丸粒化与水杨酸处理对莠去津胁迫下谷子萌发的影响

门 瑞[1] 张东梅[2] 孙 豪[1] 郭彦颉[1] 谢宇航[1]
王文竹[1] 王雪雯[1] 李灿东[3] 苗兴芬[1,4]

（[1]黑龙江八一农垦大学农学院/黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室，163319，黑龙江大庆；
[2]哈尔滨明星农业科技开发有限公司，150038，黑龙江哈尔滨；[3]黑龙江省农业科学院佳木斯分院，154007，黑龙江佳木斯；
[4]农业农村部东北平原农业绿色低碳重点实验室，163319，黑龙江大庆）

摘 要 为探究莠去津胁迫下丸粒化与外源水杨酸对谷子萌发期的影响，以龙谷 54 和嫩选 17 为试验材料，研究不同浓度（0、50、100、150、200 mg/L）外源水杨酸浸种和种子丸粒化处理对 2 mL/L 38%莠去津悬浮剂处理下谷子萌发的影响。结果表明，随着外源水杨酸浓度升高，其对莠去津处理的谷子萌发呈现先促进后抑制的效果，以 150 mg/L 浸种效果最佳，能够显著提高发芽势、发芽率和发芽指数；与 0 mg/L 相比，150 mg/L 外源水杨酸浸种能够显著提高超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶活性及可溶性蛋白含量，减少谷子在莠去津胁迫下受到的氧化损伤。在无莠去津胁迫时，丸粒化处理对谷子的根长、芽长、发芽势、发芽率和发芽指数虽表现出抑制的效果，但根鲜重、根干重、芽鲜重和芽干重却有所提升，说明丸粒化对根的生长起到了良好的促进作用，强壮的根系也促进了芽的生长，同时丸粒化也具有抑制弱苗萌发、筛选壮苗的作用；在莠去津胁迫下，丸粒化处理对以上指标均产生抑制作用。

关键词 谷子；丸粒化；水杨酸；生理指标；萌发期

谷子（*Setaria italica* L.）主要栽培在我国北方的干旱、半干旱地区，在旱作生态农业、粮食生产多样性和国家粮食安全中具有重要作用[1]。谷子曾经是我国的主要口粮作物，仅次于水稻和小麦[2]，抗旱、耐瘠薄，具有较强的环境适应能力，根系发达，需水量少，适合干旱、半干旱地区种植。

莠去津（atrazine）又名阿特拉津，分子式为 $C_8H_{14}ClN_5$，属于三氮苯类化合物[3-4]。其除草谱广，应用窗口期长，使用成本低，是一种广泛应用于农业领域的除草剂[5]。我国 20 世纪 80 年代末开始生产并投入使用，目前在东北和华北种植区莠去津及其混剂依然是玉米田最主要的除草剂，占整个东北地区玉米田除草剂施用面积的 80%以上[6]。但莠去津残留期长，在严重干旱条件下，对作物的伤害作用可长达 3 年[7]，极易对后茬作物造成毒害[8]。植物通过根系吸收莠去津并向上传导，从而破坏叶绿体的形成及其结构，干扰光系统II，降低 CO_2 固定效率[9]，影响电子传递[10]。

水杨酸（salicylic acid，SA）是植物内源小分子物质，已有研究[11]表明，SA 可诱导逆境相关基因的表达，调节细胞抗氧化机制，同时诱导植物产生系统性抗性，且参与植物光合作用的调控[12]。当植物受到环境胁迫时，其体内活性氧或自由基产生与清除的动态平衡被破坏，最终导致组织受到伤害或死亡[13]。研究[14-15]表明，外源水杨酸能够有效地缓解莠去津对甜菜和玉米幼苗的毒害作用；外源水杨酸可增强谷子对霜霉病[16]及镍胁迫[17]的抗性，水杨酸还具有增强植物抗逆性、价格低、残留风险较小等优势，但关于水杨酸处理对莠去津胁迫下谷子萌发期毒害的缓解效应，目前尚未见相关报道。

丸粒化是一种将粒径小、形状不规则的种子，用特定的材料包裹，使其大小均一、形状规则的种子加工技术[18]。丸粒化后的种子体积增大，能适应机械化精量播种，提高播种质量[19]，减少人工成本，减小田间工作量[20]，还可以保护种子、提高其抗逆性[21]。探究丸粒化对莠去津胁迫下谷子萌发的影响，可为丸粒化缓解莠去津胁迫提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

谷子品种为龙谷 54（耐除草剂）和嫩选 17（常规品种），均由黑龙江八一农垦大学谷子研究

作者简介：门瑞，主要从事谷子逆境生理研究，E-mail：811136645@qq.com
苗兴芬为通信作者，主要从事谷子育种及种子生理生化研究，E-mail：byndmxf@126.com
基金项目：黑龙江省博士后启动项目（LBH-Q17140）；黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目（YJSCX2025-XCZX06）
收稿日期：2025-09-09；修回日期：2025-10-28；网络出版日期：2026-02-04

室提供。

除草剂为 38%莠去津悬浮剂，购自连云港立本作物科技有限公司。水杨酸由北京索莱宝科技有限公司提供。种子丸粒化制作：取 100 g 谷子种子加入 H5610 包衣丸化机中，调整转速为 30 转/min，待所有种子都无沿壁滚动后加入适量丸粒化粉体（由贵州大学提供），随着包衣丸化机旋转，均匀包裹在种子表面。取出丸粒化材料放入烘干机中 40 ℃烘干 40 min。

1.2 试验方法

2025 年在黑龙江八一农垦大学农学院人工气候室中进行试验，每个品种挑选大小一致、健康饱满的种子，用 75%酒精浸泡 30 s 消毒，用蒸馏水冲洗至种子表面无酒精残留，再使用 1% NaClO 进行种子消毒 10 min，用蒸馏水冲洗种子至表面无残留，吸水纸吸干种子表面水分备用。

