

# 不同铝离子浓度对水稻苗期的生理生化影响

邱玲, 弓雨鑫, 杨少妍, 刘颖\*

广东海洋大学, 广东湛江

DOI:10.62836/environment.v3i2.1263

**摘要:** 为揭示铝毒胁迫下水稻的生理响应规律, 以水稻品种海红11 (HH11) 为试材, 采用水培法设置 0、40、160、640、1280  $\mu\text{M}$  共5个  $\text{Al}^{3+}$  浓度梯度, 处理25天后测定植株表型、可溶性蛋白含量、丙二醛 (MDA) 含量及抗氧化酶 (APX、CAT、POD、SOD) 活性。结果表明: 铝胁迫对水稻的影响具有显著器官特异性, 地上部株高受影响较小, 根系生长随  $\text{Al}$  浓度升高逐渐受抑; 根系可溶性蛋白含量呈先升后降趋势, MDA含量在160  $\mu\text{M}$  处理下显著升高, 膜脂过氧化损伤加剧; 根系 APX、CAT、POD 和 SOD 活性均表现为中浓度诱导、高浓度抑制, 160  $\mu\text{M}$  为关键激活浓度, 而叶片各指标整体保持稳定。表明水稻主要通过根系启动抗氧化防御与渗透调节抵御铝毒, 叶片因  $\text{Al}$  积累较少而维持生理稳态, 可为酸性土壤区水稻耐铝育种与栽培提供理论参考。

**关键词:** 水稻; 铝毒胁迫; 生理响应; 抗氧化酶

## Effects of Different Aluminum Ion Concentrations on the Physiological and Biochemical Characteristics of Rice Seedlings

Ling Qiu, Yuxin Gong, Saoyan Yang, Ying Liu

Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong

**Abstract:** To elucidate the physiological responses of rice to aluminum (Al) toxicity, a hydroponic experiment was conducted using the rice variety Haihong 11 (HH11) exposed to five  $\text{Al}^{3+}$  concentrations (0, 40, 160, 640, and 1280  $\mu\text{M}$ ) for 25 days. Plant phenotypes, soluble protein, malondialdehyde (MDA) content, and antioxidant enzyme activities (APX, CAT, POD, SOD) were measured. Al stress exhibited significant organ-specific effects: shoot height was marginally affected, while root growth was progressively inhibited with increasing Al concentration. Root soluble protein content showed an initial increase followed by a decline, and MDA content was significantly elevated at 160  $\mu\text{M}$ , indicating severe membrane lipid peroxidation. Root APX, CAT, POD, and SOD activities all displayed a hormetic pattern—induced at moderate concentrations but suppressed at high concentrations—with 160  $\mu\text{M}$  as the critical activation threshold, whereas leaf parameters remained largely stable. These results indicate that rice mitigates Al toxicity primarily through root-based antioxidant defense and osmotic regulation, while leaves

\*基金项目: 2025省级大学生创新创业训练计划项目 (CXXL2024053/S202510566025)。

作者简介: 邱玲, 广东海洋大学滨海农业学院本科生。\*通讯作者: 广东海洋大学滨海农业学院刘颖教授。

maintain homeostasis due to limited Al accumulation. This study provides a theoretical basis for breeding and cultivating Al-tolerant rice in acid soils.

**Keywords:** rice; aluminum toxicity stress; physiological response; antioxidant enzymes

## 1 引言

### 1.1 水稻的简介

水稻 (*Oryza sativa* L.) 隶属禾本科 (Poaceae) 禾属 (*Oryza*)，是全球最重要的粮食作物之一，为世界超过半数人口提供主粮来源，在全球粮食安全体系中占据核心地位[1]。水稻为典型的喜温、喜湿、短日照作物，对土壤水分、酸碱度及田间微环境变化较为敏感，在我国主要集中于南方热带及亚热带地区规模化种植[2]。作为我国核心口粮作物，水稻产业链条完善，兼具极高的食用价值与经济附加值，在保障粮食自给、稳定农业生产中发挥着不可替代的作用[3]。与此同时，水稻生长过程中易受干旱、盐碱、低温及铝毒等多种非生物胁迫的影响，其中铝毒是酸性土壤地区限制水稻产量的首要非生物胁迫因子[4]。值得注意的是，水稻整个生育期中，幼苗期是根系发育与抗逆能力建成的关键窗口期，此时植株抗逆性较弱，对铝离子毒害等非生物胁迫极为敏感，其早期生理响应直接关系到后期产量的形成[5]。

