

不同pH条件下镉对水稻幼苗的毒害效应

姚丽华, 查建军, 李亚丽, 潘小翠, 于红梅, 束良佐

引用本文:

姚丽华, 查建军, 李亚丽, 潘小翠, 于红梅, 束良佐. 不同pH条件下镉对水稻幼苗的毒害效应[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2111-2119.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0372>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

丛枝菌根真菌对紫花苜蓿镉积累和抗氧化活性的影响

陈志鹏, 魏源, 赵冬安, 上官宇先, 侯红, 曾清如

农业环境科学学报. 2015(6): 1053-1059 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.06.006>

微塑料与铅复合污染对水稻幼苗根系生长和氧化应激的影响

刘玲, 洪婷婷, 胡倩男, 谢瑞丽, 周颖, 王玲, 汪承润

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2623-2633 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0523>

镉胁迫对桑树生理指标及富集转运特征的影响

耿丽莎, 杨再福, 许志楠, 舒文君, 朱彤

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1667-1674 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0030>

外源NO对铝胁迫下西瓜幼苗生长及生理特性的影响

肖家昶, 郑开敏, 马俊英, 郑阳霞

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1650-1658 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0145>

纳米硫对铅胁迫下油菜幼苗生长和铅积累的影响

原海燕, 刘清泉, 张永侠, 符佳豪, 王银杰, 孙玉明, 佟海英

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 517-524 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0798>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

姚丽华, 查建军, 李亚丽, 等. 不同pH条件下锑对水稻幼苗的毒害效应[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2111–2119.

YAO L H, ZHA J J, LI Y L, et al. Toxic effects of antimony on rice seedlings under different pH conditions [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(10): 2111–2119.



开放科学 OSID

不同pH条件下锑对水稻幼苗的毒害效应

姚丽华^{1,3}, 查建军², 李亚丽³, 潘小翠³, 于红梅^{1*}, 束良佐^{3*}

(1. 浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江 金华 321000; 2. 南方科技大学台州研究院, 浙江 台州 318000; 3. 台州学院生命科学学院, 浙江 台州 318000)

摘要:为探究pH对锑胁迫下水稻生长的影响,本研究通过水培试验,研究了不同pH条件下水稻中锑的吸收量以及锑对水稻的生长、叶绿素荧光特性、光响应曲线参数和抗氧化酶活性的影响。结果表明,锑胁迫抑制了水稻的生长以及地上部和根部生物量的积累,其中株高较无锑处理减少了4.30%~11.72%;叶片PS II最大光化学量子产量(Fv/Fm)、实际光化学效率Y(II)、光合电子传递效率(ETR)、光化学猝灭系数(qP)以及荧光快速光响应曲线参数曲线的初始斜率(α)、最大相对电子传递速率(ETR_m)和半饱和光强(IK)在锑胁迫下均显著下降,而过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性和丙二醛(MDA)含量显著增加,分别增加了11.66%、16.86%、17.85%和22.04%。此外,pH 4、pH 5处理促进了水稻对锑的吸收,增大了锑胁迫对水稻幼苗各参数影响的幅度,而pH 6、pH 7处理有效缓解锑胁迫导致的水稻幼苗各指标的变化。因此,锑胁迫下水稻植株吸收大量的锑,破坏叶绿素荧光特性及保护酶活性等生理过程,进而对植株造成毒害,而pH 6和pH 7条件下通过减少锑吸收、维持细胞膜稳定性、调控热耗散机制以及抗氧化酶系统来缓解锑胁迫对水稻幼苗生长的影响。

关键词: 锑胁迫; pH值; 水稻幼苗; 叶绿素荧光; 抗氧化酶

中图分类号: X173 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)10-2111-09 doi:10.11654/jaes.2022-0372

Toxic effects of antimony on rice seedlings under different pH conditions

YAO Lihua^{1,3}, ZHA Jianjun², LI Yali³, PAN Xiaocui³, YU Hongmei^{1*}, SHU Liangzuo^{3*}

(1. College of Geography and Environmental Science, Zhejiang Normal University, Jinhua 321000, China; 2. Taizhou Research Institute, Southern University of Science and Technology, Taizhou 318000, China; 3. College of Life Sciences, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

Abstract: To investigate the effect of pH on the growth of rice under antimony stress, this study investigated the uptake of antimony in rice under different pH conditions and the effect of antimony on the growth, chlorophyll fluorescence characteristics, light response curve parameters, and antioxidant enzyme activities of rice by performing hydroponic experiments. The results showed that antimony stress inhibited the growth and aboveground and root biomass accumulation of rice, reducing plant height by 4.30%–11.72%, compared with the antimony-free treatment. The maximum photochemical quantum yield of leaf PS II (Fv / Fm), actual photochemical efficiency, photosynthetic electron transfer efficiency, and photochemical quenching coefficient were significantly decreased under antimony stress. Initial slope, maximum relative electron transfer rate, and half-saturation light intensity also decreased significantly, whereas catalase, superoxide dismutase, and peroxidase activities and malondialdehyde content increased significantly by 11.66%, 16.86%, 17.85%, and