1.2.1 *水杨酸浸种处理* 配制浓度为 0（T0）、50（T1）、100（T2）、150（T3）和 200 mg/L（T4）的水杨酸溶液，将消毒过的种子分别放置在不同浓度下的水杨酸溶液中浸种 24 h。在 12 cm×12 cm 发芽盒内放置滤纸，每个发芽盒内均匀播 50 粒种子，每个处理设置 3 次重复，处理组每盒均匀加入浓度为 2 mL/L 的 38%莠去津悬浮剂 2 mL 浸润吸水纸，CK 组加入 2 mL 蒸馏水。将发芽盒放置恒温培养箱内，温度 25 ℃，湿度 60%，12 h 光照 12 h 黑暗，培养期间每天统计谷子发芽数，并适当补充水分，第 3 天统计发芽势，第 7 天统计发芽率，第 8 天取 10 株样品测定根长、芽长，并称取鲜重，求平均值。取鲜样 0.2~0.3g 测超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）、过氧化物酶（peroxidase，POD）、过氧化氢酶（catalase，CAT）、丙二醛（malondialdehyde，MDA）、抗坏血酸过氧化物酶（ascorbate peroxidase，APX）和可溶性蛋白。采用氮蓝四唑（nitroblue tetrazolium，NBT）法测定 SOD 活性；采用愈创木酚（guaiacol，GUA）法测定 POD 活性；采用紫外吸收法测定 CAT 活性；采用硫代巴比妥酸（thiobarbituric acid，TBA）法测定 MDA 含量；采用考马斯亮蓝（Coomassie Brilliant blue，CBB）G-250 染色法测定可溶性蛋白含量；采用分光光度法测定 APX 活性[22-23]。

1.2.2 *种子丸粒化处理* 设置 4 个处理，分别为丸粒化+莠去津胁迫（P1）、丸粒化+清水对照（P2）、未丸化种+莠去津胁迫（P3）和未丸化种+清水对照（P4）。每个处理设置 3 次重复。培养与取样方式同 1.2.1。

1.3 数据处理

参考王雨婷等[24]和陈二影等[25]的方法计算性状指标。采用 WPS Office 软件处理数据，采用 IBM SPSS Statistics 27 进行方差分析和相关性分析，采用 Origin 2024 绘图。

2 结果与分析

2.1 外源水杨酸浸种对莠去津胁迫下谷子萌发的影响

2.1.1 *对莠去津胁迫下谷子萌发指标的影响* 图 1 是在莠去津胁迫下不同浓度水杨酸浸种后龙谷 54（图 1a）与嫩选 17（图 1b）根长、芽长的变化情况。莠去津胁迫对 2 个品种的根长、芽长均产生了明显的抑制作用，对比发现莠去津对根长的抑制大于芽长。

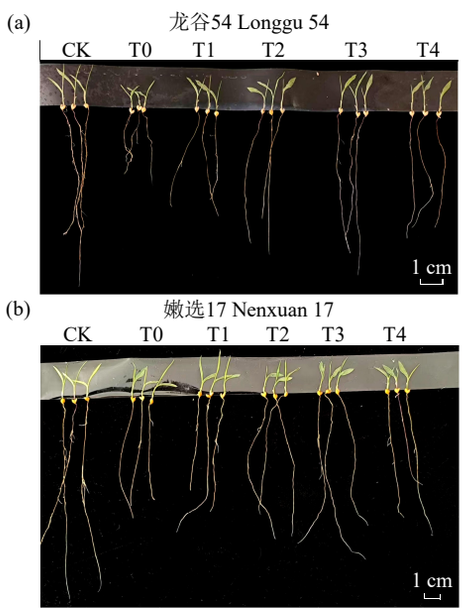


图 1 不同浓度水杨酸浸种对谷子萌发的影响

Fig.1 Effects of different concentrations of SA seed soaking on foxtail millet germination

莠去津胁迫下不同浓度水杨酸处理后 2 个谷子品种的发芽势和发芽率相对指数都有不同程度的提升，各指标随水杨酸浓度的升高均呈先上升后下降的变化趋势（表 1）。龙谷 54 在 T3 处理下发芽势与 T0 差异显著；发芽率在 T3 处理下最高但在不同浓度的处理中差异均不显著；发芽指数在 T2 处理时最高且与 T0 差异显著。嫩选 17 的发芽势、发芽率在 T3 处理下最高且与 T0 处理相比差异显著，

分别提升了 28.8%和 20.5%，但发芽指数在 T2 处理下最高，且与 T0 差异显著。

从表 2 可以看出，与 CK 相比，T0 处理下龙谷 54 和嫩选 17 的根长分别降低了 52.9%和 60.6%，芽长分别降低了 90.7%和 87.2%。T3 处理 2 个品种莠去津胁迫的缓解效果最好，较 T0 处理根长分别提升了 47.3%和 10.6%。高浓度水杨酸处理（200 mg/L）对根长和芽长都表现出抑制作用，与 T3 相比根长分别降低了 13.7%和 4.2%，与 T0 相比，T3 处理对龙谷 54 的根长、根鲜重和根干重的影响显著，3 个指标均提升 30%以上；外源水杨酸对芽长、芽鲜重和芽干重的作用效果不显著，但在 T3 处理下芽长和芽鲜重达到峰值，与 T0 相比分别提升了 3.1%和 12.9%，芽干重在 T2 处理下效果最好。

水杨酸处理对嫩选 17 的根长、根鲜重和芽长提升效果并不显著，但均在 T3 处理下效果最好，

表 1　不同浓度水杨酸浸种处理对谷子萌发期指标的影响

Table 1　Effects of different concentrations of SA seed soaking on the indicators of foxtail millet germination stage