### 1.2 铝毒胁迫对水稻的影响及研究进展

铝 (Al) 是地壳中含量最为丰富的金属元素，在酸性土壤中以  $Al^{3+}$  形态被根系大量吸收，对植物生长表现出典型的低促高抑双重效应，是制约作物生长发育的核心毒性因子[6,7]。国内外学者围绕铝毒胁迫已开展了大量研究，并取得了重要进展。

在根系损伤机制方面，Feng JM等较早发现  $Al^{3+}$  可迅速结合根尖细胞壁果胶组分，破坏细胞壁结构延展性，抑制根尖细胞伸长与分裂，导致主根缩短、根毛退化[8]；Yamamoto等进一步证实铝毒通过干扰细胞壁重塑与质膜完整性，严重削弱根

系水分与矿质养分吸收功能[9]。在氧化损伤机制方面，Delhaize和Ryan揭示了铝毒诱导活性氧 (ROS) 大量积累、引发膜脂氧化的核心路径[10]；Zhang等和Kochian等发现不同水稻品种间抗氧化酶活性差异显著，耐铝品种可通过上调SOD、CAT等酶活性有效清除ROS，缓解氧化损伤[11,12]。Jan等发现耐铝水稻品种能够在铝胁迫下保持根细胞中蛋白质含量和酶活性，而敏感品种在铝胁迫下蛋白质从细胞质向细胞壁重新分配，与师瑞红的研究结果类似[13,14]。在抗氧化酶响应方面，国内学者张等以水稻为材料证实，铝胁迫下APX、CAT、POD和SOD活性呈浓度依赖性变化，但多数研究仅关注单一酶活性或单一品种，缺乏对多酶协同响应及器官特异性差异的系统比较[15]。此外，已有研究多集中于普通水稻品种，针对海水稻在铝胁迫下的系统性生理响应研究仍较为薄弱，且鲜有研究同时考察根系与地上部的器官差异性响应规律[16-18]。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验材料

本实验采用的水稻种子是海红11 (HH11)，由广东海洋大学 (Guangdong Ocean University, GDOU) 滨海农业学院周鸿凯教授提供。

### 2.2 种子处理与培养

选取颗粒饱满、无病虫害的海红11 (HH11) 稻种，经5%  $NaClO$  浸泡15min表面消毒后，用蒸馏水漂洗3~5次。消毒种子置于垫有湿滤纸的培养皿中，30℃暗培养促根，根系突破种皮后转至光照条件。苗高2~3cm时选取长势一致的幼苗移入避光培养盒，暗培养约14d至三叶一心期，期间添加1/4浓度Kimura B营养液[19]。

## 2.3 铝胁迫水培试验

将幼苗移入4L水培桶中，以去Al的1000倍稀释Kimura B营养液为基础液，外源Al由 $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ 提供，设置0、40、160、640和1280 $\mu M$ 五个浓度梯度，0 $\mu M$ 为对照。培养条件：温度 $25 \pm 2^\circ C$ ，每5d全量更换培养液，用1mol/L HCl或NaOH调节pH至5.0，处理25d。所用化学试剂均为分析纯（广州化学试剂厂或沪试）。

## 2.4 样品采集与酶液提取

每处理随机取 $\geq 3$ 株，将地上部与地下部分离，叶片去除黄化枯萎组织，根系完整保留。各器官样品混匀后均分为3份（每份鲜重约0.2g），无菌水漂洗后滤纸吸干，于 $4^\circ C$ 预冷研钵中冰浴研磨，分3次加入共10mL预冷磷酸缓冲液（pH7.8），充分混匀至组织完全匀浆。匀浆于 $4^\circ C$ 、10000r/min离心20min，取上清液即为粗酶提取液，用于后续酶活及生理指标测定。

## 2.5 生理数据的

为探究铝毒胁迫对水稻的生理影响，需要对不同浓度的铝离子处理下的生理指标进行测定。测定的生理数据包括可溶性蛋白、本实验检测了丙二醛（MDA）的积累水平，同时测定了抗氧化防御体系中4种关键酶的活性，具体包括超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化氢酶（CAT）、过氧化物酶（POD）以及抗坏血酸过氧化物酶（APX）。