收稿日期: 2022-04-16 录用日期: 2022-07-01

作者简介: 姚丽华(1998—), 女, 安徽铜陵人, 硕士研究生, 从事自然地理与环境植物学研究。E-mail: Yao1025@zjnu.edu.cn

*通信作者: 于红梅 E-mail: yuhongmei@zjnu.cn; 束良佐 E-mail: shulz69@163.com

基金项目: 台州学院高层次人才科研启动费(T20220101059); 国家自然科学基金项目(31572202)

Project supported: Research Start-up Fund for High-level Talents of Taizhou College(T20220101059); The National Natural Science Foundation of China (31572202)

22.04%, respectively. Moreover, pH 4 and pH 5 treatments promoted the absorption of antimony by rice and increased the range of the effects of antimony stress on the evaluated parameters of rice seedlings, while pH 6 and pH 7 treatments effectively alleviated the changes caused by antimony stress in the indicators of rice seedlings. Therefore, under antimony stress, rice plants absorb a large amount of antimony, which destroy the chlorophyll fluorescence characteristics and protective enzyme activities and subsequently causes toxicity in plants. pH 6 and pH 7 treatments alleviate the effects of antimony stress on rice seedling growth by reducing antimony absorption, maintaining cell membrane stability, and regulating heat dissipation mechanism and antioxidant enzyme system.

Keywords: antimony stress; pH; rice seedling; chlorophyll fluorescence; antioxidant enzyme

锑(Sb)是一种有毒的类金属元素,在地壳中的自然含量约为 $0.2\sim 0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤中锑的背景含量约为 $0.3\sim 2.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。我国是产锑大国,锑矿储量位居世界第一,产量约占世界总产量的79%^[2]。近年来,由于锑矿开采以及含锑产品的不合理利用,导致环境中锑的含量急剧上升^[3-4],尤其是湖南、贵州、广西等锑矿较集中的地区土壤锑含量远超过其土壤背景值^[5-8]。宋书巧等^[9]在广西刁江沿岸农田土壤的调查发现,该地土壤中的锑含量高达 $1\ 000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。何孟尝等^[1]对湖南锡矿山锑矿附近不同地点取样调查发现,该区域土壤的锑浓度为 $100.6\sim 5\ 045.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。环境中高含量的锑会影响作物生长,进而通过食物链被人体吸收,危害人体健康。

水稻(*Oryza sativa*)是世界第二大粮食作物,在我国三大粮食作物中产量居首位,其播种面积约占粮食作物播种总面积的30%,产量约占粮食总产量的40%^[10-11]。香港食品安全指南限制了水稻中允许的最大锑含量为 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[12]。然而,在锑污染地区种植的水稻中锑含量可高达 $5.79\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[13]。何孟尝等^[14]对湖南省锡矿山锑冶炼厂周边生长的水稻进行调查研究,发现水稻体内富集了大量锑,其含量具体表现为根>茎>叶。水稻对锑具有一定的吸收富集能力,且水稻是锑矿富集区主要的粮食作物。对锑矿山周边居民日常摄入食物中锑来源调查表明,摄入的锑中有33%来源于稻米,因此,种植和食用水稻已成为矿区居民接触锑的主要途径^[15],这对矿区居民的健康造成很大的危害。

环境的pH值对植物吸收利用土壤养分有着重要影响,同时也是影响土壤中重金属存在形态与活性的关键因素^[16]。WILSON等^[17]绘制了不同系统下的pe-pH图,表明不同的pH值使得锑有着不同的沉淀形态和离子形态。酸性环境下,矿石中的碳酸盐、碳酸氢盐和氧化物会不断溶解,使得锑从沉淀形态转换为离子形态,并且矿石结构会变得十分疏松,进一步促进锑的释放^[18-19]。此外土壤吸附重金属的能力以及重金

属的迁移能力在很大程度上也受土壤pH值影响。TIGHE等^[20]研究发现土壤中非结晶Fe氢氧化物对Sb(V)的吸附量在pH为4时最大。CAI等^[21]研究也发现锑在钙质土壤中的迁移性和pH有关,钙质土壤的pH大于7是锑迁移性高的主要原因。因此,不同的pH在不同的土壤环境中对锑的影响存在差异。由于土壤中重金属的存在形态和迁移能力会严重影响植物对重金属的吸收量,且我国锑污染区域土壤pH差异较大^[22-23],但是pH对水稻吸收锑的影响机制尚不明确。

本研究以水稻为研究对象,通过水培试验,探究不同pH条件下锑污染对水稻幼苗生长及生理机制的影响,为锑污染区水稻的安全生产提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

化学试剂:酒石锑酸钾($\text{C}_8\text{H}_4\text{K}_2\text{O}_{12}\text{Sb}_2$),分析纯;供试材料选取水稻(*Oryza sativa* L.),品种为粳粳杂交稻嘉优中科3号(浙江省台州市台农种业有限公司)。

