both physiological processes and expression of genes associated with photosynthesis in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Plant and soil*, 2015, 397(1):289-301.
- [9] SCHMIDT S B, JENSEN P E, HUSTED S. Manganese deficiency in plants: the impact on photosystem II [J]. *Trends in plant science*, 2016, 21(7):622-632.
- [10] PAN G, ZHANG H P, LIU W S, et al. Integrative study of subcellular distribution, chemical forms, and physiological responses for understanding manganese tolerance in the herb *Macleaya cordata* (Papaveraceae)[J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2019, 181:455-462.
- [11] 张玉秀,李林峰,柴团耀,等.锰对植物毒害及植物耐锰机理研究进展[J].植物学报, 2010, 45(4):506-520. ZHANG Y X, LI L F, CHAI T Y, et al. Mechanisms of manganese toxicity and manganese tolerance in plants[J]. *Chinese bulletin of botany*, 2010, 45(4):506-520 (in Chinese with English abstract).
- [12] YAMAJI N, MA J F. The node, a hub for mineral nutrient distribution in graminaceous plants[J]. *Trends in plant science*, 2014, 19(9):556-563.
- [13] YAMAJI N, SASAKI A, XIA J X, et al. A node-based switch for preferential distribution of manganese in rice [J/OL]. *Nature communications*, 2013, 4:2442[2025-07-17]. <https://doi.org/10.1038/ncomms3442>.
- [14] 张俊伶.植物营养学[M].北京:中国农业大学出版社, 2021. ZHANG J L. *Plant nutrition* [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2021 (in Chinese).
- [15] ST CLAIR S B, LYNCH J P. Differences in the success of sugar maple and red maple seedlings on acid soils are influenced by nutrient dynamics and light environment [J]. *Plant, cell & environment*, 2005, 28(7):874-885.
- [16] ST CLAIR S B, LYNCH J P. Element accumulation patterns of deciduous and evergreen tree seedlings on acid soils: implications for sensitivity to manganese toxicity[J]. *Tree physiology*, 2005, 25(1):85-92.
- [17] ST CLAIR S B, LYNCH J P. Photosynthetic and antioxidant enzyme responses of sugar maple and red maple seedlings to excess manganese in contrasting light environments [J]. *Functional plant biology*, 2004, 31(10):1005-1014.
- [18] HUANG Y L, YANG S, LONG G X, et al. Manganese toxicity in sugarcane plantlets grown on acidic soils of Southern China [J/OL]. *PLoS one*, 2016, 11(3):e0148956[2025-07-17]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148956>.
- [19] LIDON F C, TEIXEIRA M G. Oxy radicals production and control in the chloroplast of Mn-treated rice[J]. *Plant science*, 2000, 152(1):7-15.
- [20] 李谷成,牛秋纯,冷博峰,等.新时代十年:我国油菜产业发展与路径选择[J].中国油料作物学报, 2024, 46(2):228-235. LI G C, NIU Q C, LENG B F, et al. The decade of rapeseed industry in the new era: development and its path choice [J]. *Chinese journal of oil crop sciences*, 2024, 46(2):228-235 (in Chinese with English abstract).
- [21] 国家统计局.中国统计年鉴 2023[M].北京:中国统计出版社, 2023. National Bureau of Statistics. *China statistical yearbook 2023* [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2023 (in Chinese).
- [22] 冉文昊,徐芳森,史仕军,等.我国酸性土壤区油菜耐酸高产技术与综合利用模式[J].华中农业大学学报, 2025, 44(4):1-10. RAN W H, XU F S, SHI S J, et al. Acid soil-tolerant and high-yield techniques and comprehensive utilization models for rapeseed in acid soil regions of China [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2025, 44(4):1-10 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张雯,黄益丹,张鹏超,等.甘蓝型油菜耐铝极端品种筛选及耐铝生理机制初步解析[J].华中农业大学学报, 2023, 42(6):154-163. ZHANG W, HUANG Y D, ZHANG P C, et al. Screening of extreme aluminum-tolerant varieties and preliminary analysis of physiological mechanisms of aluminum tolerance in *Brassica napus* [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2023, 42(6):154-163 (in Chinese with English abstract).
- [24] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:北京高等教育出版社, 2006. Gao J F. *Laboratory manual for plant physiology* [M]. Beijing: Beijing Higher Education Press, 2006 (in Chinese).
- [25] 王寅,鲁剑巍,李小坤,等.施肥对红壤地区直播油菜生长、产量及养分吸收的影响[J].中国土壤与肥料, 2012(1):38-42. WANG Y, LU J W, LI X K, et al. Effects of fertilizers application on growth, seed yield, NPK absorption and accumulation of direct-seeding rapeseed in red soil [J]. *Soil and fertilizer sciences in China*, 2012(1):38-42 (in Chinese with English abstract).
- [26] 杨曙.甘蔗幼苗锰毒黄化及其抗性机制研究[D].南宁:广西大学, 2019. YANG S. Study on the mechanisms of excessive manganese-induced chlorosis and its [D]. Nanning: Guangxi University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [27] 王汉中.我国油菜产业发展的历史回顾与展望[J].中国油料作物学报, 2010, 32(2):300-302. WANG H Z. Review and future development of rapeseed industry in China [J]. *Chinese journal of oil crop sciences*, 2010, 32(2):300-302 (in Chinese with English abstract).
- [28] KHABAZ-SABERI H, RENGEL Z, WILSON R, et al. Varia-