可溶性蛋白采用考马斯亮蓝G-250法[20]测定：0.2g鲜样加10mL PBS（0.05M，pH7.8）研磨，取1mL匀浆与5mL CBB G-250显色液混合，静置2min后595nm比色，BSA标准曲线计算。SOD活性采用NBT光化还原法[21]测定：反应体系含甲硫氨酸、NBT、核黄素及EDTA，2.9mL反应液加0.1mL酶液， $25^\circ C$ 、4000Lux光照20min，560nm测定，抑制NBT还原50%定义为1U。POD活性采用愈创木酚法[22]测定：40 $\mu L$ 酶液加入含PBS（0.2M，pH6.0）、30%  $H_2O_2$ 及愈创木酚的反应体系，470nm每30s读数（共4次），每分钟OD降低0.01为1U。APX活

性以290nm抗坏血酸氧化速率表征[23]：反应体系含酶液、PBS（pH7.0，0.1mM EDTA）、20mM  $H_2O_2$ 及5mM抗坏血酸，每30s读数（共4次），每分钟OD变化0.01为1 U。CAT活性采用紫外分光光度法[24]测定：2.9mL PBS（0.15M，pH7.0）加0.05mL 30%  $H_2O_2$ ，加0.1mL酶液启动反应，240nm每30s读数（共4次），每分钟 $\Delta A$ 降低0.01为1U。MDA含量采用改良TBA法[25]测定：0.2g鲜样加10mL PBS（0.05M，pH7.8）研磨，取1mL上清加2mL 0.6% TBA，沸水浴15min，4200r/min离心20min，于450、532、600nm测定并计算。

## 2.6 数据统计分析

本研究数据以3次生物学重复的均值 $\pm$ 标准差（Standard deviation, SD）呈现，经SPSS单因素ANOVA及Waller-Duncan事后检验分析不同Al浓度下处理组与对照的差异，柱状图中字母不同代表差异显著（ $P < 0.05$ ）。

## 3 结果与分析

### 3.1 铝胁迫处理后水稻植株的表型图

通过对水稻幼苗进行水培胁迫处理25天后，我们对水稻的幼苗进行了株高的测量。结果显示，虽然外源铝离子浓度在提高，但水稻的地上部分没有受到很严重的胁迫，各组之间也无明显的差异。同时，我们对梯度Al处理后的根系开展了形态学观测。结果表明，Al浓度越高，根系伸长越受抑制，但各组之间也没有明显的差异（如图1）。



图1. 水稻植株的表型图。（1-5）分别为0、40、160、64、1280  $\mu M$ 五个浓度处理下的表型图（Bars=10cm）

### 3.2 铝毒胁迫对水稻可溶性蛋白和丙二醛含量的影响

通过测定梯度Al处理下水稻根叶的可溶性蛋白及MDA含量，揭示Al毒胁迫对水稻生理代谢的影响。

根系可溶性蛋白含量随Al浓度升高呈“先升后降”趋势：40 $\mu\text{M}$ 处理较对照（0 $\mu\text{M}$ ）升高4.9%，160 $\mu\text{M}$ 时达峰值（+35.4%），640 $\mu\text{M}$ 和1280 $\mu\text{M}$ 时分别回落至+1.0%和-0.3%，但各处理间差异均不显著。叶片可溶性蛋白含量在各处理组间变化幅度较小（+11.4%~+6.3%），均无显著差异，表现出较强的稳定性。

根系MDA含量在160 $\mu\text{M}$ 处理下较对照剧增658.5%，表明该浓度下膜脂过氧化损伤最为严重；40、640和1280 $\mu\text{M}$ 处理分别为对照的123.9%、113.9%和138.0%，组间无显著差异。叶片MDA含量则随Al浓度升高呈持续小幅下降趋势，较对照分别降低1.5%、29.4%、34.8%和35.0%，各处理间亦无显著差异（如图2）。

