网络出版时间:2025-08-07 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.02.015

根边缘细胞对荞麦根尖莠去津毒害的缓解效应

史兴海[1],王子然[1],丁志刚[2],李秀莲[1],任君[1],杨小环[1],马金虎[3]
(1 山西农业大学 农学院,山西 晋中 030801;2 山西省科技厅山西省科技成果转移转化促进与数据监测中心,山西 太原 030000;3 山西农业大学 创新创业学院,山西 晋中 030801)

[摘 要] 【目的】探究根边缘细胞(RBC)对荞麦根尖莠去津毒害的缓解效应。【方法】以晋荞 8 号(JB)和品甜荞 2 号(P2) 2 个荞麦品种为材料,采用根悬空培养的方法,研究不同浓度莠去津对荞麦根边缘细胞数量、存活率、凋亡率以及初生根抗氧化系统、根系活力的影响。【结果】莠去津对荞麦根边缘细胞和幼根生长有毒害作用,其中 7.5 mL/L 莠去津处理时,晋荞 8 号(JB)和品甜荞 2 号(P2)的 RBC 数量较其对照分别显著降低 18.6%和 32.0%,而其凋亡率较对照分别升高 251.5%和 328.3%。莠去津对荞麦根产生氧化胁迫伤害,诱导荞麦幼根抗氧化酶 POD、SOD 和 CAT 活性升高,活性氧和 MDA 积累,根膜透性增大,而根系活力下降。其中 3.75 mL/L 莠去津处理时,与移除 RBC 的根尖相比,晋荞 8 号(JB)和品甜荞 2 号(P2)2 个荞麦品种保留 RBC 的根尖 H_2O_2 含量分别降低 45.6%和 70.5%,$O_2^{\cdot-}$ 含量分别降低 33.6%和 29.0%,SOD 活性分别降低 4.6 %和 4.1%,POD 活性分别降低 36.0%和 54.8%,CAT 活性分别降低 17.4%和 16.9%,相对电导率分别降低 54.2%和 33.7%,MDA 含量分别降低 36.2%和 55.1%,根系活力分别提高 40.5%和 29.8%。【结论】在一定浓度莠去津胁迫下,荞麦根尖通过产生较多的 RBC,并通过 RBC 分泌更多的黏胶层螯合莠去津,从而减轻莠去津对根尖的伤害。

[关键词] 荞麦;根边缘细胞;除草剂;莠去津;初生根;胁迫伤害
[中图分类号] S517 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)02-0143-09

Alleviation effect of border cells on atrazine toxicity in *Fagopyrum esculentum* root tip

SHI Xinghai[1], WANG Ziran[1], DING Zhigang[2], LI Xiulian[1], REN Jun[1], YANG Xiaohuan[1], MA Jinhu[3]
(1 *College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong, Shanxi* 030801, *China*; 2 *Shanxi Provincial Science and Technology Achievements Transfer and Transformation Promotion and Data Monitoring Center, Taiyuan, Shanxi* 030000, *China*; 3 *School of Innovation and Entrepreneurship, Shanxi Agricultural University, Jinzhong, Shanxi* 030801, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aims to explore the alleviation effect of buckwheat root border cells (RBC) on the atrazine toxicity of buckwheat root tip. 【Method】 With two buckwheat varieties, Jinqiao 8 (JB) and Pintianqiao 2 (P2) as the study material, the effects of different concentrations atrazine on the number, survival rate, apoptosis rate of RBCs, antioxidant system of primary root and root activity of buckwheat root were analyzed. 【Result】 Atrazine had toxic effects on the growth of root border cells and young roots of buckwheat. Under treatment of 7.5 mL/L atrazine, compared with CK, the RBC numbers of JB and P2 were significantly reduced by 18.6% and 32.0%, respectively, and RBC apoptosis was increased by 251.5% and 328.3%, respectively. Atrazine caused oxidative stress damage to buckwheat roots, inducing

[收稿日期] 2024-10-27 [修回日期] 2025-03-17
[基金项目] 山西省科技成果转化引导专项(202304021301054);山西农业大学学科技创新提升工程项目(CXGC2023001)
[作者简介] 史兴海(1971—),男,山西岚县人,副研究员,主要从事荞麦生理研究。E-mail:Sxhai128@163.com
[通信作者] 马金虎(1967—),男,河南武陟人,教授,主要从事作物化学调控和逆境生理研究。E-mail:mjh109@126.com

the increase of antioxidant enzymes POD, SOD and CAT activities, the accumulation of reactive oxygen species and MDA, the increase of root membrane permeability, and the decrease of root activity. Under treatment with 3.75 mL/L atrazine, the H_2O_2 contents of RBC-retained root tips of two buckwheat cultivars, JB and P2, were 45.6% and 70.5% lower than those of RBC-removed root tips. The O_2^- contents of the RBC-retained root tips were 33.6% and 29.0% lower than those of RBC-removed root tips. The SOD activity in RBC-retained root tips of JB and P2 was 4.6% and 4.1% lower than that of RBC-removed root tips. The POD activity of RBC-retained root tips was 36.0% and 54.8% lower than that of RBC-removed root tips. The CAT activity of RBC-retained root tips was 17.4% and 16.9% lower than that of RBC-removed root tips. The relative conductivity of the RBC-retained root tips of JB and P2 was 54.2% and 33.7% lower than that of RBC-removed root tips. The MDA contents of RBC-retained root tips were 36.2% and 55.1% lower than those of RBC-removed root tips. The root activity of RBC-retained root tips of JB and P2 was 40.5% and 29.8% higher than that of RBC-removed root tips.【Conclusion】 Under the atrazine stress of a certain concentration, buckwheat root tips mitigate damage by producing a greater number of root border cells (RBCs), which secrete more mucilage to chelate atrazine, thereby alleviating its toxic effects on the root tips.

