

许朝荣, 万 群, 王 亚, 等. 微量元素肥料对水稻噻呋酰胺吸收及纹枯病防治效果的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(5): 883-892.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.05.007

微量元素肥料对水稻噻呋酰胺吸收及纹枯病防治效果的影响

许朝荣¹, 万 群^{2,3}, 王 亚², 吕 康², 田 岳³, 葛 静², 程金金², 余向阳²

(1. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院农产品质量安全与营养研究所, 江苏 南京 210014; 3. 江苏科技大学生物技术学院, 江苏 镇江 212100)

摘要: 本研究分别采用水培法和土培法, 探究镧、硒、硼 3 种微量元素肥料对水稻吸收噻呋酰胺的影响, 并分析了 3 种微量元素肥料与噻呋酰胺配施对水稻抗氧化酶活性、纹枯病防治效果的影响。结果表明, 水培条件下, La1 处理(0.5 mg/L 噻呋酰胺+43.3 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、B1 处理(0.5 mg/L 噻呋酰胺+0.286 mg/L H_3BO_3)、Se2 处理(0.5 mg/L 噻呋酰胺+0.10 mg/L Na_2SeO_3) 水稻地上部噻呋酰胺含量显著高于 0.5 mg/L 噻呋酰胺对照。同时 La1 处理、B1 处理、Se2 处理水稻纹枯病相对病级显著低于 0.5 mg/L 噻呋酰胺对照和其他处理($P < 0.05$)。La1 处理、B1 处理、Se2 处理水稻地上部超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、几丁质酶、 β -1,3 葡聚糖酶活性显著高于 0.5 mg/L 噻呋酰胺对照。土培条件下, Se4 处理[14.56 g 噻呋酰胺(24%)+0.2 g Na_2SeO_3]、La4 处理[14.56 g 噻呋酰胺(24%)+0.6 g $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$]与 B4 处理[14.56 g 噻呋酰胺(24%)+0.1 g H_3BO_3]对水稻种子萌发的影响较小。拌种 20 d 后, 与 14.56 g/kg 噻呋酰胺(24%)对照相比, Se4 处理、La4 处理与 B4 处理水稻地上部噻呋酰胺含量分别显著提高了 20.36%、36.72% 和 36.00% ($P < 0.05$)。因此, 适量的镧、硒、硼微量元素肥料与噻呋酰胺配施可以促进水稻对噻呋酰胺的吸收和转运, 提高水稻植株抗氧化酶活性, 进而提升噻呋酰胺对水稻纹枯病的防治效果。本研究结果为噻呋酰胺高效利用及水稻纹枯病防治提供了理论依据, 对推进农药减量增效具有重要意义。

关键词: 微量元素肥料; 纹枯病; 噻呋酰胺; 水稻

中图分类号: S481⁺.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)05-0883-10

The impact of micronutrient fertilizers on the uptake of thifluzamide and the control of sheath blight in rice

XU Zhaorong¹, WAN Qun^{2,3}, WANG Ya², LYU Kang², TIAN Yue³, GE Jing², CHENG Jinjin², YU Xiangyang²

(1. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Institute of Food Safety and Nutrition, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. School of Biotechnology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

收稿日期: 2024-10-11

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项基金项目(BE2022424); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(23)3009]; 国家重点研发计划项目(2021YFD1700803)

作者简介: 许朝荣(2000-), 男, 四川巴中人, 硕士研究生, 研究方向为农产品产地农药环境行为。(E-mail) 1309895107@qq.com

通讯作者: 程金金, (E-mail) jjcheng@jaas.ac.cn

Abstract: This study employed both hydroponic and soil cultivation methods to investigate the effects of three micronutrient fertilizers (lanthanum, selenium and boron) on the uptake of thifluzamide by the rice plants. Additionally, this study analyzed the impact of combining these micronutrient fertilizers with thifluzamide on the activity of antioxidant enzymes in rice and the efficacy of sheath blight control. The results showed that under hydro-

ponic conditions, the thifluzamide content in aboveground parts of rice treated with La1 (0.5 mg/L thifluzamide + 43.3 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), B1 (0.5 mg/L thifluzamide + 0.286 mg/L H_3BO_3), and Se2 (0.5 mg/L thifluzamide + 0.10 mg/L Na_2SeO_3) was significantly higher than that in the 0.5 mg/L thifluzamide control group. Moreover, the relative disease severity of sheath blight in La1 treatment, B1 treatment, and Se2 treatment was significantly lower than that in the 0.5 mg/L thifluzamide control and other treatments ($P < 0.05$). The activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), chitinase, and β -1,3-glucanase in the aboveground parts of rice in La1 treatment, B1 treatment, and Se2 treatment were significantly higher than those in the 0.5 mg/L thifluzamide control group. Under soil cultivation conditions, the Se4 treatment (14.56 g thifluzamide (24%) + 0.2 g Na_2SeO_3), La4 treatment (14.56 g thifluzamide (24%) + 0.6 g $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), and B4 treatment (14.56 g thifluzamide (24%) + 0.1 g H_3BO_3) exhibited minimal impact on rice seed germination. Twenty days after seed dressing, compared with the 14.56 g/kg thifluzamide (24%) control, the thifluzamide content in the aboveground parts of rice in the Se4, La4, and B4 treatments increased by 20.36%, 36.72%, and 36.00%, respectively ($P < 0.05$). Therefore, appropriate application of lanthanum, selenium, and boron micronutrients in combination with thifluzamide can enhance the uptake and translocation of thifluzamide in rice plants, increase the activity of antioxidant enzymes in rice plants, and thereby improve the control efficacy of thifluzamide against rice sheath blight. The findings of this study provide a theoretical basis for the efficient utilization of thifluzamide and the control of rice sheath blight, and are of great significance for advancing pesticide reduction and efficacy enhancement.

Key words: micronutrient fertilizers; sheath blight; thifluzamide; rice

稻瘟病、白叶枯病和纹枯病被公认为是水稻三大关键病害。这些病害在各主要稻作区广泛分布且频繁暴发,对水稻产量构成了严重威胁,导致严重经济损失^[1]。纹枯病菌作为一种半腐生真菌,能够通过形成抗逆性强的菌核结构在土壤中长期存活,该病原菌通常通过土壤和水流传播,发病期间也可通过水稻发病组织进行横向传播。其寄主范围较广,可感染约 32 种植物^[2]。水稻纹枯病通常从叶鞘部分开始发病,发病部位具有隐蔽性。目前,纹枯病的防治措施主要包括培育抗病品种以及施用化学、生物或 RNA 农药。喷雾施药是一种常见的农药施用方法,为确保农药充分到达病害部位往往需要大量喷施,这不仅增加了环境负担,也造成了农药浪费。