### 3.3 铝毒胁迫对水稻抗氧化酶活性的影响

SOD、CAT、POD和APX作为水稻体内核心抗氧化酶，其活性变化直接反映植株对铝毒胁迫的耐受能力与应答机制。本研究对水稻植株进行不同浓

度的铝胁迫处理后，分别对水稻地下部分（根系）和地上部分（茎叶）的SOD、CAT、POD、APX四种抗氧化酶活性进行系统测定（如图3）。

根系抗氧化酶活性呈显著剂量依赖性。APX活性在160 $\mu\text{M}$ 时达峰值（+123.1%， $P<0.05$ ），其余浓度无显著变化。CAT活性仅在160 $\mu\text{M}$ 时显著升至对照的255.6%（+155.6%），其余浓度无显著差异。POD活性在160 $\mu\text{M}$ 时显著升高90.0%（ $P<0.05$ ），低、高浓度组均无显著变化。SOD活性呈“中浓度诱导—高浓度抑制”模式：160 $\mu\text{M}$ 时激增至对照的397.3%（ $P<0.05$ ），640 $\mu\text{M}$ 时回落至对照水平，1280 $\mu\text{M}$ 时显著降至26.3%（-73.7%， $P<0.05$ ）。

相比之下，叶片酶活性整体稳定，无显著处理效应。APX活性在各浓度下波动于+35.4%~+60.6%，CAT活性变化于-10.6%~+20.3%，POD活性变化于-2.7%~+46.4%，SOD活性在160 $\mu\text{M}$ 时显著降至51.3%（ $P<0.05$ ），其余浓度与对照无显著差异。

## 4 讨论

铝毒是酸性土壤中制约水稻生长的关键非生物胁迫因子[16]。本研究发现，铝胁迫对水稻幼苗的影响具有显著器官特异性：根系对铝毒高度敏感，叶片则相对稳定。这一规律在小麦、玉米、荞麦、