Key words: *Fagopyrum esculentum*; root border cell; herbicide; atrazine; primary roots; stress injury

荞麦(*Fagopyrum esculentum* Moench)是双子叶植物纲蓼科荞麦属一年生植物,含有丰富的营养和保健物质,具有很好的开发应用前景[1-2]。荞麦的生长期较短,适应性强,且耐寒耐瘠,可在高海拔冷凉山区和高寒瘠薄地种植,在农业种植资源配置中可作为备荒作物[3-4]。近年来,荞麦种植面积不断增加,在山西排在小宗作物之首。田间杂草是影响荞麦产量的主要因素之一。荞麦不耐除草剂,大田除草主要靠人工除草,费工费时,生产效率低[3]。

莠去津是一种三嗪类除草剂,具有杀草谱广、成本低等特点,是目前生产上广泛应用的除草剂,其主要通过内吸传导由植物根系吸收并向上传导,进而影响植物光合作用,抑制植物的正常生长发育[5-6]。CHOWDHURY 等[7]报道,土壤莠去津残留会降低小麦、苜蓿和扁豆的出苗率,抑制光合作用,影响植株生长。兰景宇[8]研究报道,莠去津用于荞麦播后土壤喷施,对荞麦出苗和幼苗生长有明显的毒害。王晓娜[3]研究发现,莠去津用于荞麦出苗后茎叶喷施,对荞麦幼苗产生中度毒害。

根边缘细胞(root border cell, RBC)是从植物根冠游离出来并聚集在根尖周围以保护根尖的一群特殊细胞,被视作植物根尖抵御生物与非生物胁迫的"第一道防线"[9]。在逆境条件下,根边缘细胞会向胞外释放抗生素、特异性酶类、糖类等化学物质来抑制或促进根际周围微生物的生长或螯合一些有毒化学物质,调节根际环境,保护根尖免受伤害[10-11]。莠去津除草剂用于荞麦田化学除草的相关报道较少,其对荞麦早期幼苗根的毒害及缓解的生理和细胞学机制尚不清楚。为此,本试验研究了莠去津对荞麦根边缘细胞和初生根的毒害效应,从细胞和生理学层面解析莠去津对荞麦幼苗早期生长的毒害机制,以期为莠去津在荞麦生产上的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

荞麦品种品甜荞2号(P2)、晋荞8号(JB),由山西农业大学农学院荞麦育种组提供。莠去津,由吉林金秋农药有限公司生产,购于当地农药门市部。

1.2 材料培养及处理

挑选适量、均匀、饱满的荞麦种子,用2%次氯酸钠溶液消毒5 min,去离子水洗去残液,将种子用干净的湿毛巾包裹,放于瓷盘中,置于25 ℃培养箱中催芽。种子露白后,挑选萌发生长一致的种子待用。取若干直径10 cm、高5 cm的PVC塑料管,将消毒的单层纱布用橡皮筋固定在管口上。将挑选好的萌发种子置于纱布上,上盖3层湿纱布,将PVC管转入加有适量去离子水的发芽盒中,每盒2管,将发芽盒移入25 ℃培养箱中,黑暗条件下进行根悬空培养并进行如下处理。

第1组:待根长至0.5～1.0 cm时,取12个PVC管分为4组(4个处理)。将莠去津按说明书推荐使用浓度稀释10倍、1倍和原推荐浓度,即0.75, 3.75和7.5 mL/L莠去津对根进行喷雾处理,隔6 h再喷1次,共喷施3次,以喷去离子水为对照。待

对照根长至 2.0～2.5 cm 时，不同处理分别取 5 个幼根，剪取 1.0 cm 根尖，用吖啶橙-溴乙锭染色(acridine orange-ethidium bromide，AO-EB)复合染液染色，进行根尖原位观察拍照；不同处理另取 30 个根尖，用于测定果胶甲基酯酶(pectin methylesterase，PME)活性；不同处理再取 30 个根尖，制备根边缘细胞悬液，统计根边缘细胞(RBC)数。

第 2 组：待根长至 2.0～2.5 cm 时，剪取 200 个根尖，同上述方法制备根边缘细胞悬液。将细胞悬液平分为 4 份，离心弃上清液后分别加 0.75，3.75 和 7.5 mL/L 莠去津 60 μL，振荡混匀进行 RBC 离体处理，随后 10 ℃下处理 6 h，之后测定 RBC 存活率、凋亡率、黏胶层厚度。以加去离子水为对照。

第 3 组：待根长至 2.0～2.5 cm 时，参照龚意豫等[12]和汪利沙等[13]的方法，取待用的根，一半根用湿润棉花轻轻擦拭根尖以移除根边缘细胞，另一半不除去根边缘细胞，然后将根再小心转移到 PVC 管上。用 3.75 mL/L 莠去津对保留和移除 RBC 的根尖进行喷雾处理，隔 3 h 后再补喷 1 次，以喷去离子水为对照。25 ℃下处理 6 h 后剪取根，测定根长，根系活力，超氧化物歧化酶(superoxide dismutase，SOD)、过氧化物酶(peroxidase，POD)、过氧化氢酶(catalase，CAT)活性，过氧化氢(H_2O_2)、丙二醛(malonaldehyde，MDA)、超氧阴离子(O_2^-)含量及细胞膜透性。另取适量根尖进行二氨基联苯胺(diaminobenzidine，DAB)和活性氧(Reactive oxygen species，ROS)染色，并观察拍照，每处理重复 6 次。

1.3　测定指标及方法

根尖原位观察和 RBC 数量、存活率测定：参考胡忠良等[14]的方法。每个处理挑选 30 个生长一致的根，剪取 5 mm 长根尖，置于盛有 2 mL 1 mol/L MS(murashige and skoog，MS) 培养液的离心管中，振荡器振荡 30 s，吸出细胞悬液，再用 0.5 mL MS 培养液冲洗根尖 2 次。收集细胞悬液，用 1 mL 微量注射器抽打 3 次，使成团的 RBC 分散开。将细胞悬液在 4 ℃、500 r/min 离心 2 min，弃去部分上清液，获得分散均匀、浓度适宜的细胞悬液备用。取 30 μL 不同处理的 RBC 悬液，加入 20 μL AO-EB 复合染液(AO 和 EB 体积比 1∶1)，避光染色 1 min 后在荧光显微镜(蓝色激发光)10 倍镜下观察拍照。每处理选取 10 个视野拍照，统计 RBC 总数、活细胞和死细胞数量(活细胞呈现绿色荧光，凋亡、死亡细胞呈橘红色或红色荧光)。每处理切取 10 个根尖置于载玻片上，滴加少量 AO-EB 复合染液后立即在显微镜下观察拍照。