种子处理技术作为一种有效的病害防治方法,能够预防和控制土壤或种子携带的病原体,保护作物幼苗免受病虫害侵害^[3]。姚克兵等^[4]研究结果表明,采用噻呋酰胺干拌和湿拌水稻种子,对水稻纹枯病的控制效果较好。何东兵等^[5]采用噻呋酰胺、氯虫苯甲酰胺和三氟苯嘧啶 3 种药剂拌种,对拔节孕穗期水稻纹枯病防治效果达到 75%~89%。刘嘉楠等^[6]发现,噻呋酰胺在水稻体内的迁移系数 (TF) < 1,噻呋酰胺主要富集于根部,其由地下部向地上部的转运能力较弱,与张硕佳等^[7]的研究结论一致。噻呋酰胺作为一种强内吸性琥珀酸脱氢酶抑制剂,对水稻纹枯病具有良好的防治效果^[8]。内吸性农

药经作物吸收后可以在植株体内传导,能够到达喷雾难以直接覆盖的隐蔽部位,在病虫害防治方面具有独特优势。因此,提高噻呋酰胺从地下部向地上部的迁移效率,对减少用药量并实现纹枯病高效防治具有重要意义。

微量元素在促进植物生长、缓解药害等方面发挥重要作用。据调查,江苏耕作层土壤中,贫硒与严重贫硒土壤累计超过 76%,局部耕地稀土元素缺乏现象也较为明显^[9]。通过微量元素与农药吸收转运相关化合物的协同作用,有望实现协同增效,在促进植株生长的同时实现农药靶向传输。已有研究结果表明,适宜浓度的硒能够促进植物生长、增强抗氧化能力、减少活性氧含量和脂质过氧化物含量,并通过防止细胞铁死亡提高植物抗逆性^[10]。有机硒溶液处理可抑制禾本科镰刀菌在小麦穗部的扩展,降低病穗率^[11]。此外,硒能够破坏植物组织内病原体的细胞膜,抑制病原菌的细胞延伸,硒还能改变土壤微生物群落结构,从而保护植物细胞免受真菌入侵^[12]。稀土元素镧对植物生长和抗逆性具有双重影响。研究结果表明,镧可通过改善抗氧化防御系统提高龙葵对重金属的耐受性,施用适宜浓度的镧可促进龙葵的生长,同时增强龙葵的抗逆性^[13]。镧既能刺激植株生长和光合作用,也能诱发氧化应激,对植物产生负面影响^[14-16]。此外,适宜浓度的镧能激活植物细胞的内吞作用,镧通过与钙调蛋白的 2

个钙结合位点结合,使钙调蛋白的分子结构更加紧密有序,从而促进植物的生长^[17-18]。硼作为植物必需的微量元素,在细胞壁形成、细胞分裂、果实和种子发育、糖运输以及激素合成等生理过程中发挥关键作用^[19]。此外,硼还与氮、磷、钾和钙等其他营养元素相互作用,对作物的生长发育、产量形成和品质提升具有不可替代的作用^[20]。本研究拟对水稻施用镧、硒、硼3种微量元素肥料,探究微量元素肥料对水稻吸收、传导噻呋酰胺的影响,以期为微量元素肥料与农药配合施用提高农药利用率、减少农药损失和环境污染、推进农药减量增效提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 化学试剂和仪器

仪器:液相色谱-串联质谱仪(型号 SCIEX Triple Quad 5500+,美国 AB Sciex 公司产品);离心机(型号 Centrifuge 5804R,美国 Eppendorf 公司产品);研磨机(型号 A11,德国 IKA 公司产品);高速粉碎机(型号 FW80,天津泰斯特仪器有限公司产品);多管涡旋振荡器(型号 SCDEALL VX-III,北京安简科技有限公司产品)。

试剂:乙腈(色谱纯)、无水硫酸镁(纯度>98%)、氯化钠(优级纯)、C18、*N*-丙基乙二胺(PSA)、24%噻呋酰胺悬浮剂(纯度>96%)、噻呋酰胺标准品。植物 β -1,3-葡聚糖酶 ELISA 科研试剂盒、植物几丁质酶 ELISA 科研试剂盒、植物丙二醛 ELISA 科研试剂盒、植物过氧化物酶 ELISA 科研试剂盒、植物超氧化物歧化酶 ELISA 科研试剂盒均购自江苏晶美生物科技有限公司。

1.2 水稻品种

供试水稻品种为南粳 5055。水稻纹枯病菌(*Rhizoctonia solania*)菌株 RH-2,中等致病力,由江苏省农业科学院植物保护研究所提供。

1.3 试验设计

1.3.1 水稻育苗 水稻种子经 30%过氧化氢浸泡 15 min 消毒后,用去离子水清洗 3 次,置于 32 °C 恒温黑暗培养箱中浸泡催芽。待种子破胸后点播,继续在相同条件下催芽直到芽鞘长至 2 cm。将发芽种子转移到光照环境中,初期光合有效辐射 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,2 d 后增至 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光周期为 12 h 光照/12 h 黑暗,温度设置为白天 30 °C/夜间 25 °C。一叶期前,仅用去离子水培养水稻;

一叶期,使用 1/6 浓度木村 B 营养液培养;二叶期,使用 1/6 浓度木村 B 营养液培养;三叶期及以后,使用全浓度木村 B 营养液培养。水稻生长至三叶一心期(25 d),挑选生长状态和大小一致的健康幼苗用于水培试验。

1.3.2 纹枯病菌培养 将纹枯病菌接种到 PDA 培养基上,28 °C 下倒置培养 2~3 d 进行活化,待培养基表面长满白色菌丝后,取菌块接种到新鲜 PDA 培养基中,28 °C 倒置培养 2~3 d,直至白色菌丝铺满培养皿。

1.3.3 水培试验 参照前人研究方法^[21-22],设置如下处理,CK1:清水对照;CK2:0.5 mg/L 噻呋酰胺对照;B1:0.5 mg/L 噻呋酰胺+0.286 mg/L H_3BO_3 ;B2:0.5 mg/L 噻呋酰胺+2.860 mg/L H_3BO_3 ;B3:0.5 mg/L 噻呋酰胺+14.300 mg/L H_3BO_3 ;La1:0.5 mg/L 噻呋酰胺+43.3 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;La2:0.5 mg/L 噻呋酰胺+86.6 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;La3:0.5 mg/L 噻呋酰胺+216.5 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;Se1:0.5 mg/L 噻呋酰胺+0.05 mg/L Na_2SeO_3 ;Se2:0.5 mg/L 噻呋酰胺+0.10 mg/L Na_2SeO_3 ;Se3:0.5 mg/L 噻呋酰胺+0.50 mg/L Na_2SeO_3 。将水稻幼苗置于含 0.5 mg/L 噻呋酰胺和不同浓度微量元素肥料的水稻营养液中进行培养,每个处理设置 3 个重复。48 h 后水稻对噻呋酰胺的吸收达到平衡^[6],因此本试验中水培时长设置为 48 h。

1.3.4 酶活性测定 水培 48 h 后,采集水稻地上部,洗净擦干后于 -80 °C 保存,采用试剂盒测定过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、 β -1,3-葡聚糖酶、几丁质酶活性以及丙二醛含量。操作步骤严格按照试剂盒说明书进行。