1.2 试验方法与处理

挑选籽粒饱满的种子用5%NaClO溶液消毒20 min后,用去离子水清洗干净,将消毒洗净的种子放入32℃的恒温恒湿培养箱中避光催芽,催芽期间每日更换3次蒸馏水,3 d后将露白萌发的种子均匀洒在育苗盘(含1/2强度营养液)中培养,育苗盘中的营养液以刚好浸没种子为宜。待幼苗长至两片真叶时,挑选6株长势基本一致的幼苗(用海绵固定在带孔的盖子上)移栽到2 L黑色塑料水培桶,水培桶中含有全强度的木村B营养液^[24],每桶设置3穴,每穴2株。营养液配方为 $0.36\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $0.55\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $0.36\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $0.27\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{K}_2\text{SO}_4$, $0.18\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{KH}_2\text{PO}_4$, $9.10\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{MnCl}_2$, $20\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{H}_3\text{BO}_3$, $0.77\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $0.32\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{CuSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $0.15\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $20\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Fe-EDTA}$ 。幼苗生

长前期每隔1 d换一次营养液,待苗培养至30 d后每日更换营养液。用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH或HCl调节pH值,每日3次,保持pH值处于设定梯度,期间pH值变化不超过0.5。试验在人工培养室中进行,光源由LED灯提供,光照时间设置为 $12 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$,光照强度为 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[25-26],温度为 $26.0 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为60%~70%。

待幼苗在全强度营养液中适应一周后,以酒石锑酸钾的形式向营养液中加入锑,锑浓度分别为0、 $0.016 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,该浓度的设置基于向猛等^[26]和LONG等^[27]的研究。锑处理40 d后收样。用NaOH或HCl将营养液的pH值调节至4.0、5.0、6.0、7.0共4个梯度,因此试验共8个处理:(1)pH=4 Sb0(营养液内不加Sb);(2)pH=5 Sb0;(3)pH=6 Sb0;(4)pH=7 Sb0;(5)pH=4 Sb(营养液内含 $0.016 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Sb,下同);(6)pH=5 Sb;(7)pH=6 Sb;(8)pH=7 Sb。每个处理重复4次,共32盆。在幼苗生长期每日随机调整桶的位置。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 叶绿素含量的测定

选取植株第3片叶的中上部(避开大叶脉),采用SPAD-502型便携式叶绿素仪多点测定SPAD值。每盆测定4株,取各株平均值代替该盆水稻叶片叶绿素含量。

1.3.2 叶绿素荧光参数的测定

在水稻幼苗培养至第40天时,选取第3片叶片用暗适应叶夹对叶片进行充分的暗适应,30 min后,用叶绿素荧光仪MINI-PAM-II(Walz,德国)测定不同处理下水稻叶片叶绿素荧光参数,包括PS II电子传递速率(ETR)、光化学猝灭系数(qP)和非光化学猝灭系数(NPQ)、最大光化学效率(Fv/Fm)。每盆选取4株水稻叶片测量并取其平均值代表该重复。

1.3.3 叶绿素荧光快速光响应曲线的测定

待幼苗培养至第41天,利用叶绿素荧光仪MINI-PAM-II(Walz,德国)测定不同处理下水稻叶片的快速光响应曲线。仪器内置光强(PAR)梯度分别为0、63、86、120、184、276、406、607、793、1 110、1 447 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,每个光强梯度持续20 s,每盆以不同水稻叶片重复测量5次,取平均值。

1.3.4 幼苗生长特性的测定

每盆选4株水稻植株用卷尺测量其株高,并用直尺测定中上部充分展开叶片的叶宽、叶长。根据公式计算该叶片面积^[28],叶面积(cm^2)=长度(cm)×宽度(cm)×K,校正系数K=0.75。

1.3.5 保护酶和丙二醛含量

超氧化物歧化酶(SOD)活性采用抑制氮蓝四唑光还原比色法测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸比色法^[29]测定。均采用鲜样含量。

1.3.6 根系与地上部锑的含量

锑处理40 d后收样,将植株地上部和根部用去离子水洗净后,放置于 $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干燥48 h后研磨,称取过200目筛的植物样品0.1 g于聚四氟乙烯管中,并加入2 mL HNO_3 和1 mL H_2O_2 溶液密封24 h后,在 $180 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中消化12 h,冷却至室温,然后放置在 $160 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的电热板上加热赶酸,直至液体呈黄豆粒大小,用去离子水将其转移至50 mL容量瓶,定容、过滤。采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定水稻各部位锑含量。同时做空白和标准样品进行质量控制。

1.4 数据处理

试验数据采用Excel 2016处理,结果以平均值±标准误差表示,采用SPSS 22.0软件对数据进行统计分析,在95%置信水平下,采用LSD法进行单因素方差分析,复合实验采用双因素方差分析。采用Sigma-Plot 14.0软件制图。