RBC 凋亡率的测定：参照马春红等[15]的方法。取 30 μL RBC 悬液，加入 30 μL Hochest-33258 染液，暗处染色 5 min 后在紫外 UV 激发光下观察活细胞与凋亡细胞的形态特征并计数。

RBC 黏胶层厚度的测定：参照 QIAO 等[16]的方法。取 30 μL RBC 悬液，加 30 μL 墨汁混匀，吸取 30 μL，在普通光源下显微观察拍照。不同处理选取 10 个细胞测量 RBC 黏胶层厚度，每个细胞测定 3 个不同位置，取平均值。

根冠果胶甲基酯酶(PME)活性测定：参照马金虎等[17]的方法。不同处理随机剪取 30 个 5 mm 的根尖，加入 400 μL PME 提取液，冰浴研磨后转移至离心管中，再用 400 μL PME 提取液清洗研钵 1 次，合并入离心管中，置于 4 ℃冰箱中，每隔 20 min 振荡 1 次，1 h 后 4 ℃、15 000 r/min 离心 10 min。取 300 μL 酶液加入 4 mL PME 反应液，37 ℃水浴 2 h，525 nm 波长下测定 OD 值，根据标准曲线计算 PME 活性。

SOD 活性测定采用氮蓝四唑还原法，POD 活性测定采用愈创木酚法，CAT 活性测定采用紫外吸收法，MDA 含量测定采用硫代巴比妥酸法，根长使用扫描仪进行扫描拍照后采用 ImageJ 软件测量，根系活力测定采用氯化三苯基四氮唑(TTC)还原法，H_2O_2 含量测定采用分光光度法，O_2^- 含量测定参照李忠光等[18]的方法。利用 DDS-Ⅱ型电导仪测定根细胞膜透性。二氨基联苯胺(DAB)染色：使用北京金克隆生物技术有限公司生产的活性氧(DAB)检测试剂盒染色测定。ROS 荧光探针染色：采用北京盒子生工科技有限公司生产的活性氧检测试剂盒进行染色测定。

1.4　数据统计与分析

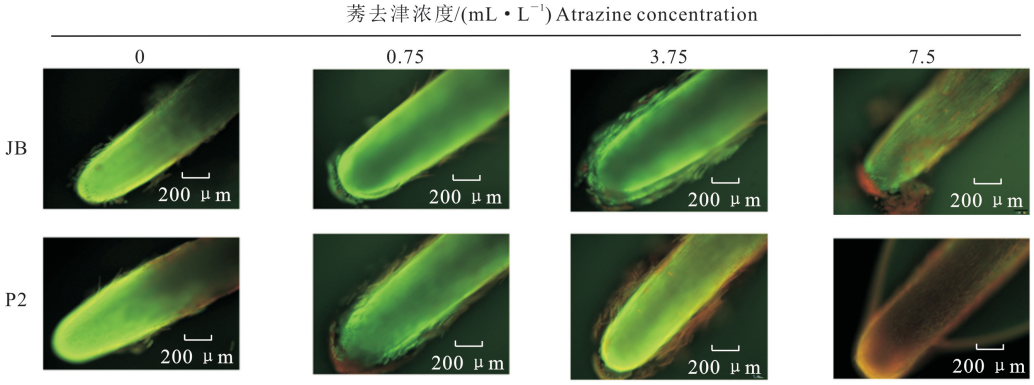
本研究采用 Microsoft Excel 2019 对试验数据进行统计分析，用 GraphPad Prism8 软件绘图，用 Adobe Photo-shop 2019 CC 进行辅助绘图，用 SPSS 23.0 软件对测定指标进行比较(Duncan's 法)，显著水平均为 $P<0.05$。

2　结果与分析

2.1　莠去津对荞麦 RBC 数量和根 PME 活性的影响

从图 1 可以看出，随莠去津处理浓度的升高，附着在荞麦根尖表面的 RBC 开始出现死亡现象。由图 2 可知，随莠去津处理浓度升高，荞麦根尖 RBC 数量呈现先增加后减少的趋势，其中 3.75 mL/L 莠去津处理时，JB、P2 荞麦品种 RBC 数量较其对照分

别增加了 42.1%和 31.2%;7.5 mL/L 莠去津处理时,JB、P2 荞麦品种 RBC 数量较其对照分别减少 18.6%和 32.0%(图 2-A)。随莠去津处理浓度的升高,荞麦根尖 PME 活性升高,其中 7.5 mL/L 处理时,JB、P2 根尖 PME 活性较其对照分别升高 86.7%和 127.8%(图 2-B)。

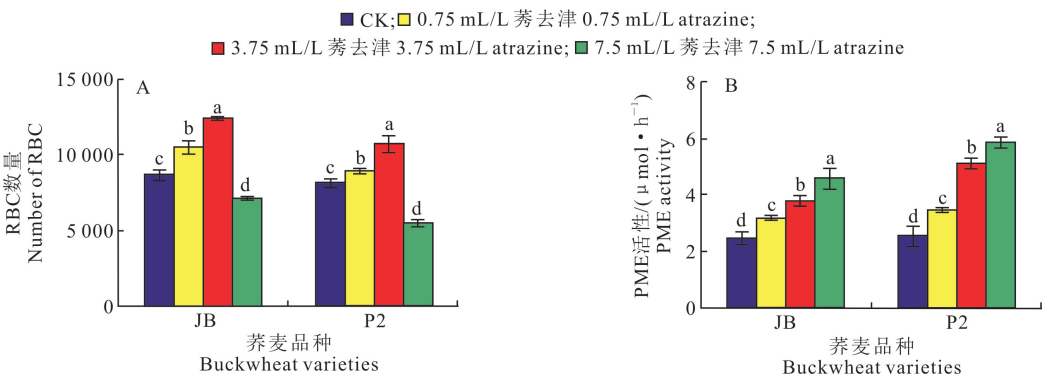


JB. 晋荞 8 号;P2. 品甜荞 2 号。下同。

JB. Jinqiao 8;P2. Pintianqiao 2. The same below.