品种 Variety	处理 Treatment	发芽势 Germination potential (%)	发芽率 Germination rate (%)	发芽指数 Germination index
龙谷 54 Longgu 54	CK	72.00±0.05bc	82.00±0.11a	63.41±6.23bc
	T0	64.67±0.08c	81.33±0.12a	56.83±6.81c
	T1	73.33±0.01abc	81.33±0.03a	61.63±1.45bc
	T2	83.33±0.04ab	88.67±0.03a	74.57±3.46a
	T3	84.00±0.04a	92.00±0.05a	67.89±1.33ab
	T4	69.33±0.10c	86.00±0.04a	57.94±3.82c
嫩选 17 Nenxuan 17	CK	90.00±0.07a	91.33±0.08ab	101.06±6.55a
	T0	69.33±0.06bc	78.00±0.03c	65.66±1.35c
	T1	68.67±0.04bc	84.67±0.01abc	74.28±1.92c
	T2	86.67±0.06ab	87.33±0.05abc	100.19±0.84a
	T3	89.33±0.04a	94.00±0.02a	87.37±5.52b
	T4	63.33±0.21c	83.33±0.07bc	51.20±11.06d

不同小写字母代表处理间差异显著（$P < 0.05$），下同。

Different lowercase letters represent significant differences among treatments ($P < 0.05$), the same below.

表 2　不同浓度水杨酸浸种处理对谷子生长的影响

Table 2　Effects of different concentrations of SA seed soaking on the growth of foxtail millet

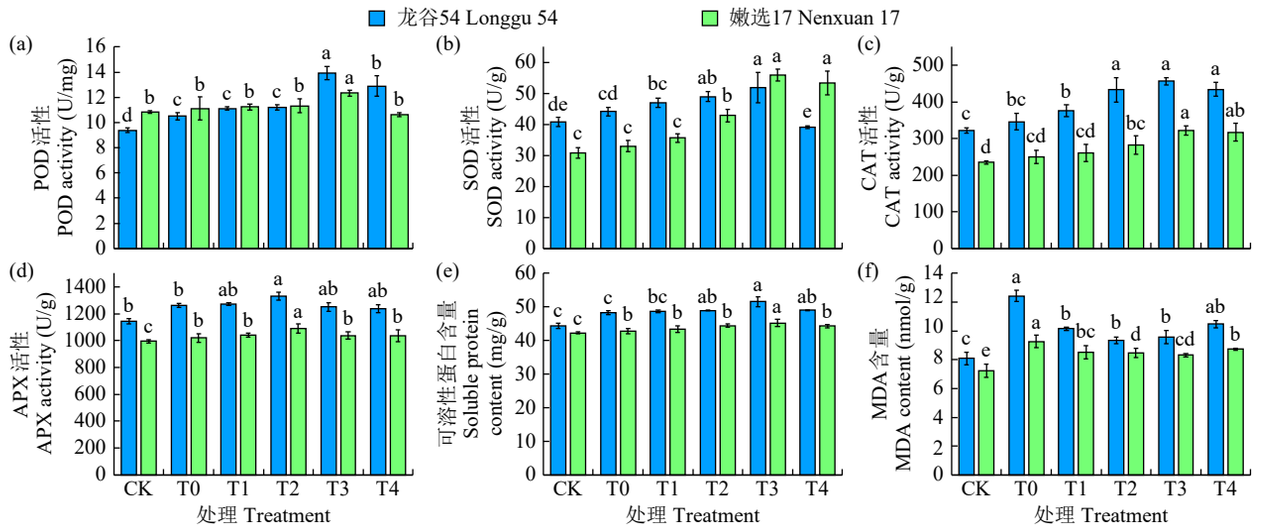
品种 Variety	处理 Treatment	根长 Root length (cm)	根鲜重 Root fresh weight (g)	根干重 Root dry weight (mg)	芽长 Shoot length (cm)	芽鲜重 Shoot fresh weight (g)	芽干重 Shoot dry weight (mg)
龙谷 54 Longgu 54	CK	7.44±0.51a	0.023±0.002a	5.87±0.25a	1.77±0.10a	0.039±0.005a	6.10±0.56a
	T0	3.94±0.10d	0.016±0.002c	3.63±0.51c	1.60±0.02b	0.031±0.002ab	4.70±0.30b
	T1	4.23±0.28d	0.018±0.003bc	3.73±0.31c	1.64±0.03b	0.033±0.008ab	5.10±0.17b
	T2	5.20±0.15c	0.020±0.003abc	5.13±0.32b	1.64±0.05b	0.034±0.002ab	5.20±0.35b
	T3	5.80±0.38b	0.022±0.003ab	5.17±0.29b	1.65±0.04b	0.035±0.002ab	4.93±0.21b
	T4	5.01±0.07c	0.018±0.003abc	4.07±0.31c	1.46±0.05c	0.030±0.001b	4.07±0.25c
嫩选 17 Nenxuan 17	CK	11.43±0.53a	0.034±0.003a	8.67±0.55a	2.11±0.10a	0.047±0.001a	6.67±0.49a
	T0	6.93±0.34b	0.025±0.001b	3.83±0.38d	1.85±0.06bc	0.035±0.001c	4.87±0.06c
	T1	6.97±0.25b	0.026±0.003b	4.23±0.23cd	1.89±0.11bc	0.038±0.002bc	5.13±0.23bc
	T2	7.46±0.82b	0.026±0.002b	4.73±0.67bc	1.90±0.11bc	0.039±0.003b	4.97±0.12bc
	T3	7.66±0.35b	0.026±0.002b	5.17±0.29b	1.98±0.09ab	0.040±0.004b	5.43±0.23b
	T4	7.34±0.72b	0.026±0.001b	4.70±0.44bc	1.77±0.03c	0.038±0.003bc	4.87±0.35c

出现拐点；根干重、芽鲜重和芽干重均在 T3 处理效果最好且差异显著，分别提升了 34.9%、14.3%和 11.5%。高浓度水杨酸（200 mg/L）浸种处理对 2 个品种的生长均存在抑制作用。