tion of tolerance to manganese toxicity in Australian hexaploid wheat[J]. Journal of plant nutrition and soil science, 2010, 173 (1): 103-112.

[29] WANG Y X, WU P, WU Y R, et al. Molecular marker analysis of manganese toxicity tolerance in rice under greenhouse conditions[J]. Plant and soil, 2002, 238(2): 227-233.

Identification of manganese tolerant varieties of *Brassica napus* and their tolerance mechanisms

ZHANG Wen¹, ZHANG Pengchao¹, YI Botao¹, SUN Mingzhu², DAI Zhigang³,
XIE Min⁴, WANG Chuang¹, XU Fangsen¹, DING Guangda¹

1. College of Resources and Environment/Microelement Research Center/Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Jiangxi Agricultural Technology Extension Center, Nanchang 330046, China;

3. Hubei Cultivated Land Quality and Fertilizer Station, Wuhan 430070, China;

4. Yuanzhou District Agriculture and Rural Affairs Bureau of Yichun City, Jiangxi Province, Yichun 336099, China

Abstract To explore the effects of manganese toxicity stress on different rapeseed varieties and the mechanisms of manganese tolerance in rapeseed under acidic soil conditions, 41 varieties of *Brassica napus* were used to analyze their phenotypes under normal manganese and manganese toxicity conditions with nutrient solution (300 $\mu\text{mol/L}$ MnCl_2) cultivation to study the effects of manganese toxicity in acidic soil on different varieties of *B. napus* and the mechanisms of manganese toxicity tolerance in *B. napus*. The ratio of total fresh mass under manganese toxicity treatment to total fresh mass under normal treatment was calculated. The manganese toxin tolerant variety 427 (Mn-T 427) and the manganese toxin sensitive variety 907 (Mn-S 907) were identified. The physiological mechanism of manganese tolerance in *B. napus* was preliminarily analyzed. The results showed that manganese toxicity stress significantly inhibited the growth of Mn-S 907, resulting in a significant decrease in shroot fresh weight and photosynthetic rate, severe degradation of chlorophyll, and inhibition of root growth. The excessive accumulation of reactive oxygen species (ROS) in the roots of Mn-S 907 indicated a low clearance efficiency of their antioxidant system. In contrast, Mn-T 427 had significant advantages including less limitation of biomass and the ability to optimize root architecture by increasing root length and surface area to adapt to manganese toxicity stress. The loss of chlorophyll was smaller, photosynthesis was less affected by manganese toxicity, and it had stronger antioxidant capacity. Compared with Mn-S 907, Mn-T 427 alleviates the damage caused by manganese toxicity through regulating root growth, maintaining photosynthesis, and enhancing antioxidant systems. It will provide important germplasm resources and a theoretical foundation for breeding *B. napus* with high yield in acidic soils.

Keywords *Brassica napus* L.; manganese toxicity; extreme varieties; root; photosynthesis; antioxidant systems

(责任编辑: 张志钰)