图 1 荞麦根尖 RBC 原位观察结果

Fig. 1 In situ observation of RBC in buckwheat root tips



图柱上标不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下图同。

Different lowercase letters marked on the column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

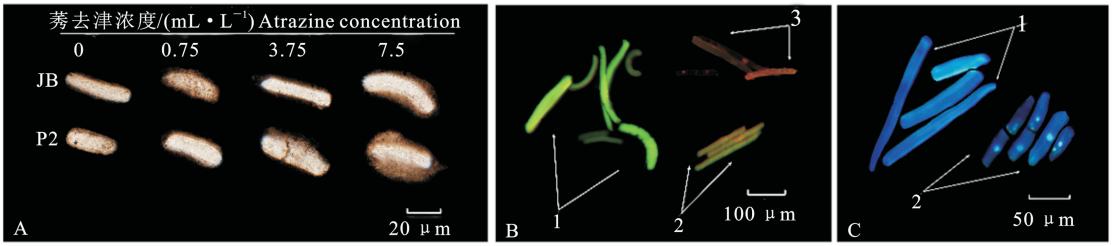
图 2 莠去津对荞麦根尖 RBC 数量和 PME 活性的影响

Fig. 2 Effects of atrazine on RBC quantity and PME activity in buckwheat root tips

2.2 莠去津对荞麦离体根 RBC 存活率和黏胶层厚度的影响

从图 3 可以看出,根尖喷施莠去津能诱导荞麦 RBC 黏胶层增厚和细胞凋亡、死亡。

莠去津对荞麦 RBC 黏胶层厚度、存活率和凋亡率的影响见图 4。



A. RBC 黏胶层;B. AO-EB 染色的 RBC,绿色为活细胞,橘红色为凋亡、死亡细胞(1. 活细胞;2. 凋亡细胞;3. 死亡细胞);C. Hochest-33258 染色的 RBC,呈现均匀蓝色的为活细胞,有亮斑的为凋亡细胞(1. 活细胞;2. 凋亡细胞)。

A. RBC adhesive layer;B. AO-EB stained RBC,green is living cells,and orange is apoptotic and dead cells(1. Normal cells;2. Apoptotic cells;3. Dead cells);C. Hochest-33258 stained RBC,cells displaying uniform blue staining are viable,while those with bright spots are apoptotic(1. Normal cells;2. Apoptotic cells).

图 3 莠去津对荞麦 RBC 黏胶层细胞的影响

Fig. 3 Effects of atrazine on the RBC mucilage cell of buckwheat

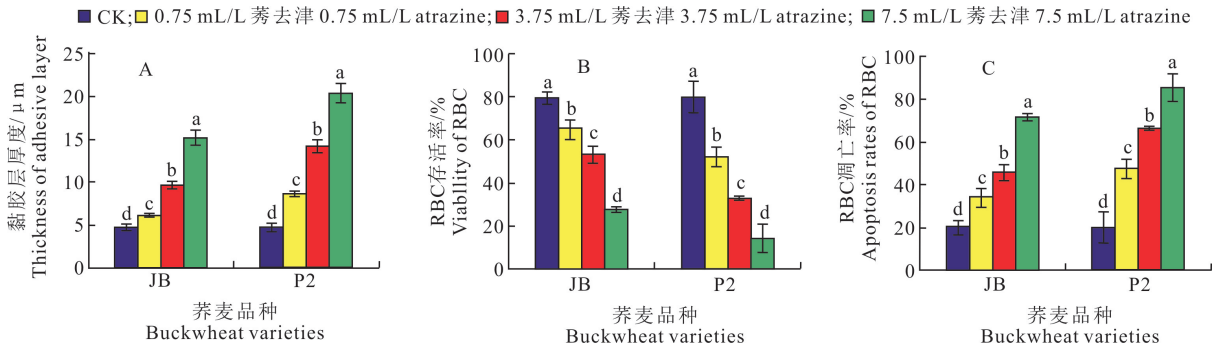


图 4　莠去津对荞麦 RBC 黏胶层厚度、存活率和凋亡率的影响

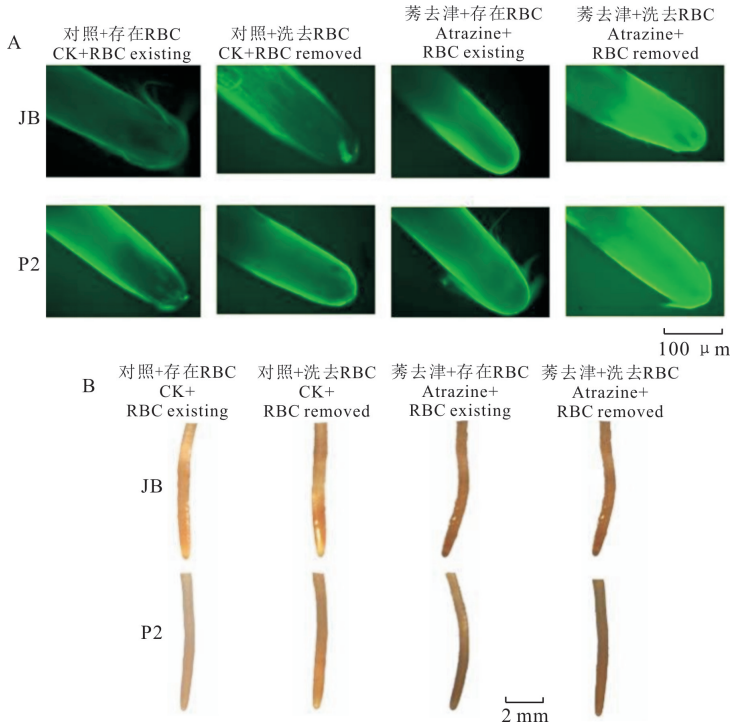
Fig. 4　Effects of atrazine on the thickness of RBC mucilage layer, survival rate and apoptosis rate of buckwheat

由图 4 可以看出，7.5 mL/L 莠去津处理时，JB、P2 荞麦品种 RBC 黏胶层厚度较其对照分别增加 217.2%和 320.5%。7.5 mL/L 莠去津处理时，JB、P2 荞麦品种 RBC 存活率较其对照分别降低 64.9%和 81.9%，而凋亡率较其对照分别升高 251.5%和 328.3%。说明莠去津诱导根尖黏胶层厚度和凋亡率增加，而 RBC 存活率降低。