1.3.5 水稻纹枯病防治效果测定 水稻幼苗水培 48 h 后,用去离子水冲洗水稻根系,将水稻幼苗转移至不含噻呋酰胺和微量元素肥料的营养液中,用打孔器取直径为 7 mm 的菌块,将菌块接种于水稻苗基部,菌丝面与水稻茎基部相贴,在光合有效辐射 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、温度 30 °C、湿度 85% 条件下培养,7 d 后剪去水稻根部,测量水稻的苗高(茎基部至水稻拉直后最高叶尖的高度)和发病水稻的病斑高度,相对病级=(病斑高度/苗高) $\times 9$ 。

1.3.6 土培试验 参照前人研究方法,每 1 kg 种子使用 14.56 g 24%噻呋酰胺悬浮剂拌种^[23-25]。设置如下处理,CK1:清水对照;CK3:14.56 g/kg 噻呋酰胺

(24%) 对照; B4: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 0.1 g/kg H_3BO_3 ; B5: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 0.2 g/kg H_3BO_3 ; B6: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 0.4 g/kg H_3BO_3 ; La4: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 0.6 g/kg $LaNO_3 \cdot 6H_2O$; La5: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 1.2 g/kg $LaNO_3 \cdot 6H_2O$; La6: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 3.0 g/kg $LaNO_3 \cdot 6H_2O$; Se4: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 0.2 g/kg Na_2SeO_3 ; Se5: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 1.0 g/kg Na_2SeO_3 ; Se6: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 2.0 g/kg Na_2SeO_3 。选取 100 粒饱满的水稻种子进行拌种处理, 每个处理设置 3 个重复, 将种子放置于无光照培养箱中, 25 °C 条件下进行催芽, 于第 1 d、4 d、7 d 观察出芽情况, 以破胸露白为发芽标准。

根据种子发芽试验结果, 选择对种子发芽影响较小的微量元素肥料浓度拌种。选择如下处理, CK3: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) 对照; B4: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 0.1 g/kg H_3BO_3 ; La4: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 0.6 g/kg $LaNO_3 \cdot 6H_2O$; Se4: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 0.2 g/kg Na_2SeO_3 。拌种后, 将种子播于穴盘中, 每穴 5 粒, 每处理设置 3 个重复。于播种后第 10 d 和 20 d 时取样, 并测定地上部噻吩酰胺含量。

1.3.7 水稻中噻吩酰胺含量的测定 用去离子水充分清洗水稻根部, 以去除残留在水稻根系表面的农药, 用吸水纸擦干水稻植株表面的水分。将水稻植株分为地下部、地上部 2 个部分, 并记录各部分重量。水稻地上部经洗净、擦干后, 用液氮速冻并进行研磨。接着, 加入 5 mL 乙腈, 振荡 20 min, 加入 1 g NaCl, 涡旋 5 min, 以 5 000 r/min 离心 5 min。取上清液 1 mL, 加入 150 mg 无水硫酸镁、25 mg PSA、25 mg C18, 充分涡旋 2 min, 以 8 000 r/min 离心 2 min。最后, 将上清液通过 0.2 μm 有机滤膜过滤, 滤液用于后续检测分析。

采用 AB-Sciex Exion 液相色谱系统与 AB-Sciex Qtrap 5500 + 三重四极杆质谱联用仪 (HPLC-MS/MS) 检测滤液中噻吩酰胺含量。色谱柱为 Kinetex F5 (2.6 μm , 100 cm \times 30 mm), 柱温 30 °C。流动相为 10% 甲酸水溶液和 90% 乙腈, 流速 0.3 mL/min, 进样体积 2 μL , 保留时间 2.5 min。

1.4 数据分析与统计

试验数据均采用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件

进行差异显著性分析, 使用 Origin 2021 软件进行数据处理和绘图。

2 结果与分析

2.1 微量元素肥料对种子发芽的影响

如表 1 所示, 与 CK3 相比, Se5 处理和 Se6 处理水稻种子发芽势分别显著降低 61.35%、81.69% ($P < 0.05$); 其余处理水稻种子发芽势与 CK3 相比无显著差异 ($P > 0.05$)。与 CK3 相比, Se5 处理和 Se6 处理水稻种子发芽率分别显著降低 59.06%、81.38% ($P < 0.05$); 其余处理水稻种子发芽率与 CK3 相比无显著差异 ($P > 0.05$)。与 CK3 相比, Se5 处理和 Se6 处理水稻种子发芽指数分别显著降低 76.89%、88.38% ($P < 0.05$); Se5 处理和 Se6 处理水稻种子发芽指数显著低于其他处理 ($P < 0.05$)。表明中、高质量浓度 Na_2SeO_3 处理使水稻种子的发芽率、发芽势以及发芽指数显著降低, 对水稻种子萌发生产生显著抑制作用, 而 H_3BO_3 和 $LaNO_3 \cdot 6H_2O$ 对水稻种子发芽率、发芽势影响较小。

表 1 微量元素肥料对种子发芽的影响

Table 1 Effects of micronutrient fertilizers on seed germination

处理	发芽势 (%)	发芽率 (%)	发芽指数
CK1	99.00 \pm 1.73a	100.00 \pm 0a	78.54 \pm 0.77a
CK3	98.33 \pm 1.15a	99.33 \pm 0.58a	69.71 \pm 2.78bc
B4	98.33 \pm 0.58a	99.00 \pm 1.00a	67.40 \pm 1.05cd
B5	97.33 \pm 2.08a	98.33 \pm 1.15a	73.02 \pm 0.49b
B6	96.67 \pm 1.15a	97.33 \pm 0.58a	61.24 \pm 2.76ef
Se4	95.00 \pm 2.00a	96.00 \pm 1.00a	42.08 \pm 2.24g
Se5	38.00 \pm 7.21b	40.67 \pm 7.09b	16.11 \pm 3.10h
Se6	18.00 \pm 1.41c	18.50 \pm 0.71c	8.10 \pm 0.80i
La4	97.67 \pm 2.31a	98.67 \pm 2.00a	66.45 \pm 2.13cde
La5	97.00 \pm 2.65a	98.33 \pm 2.00a	64.88 \pm 2.57de
La6	97.67 \pm 1.15a	98.33 \pm 1.53a	59.75 \pm 1.18f

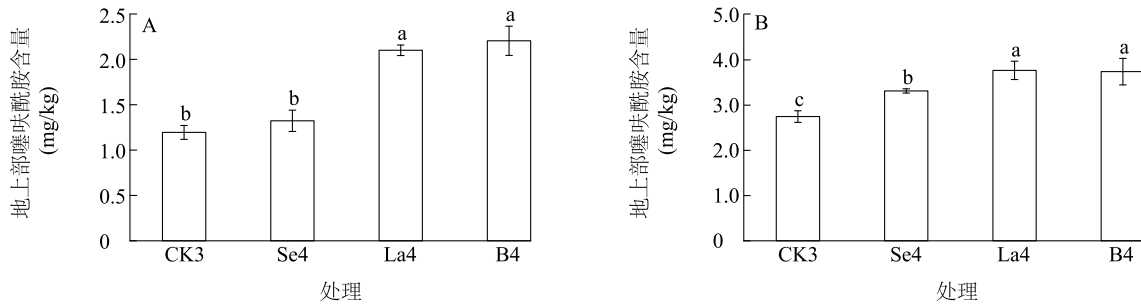
CK1: 清水对照; CK3: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) 对照; B4: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 0.1 g/kg H_3BO_3 ; B5: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 0.2 g/kg H_3BO_3 (B2); B6: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 0.4 g/kg H_3BO_3 ; La4: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 0.6 g/kg $LaNO_3 \cdot 6H_2O$; La5: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 1.2 g/kg $LaNO_3 \cdot 6H_2O$; La6: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 3.0 g/kg $LaNO_3 \cdot 6H_2O$; Se4: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 0.2 g/kg Na_2SeO_3 ; Se5: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 1.0 g/kg Na_2SeO_3 ; Se6: 14.56 g/kg 噻吩酰胺 (24%) + 2.0 g/kg Na_2SeO_3 。同一列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 微量元素肥料对水稻吸收噻吩酰胺的影响