2.1.2　*对莠去津胁迫下萌发期生理指标的影响*　图 2 为在莠去津胁迫下使用不同浓度水杨酸浸种，在发芽盒内培养至第 8 天取样测生理指标的结果。POD、SOD 和 CAT 为生物体内重要的抗氧化酶，在清除活性氧和抵御氧化胁迫中发挥关键作用，龙谷 54 在 T3 处理下与 T0 相比分别提升了 32.6%、17.5%和 31.8%，差异显著（$P < 0.05$）；嫩选 17 在 T3 处理下与 T0 处理相比分别提升了 10.9%、69.4%和 28.8%。

APX 通过清除光系统产生的 H_2O_2，从而抑制光氧化损伤，维持电子传递链平衡，提高植物在逆境条件下生存能力[26]。图 2 显示龙谷 54 与嫩选 17 在胁迫条件下 APX 活性变化趋势与 POD、SOD、CAT 变化趋势基本相同，呈先上升后下降的趋势。不同点在于龙谷 54 虽然在 T2 处理达到最大值，与 T0 相比提升了 1.5%，但各个浓度处理间差异并不显著。嫩选 17 在 T3 处理时 APX 活性最高，与 T0 处理相比提升了 6.7%。

由图 2e 可以看出，随着水杨酸浓度的增加可溶性蛋白含量随之增加，与 POD、SOD 和 CAT 变



不同小写字母代表处理间差异显著（$P < 0.05$），下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$), the same below.

图 2 不同浓度水杨酸浸种对莠去津胁迫下谷子萌发期生理指标的影响
Fig.2 Effects of different concentrations of SA seed soaking on physiological indices of foxtail millet germination under atrazine stress

化趋势基本相同，在 T3 处理下可溶性蛋白含量最高，且与 T0 相比差异显著，龙谷 54 与嫩选 17 可溶性蛋白含量分别提升了 6.8%和 5.7%。

MDA 含量与细胞膜脂氧化损伤程度呈正相关，是评估植物逆境胁迫下氧化损伤的经典指标。从图 2f 中可以看出，随着水杨酸浓度的提升，MDA 含量均呈不同程度的下降，龙谷 54 在 T2 处理下 MDA 含量降至最低，与 T0 处理相比降低了 24.8%，与 CK 相比提升了 15.5%；嫩选 17 在 T3 处理时 MDA 含量降至最低，与 T0 处理相比降低了 10.2%，与 CK 相比提升了 15.0%。

上述结果说明，外源水杨酸可以在一定程度上通过提升这些物质的含量，来提升谷子对莠去津的抗性，T3 处理效果最佳。随着水杨酸浓度的持续升高，2 个谷子品种的 POD、SOD、CAT、APX 活性和可溶性蛋白含量均呈下降趋势，MDA 含量呈上升趋势，说明高浓度对 2 个品种均呈抑制作用。

2.1.3 *不同浓度外源水杨酸与谷子萌发指标间相关性分析* 如图 3 所示，从相关性热图中可以看到发芽势与除了苗鲜重和苗干重外的其余 7 个指标均呈显著的正相关关系；发芽指数与活力指数、根长、根干重呈极显著的正相关；活力指数与根长、根干重、芽长呈极显著的正相关，与芽鲜重呈显著的正相关。根长与根干重呈极显著正相关，与根鲜重呈显著正相关；根鲜重与根干重呈显著的正相关；芽长与芽鲜重呈极显著的正相关。当环境因子随浓度变化时，环境矩阵与萌发指标组分之间的相关性也存在不同程度的正或负相关关系。

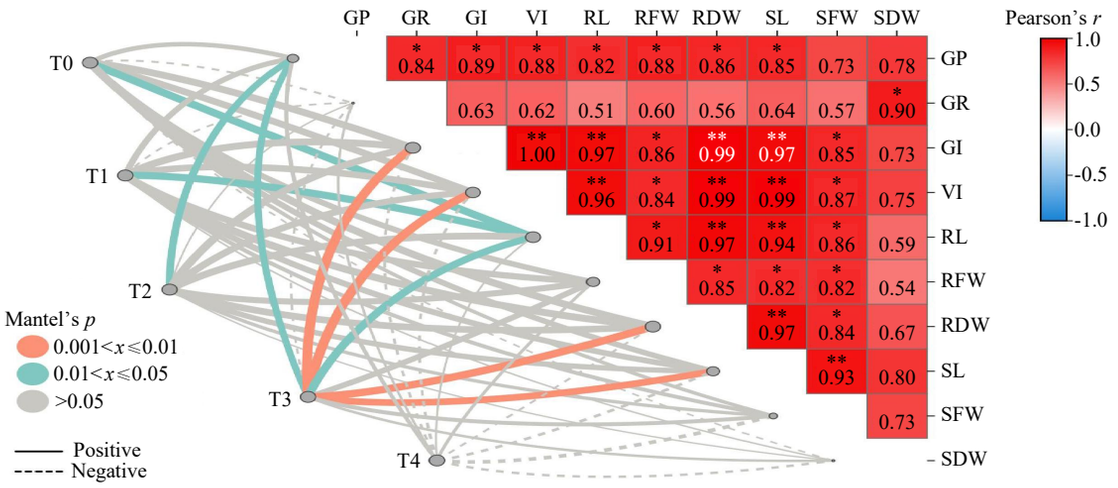
随着外源水杨酸浓度的升高，2 个矩阵之间的相关性越大，只有 T3 处理 2 个矩阵之间呈极显著的正相关关系，随着浓度的继续升高，环境矩阵与萌发指标矩阵之间的相关性随之降低，呈负相关，说明 T3 处理对萌发指标产生良好的促进作用，而高浓度外源水杨酸对萌发指标产生了抑制作用。

2.2 丸粒化对莠去津胁迫下谷子萌发的影响

2.2.1 *丸粒化对谷子萌发指标的影响* 图 4 为龙谷 54（图 4a）与嫩选 17（图 4b）在丸粒化处理后莠去津胁迫对谷子根长、芽长的影响。在无莠去津胁迫处理下，与 P4 处理相比，P2 处理对谷子的根长和芽长均产生了抑制作用（表 3）。龙谷 54 的根长与芽长分别降低了 6.7%、7.2%；嫩选 17 分别降低了 17.7%和 34.3%。从图 4 中也可以观察到，丸粒化后的根毛明显增多，根系表面积增加，利于其对水分、养分的吸收。