2 结果与讨论

2.1 不同pH处理对锑胁迫下水稻植株锑吸收的影响

锑胁迫下,不同pH处理对水稻植株各器官锑的吸收量存在显著差异(表1)。在pH 7条件下,水稻根部吸收的锑含量分别较pH 4、pH 5、pH 6条件下减少了21.76%、27.30%、25.12%。pH 4处理时,水稻植株地上部吸收的锑含量达到 $167 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是中性pH(pH 6、pH 7)处理均值的1.41倍,与pH 5处理之间的差异未达到显著水平。这可能是营养液中酸性条件下锑主要以Sb(Ⅲ)为主,随着pH增加水稻根表的铁斑会将其氧化形成Sb(V)^[30],水稻对Sb(V)的吸收能力弱于Sb(Ⅲ),进而导致水稻中吸收的锑含量减少^[31]。

2.2 对水稻生长特性的影响

锑对植物是一种非必需元素,当植物体内锑累积到一定含量时会对植物产生毒害效应^[32]。具体表现为植株矮小、叶片发黄、生长缓慢以及生物量减少等。经锑处理的植株,其株高均显著低于无锑处理组(表2),pH 7、pH 6、pH 5、pH 4分别下降了4.3%、4.98%、

表1 不同pH值条件下锑处理对水稻植株锑含量的影响

Table 1 Effects of Sb stress on Sb uptake in rice plants under different pH conditions

处理 Treatment	根 Root/(mg·kg ⁻¹)	地上部 Shoot/(mg·kg ⁻¹)
pH=4 Sb	2 477.94±62.02a	167.00±7.81a
pH=5 Sb	2 666.76±119.77a	149.42±10.92a
pH=6 Sb	2 589.15±58.25a	66.35±4.18b
pH=7 Sb	1 938.76±113.84b	52.49±3.50b

注:表中数值为平均值±标准差(n=4);同一列不同小写字母表示处理间的差异达到显著水平(P<0.05, Duncan)。下同。

Note: Values in the table are means±standard errors (n=4); Different lowercase letters in the same column indicate differences between treatments at a significant level (P<0.05, Duncan). The same below.

11.72%和9.16%。但锑处理后的叶片长、水稻叶宽和叶面积受毒害作用的大小随pH变化存在较大差异。从pH 7降到pH 4,地上部株高和叶片长分别降低了4.09%、4.42%,叶宽、叶面积未产生显著性变化。低pH条件和锑处理均会显著降低水稻地上部及根部的生物量(图1)。这与前人在水稻、玉米和小麦中的研究结果相似^[33-36]。植物吸收的锑会占用必需元素Fe²⁺、Zn²⁺、Ca²⁺等转运离子通道并与锌、钙转运蛋白结合,从而影响蛋白质结构及功能,破坏植物体内离子平衡,引起植株营养失衡^[36],同时又会抑制可溶性蛋白质、可溶性糖和淀粉的合成进而影响植物的生长^[37]。由表2可知,pH和锑对水稻地上部生长特性均有极显著的交互作用(P<0.01),两者的交互作用使低pH条件(pH 4、pH 5)下水稻的株高、叶长下降均值是中性pH条件(pH 6、pH 7)的2.25倍和2.29倍;水稻叶

宽、叶面积也较中性pH下减少了18.32%和23.95%。随着pH降低,水稻植株地上部和根部的生物量下降幅度也逐渐增加。这表明重金属胁迫和低pH可能产生复合胁迫,进一步抑制水稻的生长。一方面在低pH条件下,水稻幼苗根系细胞膜透性增大,促进锑的跨膜运输,增加细胞内锑的含量,加重锑对根系的伤害,另一方面锑胁迫下,水稻植株根系的细胞膜被破坏,H⁺-ATP酶活性受到抑制,增加细胞外H⁺进入,减少细胞内H⁺流出,进而导致细胞质酸化加剧,使根系损伤加重^[38-39]。

2.3 对水稻叶片SPAD值的影响

叶绿素是植物光合作用的物质基础,其含量高低在一定程度上能够反映植物叶片光合作用功能强弱。本研究中经锑处理的植株,pH 4、pH 5、pH 6和pH 7条件下叶片SPAD值较无锑处理的植株分别下降了14.64%、15.15%、12.73%和12.23%(图2)。一方面锑胁迫可能会抑制有关叶绿素合成酶的活性,使叶绿素的合成受阻;另一方面会大量诱导产生的活性氧破坏细胞膜的结构与功能,使叶绿体膜膨胀破裂,进而导致叶绿素被降解^[40-41]。pH 6和pH 7条件下水稻叶片SPAD值无显著性差异,但其均值较低pH条件(pH 4、pH 5)显著增加。由方差分析结果可知,锑处理和pH值对水稻叶片SPAD值存在极显著的交互作用(P<0.01),在低pH条件下(pH 4、pH 5)降幅高于中性pH处理。这和前人在花椰菜、苎草上的研究结果相似^[16,42],其研究表明植物在酸性条件下易失绿,叶绿素转变为叶褐素,进而影响植物的光合作用。本研究

表2 不同pH条件下锑对水稻地上部生长的影响

Table 2 Effects of Sb on shoot growth of rice seedlings under different pH conditions