为进一步验证 3 种微量元素肥料对水稻吸收噻

噻呋酰胺的促进效果,将微量元素肥料与噻呋酰胺混合拌种,进行土培试验。如图 1A 所示,拌种后 10 d,0.6 g/kg $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 0.1 g/kg H_3BO_3 均能显著提高水稻幼苗地上部噻呋酰胺含量,与 CK3 相比,La4 处理与 B4 处理水稻地上部噻呋酰胺含量分别显著提高 76.47%和 84.87% ($P < 0.05$)。如图 1B

所示,拌种后 20 d,0.2 g/kg Na_2SeO_3 、0.6 g/kg $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 0.1 g/kg H_3BO_3 均能显著提高水稻幼苗地上部噻呋酰胺含量,与 CK3 相比,Se4 处理、La4 处理与 B4 处理水稻地上部噻呋酰胺含量分别显著提高 20.36%、36.72%和 36% ($P < 0.05$)。



A:拌种后 10 d 水稻幼苗地上部噻呋酰胺含量;B:拌种后 20 d 水稻幼苗地上部噻呋酰胺含量。CK3:14.56 g/kg噻呋酰胺(24%)对照;Se4:14.56 g/kg噻呋酰胺(24%)+0.2 g/kg Na_2SeO_3 ;La4:14.56 g/kg噻呋酰胺(24%)+0.6 g/kg $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;B4:14.56 g/kg噻呋酰胺(24%)+0.1 g/kg H_3BO_3 。同一图中图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 土培条件下水稻地上部噻呋酰胺含量

Fig.1 Thifluzamide content in the aboveground parts of rice under soil cultivation conditions

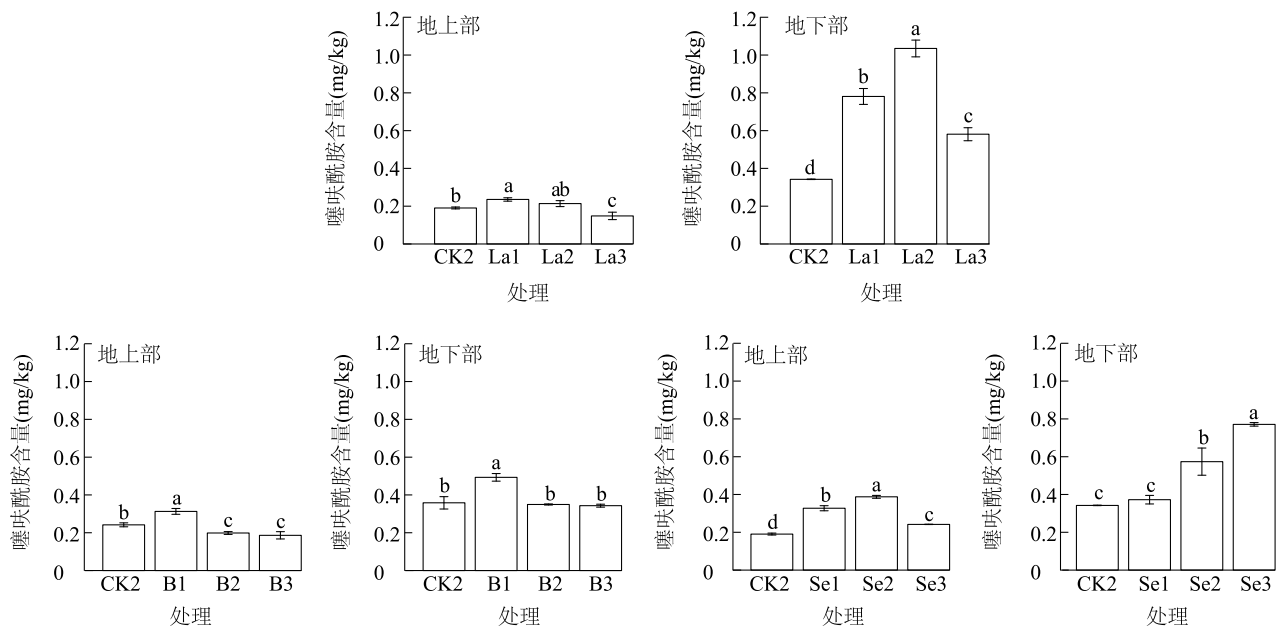
如图 2A 所示,随着硝酸镧质量浓度的增加,水稻幼苗地上部和地下部噻呋酰胺含量呈现先上升后降低的趋势。La1 处理地上部噻呋酰胺含量显著高于 CK2 ($P < 0.05$),与 CK2 相比,La2 处理水稻地下部噻呋酰胺含量显著提高 205.88% ($P < 0.05$)。如图 2B 所示,随着硼酸质量浓度的增加,水稻幼苗地上部和地下部噻呋酰胺含量呈现先上升后降低的趋势。B1 处理水稻地下部与地上部噻呋酰胺含量最高,分别为 0.49 mg/kg 和 0.31 mg/kg,与 CK2 相比,B1 处理水稻地下部与地上部噻呋酰胺含量分别显著提高 36.11% 和 29.17% ($P < 0.05$)。如图 2C 所示,Se2 处理水稻地上部噻呋酰胺含量最高,达到 0.39 mg/kg,与 CK2 相比,Se2 处理水稻地上部噻呋酰胺含量显著提高 105.26% ($P < 0.05$),Se3 处理水稻地下部噻呋酰胺含量最高,达到 0.77 mg/kg,与 CK2 相比,Se3 处理水稻地下部噻呋酰胺含量显著提高 126.47% ($P < 0.05$)。综上,水培条件下,43.3 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、0.1 mg/L Na_2SeO_3 和 0.286 mg/L H_3BO_3 可以显著提高水稻地上部噻呋酰胺含量。

2.3 微量元素肥料与噻呋酰胺联合施用对水稻酶活性的影响

2.3.1 微量元素肥料与噻呋酰胺联合施用对水稻抗氧

化酶活性及丙二醛含量的影响 膜脂过氧化的终产物是丙二醛,其含量可以反映植物受损程度。如图 3A~图 3C 所示,与 CK2 相比,La3 处理和 Se3 处理水稻地上部丙二醛含量分别显著降低 17.34%、22.32% ($P < 0.05$);与 CK2 相比,La1 处理与 Se2 处理水稻地上部丙二醛含量分别显著提高 28.60% 和 27.49% ($P < 0.05$)。表明适宜质量浓度的微量元素肥料可有效降低水稻地上部丙二醛积累量,从而增强水稻抗逆性。