表 3 显示，龙谷 54 的根鲜重、根干重、芽鲜重和芽干重均得到了不同程度的提升，分别提升了 22.5%、22.9%、13.1%和 30.7%；嫩选 17 除芽鲜重以外的 3 个指标均得到提升，分别提升了 53.7%、12.1%和 16.9%。

在莠去津胁迫下，P1 处理后对谷子根长和芽长的抑制作用更加明显，与 P3 处理相比，P1 处理龙谷 54 的根长与芽长分别降低了 39.4%、4.5%，



矩形为生理指标间的相关性热图，不同颜色的连线表示环境因子和生理指标组分之间相关性显著水平，其中橘黄色连线表示极显著相关（$P < 0.01$），绿色连线表示显著相关（$P < 0.05$）。GP：发芽势；GR：发芽率；GI：发芽指数；VI：活力指数；RL：根长；RFW：根鲜重；RDW：根干重；SL：芽长；SFW：芽鲜重；SDW：芽干重。*：$P < 0.05$，**：$P < 0.01$。

Rectangles are heatmaps of correlations among physiological indicators, and lines of different colors indicate the significance levels of correlations between environmental factors and physiological indicator components, with orange lines indicating highly significant correlations ($P < 0.01$) and green lines indicating significant correlations ($P < 0.05$). GP: germination potential, GR: germination rate, GI: germination index, VI: vigor index, RL: root length, RFW: root fresh weight, RDW: root dry weight, SL: shoot length, SFW: shoot fresh weight, SDW: shoot dry weight.

图 3　萌发指标组分与环境因子的 Mantel 检验

Fig.3　Mantel test for germination index components and environmental factors

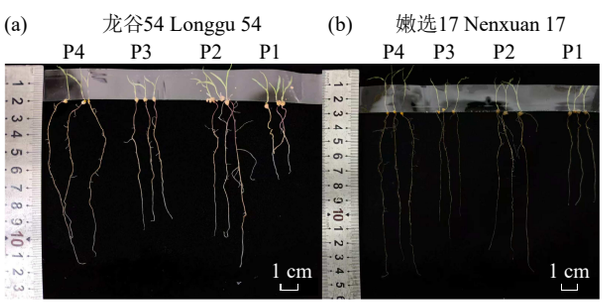


图 4　莠去津胁迫下丸粒化对谷子萌发的影响

Fig.4　Effects of pelletization on foxtail millet germination under atrazine stress

嫩选 17 分别降低了 33.8%、25.3%。

通过图 4 与表 3 的分析可以得到，无莠去津胁迫时，丸粒化虽然抑制了谷子根长，但起到了“壮根”的作用，能促进根毛生长，发达的根系有助于对养分的吸收，使根与芽的重量增加。加入莠去津胁迫后，丸粒化处理对 2 个谷子品种的芽生长起到抑制的作用，对与根相关的 3 个指标起到了更显著的抑制作用。

如表 4 所示，在 4 个处理中发芽势、发芽率和发芽指数都呈现出未丸化种＞丸化种的趋势，说明丸粒化对种子萌发产生了抑制作用。在莠去津胁迫下，P1 与 P3 处理相比，发芽率、发芽势和发芽指数分别降低了 42.6%、37.1%和 50.7%。未丸化处理（P3 与 P4）加入莠去津胁迫后，这 3 个指标分别下降 2.2%、2.0%和 6.8%；丸粒化（P1 与 P2）加入莠去津胁迫后，这 3 个指标分别下降 27.1%、23.8%和 27.3%。嫩选 17 变化趋势与龙谷 54 基本

表 3　莠去津胁迫下丸粒化对谷子生物量指标的影响

Table 3　Effects of pelletizing on foxtail millet biomass indexes under atrazine stress

品种 Variety	处理 Treatment	根长 Root length (cm)	根鲜重 Root fresh weight (g)	根干重 Root dry weight (mg)	芽长 Shoot length (cm)	芽鲜重 Shoot fresh weight (g)	芽干重 Shoot dry weight (mg)
龙谷 54 Longgu 54	P1	4.76±0.89c	0.021±0.001c	4.93±0.55c	1.88±0.03b	0.051±0.002ab	5.77±0.75c
	P2	9.25±0.48a	0.033±0.003a	8.77±0.35a	2.04±0.18ab	0.058±0.007a	9.37±0.38a
	P3	7.86±0.51b	0.026±0.001b	5.27±0.57bc	1.97±0.06b	0.046±0.001b	6.47±0.72bc
	P4	9.91±0.04a	0.027±0.001b	7.13±1.89ab	2.20±0.06a	0.051±0.003ab	7.17±0.67b
嫩选 17 Nenxuan 17	P1	5.87±0.16c	0.026±0.002b	4.27±0.21d	2.04±0.05d	0.043±0.003b	8.00±0.10b
	P2	8.64±0.17b	0.032±0.001a	9.27±0.57a	2.34±0.21c	0.049±0.002b	9.67±0.25a
	P3	8.87±0.21b	0.018±0.001d	5.67±0.32c	2.73±0.05b	0.050±0.007b	6.80±0.17c
	P4	10.50±0.28a	0.020±0.001c	8.27±0.55b	3.56±0.12a	0.061±0.002a	8.27±0.21b

一致。

表 4 莠去津胁迫下丸粒化对谷子萌发指标的影响

Table 4 Effects of pelletization on germination indices of foxtail millet under atrazine stress