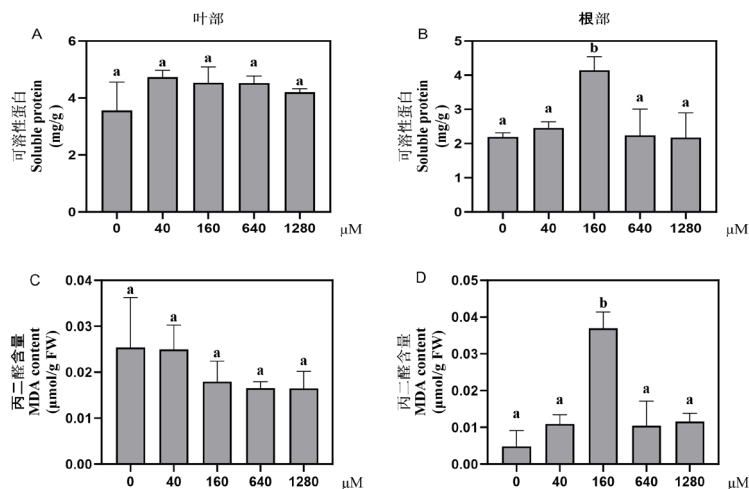


图2. 不同铝浓度梯度下水稻渗透调节与胁迫响应的变化

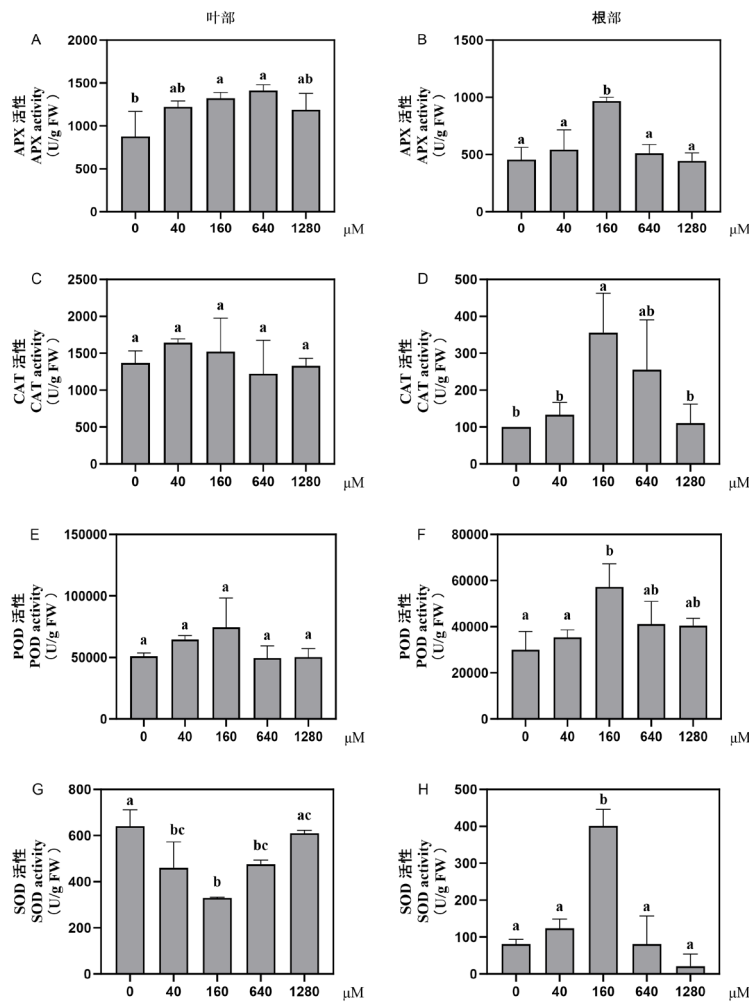


图3. 不同浓度的铝离子对水稻抗氧化酶活性的影响。(A-H) 分别为根与叶中APX、CAT、POD及SOD的酶活性。柱形图为三次重复的均值±SD, Duncan法多重比较, 小写字母不同表示差异显著 (P<0.05)

南苜蓿及木本植物(酸柚、柑橘、桉树)中均有报道,表明铝离子主要在根系富集、向地上部转运有限,是植物适应酸性土壤的共性策略[26-31]。

抗氧化酶系统是清除活性氧的核心防线[32]。本研究中,根系APX、CAT、POD、SOD活性均以160μM为峰值,呈“先升后降”的剂量效应,表明中等浓度铝胁迫可有效激活酶系统,而高浓度则超出其调节能力;叶片酶活性整体稳定,与小麦、玉米及荞麦的研究结论一致[33-35]。MDA结果进一步佐证:根系MDA在160μM时剧增658.5%,表明严重膜脂过氧化,而叶片无显著变化,说明铝毒未对叶片膜系统造成明显损伤,这与大豆、桉树、马尾松及禾本科、木本植物的报道吻合[36-38]。

可溶性蛋白变化同样体现了器官分工策略:根系蛋白含量先升后降,反映胁迫初期渗透调节与后期代谢失衡的动态过程[39,40];叶片蛋白含量稳定,表明植物优先维持地上部核心功能,这与酸柚的渗透调节机制相似[31,41,42]。

综上,水稻通过“根系激活抗氧化防御—叶片维持功能稳态”的器官特异性策略实现铝毒耐受,为耐铝育种提供了理论依据。

## 5 结论

外源铝胁迫对水稻的影响具有显著器官特异性,整体呈现“根系敏感响应、叶片耐受稳定”的分化特征。根系生长随Al浓度升高而显著受

抑; APX、CAT、POD和SOD活性均以160 $\mu$ M为峰值呈先升后降趋势,表明中等浓度铝胁迫可有效激活根系抗氧化防御系统,高浓度则超出其调节能力。根系可溶性蛋白含量同步呈先升后降变化,MDA含量在160 $\mu$ M时剧增658.5%,表明该浓度下膜脂过氧化损伤最为严重。相比之下,叶片各生理指标整体稳定,无显著处理效应,表明铝离子主要在根系富集、向地上部转运有限。综上,水稻通过"根系主动防御—叶片功能稳态"的器官分工策略实现铝毒耐受,可为耐铝育种提供理论依据。