过氧化物酶(P_{OD})作为重要的抗氧化酶,可通过催化过氧化氢(H_2O_2)分解从而减少活性氧的积累,保护植物细胞免受氧化损伤。如图 3D~图 3F 所示,与 CK2 相比,La1 处理、B1 处理、Se1 处理、Se2 处理水稻地上部 P_{OD} 活性分别显著提高 11.00%、23.64%、54.81% 与 72.10% ($P < 0.05$)。超氧化物歧化酶(S_{OD})催化超氧化物阴离子自由基歧化为过氧化氢和分子氧,在保护细胞免受氧化损伤过程中发挥重要作用。如图 3G~图 3I 所示,L1 处理、L2 处理、B1 处理、Se1 处理、Se2 处理水稻地上部 S_{OD} 活性均显著高于 CK2 ($P < 0.05$)。综上,适宜质量浓度的微量元素肥料能够增强水稻抗氧化能力,使水稻维持正常的光合作用和呼吸作用,增强水稻应对干旱、盐碱、高温等非生物胁迫的能力。



CK2:0.5 mg/L噻唑酰胺对照;La1:0.5 mg/L噻唑酰胺+43.3 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;La2:0.5 mg/L噻唑酰胺+86.6 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;La3:0.5 mg/L噻唑酰胺+216.5 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;B1:0.5 mg/L噻唑酰胺+0.286 mg/L H_3BO_3 ;B2:0.5 mg/L噻唑酰胺+2.860 mg/L H_3BO_3 ;B3:0.5 mg/L噻唑酰胺+14.300 mg/L H_3BO_3 ;Se1:0.5 mg/L噻唑酰胺+0.05 mg/L Na_2SeO_3 ;Se2:0.5 mg/L噻唑酰胺+0.10 mg/L Na_2SeO_3 ;Se3:0.5 mg/L噻唑酰胺+0.50 mg/L Na_2SeO_3 。同一图中柱上不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图2 水培条件下水稻地上部与地下部噻唑酰胺含量

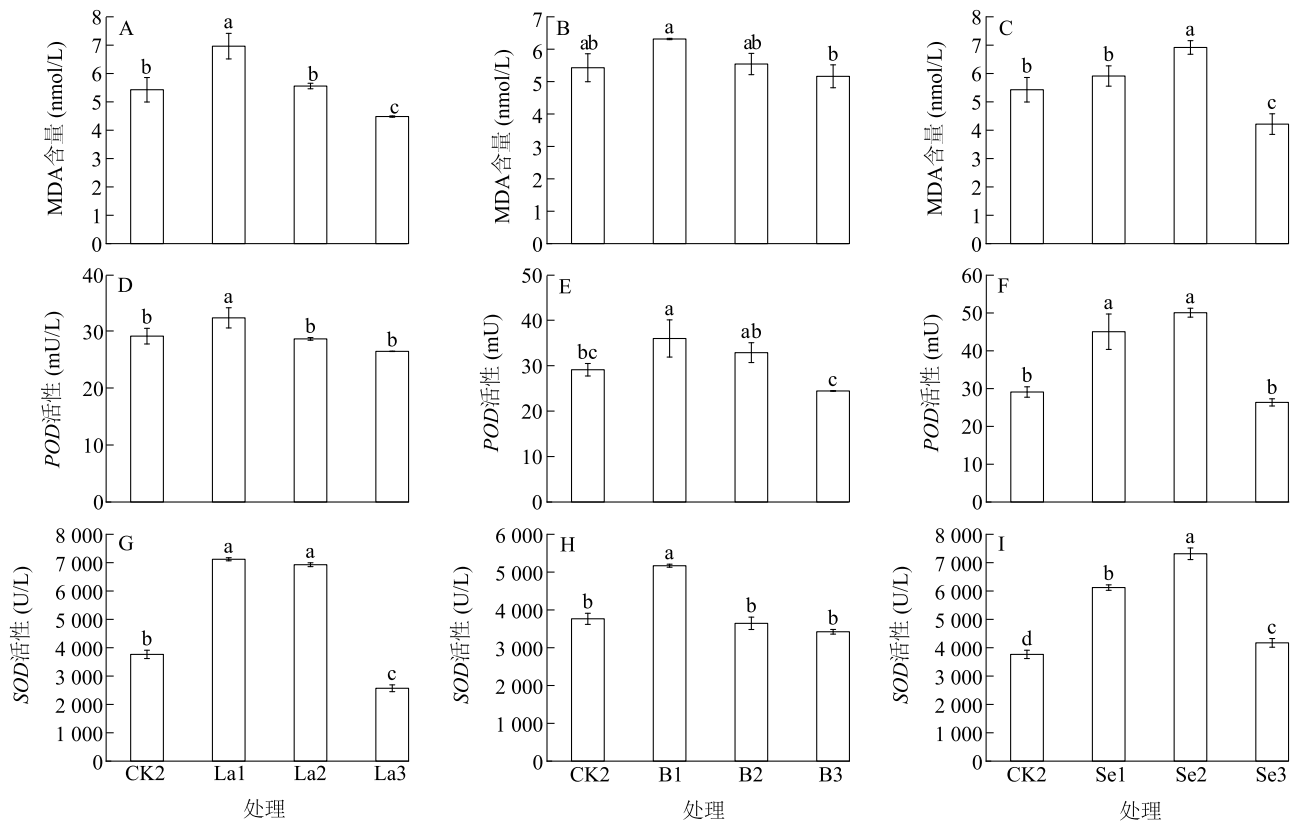
Fig.2 Thifluzamide content in the aboveground and underground parts of rice under hydroponic conditions

2.3.2 微量元素肥料与噻唑酰胺联合施用对水稻纹枯病病程相关酶活性的影响 β -1,3-葡聚糖酶是许多病原真菌细胞壁的主要组成成分,当植物受到真菌感染时, β -1,3-葡聚糖酶可以降解真菌细胞壁,抑制病原菌的生长。如图4A~图4C所示,与CK2相比,La1处理、La2处理、B1处理与Se2处理水稻地上部 β -1,3-葡聚糖酶活性分别显著提高20.56%、7.18%、26.43%和12.20%($P < 0.05$)。与CK2相比,La3处理与Se3处理水稻地上部 β -1,3-葡聚糖酶活性分别显著降低16.91%和36.82%($P < 0.05$)。几丁质酶可以降解病原真菌的细胞壁,从而提高水稻对纹枯病等真菌病害的抵御能力。图4D~图4F所示,与CK2相比,La1处理、B1处理、B2处理与Se2处理水稻地上部几丁质酶活性分别显著提高33.23%、45.48%、35.72%和50.46%($P < 0.05$)。综上,适宜质量浓度的微量元素肥料可以提升水稻 β -1,3-葡聚糖酶和几丁质酶活性,增强水稻对纹枯病的抗病能力。