品种 Variety	处理 Treatment	发芽势 Germination potential (%)	发芽率 Germination rate (%)	发芽指数 Germination index
龙谷 54 Longgu 54	P1	50.67±0.03c	61.33±0.08c	35.35±2.67c
	P2	70.00±0.08b	80.00±0.06b	46.97±4.10b
	P3	88.67±0.04a	96.67±0.04a	71.69±3.67a
	P4	90.67±0.03a	99.33±0.01a	76.92±1.96a
嫩选 17 Nenxuan 17	P1	15.33±0.05c	44.67±0.12c	18.21±4.52c
	P2	22.67±0.08c	60.67±0.08b	25.04±5.68c
	P3	82.00±0.07b	94.00±0.02a	76.16±4.62b
	P4	94.00±0.00a	97.33±0.02a	89.29±5.01a

对比发现，丸粒化处理降低了谷子的发芽率、发芽势和发芽指数，但在未加入莠去津时，丸粒化对谷子根和芽的物质积累却产生促进作用，使根与芽的重量显著高于未丸粒化种。

2.2.2 丸粒化对谷子生理指标的影响 从图 5 可以看出，与 P4 相比，P2 处理下龙谷 54 的 POD、CAT 活性和可溶性蛋白含量分别下降了 9.1%、27.4%和 9.2%；嫩选 17 的 POD、CAT 与 APX 活性分别下降 41.8%、15.1%和 8.2%。说明丸粒化处理对 2 个品种 POD、CAT 的合成产生了较强的抑制作用。值得注意的是，在丸粒化处理后，龙谷 54 的 MDA 含量下降了 16.7%，说明丸粒化降低了膜脂过氧化，让细胞膜更稳定；2 个品种的 SOD 活性都得到了较大幅度的提升，分别提升了 118.5%（龙谷 54）、89.1%（嫩选 17），强化了谷子的抗氧化防御系统。

对比 P1 与 P3 处理之间 6 个生理指标变化发现，龙谷 54 的 SOD、CAT、APX 活性及可溶性蛋白和 MDA 含量分别提升了 0.4%、14.8%、6.0%和 20.2%，只有 POD 活性降低了 9.1%；嫩选 17 只有 SOD 活性、可溶性蛋白含量分别提升了 5.0%和 2.6%，其余指标下降最多的为 POD 活性，下降了 29.3%，值得注意的是，MDA 含量下降了 16.2%。说明谷子丸粒化处理后对增强其抗逆性有一定的帮助。

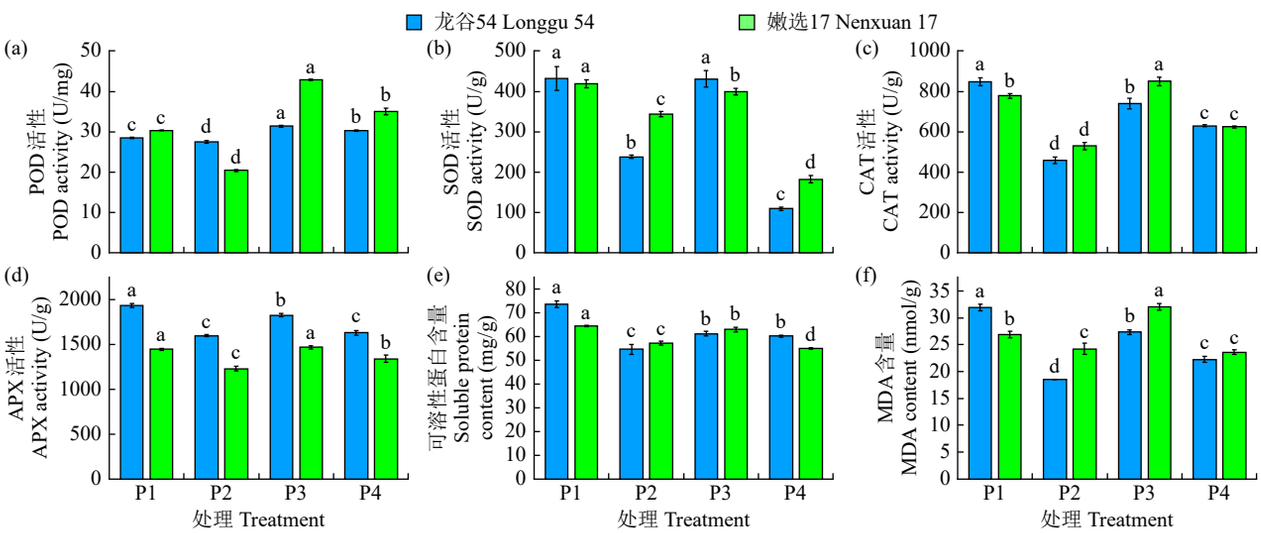


图 5 莠去津胁迫下丸粒化对谷子萌发期生理指标的影响

Fig.5 Effects of pelletization on physiological indices of foxtail millet during germination under atrazine stress

3 讨论

3.1 莠去津胁迫下外源水杨酸浸种对谷子萌发的影响

本试验结果表明，莠去津胁迫对谷子萌发和生长均产生了显著的抑制作用，这与王雨婷等[24]的研究结果相符。莠去津对根的抑制效果大于芽，在潘浪等[27]的研究中也有相似的结果，低浓度（10 mg/L）就会对后茬作物根长有显著的影响，而对后茬作物芽长产生影响的浓度需要大于 80 mg/L，这可能是因为根系是直接接触胁迫的部位，吸收量较多，对根的伸长和物质积累产生的抑制相对较大，芽则主要通过根部的运输，积累量相对较少，产生的抑制相对较小。

胡亚丽等[28]研究表明，外源水杨酸能够显著提高红麻幼苗在盐胁迫下的发芽率、发芽势和发芽指数，在本试验中外源水杨酸浸种对莠去津胁迫下谷子的这 3 个指标影响结果相同。POD、SOD 和 CAT 为生物体内重要的抗氧化酶，在清除活性氧、抵御