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶面积 Leaf area/cm ²
pH=4 Sb0	60.00±0.20b	38.33±0.19b	1.29±0.02ab	37.00±0.6a
pH=4 Sb	54.50±0.29d	35.20±0.27d	1.03±0.02d	27.05±0.58b
pH=5 Sb0	60.75±0.14ab	38.13±0.17b	1.24±0.01b	35.39±0.4a
pH=5 Sb	53.63±0.23e	34.35±0.62d	1.11±0.01c	28.67±0.73b
pH=6 Sb0	61.00±0.29a	37.95±0.21bc	1.26±0.03ab	35.95±1.09a
pH=6 Sb	57.96±0.10c	37.00±0.20c	1.31±0.01a	36.42±0.40a
pH=7 Sb0	61.00±0.29a	39.50±0.35a	1.26±0.01ab	37.41±0.61a
pH=7 Sb	58.38±0.52c	37.43±0.26bc	1.31±0.01a	36.85±0.57a
双因素方差分析				
pH值	46.622**	18.279**	27.000**	33.142**
Sb浓度	518.294**	121.331**	27.842**	79.818**
pH值×Sb浓度	28.064**	7.551**	30.930**	28.241**

注:*和**分别表示在0.05和0.01水平上互作显著。下同。

Note: The symbol of “*” and “**” indicate reciprocal significant at P<0.05 and P<0.01 levels, respectively. The same below.

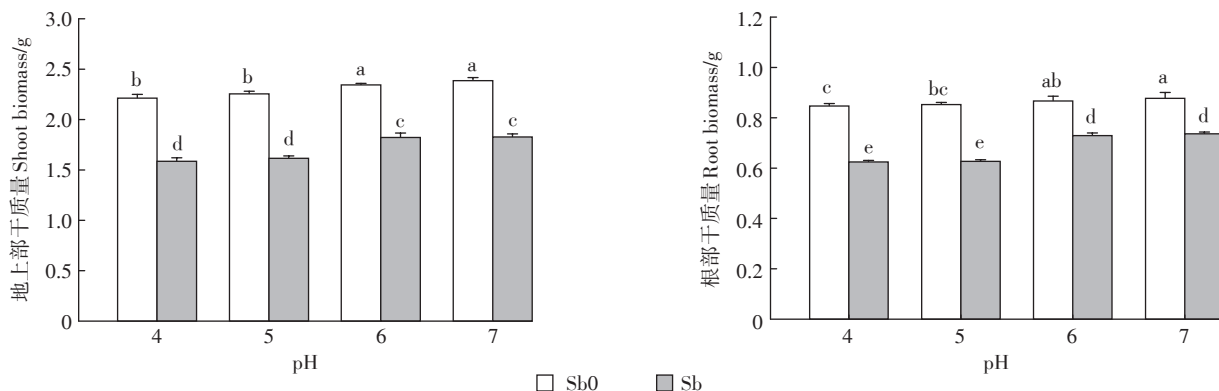


图1 不同pH条件下锑对水稻生物量的影响

Figure 1 Effects of antimony on biomass accumulation of rice seedlings under different pH conditions

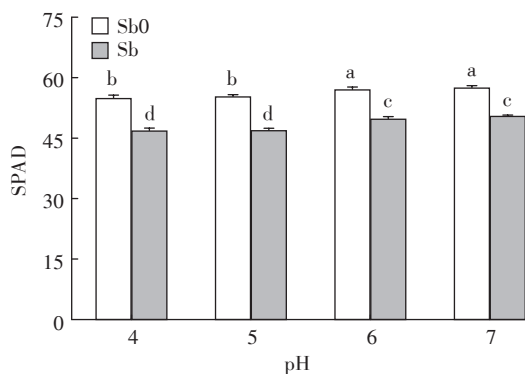


图2 不同pH条件下锑对水稻叶绿素SPAD值的影响

Figure 2 Effects of antimony on chlorophyll SPAD values of rice seedlings under different pH conditions

结果也表明在相同锑浓度下,pH 6、pH 7条件下水稻叶片光合色素遭受的损伤较小,受锑胁迫影响较轻。磷、镁、钾等营养元素在保证叶绿体膜的结构和功能上至关重要,而在pH处于中性条件时大多数营养元素有效性高,促进水稻植株对营养元素的吸收^[43],从而在一定程度上缓解了锑胁迫造成的水稻吸收营养元素减少带来的毒害效应^[44]。

2.4 对水稻叶绿素荧光特性的影响

叶绿素荧光参数是探讨植物光合性能的重要探针^[41]。Fv/Fm能够反映PS II原初光能转化效率,Y(II)反映植物叶片实际光合效率,qP表征PS II反应中心吸收的光能用于光化学电子传递的份额,ETR反映实际光反应过程中的表观电子传递效率^[45-46]。PS II是植物光合作用的重要部位,同时也是重金属胁迫的重要位点^[45]。研究表明重金属胁迫会影响水裂解端的电子流,抑制PS II活性,降低PS II的原初光能捕获能力和电子传输能力,从而抑制植物光合作用^[46-47]。本试验中经锑处理的植株,Fv/Fm、Y(II)、ETR、qP值均