2.4 微量元素肥料与噻唑酰胺联合施用对水稻纹枯病的防治效果

如图5所示,CK1水稻纹枯病的相对病级最高,

为5.20;与CK1相比,CK2水稻纹枯病的相对病级显著降低57.31%($P < 0.05$),表明噻唑酰胺对水稻纹枯病具有一定的防治效果。与CK2相比,La1处理和La2处理水稻纹枯病的相对病级分别显著降低32.88%和17.57%($P < 0.05$),La3处理水稻纹枯病的相对病级和CK2相比无显著差异($P > 0.05$)。B1处理和B2处理水稻纹枯病的相对病级分别为1.14和1.69;与CK2相比,B1处理与B2处理水稻纹枯病的相对病级分别显著降低48.65%和23.87%($P < 0.05$);B3处理水稻纹枯病的相对病级为2.63,与CK2相比,B3处理水稻纹枯病的相对病级显著提升18.47%($P < 0.05$),这可能是由于高浓度硼元素对水稻产生了毒害作用。所有处理中,Se2处理水稻纹枯病的相对病级最低,为0.96,与CK2相比,Se2处理水稻的相对病级显著降低56.76%($P < 0.05$)。Se1处理水稻的相对病级为1.37,与CK2相比,Se1处理水稻纹枯病的相对病级显著降低38.29%($P < 0.05$)。Se3处理水稻纹枯病的相对病级为2.26,Se3处理水稻纹枯病的相对病级显著高于Se1处理与Se2处理($P < 0.05$),这可能是由于高浓度硒元素



POD:过氧化物酶;SOD:超氧化物歧化酶;MDA:丙二醛。CK2:0.5 mg/L噻呋酰胺对照;La1:0.5 mg/L噻呋酰胺+43.3 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; La2:0.5 mg/L噻呋酰胺+86.6 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; La3:0.5 mg/L噻呋酰胺+216.5 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; B1:0.5 mg/L噻呋酰胺+0.286 mg/L H_3BO_3 ; B2:0.5 mg/L噻呋酰胺+2.860 mg/L H_3BO_3 ; B3:0.5 mg/L噻呋酰胺+14.300 mg/L H_3BO_3 ; Se1:0.5 mg/L噻呋酰胺+0.05 mg/L Na_2SeO_3 ; Se2:0.5 mg/L噻呋酰胺+0.10 mg/L Na_2SeO_3 ; Se3:0.5 mg/L噻呋酰胺+0.50 mg/L Na_2SeO_3 。同一图中图柱上不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图3 水稻地上部抗氧化酶活性及丙二醛含量

Fig.3 Antioxidant enzyme activity and malondialdehyde content in the aboveground parts of rice

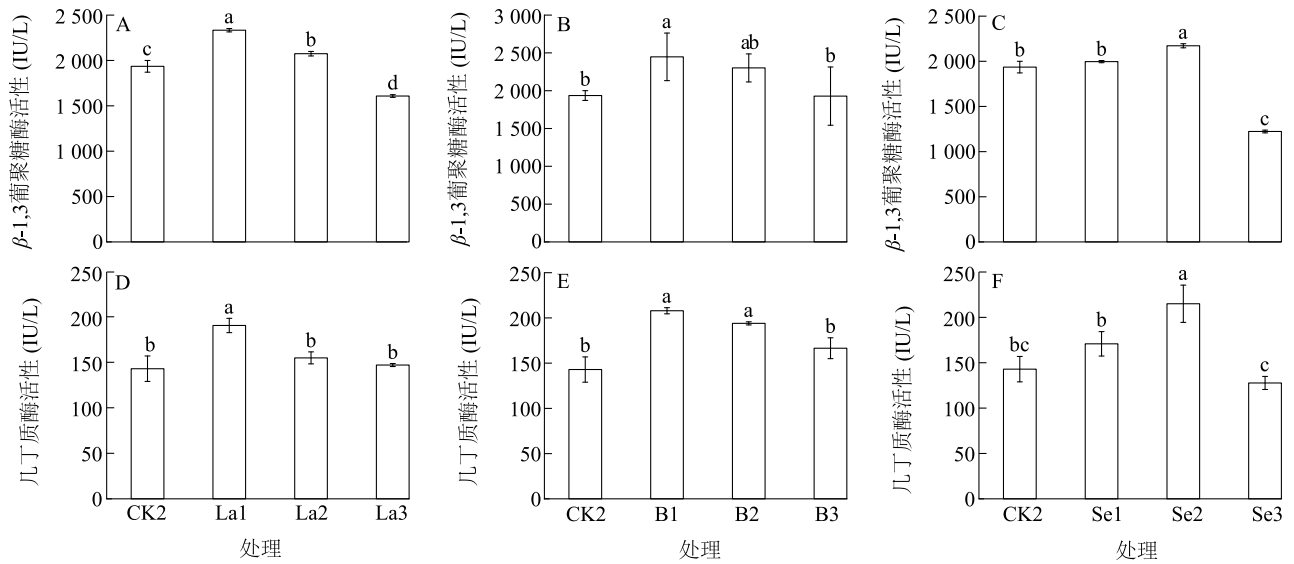
对水稻产生了毒害作用。

综上,La1处理、B1处理与Se2处理对水稻纹枯病的防治效果较好。高质量浓度 $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 H_3BO_3 、 Na_2SeO_3 对噻呋酰胺的防治效果无促进作用。因此需要控制微量元素肥料用量,充分发挥微量元素肥料与噻呋酰胺配施对水稻纹枯病的防治效果。

3 讨论

本研究中,水培48 h后,与0.5 mg/L噻呋酰胺对照相比,La1处理、Se1处理、Se2处理、Se3处理和B1处理水稻地上部噻呋酰胺含量显著增加,表明适宜质量浓度的微量元素肥料能够显著提高水稻地上部噻呋酰胺含量。硒通过增强植物的内吸作用,促进噻呋酰胺在植物体内传导,从而提升植物的抗病

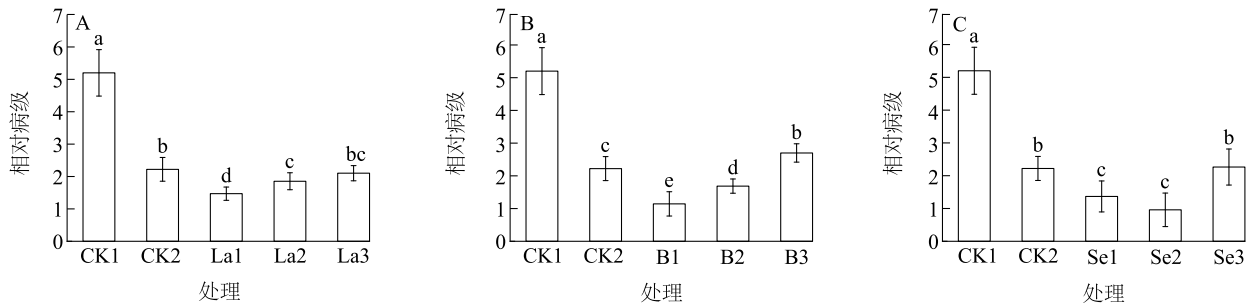
性^[26]。在盐胁迫下,Badawy等^[27]发现,纳米硒(NPs-Se)能够显著改善水稻(*Oryza sativa* L.)的根系形态。与对照相比,浸种和叶面喷施6.25 mg/L纳米硒处理水稻根系直径和根系长度显著增加。硒还能通过调节蒸腾作用和胞吞胞饮过程,提高植物的生理和生化功能,促进植物对农药的吸收、利用^[28]。Jiao等^[29]的研究结果表明,低质量浓度镧(15~30 $\mu\text{mol/L}$)能够诱导根细胞的胞吞作用,增强植物对营养元素的摄取,从而促进根系的生长。缺硼条件下,拟南芥中 ACS11 相对表达量提高,导致乙烯信号增强,抑制主根伸长^[30]。张硕佳等^[7]研究了水稻对多种杀菌剂的吸收与转运特性,发现噻呋酰胺在水稻根部的累积量远高于地上部分,其转运系数(TF) < 1 ,表明根部为噻呋酰胺的主要富集器官。