氧化胁迫中发挥关键作用[29]；APX 通过清除光系统产生的 H_2O_2 抑制光氧化损伤，从而提升作物在逆境条件下的生存能力；MDA 是膜脂过氧化的主要副产物，通常作为判断植物逆境条件下细胞受损的关键指标，在本试验中，通过外源水杨酸浸种，能够显著提高谷子萌发期 POD、SOD、CAT 和 APX 活性，提升谷子在逆境中的生存能力，同时也显著降低了 MDA 含量，说明外源水杨酸浸种能够降低膜脂过氧化，降低植物细胞的受损程度。在高浓度外源水杨酸浸种时发现，高浓度反而对萌发期的各类指标均产生了抑制效果，破坏了植物体内的激素平衡和代谢平衡，这一现象体现出了植物激素调控的复杂性。

通过观察外源水杨酸浸种对 2 个品种的生理指标影响发现，只有 APX 活性在 T2 处理下出现拐点，其余 5 项指标均在 T3 处理下出现拐点；综合萌发指标与外源水杨酸浓度变化，通过 Mantel 检验发现在 T3 处理（150 mg/L）浸种效果最佳，对莠去津胁迫下各类萌发指标恢复效果最好，这与吴子龙等[30]的试验结果相符。

3.2　莠去津胁迫下丸粒化对谷子萌发的影响

本试验发现，丸粒化处理后谷子根干重和鲜重更大，说明其根系储存或积累的有机、无机物质更多，可能是因根毛多，吸收和同化能力强，促进了物质积累，让根系更健壮，这与文飞等[31]的试验结果相似。对比丸粒化+莠去津胁迫与未丸化种+莠去津胁迫发现，丸粒化处理后的种子，加入莠去津胁迫后对根的伸长产生更显著的抑制作用，这可能是因为在发芽盒内丸粒化材料将周围莠去津溶液吸收至种子表面，形成局部高浓度区域，对幼苗生长产生抑制作用。试验发现无论是否存在莠去津胁迫，丸粒化处理后种子的发芽势、发芽率和发芽指数都会显著降低，这与马凌妍[32]、拜伟俊等[33]和陈红刚等[34]的丸粒化后提高种子萌发率的结论存在差异。陈云飞等[35]发现，在低氧条件下水稻的萌发会受到抑制，在本试验中谷子丸粒化后萌发受到抑制可能是发芽盒内水分较大，丸粒化材料吸水后导致透气性不佳，影响种子与外界的气体交换，进而影响种子萌发。这部分试验由于在发芽盒内进行，与土壤环境不同，对丸粒化处理后种子的萌发产生一定影响。

通过对 6 个生理指标的测定发现，在莠去津胁迫下，龙谷 54 丸粒化处理后促进了 SOD、CAT、APX 活性和可溶性蛋白含量提升；嫩选 17 丸粒化处理后，促进 SOD 和可溶性蛋白的合成，同时降低了 MDA 含量，降低了膜脂过氧化，说明丸粒化处理后强化了谷子的抗氧化防御系统，增强了谷子在逆境中的生存能力，降低胁迫产生的损伤，这与陈红刚等[34]的试验结果相符。

4　结论

莠去津胁迫下，150 mg/L 外源水杨酸浸种能够有效缓解莠去津对谷子萌发的影响，提高谷子的发芽率、发芽势和发芽指数，对谷子根与芽的生长也有促进作用，能显著提高谷子萌发期的抗氧化酶活性，减轻对膜脂过氧化损伤。丸粒化处理后能显著提升根与芽的鲜重和干重，起到壮根、壮苗的作用，但抑制苗的萌发。

参考文献

[1] 刁现民. 禾谷类杂粮作物耐逆和栽培技术研究新进展. 中国农业科学，2019，52(22)：3943-3949.

[2] 贾冠清，刁现民. 中国谷子种业创新现状与未来展望. 中国农业科学，2022，55(4)：653-665.

[3] 司友斌，孟雪梅. 中国谷子种业创新现状与未来展望. 安徽农业大学学报，2007，34(3)：451-455.

[4] 李清波，黄国宏，刘孝义，等. 阿特拉津薄层层析检测方法. 沈阳农业大学学报，2002，33(2)：112-114.

[5] 顾林玲. 三嗪类除草剂研究与开发新进展. 世界农药，2021，43(12)：12-23.

[6] 赵滨，卢宗志. 莠去津在吉林省的应用和残留现状调查. 东北农业科学，2018，43(3)：28-31.

[7] Karlsson S A，Weihermüller L，Tappe W，et al. Field scale boscalid residues and dissipation half-life estimation in a sandy soil. Chemosphere，2016，145：163-173.

[8] Pereira S V，Reis T，Souza B S，et al. Oestrogenicity assessment of s-triazines by-products during ozonation. Environmental Technology，2015，36(12)：1538-1546.

[9] 卢家顶，张晓霞，姚晋，等. 莠去津残留对玉米/苜蓿轮作体系中紫花苜蓿的毒害研究. 中国草地学报，2023，45(10)：98-106.

[10] 王淑楠. 莠去津与镉复合胁迫对玉米幼苗生态毒性的影响. 太原：山西大学，2021.

[11] 王栋麟，王琳，吴亚，等. 铝胁迫下添加水杨酸对黑麦草生理及叶绿素荧光参数的影响. 草原与草坪，2021，41(6)：88-97.

[12] 程晓晴，方婷玉，李凤杰，等. 喷施水杨酸对铝胁迫紫花苜蓿幼苗光合作用和光化学系统的影响. 中国草地学报，2020，42(4)：42-49.

[13] 王娟，李德全. 逆境条件下植物体内渗透调节物质的积累与活性氧代谢. 植物学通报，2001，18(4)：459-465.

[14] 姜炳杉，佟盟露，庞彩卫，等. 外源水杨酸对阿特拉津胁迫下甜菜幼苗生理特性的影响. 中国糖料，2024，46(4)：45-50.

[15] 余倩倩. 外源水杨酸缓解莠去津、特丁津和莠灭净对玉米毒性的作用. 南京：南京农业大学，2019.