显著下降(表3),其中ETR值在pH 4、pH 5、pH 6和pH 7条件下较无锑处理分别下降了17.32%、17.32%、14.65%和14.11%;而表征热耗散引起的荧光猝灭qN、NPQ表现出的规律正好相反,即锑处理后,qN、NPQ值均显著上升,其在各pH下的均值分别上升了25.67%、16.83%。Fv/Fm、Y(II)、ETR和qP值均随pH的降低而降低,其中在pH 7和pH 6之间无显著性差异,但均高于pH 5和pH 4处理;而qN值和NPQ值则在低pH下增加。这说明锑胁迫破坏了光合机构,使PS II反应中心光能转换效率和电子传递能力降低,进而抑制了植物的光合作用;而幼苗能够通过自身的调节机制将过多激发能以热能的方式耗散,从而降低对PS II反应中心的破坏程度,实现植株的自我保护。据双因素方差分析可知锑处理和pH值对Fv/Fm、Y(II)、qP、qN和NPQ值均有显著的交互作用,使Fv/Fm、Y(II)、qP值在低pH条件下的下降均值是中性pH条件下的2.22、1.48倍和1.65倍,而二者交互作用对ETR值未产生显著性影响。这说明锑胁迫对水稻幼苗光合作用的破坏程度在低pH条件下最重,可能是在低pH条件下,叶片内蛋白酶活性降低,相关电子传递受阻,光能转换效率随之降低^[48];且幼苗在低pH和锑胁迫下qN和NPQ值增幅最大,一方面反映了叶片的自我保护机制,另一方面也表明了幼苗吸收的大量能量以热能形式耗散,只有小部分能量被利用,从而导致其不能更好地进行光合作用。

2.5 对水稻叶绿素快速光响应曲线的影响

α 值、ETR_m值、IK值是反映植物光合能力的重要指标。不同pH下(pH 4~pH 7)锑处理使得水稻叶片的 α 值、ETR_m值、IK值均较无锑处理分别下降了19.75%、24.15%和15.80%(表4); α 值、ETR_m值、IK

表3 不同pH条件下锑对水稻叶绿素荧光的影响

Table 3 Effects of Sb on chlorophyll fluorescence of rice seedlings under different pH conditions

处理 Treatment	Fv/Fm	Y(II)	ETR	qP	qN	NPQ
pH=4 Sb0	0.828±0.003b	0.598±0.001c	33.096±0.318b	0.752±0.003c	0.539±0.004c	0.972±0.011c
pH=4 Sb	0.741±0.002d	0.503±0.001e	27.363±0.232d	0.619±0.002e	0.757±0.002a	1.217±0.007a
pH=5 Sb0	0.830±0.001b	0.605±0.004bc	33.100±0.204b	0.754±0.003bc	0.540±0.002c	0.970±0.016c
pH=5 Sb	0.744±0.001d	0.505±0.027e	27.367±0.674d	0.620±0.002e	0.748±0.006a	1.182±0.023a
pH=6 Sb0	0.844±0.002a	0.628±0.002ab	35.075±0.263a	0.762±0.002ab	0.512±0.003d	0.914±0.006cd
pH=6 Sb	0.806±0.002c	0.562±0.003d	29.938±0.246c	0.680±0.002d	0.664±0.006b	1.088±0.021b
pH=7 Sb0	0.847±0.03a	0.633±0.002a	35.625±0.310a	0.763±0.001a	0.511±0.003d	0.910±0.004d
pH=7 Sb	0.807±0.002c	0.567±0.001d	30.600±0.161c	0.683±0.004d	0.659±0.003b	1.041±0.040b
双因素方差分析						
pH 值	133.833**	137.064**	35.608**	109.299**	106.923**	90.359**
Sb 浓度	904.769**	1 066.561**	372.742**	1 986.096**	2 722.508**	627.426**
pH 值×Sb 浓度	53.347**	14.210**	NS	50.915**	28.036**	29.360**

注: NS 表示不显著。下同。
Note: NS indicates non-significant difference. The same below.

值均随 pH 值升高而上升(表4),与 pH 4 相比,α 值、ETRm 值、IK 值在 pH 7 条件下分别增加了 0.07、0.15、0.05 倍。pH 值和锑浓度的交互作用对 α、ETRm 和 IK 的影响虽未达到显著水平($P<0.01$),但均在低 pH 时下降幅度最大,其下降均值分别是中性 pH 条件下的 1.15、1.14、1.07 倍。这表明锑胁迫和低 pH 均会破坏植物的光合中心,降低植物的光合能力;且锑胁迫下,低 pH 值会加重破坏程度。