CK2:0.5 mg/L噻呋酰胺对照;La1:0.5 mg/L噻呋酰胺+43.3 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;La2:0.5 mg/L噻呋酰胺+86.6 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;La3:0.5 mg/L噻呋酰胺+216.5 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;B1:0.5 mg/L噻呋酰胺+0.286 mg/L H_3BO_3 ;B2:0.5 mg/L噻呋酰胺+2.860 mg/L H_3BO_3 ;B3:0.5 mg/L噻呋酰胺+14.300 mg/L H_3BO_3 ;Se1:0.5 mg/L噻呋酰胺+0.05 mg/L Na_2SeO_3 ;Se2:0.5 mg/L噻呋酰胺+0.10 mg/L Na_2SeO_3 ;Se3:0.5 mg/L噻呋酰胺+0.50 mg/L Na_2SeO_3 。同一图中图柱上不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图4 水稻纹枯病病程相关酶活性

Fig.4 The activity of enzymes related to rice sheath blight



CK1:清水对照;CK2:0.5 mg/L噻呋酰胺对照;La1:0.5 mg/L噻呋酰胺+43.3 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;La2:0.5 mg/L噻呋酰胺+86.6 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;La3:0.5 mg/L噻呋酰胺+216.5 mg/L $\text{LaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;B1:0.5 mg/L噻呋酰胺+0.286 mg/L H_3BO_3 ;B2:0.5 mg/L噻呋酰胺+2.860 mg/L H_3BO_3 (B2);B3:0.5 mg/L噻呋酰胺+14.300 mg/L H_3BO_3 ;Se1:0.5 mg/L噻呋酰胺+0.05 mg/L Na_2SeO_3 ;Se2:0.5 mg/L噻呋酰胺+0.10 mg/L Na_2SeO_3 ;Se3:0.5 mg/L噻呋酰胺+0.50 mg/L Na_2SeO_3 。同一图中图柱上不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图5 水稻纹枯病相对病级

Fig.5 Relative disease severity of rice sheath blight

硒元素在植物抗逆生理中也发挥重要作用,尤其是在蒸腾作用和胞吞胞饮过程中。Ramkumar等^[31]发现,硒通过增强植物的抗氧化防御系统,减少农药诱导的氧化应激。Liu等^[23]的研究结果表明,0.05 mmol/L镧处理显著降低了水稻地上部POD、SOD活性和MDA含量。Ding等^[24]发现,在镉胁迫下,施用0.2 mg/L Se可以降低水稻地上部MDA含量。本研究结果表明,水培48 h后,与0.5

mg/L噻呋酰胺对照相比,La1处理、B1处理与Se2处理水稻地上部POD、SOD活性显著上升。POD、SOD活性提高表明水稻的抗氧化能力增强。徐佳^[32]发现,向水稻叶片喷施125 $\mu\text{g/L}$ 农抗702和125 $\mu\text{g/mL}$ 井冈霉素,3 d后,水稻叶片中 β -1,3葡聚糖酶与几丁质酶活性显著上升。本研究中,与0.5 mg/L噻呋酰胺对照相比,La1处理、Se2处理和B1处理水稻地上部 β -1,3葡聚糖酶与几丁质酶活性显

著上升。表明适宜质量浓度微量元素肥料能够显著提升纹枯病病程相关酶的活性。

本研究中,La1 处理、B1 处理与 Se2 处理对水稻纹枯病的防治效果较好,水稻纹枯病的相对病级显著降低。硒通过增强水稻的抗氧化能力和激活防御酶系统,提高植物对病原菌的抵抗力^[33]。此外,硒通过影响病原菌的代谢,进一步降低其对植物的感染能力^[34]。镧能够激活水稻的内吞作用,从而提升水稻的抗病能力^[33]。硼与噻呋酰胺的协同增效作用显著,与单独施用 0.5 mg/L 噻呋酰胺相比,0.5 mg/L 噻呋酰胺+0.286 mg/L H₃BO₃ 处理使纹枯病的相对病级显著降低 48.65% ($P<0.05$)。硼能够增强细胞壁的稳定性,提高植物的物理防御能力,从而提高水稻的抗病能力^[19]。然而,高浓度硼处理(B3)会破坏细胞壁完整性,引发植物的氧化应激和细胞损伤^[35]。

4 结论

本研究发现,水培条件下,La1 处理(0.5 mg/L 噻呋酰胺+43.3 mg/L LaNO₃·6H₂O)、B1 处理(0.5 mg/L 噻呋酰胺+0.286 mg/L H₃BO₃)、Se2 处理(0.5 mg/L 噻呋酰胺+0.10 mg/L Na₂SeO₃) 水稻地上部噻呋酰胺含量显著高于 0.5 mg/L 噻呋酰胺对照。同时 La1 处理、B1 处理、Se2 处理水稻纹枯病相对病级显著低于 0.5 mg/L 噻呋酰胺对照 ($P<0.05$)。La1 处理、B1 处理、Se2 处理水稻地上部超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、几丁质酶、 β -1,3 葡聚糖酶活性显著高于 0.5 mg/L 噻呋酰胺对照。土培条件下,Se4 处理[14.56 g 噻呋酰胺(24%)+0.2 g Na₂SeO₃]、La4 处理[14.56 g 噻呋酰胺(24%)+0.6 g LaNO₃·6H₂O]与 B4 处理[14.56 g 噻呋酰胺(24%)+0.1 g H₃BO₃]对水稻种子萌发的影响较小。拌种 20 d 后,与 14.56 g/kg 噻呋酰胺(24%)对照相比,Se4 处理、La4 处理与 B4 处理水稻地上部噻呋酰胺含量分别显著提高 20.36%、36.72% 和 36.00% ($P<0.05$)。因此,适量的镧、硒、硼微量元素肥料与噻呋酰胺配施可以促进水稻对噻呋酰胺的吸收、转运,提高水稻植株抗氧化酶活性,进而提升噻呋酰胺对纹枯病的防治效果。未来可以进一步探究微量元素肥料影响水稻抗纹枯病相关基因表达的机制。