## 参考文献

- [1] 虞国平.水稻在我国粮食安全中的战略地位分析[J].新西部(下半月),2009,(11):31-33.
- [2] 吴媛媛.我国水稻生产现状及发展趋势[J].新农业,2018,(07):27-28.
- [3] 章家恩,石兆基,李德鑫,等.中国水稻大面积单产提升的潜力、挑战、方向路径与行动举措[J].华南农业大学学报,2026,47(2):175-186.
- [4] 陈悦,孙明哲,贾博为,等.水稻AP2/ERF转录因子参与逆境胁迫应答的分子机制研究进展[J].作物学报,2022,48(04):781-790.
- [5] 胡娟,潘朝阳,张丽婷,等.非生物胁迫对水稻根系形态和生理的影响[J].江西农业学报,2025,37(04):69-77+88.
- [6] 袁晶晶.不同耐铝机制的植物及外源因子对酸性土壤溶液铝化学的影响[D].西北农林科技大学,2010.
- [7] Yang L, Liu T, Li G H et al. Functional divergence of ALMTs mediates organic acid transport and callose synthesis for aluminum tolerance in rose myrtle. *Plant Physiology*,2025, 200(1): 655.
- [8] Feng J M, Renfang S, Sakiko N, et al. Aluminum targets elongating cells by reducing cell wall extensibility in wheat roots[J]. *Plant & Cell Physiology*, 2004, 45(5): 583-9.
- [9] Yamamoto Y, Kobayashi Y, Matsumoto H. Lipid peroxidation is an early symptom triggered by aluminum, but not the primary cause of elongation inhibition in pea roots[J]. *Plant physiology*, 2001, 125(1): 199-208.
- [10] Delhaize E, Ryan P R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. *Plant Physiology*, 1995, 107(2): 315-321.
- [11] Zhang W H, Wang J, Chen L S, et al. Comparative physiological and transcriptomic analyses reveal differential aluminum tolerance mechanisms in rice varieties. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2023, 198: 107-118.
- [12] Kochian V L, Hoekenga A O, Piñeros A M. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55(0): 459-493.
- [13] Jan F, Yamashita K, Matsumoto H, et al. Protein and peroxidase changes in various root-cell fractions of two upland rice cultivars differing in Al tolerance[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, 46(2): 141-146.
- [14] 师瑞红.水稻幼苗适应铝胁迫的生理特性研究[D].华中农业大学,2007.
- [15] 张云华,孟庆玲,计成林,等.铝胁迫对转C4磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶基因水稻光合作用和活性氧代谢的影响[J].生物技术通报,2014,(07):81-85.
- [16] 邢俊连,彭歆.水稻耐铝毒害生理和分子机制研究进展[J].广东农业科学,2022,49(09):20-30.
- [17] Jiang D, Du S, Shi J, et al. Glutathione mitigates aluminum toxicity in root-apex transition zone of rice through reducing aluminum absorption and maintaining redox balance. *Plant Physiology and Biochemistry: PPB*, 2024, 219: 109366.
- [18] 王旭明,赵夏夏,陈景阳,等.盐胁迫下海水稻抗逆生理响应分析[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(05):747-756.
- [19] Huang G, Ding C, Li Y, et al. Selenium enhances iron plaque formation by elevating the radial oxygen loss of roots to reduce cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 398: 122860.
- [20] Silva A D M M, Ferreira T L, Vasconcelos D T M F, et al. Water Stress-Induced Responses in the Growth, Cuticular Wax Composition, Chloroplast Pigments and Soluble Protein Content, and Redox Metabolism of Two Genotypes of *Ricinus communis* L. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2020, 40(1): 1-11.
- [21] Shi J, Zhao M, Zhang F, et al. Physiological Mechanism through Which Al Toxicity Inhibits Peanut Root Growth. *Plants*, 2024, 13(2): 325-325.
- [22] Rácz A, Hideg É, Czégény G. Selective responses of class III plant