2.6 对水稻抗氧化酶和 MDA 含量的影响

逆境胁迫会大量诱导植株产生活性氧自由基,产生过氧化反应,使细胞膜系统受损,进而影响植物的生长^[49],其产物 MDA 含量常作为反映细胞脂质过氧化强度和质膜受破坏程度的重要参数^[50]。本试验中在锑处理后 MDA 含量显著增加了 28.27%,表明细胞膜受到破坏。植株为了抵抗这种逆境胁迫,自身会产生一种抗氧化酶保护系统来清除过多的自由基并维持正常生长^[51]。本试验中锑处理下水稻叶片的 SOD、POD、CAT 活性显著增加,其均值较无锑处理分别增加了 13.20%、20.28% 和 21.73%(表5),相较于 pH 4, pH 7 条件下水稻叶片的 SOD、POD、CAT 活性分别降低了 5.60%、8.33%、12.50%。抗氧化酶(SOD、CAT、POD)活性的增加(表5),提高了清除自由基的能力,从而缓解了活性氧对细胞膜的伤害,但这是防止活性氧自由基累积从而导致植株死亡的刺激性机制^[52],故逆境胁迫造成的生长抑制作用仍旧难以避免。方差分析结果可知 pH 值和锑处理对 SOD 和 POD 活性具有显著的交互作用,而两者的交互作用对 MDA 含量、CAT 活性未产生显著性影响,但其均使三种抗氧化酶

表4 不同pH值条件下Sb对水稻叶绿素荧光光响应曲线参数的影响

Table 4 Effects of Sb on parameters of chlorophyll fluorescence photoresponse curve of rice under different pH conditions

处理 Treatment	α	ETRm	IK
pH=4 Sb0	0.249±0.002c	72.997±1.131b	320.126±3.198b
pH=4 Sb	0.195±0.002e	52.530±0.970d	266.192±1.748e
pH=5 Sb0	0.253±0.003bc	73.187±0.735b	325.331±1.568ab
pH=5 Sb	0.199±0.001e	54.144±0.634d	272.646±2.883de
pH=6 Sb0	0.259±0.001ab	80.313±0.848a	328.175±1.486a
pH=6 Sb	0.212±0.003d	62.628±0.659c	277.993±2.402dc
pH=7 Sb0	0.262±0.002a	80.870±0.875a	331.586±2.667a
pH=7 Sb	0.215±0.001d	63.822±0.875c	282.209±1.386c
双因素方差分析			
pH 值	29.235**	69.671**	13.006**
Sb 浓度	1 234.445**	942.754**	1 030.216**
pH 值×Sb 浓度	NS	NS	NS

注: α 为曲线的初始斜率; ETRm 为最大相对电子传递速率; IK 为半饱和光强。
Note: α indicates initial slope of the curve; ETRm indicates maximum relative electron transfer rate; IK indicates half-saturation light intensity.

活性在低 pH 条件下增长最为明显,分别是中性 pH 条件的 1.51、1.32 倍和 1.05 倍。这表明在 pH 6、pH 7 条件下,水稻受锑胁迫引起的氧化损伤较小,在 pH 6、pH 7 处理组中过氧化反应产物 MDA 含量增幅较小也可证明这一点。

3 结论

(1) 锑处理后,水稻幼苗地上部和根部均大量吸收锑造成锑胁迫,其虽然能够诱导水稻体内的过氧化

表5 不同pH值条件下锑胁迫对水稻植株抗氧化酶和MDA含量的影响

Table 5 Effects of Sb stress on antioxidant enzymes and MDA content of rice plants under different pH conditions

处理 Treatment	SOD活性 SOD activity/(U·g ⁻¹)	POD活性 POD activity/(Δ470·min ⁻¹ ·g ⁻¹)	CAT活性 CAT activity/(U·g ⁻¹)	MDA含量 MDA content/(nmol·g ⁻¹)
pH=4 Sb0	97.367±0.143c	30 704.183±265.239c	137.305±2.438c	3.620±0.079c
pH=4 Sb	112.729±0.804a	37 759.341±410.290a	166.508±0.607a	4.805±0.096a
pH=5 Sb0	96.599±0.829cd	30 412.728±303.837cd	137.957±3.289c	3.490±0.088cd
pH=5 Sb	111.673±1.321a	37 086.963±376.154a	166.620±0.405a	4.635±0.052a
pH=6 Sb0	95.206±0.769cd	29 064.979±55.116de	119.683±0.147d	3.340±0.111d
pH=6 Sb	105.751±1.002b	34 077.278±401.281b	146.865±3.062b	4.140±0.078b
pH=7 Sb0	94.344±0.378d	28 696.315±332.009e	119.527±0.049d	3.275±0.057d
pH=7 Sb	103.987±0.911b	34 064.124±286.126b	146.298±2.991b	4.025±0.036b
双因素方差分析				
pH值	19.603**	32.734**	49.660**	3.330*
Sb浓度	403.616**	578.950**	321.813**	9.195*
pH值×Sb浓度	5.711*	6.226*	NS	NS

氢酶、过氧化物酶和超氧化物歧化酶活性增加,但仍然使丙二醛含量升高,抑制水稻地上部生长,降低干物质质量。

(2) 锑处理显著降低水稻叶片叶绿素相对含量,降低PSⅡ原初光能转化效率、最大相对电子传递效率和半饱和光强等叶绿素荧光参数,同时叶片非荧光猝灭系数显著提高。锑胁迫通过破坏水稻的细胞膜系统和光合中心来降低水稻光合能力。