参考文献:

- [1] LIU W D, WANG G L. Plant innate immunity in rice: a defense against pathogen infection [J]. *National Science Review*, 2016, 3 (3): 295-308.
- [2] LI D Y, LI S, WEI S H, et al. Strategies to manage rice sheath blight: lessons from interactions between rice and *Rhizoctonia solani* [J]. *Rice*, 2021, 14(1): 21.
- [3] 罗兴忠, 黄必华, 李为民, 等. 玉米制种病虫害趋重的原因及防治对策 [J]. *中国农村小康科技*, 2008(7): 52.
- [4] 姚克兵, 于居龙, 张国, 等. 噻呋酰胺不同种子处理方式对水稻纹枯病的控制效应及其安全性评价 [J]. *农学学报*, 2021, 11(7): 13-17.
- [5] 何东兵, 朱友理, 吴佳文, 等. 不同药剂拌种对水稻穗前病虫害的控制效果 [J]. *浙江农业科学*, 2019, 60(4): 601-604.
- [6] 刘嘉楠, 程金金, 孙星, 等. 水稻对三种常用农药的吸收及转运 [J]. *江苏农业学报*, 2023, 39(1): 53-64.
- [7] 张硕佳, 王超杰, 徐博, 等. 五种杀菌剂在水稻上的吸收与传导性能研究 [J]. *农药学报*, 2022, 24(4): 752-761.
- [8] 牟文君. 水稻纹枯病菌对噻呋酰胺的抗性风险评估及抗性机制研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [9] 廖启林, 崔晓丹, 黄顺生, 等. 江苏富硒土壤元素地球化学特征及主要来源 [J]. *中国地质*, 2020, 47(6): 1813-1825.
- [10] RAMAKRISHNAN M, ARIVALAGAN J, SATISH L, et al. Selenium: a potent regulator of ferroptosis and biomass production [J]. *Chemosphere*, 2022, 306: 135531.
- [11] MAO X Y, HUA C, YANG L, et al. The effects of selenium on wheat fusarium head blight and DON accumulation were selenium compound-dependent [J]. *Toxins*, 2020, 12(9): 573.
- [12] LI Q R, XIAN L M, YUAN L X, et al. The use of selenium for controlling plant fungal diseases and insect pests [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14(5): 1102594.
- [13] HE D, GUO T, PENG C Q, et al. Foliar application of lanthanum promotes growth and phytoremediation potential *Solanum nigrum* L. [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 334(8): 117259.
- [14] LIU D, WANG X, ZHANG X, et al. Effects of lanthanum on growth and accumulation in roots of rice seedlings [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2013, 59(5): 196-200.
- [15] OLIVEIRA D C, RAMOS J S, SIQUEIRA O J, et al. Bioaccumulation and effects of lanthanum on growth and mitotic index in soybean plants [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 122(3): 136-144.
- [16] WEN K J, LIANG C J, WANG L H, et al. Combined effects of lanthanum and acid rain on growth, photosynthesis and chloroplast ultrastructure in soybean seedlings [J]. *Chemosphere*, 2011, 84(5): 601-608.
- [17] WANG L H, LI J G, ZHOU Q, et al. Rare earth elements activate endocytosis in plant cells [J]. *Ecotoxicology and Environmental*

- Safety, 2014, 111(35):12936-12941.
- [18] WANG Y, ZHOU M, GONG X L, et al. Influence of lanthanides on the antioxidative defense system in maize seedlings under cold stress[J]. *Biological Trace Element Research*, 2011, 142(3):819-830.
- [19] MOHAMMAD S, KUMAR A N, RAHUL T, et al. Boron application improves yield of rice cultivars under high temperature stress during vegetative and reproductive stages[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2018, 62(8):1375-1387.
- [20] HUSSAIN M, KHAN A M, KHAN B M, et al. Boron application improves growth, yield and net economic return of rice[J]. *Rice Science*, 2012, 19(3):259-262.
- [21] AGATHOKLEOUS E, KITAO M, CALABRESE J E. Hormetic dose responses induced by lanthanum in plants[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 244:332-341.
- [22] 黄爱纓, 吴珍龄. Na_2SeO_3 对稻苗生长及谷胱甘肽过氧化物酶的影响[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 1997(4):61-65.
- [23] LIU D W, LIN Y S, WANG X. Effects of lanthanum on growth, element uptake, and oxidative stress in rice seedlings[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175(6):907-911.
- [24] DING Y Z, FENG R W, WANG R G, et al. A dual effect of Se on Cd toxicity: evidence from plant growth, root morphology and responses of the antioxidative systems of paddy rice[J]. *Plant and Soil*, 2014, 375:289-301.
- [25] CHOUDHARY S, ZEHRA A, NAEEM M, et al. Effects of boron toxicity on growth, oxidative damage, antioxidant enzymes and essential oil fingerprinting in *Mentha arvensis* and *Cymbopogon flexuosus*[J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2020, 7:1-11.
- [26] CHEN X F, JIANG Y, WANG C X, et al. Selenium nanomaterials enhance sheath blight resistance and nutritional quality of rice; mechanisms of action and human health benefit[J]. *ACS Nano* 2024, 18(20):13084-13097.
- [27] BADAWEY S A, ZAYED B A, BASSIOUNI S M A, et al. Influence of nano silicon and nano selenium on root characters, growth, ion selectivity, yield, and yield components of rice (*Oryza sativa* L.) under salinity conditions[J]. *Plants*, 2021, 10(8):1657.
- [28] SADAF J, RATTANDEEP S, RENU B, et al. Plant growth regulators: a sustainable approach to combat pesticide toxicity[J]. *Biotech*, 2020, 10(11):466.
- [29] JIAO Y L, YANG Q, LIU L M, et al. Endocytosis of root cells induced by low-dose lanthanum (III) can promote seedling photomorphogenesis and leaf photosynthesis[J]. *Plant and Soil*, 2023, 488(1):637-651.
- [30] HUANG Y P, WANG S L, SHI L, et al. JASMONATE RESISTANT 1 negatively regulates root growth under boron deficiency in Arabidopsis[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2021, 72(8):3108-3121.
- [31] RAMKUMAR S, BASKAR V, KARTHIKEYAN R, et al. A recent update on the impact of nano-selenium on plant growth, metabolism, and stress tolerance[J]. *Plants*, 2023, 12(4):853.
- [32] 徐佳. 新农抗 702 诱导水稻防御纹枯病的生理生化机理研究[D]. 南昌:江西农业大学, 2012.
- [33] 邓正春, 吴平安, 吴仁明, 等. 硒对农作物生长发育的影响及其补充方法[J]. *作物研究*, 2014, 28(6):771-774.
- [34] QIN C, CHENG X H, WEI J, et al. Selenium reduces the pathogenicity of *Sclerotinia sclerotiorum* by inhibiting sclerotial formation and germination[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 183(7):109503.
- [35] QIN S Y, XU Y F, NIE Z J, et al. Metabolomic and antioxidant enzyme activity changes in response to cadmium stress under boron application of wheat (*Triticum aestivum*)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(23):34701-34713.

(责任编辑:成纾寒)