2.3　莠去津胁迫下根边缘细胞对荞麦根尖 H_2O_2 和 $O_2^{\cdot-}$ 含量的影响

荞麦根尖移除 RBC 后，ROS 染色发现，无 RBC 的根尖呈现亮绿色（图 5-A）。DAB 染色发现，无 RBC 的根尖颜色显著加深（图 5-B）。

定量检测结果（图 6）表明，3.75 mL/L 莠去津处理时，移除 RBC 和保留 RBC，JB 荞麦品种根尖 H_2O_2 含量较其对照分别升高 114.1%和 47.1%，P2 品种根尖 H_2O_2 含量较其对照分别升高 218.4%和 86.7%；JB 和 P2 保留 RBC 的根尖 H_2O_2 含量较移除 RBC 的根尖分别降低 45.6%和 70.5%。3.75 mL/L 莠去津处理时，移除 RBC 和保留 RBC，JB 荞麦品种根尖 $O_2^{\cdot-}$ 含量较其对照分别升高 84.3%和 38.0%，P2 荞麦品种根尖 $O_2^{\cdot-}$ 含量较其对照分别升高 146.6%和 91.2%；JB 和 P2 保留 RBC 的根尖 $O_2^{\cdot-}$ 含量较移除 RBC 的根尖分别降低 33.6%和 29.0%。说明莠去津会对根尖产生氧化胁迫伤害，诱导根尖过氧化氢和超氧阴离子等活性氧积累。



A. 荞麦根尖 ROS 荧光探针染色；B. 荞麦根尖 DAB 染色。

A. Buckwheat root tip ROS fluorescent probe staining; B. DAB staining of buckwheat root tip.

图 5　莠去津处理荞麦初生根染色结果观察

Fig. 5　Observation results on staining the primary roots of buckwheat treated with atrazine

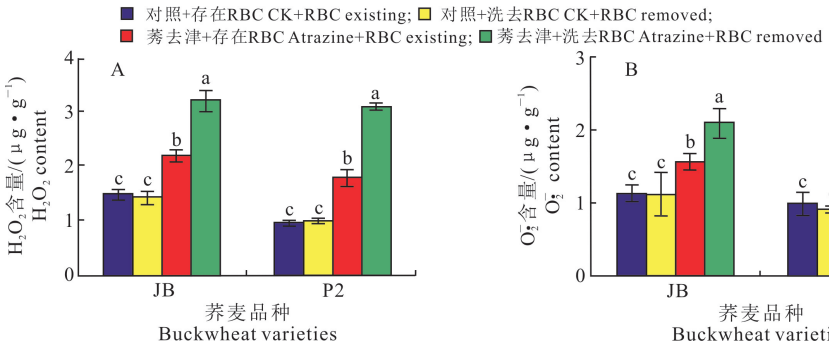


图 6 莠去津对荞麦初生根活性氧含量的影响

Fig. 6 Effect of atrazine on ROS content in primary roots of buckwheat

2.4 莠去津胁迫下根边缘细胞对荞麦根尖抗氧化酶活性的影响

从图 7 可以看出,在 3.75 mL/L 莠去津处理时,移除 RBC 和保留 RBC,JB 荞麦品种根尖 SOD 活性较其对照分别升高 18.5%和 13.3%,P2 荞麦品种 SOD 活性较其对照分别升高 61.1%和 54.8%;JB 和 P2 保留 RBC 的根尖 SOD 活性较移除 RBC 的根尖分别降低 4.6%和 4.1%。3.75 mL/L 莠去津处理时,移除 RBC 和保留 RBC,JB 荞麦品种根尖 POD 活性较其对照分别升高 114.3%和 57.6%,P2 荞麦品种 POD 活性较其对照分别升高 180.9%和 81.5%;JB 和 P2 保留 RBC 的根尖 POD 活性较移除 RBC 的根尖分别降低 36.0%和 54.8%。在 3.75 mL/L 莠去津处理时,移除 RBC 和保留 RBC,JB 荞麦品种根尖 CAT 活性较其对照分别升高 70.6%和 45.3%,P2 荞麦品种 CAT 活性较其对照分别升高 99.6%和 70.7%;JB 和 P2 保留 RBC 的根尖 CAT 活性较移除 RBC 的根尖分别降低 17.4%和 16.9%。说明莠去津对荞麦根尖产生胁迫伤害,诱导根尖抗氧化酶活性增强。

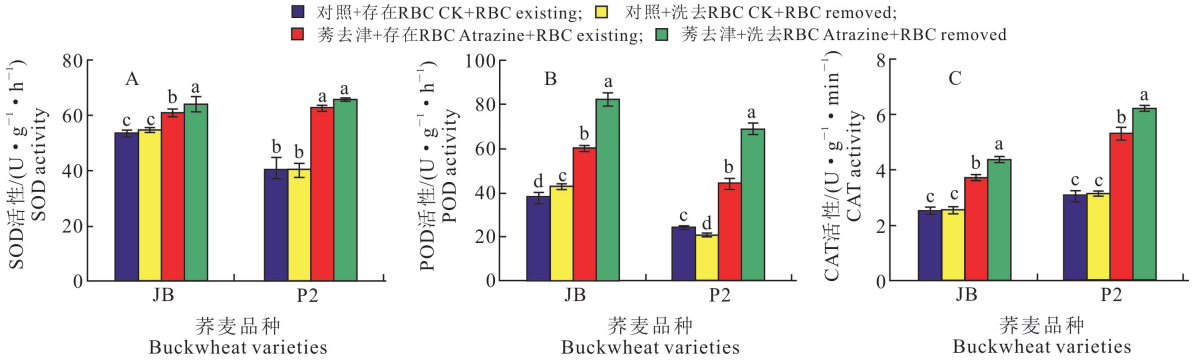


图 7 莠去津对荞麦初生根抗氧化酶活性的影响

Fig. 7 Effect of atrazine on antioxidant enzyme activity in primary roots of buckwheat