- peroxidase isoforms to environmentally relevant UV-B doses[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 221: 101-106.
- [23] Conghui L, Jiabin L, Xihua D, et al. Chloroplast Thylakoidal Ascorbate Peroxidase, PtotAPX, Has Enhanced Resistance to Oxidative Stress in *Populus tomentosa*. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(6): 3340-3340.
- [24] Kumar A S, Divya S. Assessment of malathion toxicity on cytophysiological activity, DNA damage and antioxidant enzymes in root of *Allium cepa* model. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 886.
- [25] Chen G, Zheng D, Feng N, et al. Effects of exogenous salicylic acid and abscisic acid on growth, photosynthesis and antioxidant system of rice. *Chilean journal of agricultural research*, 2022, 235(4): 1523-1540.
- [26] 杨野, 王伟, 刘辉等. 铝胁迫对不同耐铝小麦品种根伸生长影响的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(3): 584-590.
- [27] 张涛. 铝胁迫对不同耐性的小麦与小黑麦及其异源亲本活性氧代谢的影响[D]. 广西大学, 2018.
- [28] 王保义, 李朝苏, 刘鹏, 等. 荞麦叶内抗氧化系统对铝胁迫的响应[J]. *生态环境*, 2006, 15(4): 816-821.
- [29] 黎梅杰, 段正山, 姜华, 等. 铝胁迫下楚雄南苜蓿的生理响应[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2023, 38(4): 615-620.
- [30] 陈晓莹. 硒缓解酸柚铝毒的生理机制研究[D]. 福建农林大学, 2024.
- [31] 盘建英, 吴庆标, 田湘, 等. 白云石与活性炭及铝对桉树幼苗磷铝锰的影响[J]. *森林与环境学报*, 2025, 45(05): 524-535.
- [32] Jiang D, Ou Y, Jiang G, et al. Melatonin-priming ameliorates aluminum accumulation and toxicity in rice through enhancing aluminum exclusion and maintaining redox homeostasis. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2025, 219: 109433-109433.
- [33] 彭艳, 李洋, 杨广笑, 等. 铝胁迫对不同小麦SOD、CAT、POD活性和MDA含量的影响[J]. *生物技术*, 2006, 16(3): 5.
- [34] Abd Elgawad H, Zinta G, Hamed A B, et al. Maize roots and shoots show distinct profiles of oxidative stress and antioxidant defense under heavy metal toxicity. *Environmental Pollution*, 2020, 258: 113705.
- [35] García-Caparrós P, Filippis D L, Gul A, et al. Oxidative Stress and Antioxidant Metabolism under Adverse Environmental Conditions: A Review. *The Botanical Review*, 2020, 87(4): 1-46.
- [36] 缪聪林, 刘亚敏, 姚虹宇, 等. 3种有机酸对铝毒下马尾松幼苗抗氧化系统调控效应评价[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2025, 49(01): 112-118.
- [37] Siqueira A J, Barros S A J, Dal-Bianco M, et al. Metabolic and physiological adjustments of maize leaves in response to aluminum stress. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 2020, 32(2): 1-13.
- [38] Reis D R A, Lisboa M A L, Reis G P, et al. Depicting the physiological and ultrastructural responses of soybean plants to Al stress conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 130: 377-390.
- [39] Joanna S, Elzbieta R, Ewa P, et al. Proteolytic and Structural Changes in Rye and Triticale Roots under Aluminum Stress[J]. *Cells*, 2021, 10(11): 3046-3046.
- [40] Agnieszka N, Lucyna D, Dynkowska W M, et al. Aluminum Stress Induces Irreversible Proteomic Changes in the Roots of the Sensitive but Not the Tolerant Genotype of Triticale Seedlings. *Plants*, 2022, 11(2): 165-165.
- [41] 谢国生, 范雪莲, 师瑞红, 等. 铝胁迫对水稻幼苗生理变化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(1): 5.
- [42] Suwanna P, Rujira T, Thanyaporn S, et al. Aluminum uptake, translocation, physiological changes, and overall growth inhibition in rice genotypes (*Oryza sativa*) at vegetative stage. *Environmental geochemistry and health*, 2022, 45(1): 187-197.

附录

木村B营养液配方(1000×) Kimura B nutrient solution formula			
元素 Element	试剂 Reagent	母液浓度 Liquor concentration(g/L)	500ml剂量(g)
母液一	KNO <sub>3</sub>	15.9	7.95
母液二	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 或Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	59.9/82.6	29.95/41.3
母液三 (大量元素)	MgSO <sub>4</sub> /MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	65.9/134.8	32.95/67.4
	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	48.2	24.1
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	15.9	7.95
母液四	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.86	1.43
	CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0.08	0.04
	ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.22	0.11
	MnC <sub>12</sub> ·4H <sub>2</sub> O	1.81	0.905
	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Mo <sub>4</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0.09	0.045
母液五	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	24.8	12.4
母液六 (铁盐) 需要螯合	Na <sub>2</sub> ·EDTA	7.45	3.725
	FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	5.57	2.785
母液六 (EDTA铁钠 已经螯合)	乙二胺四乙酸铁钠	8.42	4.21

注：使用时取各母液1mL,再用水定容至1L，采用 40% 盐酸调节 pH 值为 5.4~5.7。

注：若实验室有EDTA铁钠 优先使用EDTA铁钠，省去加热溶解螯合步骤，且溶液相对稳定，较难变质，若出现变质，可稍微添加HCL溶液保持稳定性。