[16] Hou S P，Liu Z W，Li Y Q，et al. Exogenous salicylic acid enhanced resistance of foxtail millet (*Setaria italica*) to *Sclerospora graminicola*. Plant Growth Regulation，2022，99(1)：35-44.

[17] Viswanath K K，Palaka K B，Ampasala R D. Alleviation of nickel toxicity in finger millet (*Eleusine coracana* L.) germinating seedlings by exogenous application of salicylic acid and nitric oxide. The Crop Journal，2016，5(3)：240-250.
[18] 抗艳红，许寅生，付永斌，等. 丸粒化处理对张杂谷种子萌发及生理特性的影响. 广东农业科学，2012，39(18)：18-19，28.
[19] Boudmyxay K，沈镭，钟帅，等. 引发剂混合引发及包衣丸化对烟草种子萌发的影响. 江苏农业科学，2020，48(6)：81-85.
[20] 马学杰，刘敏，侯占峰，等. 小粒牧草种子丸粒化包衣数值模拟与试验. 农业工程学报，2023，39(2)：43-52.
[21] 谢锦，韩立朴. 我国种子丸粒化研究现状及展望. 中国生态农业学报（中英文），2024，32(4)：605-615.
[22] 王晶英，敖红，张杰，等. 植物生理生化实验技术与原理. 哈尔滨：东北林业大学出版社，2003.
[23] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京：高等教育出版社，2000.
[24] 王雨婷，苗兴芬，王帝. 萌发期耐莠去津谷子种质资源筛选及评价. 作物杂志，2021(5)：194-204.
[25] 陈二影，王润丰，秦岭，等. 谷子芽期耐盐碱综合鉴定及评价. 作物学报，2020，46(10)：1591-1604.
[26] Li Q W，Li Y J，Bi J S，et al. Melatonin enhances maize germination, growth, and salt tolerance by regulating reactive oxygen species accumulation and antioxidant systems. Plants，2025，14(2)：296.
[27] 潘浪，徐洪乐，罗小娟，等. 烟嘧·莠去津不同剂型对后茬作物幼苗的影响. 杂草科学，2012，30(2)：29-33.
[28] 胡亚丽，聂靖芝，吴霞，等. 水杨酸引发对红麻幼苗耐盐性的影响. 中国农业科学，2022，55(14)：2696-2708.
[29] 李畅，苏家乐，刘晓青，等. 干旱胁迫对鹿角杜鹃种子萌发和幼苗生理特性的影响. 西北植物学报，2015，35(7)：1421-1427.
[30] 吴子龙，张晨，刘天艺，等. 外源水杨酸对 PEG 胁迫下谷子发芽及幼苗生长的影响. 饲料研究，2024，47(6)：115-119.
[31] 文飞，谢建池，吕伟，等. 丸粒化处理对芝麻出苗及幼苗生长的影响. 山西农业科学，2018，46(12)：2026-2028，2065.
[32] 马凌妍. 两种乡土草的干旱胁迫响应及其种子丸粒化研究. 沈阳：沈阳农业大学，2024.
[33] 拜伟俊，黄杰，魏玉明，等. 藜麦种子丸粒化配方的筛选及效果验证. 作物杂志. (2025-10-28)[2026-02-03]. https://link.cnki.net/urlid/11.1808.s.20250423.1103.014.
[34] 陈红刚，李岩，王惠珍，等. 丸粒化处理对菘蓝种子萌发及幼苗质量的影响. 时珍国医国药，2025，36(9)：1737-1741.
[35] 陈云飞，张军礼，尹道琨，等. 丸粒化处理对低氧胁迫下水稻种子萌发、幼苗形态和淀粉酶活性的影响. 安徽农业大学学报，2023，50(6)：930-935.

Effects of Pelleting and Salicylic Acid Treatment on Foxtail Millet Germination under Atrazine Stress

Men Rui[1], Zhang Dongmei[2], Sun Hao[1], Guo Yanjie[1], Xie Yuhang[1], Wang Wenzhu[1], Wang Xuewen[1], Li Candong[3], Miao Xingfen[1,4]

([1]College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University / Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation Technology and Crop Germplasm Improvement, Daqing 163319, Heilongjiang, China; [2]Harbin Mingxing Agricultural Technology Development Co., Ltd., Harbin 150038, Heilongjiang, China; [3]Jiamusi Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Jiamusi 154007, Heilongjiang, China; [4]Key Laboratory of Green and Low-Carbon Agriculture in Northeast China Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Daqing 163319, Heilongjiang, China)

Abstract To investigate the effects of seed pelleting and exogenous salicylic acid on foxtail millet germination under atrazine stress, experiments were conducted using Longgu 54 and Nenxuan 17 as test materials. The study examined the impact of seed soaking and pelleting treatments with different concentrations (0, 50, 100, 150, 200 mg/L) of exogenous salicylic acid on foxtail millet germination under 2 mL/L of 38% atrazine suspension treatment. The results showed that increasing concentrations of exogenous salicylic acid initially promoted and then inhibited foxtail millet germination under atrazine stress, with 150 mg/L yielding the optimal effect. This concentration significantly enhanced germination potential, germination rate, and germination index. Compared to 0 mg/L, soaking with 150 mg/L salicylic acid markedly increased activities of superoxide dismutase, peroxidase, catalase and ascorbate peroxidase, as well as soluble protein content, thereby reducing oxidative damage caused by atrazine stress. In the absence of atrazine, pelleting treatment exhibited inhibitory effects on root length, shoot length, germination potential, germination rate, and germination index, but improved root fresh weight, root dry weight, shoot fresh weight, and shoot dry weight, indicating that pelleting promoted root development and shoot growth. Additionally, pelleting had the function of suppress weak seed germination and select for vigorous seedlings. Under atrazine stress, pelleting treatment exerted inhibitory effects on all measured parameters.

Key words Foxtail millet; Pelleting; Salicylic acid; Physiological indices; Germination stage