2.5 莠去津胁迫下根边缘细胞对荞麦根尖细胞膜透性的影响

从图 8 可知,在 3.75 mL/L 莠去津处理时,移除 RBC 和保留 RBC,JB 荞麦品种根尖相对电导率较其对照分别增大 148.46%和 60.99%,P2 荞麦品种相对电导率较其对照分别增大 310.52%和 206.68%;JB 和 P2 保留 RBC 根尖的相对电导率较移除 RBC 的根尖分别降低 54.2%和 33.7%。在 3.75 mL/L 莠去津处理时,移除 RBC 和保留 RBC,JB 荞麦品种根尖 MDA 含量较其对照分别增大 93.06%和 41.77%,P2 荞麦品种 MDA 含量较其对照分别升高 171.80%和 75.26%;JB 和 P2 保留 RBC 的根尖 MDA 含量较移除 RBC 的根尖分别降低 36.2%和 55.1%。说明莠去津对荞麦根尖产生氧化胁迫伤害,诱导根尖发生膜脂过氧化,使膜透性增大,MDA 含量升高。

2.6 莠去津胁迫下根边缘细胞对荞麦幼根根长及根系活力的影响

图 9 显示,在 3.75 mL/L 莠去津处理时,移除 RBC 和保留 RBC,JB 荞麦品种根系活力较其对照分别降低 52.17%和 19.63%,P2 荞麦品种根系活力较其对照分别降低 65.98%和 51.48%;JB 和 P2 保留 RBC 的根尖根系活力较移除 RBC 的根尖分别提高 40.5%和 29.8%。在 3.75 mL/L 莠去津处理时,移除 RBC 和保留 RBC,JB 荞麦品种根长较其对照分别减小 28.28%和 25.87%,P2 荞麦品种根长

较其对照分别减小 43.97%和 44.82%；JB 和 P2 保留 RBC 和移除 RBC 对根长无显著影响。说明莠去津降低荞麦根系活力，抑制根的生长。

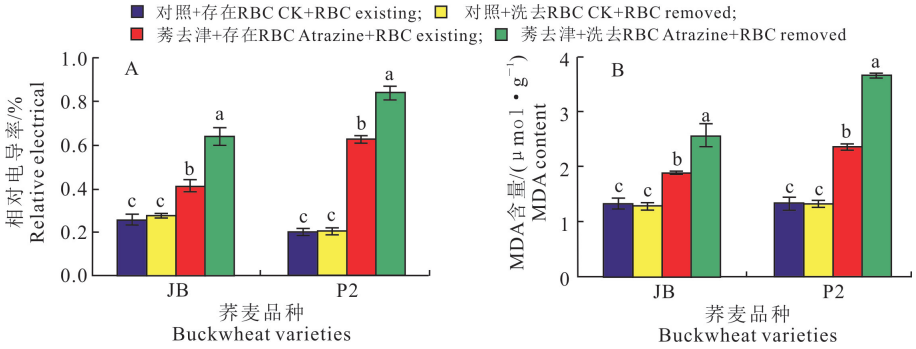


图 8　莠去津对荞麦初生根膜透性的影响

Fig. 8　Effect of atrazine on membrane permeability of primary roots of buckwheat

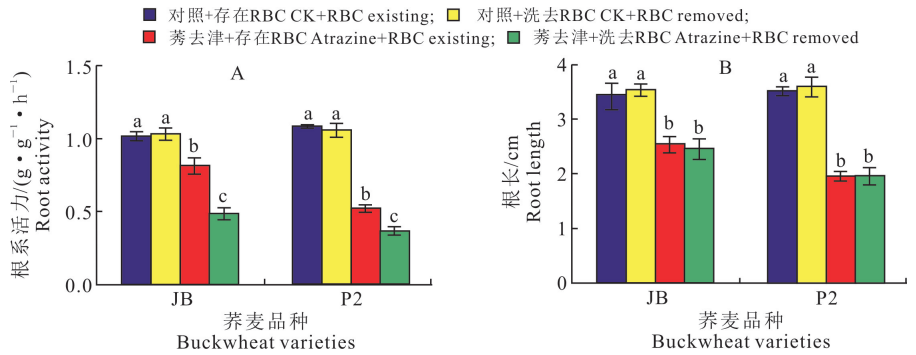


图 9　莠去津对荞麦初生根根系活力及根长的影响

Fig. 9　Effects of atrazine on primary root activity and root length of buckwheat

3　讨　论

植物的根边缘细胞作为根表面与土壤间构建的生物表界面，在减少或避免外界有害生物和非生物胁迫伤害中起着重要作用[19-20]。当植物根遭受有毒物质和微生物胁迫时，根尖果胶甲基酯酶(PME)活性升高，PME 通过果胶去甲基化使果胶酸分解，诱导其他果胶酶基因的表达，最终促进更多的 RBC 从根冠释放[17]。RBC 通过向外分泌更多的黏胶层物质螯合或抑制有害因子，以保护根尖免受伤害；同时有害因子也诱导 RBC 发生凋亡或死亡[21-23]。从本研究结果看，0.75，3.75 mL/L 莠去津处理，2 个荞麦品种的根尖 PME 活性均增强，根尖的 RBC 数量显著增加，同时 RBC 存活率降低，而凋亡率上升，这与前人的研究结果[24]一致。说明莠去津对荞麦根尖产生毒害，诱导了根尖 PME 活性升高，致使其产生更多的 RBC 以减轻莠去津对根尖的进一步伤害。同时莠去津对 RBC 也产生毒害，导致其大量凋亡或死亡。本试验还发现，7.5 mL/L 莠去津处理荞麦的 RBC 数量显著减少，这可能是由于高浓度莠去津对根尖产生了较重的毒害，使其丧失了产生 RBC 的能力。

正常情况下，植物体内的活性氧含量维持在一个较低水平，当植物受到胁迫时，体内的活性氧会迅速升高，过量的 O_2^- 和 H_2O_2 对植物产生氧化胁迫，导致膜损伤，MDA 含量升高。SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶是植物抗氧化系统的重要酶，植物在受到逆境胁迫时，SOD、POD 和 CAT 活性升高，及时清除活性氧，从而维持植物的正常代谢平衡[25-26]。李荣峰等[27]研究发现，低浓度、短时间 Al^{3+} 胁迫下，具有 RBC 大豆根系的 SOD、POD 和 CAT 活性显著高于移除 RBC 的根系。本试验中，3.75 mL/L 莠去津处理荞麦根尖，保留 RBC 的根尖 SOD、POD 和 CAT 活性均显著低于移除 RBC 的根尖，这与李荣峰等[27]的研究结果相悖，这可能是荞麦 RBC 对莠去津胁迫有较强的耐性所致。在本研究中，3.75 mL/L 莠去津处理离体的 RBC，JB 和 P2 品种 RBC 存活率仍保持在 54%和 33%的水平，较多的活 RBC 保护根尖，减轻了莠去津对根尖的胁迫伤害，根尖 SOD、POD 和 CAT 活性维持在相对较低的水平。从本试验结果看，3.75 mL/L 莠去津处理荞麦根尖，移除 RBC 的根尖 H_2O_2、O_2^- 和 MDA 含量，根

尖膜透性以及 SOD、POD 和 CAT 活性均显著高于保留 RBC 的根尖,而根尖根系活力显著低于保留 RBC 的根尖。表明莠去津对荞麦根尖产生氧化胁迫伤害,而 RBC 能较好地减轻莠去津对根尖的伤害。这也可从试验中莠去津处理根尖 RBC 黏胶层增厚得到印证,较多的黏胶层可能螯合了莠去津,使其侵入根尖的数量减少,从而减轻了对根尖的伤害。

本试验结果还显示,试验的 2 个荞麦品种对莠去津的耐受性不同。7.5 mL/L 莠去津处理时,从抗逆性方面看,测定的 RBC 及根的细胞学和生理指标,JB 荞麦品种均好于 P2 荞麦品种,说明 JB 荞麦品种较耐莠去津。另外,从减轻莠去津对 RBC 的伤害又能达到控草的目的出发,建议用推荐浓度减半的莠去津进行荞麦田杂草防控。前期模拟田间土壤喷施莠去津预试验结果显示,3.75 mL/L 莠去津处理对荞麦种子萌发和早期幼苗生长无明显的伤害现象,还需大田进一步验证试验。

4 结 论

除草剂莠去津对荞麦根边缘细胞和初生根产生毒害,诱导根边缘细胞发生凋亡或死亡,对初生根造成氧化胁迫伤害。根边缘细胞在抵御莠去津对根胁迫伤害中发挥重要作用,通过产生更多的黏胶层螯合莠去津,使其侵入根尖的数量减少,从而减轻对根尖的伤害。相对来说,JB 品种对莠去津的耐性好于 P2 品种。

[参考文献]

[1] 王安虎,熊梅,耿选珍,等. 中国荞麦的开发利用现状与展望[J]. 作物杂志,2003(3):7-8.
WANG A H,XIONG M,GENG X Z,et al. Present situation and prospect of development and utilization of buckwheat in China[J]. Crop Journal,2003(3):7-8.

[2] 赵建栋,李秀莲,陈稳良,等. 同源四倍体甜荞诱导方法研究[J]. 种子,2023,42(2):77-82.
ZHAO J D,LI X L,CHEN W L,et al. Study on induction method of autotetraploid common buckwheat[J]. Seed,2023,42(2):77-82.

[3] 王晓娜. 除草剂对荞麦田杂草防效及荞麦生长发育的影响[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
WANG X N. Effect of herbicide on weeds control and growth of buckwheat field[D]. Yangling,Shaanxi:Northwest A&F University,2019.

[4] 郭玉珍,陈庆富,杨兰英,等. 栽培及野生荞麦资源的种子蛋白质含量研究[C]//山西省食品科学学会. 苦荞产业经济国际论坛论文集. 山西:苦荞产业经济国际论坛,2006:82-92.
GUO Y Z,CHEN Q F,YANG L Y,et al. Study on seed protein content of cultivated and wild buckwheat resources[C]// Shanxi Society of Food Science. International forum on tartary buckwheat industry economy. Shanxi:Tartary Buckwheat Industry Economy,2006:82-92.

[5] ZHANG J J,XU J Y,LU F F,et al. Detoxification of atrazine by low molecular weight thiols in alfalfa (*Medicago sativa*)[J]. Chemical Research in Toxicology,2017,30(10):1835-1846.

[6] FAN X X,CHANG W,FENG F J,et al. Responses of photosynthesis-related parameters and chloroplast ultrastructure to atrazine in alfalfa (*Medicago sativa* L.) inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2018,166:102-108.

[7] CHOWDHURY I F,DORAN G S,STODART B J,et al. Trifluralin and atrazine sensitivity to selected cereal and legume crops[J]. Agronomy-Basel,2020,10(4):587.

[8] 兰景宇. 荞麦田除草剂筛选及除草剂金都尔对土壤质量的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
LAN J Y. Screening of herbicide in buckwheat field and the effect of herbicide jinduer on soil quality[D]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2016.

[9] HAMAMOTO L,HAWES M C,ROST T L. The production and release of living root cap border cells is a function of root apical meristem type in dicotyledonous angiosperm plants[J]. Annals of Botany,2006,97(5):917-923.

[10] 蔡文春,刘鹏,徐根娣,等. 铝胁迫对绿豆根边缘细胞的影响[J]. 湖北农业科学,2006,45(2):180-182.
CAI W C,LIU P,XU G D,et al. Effect of aluminum stress on root border cells of mung bean[J]. Hubei Agricultural Sciences,2006,45(2):180-182.

[11] 王亚男,姜华,王煜,等. 不同状态绿豆根边缘细胞对 Cd^{2+} 的响应[J]. 土壤学报,2013,50(1):165-170.
WANG Y N,JIANG H,WANG Y,et al. Response of mung bean root border cells to cadmium in relation to their status [J]. Acta Pedologica Sinica,2013,50(1):165-170.

[12] 龚意豫,谢媛怡,李玖一,等. 根边缘细胞缓解土荆芥淋溶途径化感作用对苦荞麦代谢扰动的机制[J]. 生态学报,2024,44(6):2437-2451.
GONG Y Y,XIE Y Y,LI J Y,et al. The mechanism of root border cells alleviating the allelopathic effect of the leaching pathway of *Chenopodium ambrosioides* on the metabolic disturbance of tartary buckwheat[J]. Ecology,2024,44(6):2437-2451.

[13] 汪利沙,何兵,马丹炜,等. 土荆芥挥发油化感作用下根边缘细胞对豌豆根尖的保护效应[J]. 四川师范大学学报(自然科学版),2013,36(5):754-758.
WANG L S,HE B,MA D W,et al. Protective effect of root border cells on pea root tip under the allelopathy of volatile oil from *Chenopodium ambrosioides*[J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science Edition),2013,36(5):754-758.

[14] 胡忠良,王亚男,马丹炜,等. 玉米根边缘细胞 exDNA 和胞外

蛋白对土荆芥化感胁迫的缓解效应[J]. 中国农业科学，2015，48(10)：1962-1970.
HU Z L，WANG Y N，MA D W，et al. Mitigation effects of exDNA and extracellular proteins from maize root border cells on allelopathic stress of *C. ambrosioides*[J]. Scientia Agricultura Sinica，2015，48(10)：1962-1970.

[15] 马春红，李秀丽，董文琦，等. HMC 毒素诱导玉米同核 C、N 细胞质细胞凋亡的荧光显微观察[J]. 中国农业科学，2011，44(9)：1823-1829.
MA C H，LI X L，DONG W Q，et al. Detection of apoptosis in homocaryon with C and N cytoplasm of maize induced by helminthosporium maydis race C(HMC) toxin[J]. Scientia Agricultura Sinica，2011，44(9)：1823-1829.

[16] QIAO Y X，ZHANG Y P，ZHANG H X，et al. Developmental characteristics and cinnamic acid resistance of root border cells in cucumber and figleaf gourd seedlings[J]. Journal of Integrative Agriculture，2013，12(11)：2065-2073.

[17] 马金虎，杨文秀，孙亮亮，等. 紫茎泽兰提取物对 3 种杂草的化感胁迫作用[J]. 生态学报，2018，38(10)：3514-3523.
MA J H，YANG W X，SUN L L，et al. Physiological mechanisms of the allelochemical stress to three weed species caused by *Eupatorium adenophorum* extracts[J]. Acta Ecologica Sinica，2018，38(10)：3514-3523.

[18] 李忠光，龚明. 植物中超氧阴离子自由基测定方法的改进[J]. 云南植物研究，2005，27(2)：211-216.
LI Z G，GONG M. Improvement of measurement method for superoxide anion radical in plant[J]. Plant Diversity，2005，27(2)：211-216.

[19] HAWES M C，GUNAWARDENA U，MIYASAKA S，et al. The role of root border cells in plant defense[J]. Trends in Plant Science，2000，5(3)：128-133.

[20] 邢承华，张淑娜，吴坤，等. 边缘细胞对水稻生长和细胞壁组分的影响及其与耐铝性的关系[J]. 作物学报，2012，38(5)：880-886.
XING C H，ZHANG S N，WU K，et al. Effects of root border cells on root growth and cell wall polysaccharide contents in rice seedlings and their relation to aluminum tolerance[J]. Acta Agronomica Sinica，2012，38(5)：880-886.

[21] 何兵，汪利沙，王亚男，等. 土荆芥挥发油对豌豆根边缘细胞的诱导和胁迫作用[J]. 生态环境学报，2013，22(6)：991-995.
HE B，WANG L S，WANG Y N，et al. Induced and stress effects of volatile oil from *Chenopodium ambrosioide* L. on root border cells of pea[J]. Ecology and Environmental Sciences，2013，22(6)：991-995.

[22] 李荣峰，蔡妙珍，刘鹏，等. 植物根边缘细胞的抗逆性研究进展[J]. 广西植物，2007，27(3)：497-502.
LI R F，CAI M Z，LIU P，et al. The stress response and resistance of root border cells in plants[J]. Guihaia，2007，27(3)：497-502.

[23] 张永平，付玲，包颖，等. 高等植物根系边缘细胞的抗逆性研究进展[J]. 北方园艺，2017(24)：189-193.
ZHANG Y P，FU L，BAO Y，et al. Research on stress response and resistance of root border cells in higher plants[J]. Northern Horticulture，2017(24)：189-193.

[24] 蔡妙珍，王宁，王志颖，等. 边缘细胞对荞麦根尖铝毒的防护效应和对细胞壁多糖的影响[J]. 生态学报，2012，32(3)：915-922.
CAI M Z，WANG N，WANG Z Y，et al. The role of root border cells in protecting buckwheat root apices from aluminum toxicity and their effect on polysaccharide contents of root tip cell walls[J]. Acta Ecologica Sinica，2012，32(3)：915-922.

[25] 李宏鑫. 纳米氧化硅缓解镉对豌豆生长胁迫伤害的机制[D]. 山西太谷：山西农业大学，2023.
LI H X. Mechanism of nano-silica to alleviate the damage of cadmium on pea growth stress[D]. Taigu，Shanxi：Shanxi Agricultural University，2023.

[26] 王鹏，杨奥军，冯志进，等. 外源 5-ALA 对干旱胁迫下玉米幼苗生长的缓解效应及抗氧化酶基因表达的影响[J]. 干旱地区农业研究，2022，40(4)：1-9.
WANG P，YANG A J，FENG Z J，et al. Effects of exogenous 5-ALA on growth of maize seedlings and expression of antioxidant enzyme genes under drought stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2022，40(4)：1-9.

[27] 李荣峰，蔡妙珍，刘鹏，等. 边缘细胞对大豆根尖铝毒害的缓解效应[J]. 作物学报，2008，34(2)：318-325.
LI R F，CAI M Z，LIU P，et al. Border cells alleviating aluminum toxicity in soybean root tips[J]. Acta Agronomica Sinica，2008，34(2)：318-325.

（责任编辑：屈李纯）

（上接第 142 页）

[22] 葛阳，王升，万修福，等. 施氮对中药材抗逆性影响及机制[J]. 中国中药杂志，2021，46(8)：1901-1909.
GE Y，WANG S，WAN X F，et al. Effects and mechanisms of nitrogen application on stress resistance of Chinese materia medica[J]. China Journal of Chinese Materia Medica，2021，46(8)：1901-1909.

[23] 徐青山，黄晶，孙爱军，等. 低温影响水稻发育机理及调控途径研究进展[J]. 中国水稻科学，2022，36(2)：118-130.
XU Q S，HUANG J，SUN A J，et al. Effects of low temperature on the growth and development of rice plants and the advance of regulation pathways：a review[J]. Chinese Journal of Rice Science，2022，36(2)：118-130.

[24] 蔡志欢，张桂莲. 水稻低温冷害研究进展[J]. 作物研究，2018，32(3)：249-255.
CAI Z H，ZHANG G L. Research progress of low temperature and chilling injury of rice[J]. Crop Research，2018，32(3)：249-255.

（责任编辑：李小平）