(3) 营养液在pH=4、pH=5条件下会促进水稻地上部和根部吸收锑,同时加剧锑对水稻的生长、光合性能以及细胞膜的破坏,而在pH=6、pH=7条件下减轻了锑胁迫对水稻的毒害作用。综上,对存在锑污染风险地区可通过适当改变土壤pH值来缓解锑的毒害作用。

参考文献:

- [1] 何孟常, 季海冰, 赵承易, 等. 锑矿区土壤和植物中重金属污染初探[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2002(3): 417-420. HE M C, JI H B, ZHAO C Y, et al. Preliminary study of heavy metal pollution soil and plant near antimony mine area[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2002(3): 417-420.
- [2] 童兵, 许虹, 刘陟娜. 全球锑矿资源分布现状及对中国勘查投资建议[J]. 中国矿业, 2017, 26(增刊1): 5-10. TONG B, XU H, LIU Z N. Distribution of global antimony resources and proposals of exploration investment for China[J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(Suppl1): 5-10.
- [3] LIANG Y H, LIU Q C, LI Y K, et al. Speciation analysis and ecological risk assessment of antimony in Xikuangshan, Hunan Province[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, 30(2): 1289-1296.
- [4] WANG X, HE M, XI J, et al. Antimony distribution and mobility in rivers around the world's largest antimony mine of Xikuangshan, Hunan

Province, China[J]. *Microchemical Journal*, 2011, 97(1): 4-11.

- [5] FU Z Y, WU F C, MO C L, et al. Comparison of arsenic and antimony biogeochemical behavior in water, soil and tailings from Xikuangshan, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 539(1): 97-104.
- [6] 姚冬菊, 刘恩光, 宁增平, 等. 贵州某锑冶炼厂周边农田土壤锑、砷污染与人体健康风险评估[J]. 地球与环境, 2021, 49(6): 673-683. YAO D J, LIU E G, NING Z P, et al. Contamination and human health risks of Sb and As in farmland soils around a typical antimony smelter in Guizhou, China[J]. *Earth and Environment*, 2021, 49(6): 673-683.
- [7] 项萌, 张国平, 李玲, 等. 广西铅锑矿冶炼区土壤剖面及孔隙水中重金属污染分布规律[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 266-272. XIANG M, ZHANG G P, LI L, et al. Characteristics of heavy metals in soil profile and pore water around Hechi antimony-lead smelter, Guangxi, China[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(1): 266-272.
- [8] 齐文启, 曹杰山. 锑(Sb)的土壤环境背景值研究[J]. 土壤通报, 1991(5): 209-210. QI W Q, CAO J S. Soil environmental background value study of antimony(Sb)[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1991(5): 209-210.
- [9] 宋书巧, 梁利芳, 周永章, 等. 广西刁江沿岸农田受矿山重金属污染现状与治理对策[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003(2): 152-155. SONG S Q, LIANG L F, ZHOU Y Z, et al. The situation and remedial measures of the cropland polluted by heavy metals from mining along the Diaojiang River[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003(2): 152-155.
- [10] 辛良杰, 李秀彬. 近年来我国南方双季稻区复种的变化及其政策启示[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 58-65. XIN L J, LI X B. Changes of multiple cropping of southern China and its policy implications[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(1): 58-65.
- [11] WATANABE T, ZHANG Z W, MOON C S, et al. Cadmium exposure of women in general populations in Japan during 1991-1997 compared with 1977-1981[J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2000, 73(1): 26-34.
- [12] ALVAREZ-AYUSO E, OTONES V, MURCIEGO A, et al. Antimony,

- arsenic and lead distribution in soils and plants of an agricultural area impacted by former mining activities[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 439(15):35-43.
- [13] 冯人伟, 韦朝阳, 涂书新. 植物对锑的吸收和代谢及其毒性的研究进展[J]. 植物学报, 2012, 47(3):302-308. FENG R W, WEI C Y, TU S X. Research advances in uptake, metabolism and toxicity of antimony in plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2012, 47(3):302-308.
- [14] 何孟常, 谢南岳, 余维德, 等. 土壤锑对水稻生长的影响及残留积累规律研究[J]. 农业环境保护, 1994(1):18-22. HE M C, XIE N Y, YU W D, et al. Study on the effect of soil antimony on rice growth and residue accumulation pattern[J]. *Agriculture Environmental Protection*, 1994(1):18-22.
- [15] WU F, FU Z, LIU B, et al. Health risk associated with dietary co-exposure to high levels of antimony and arsenic in the world's largest antimony mine area[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(18):3344-3351.
- [16] 黄敏, 施国新, 夏海威, 等. 不同pH处理对菹草(*Potamogeton crispus* L.) Cr⁶⁺毒害效应的影响[J]. 湖泊科学, 2014, 26(4):607-615. HUANG M, SHI G X, XIA H W, et al. Toxicological effects of Cr⁶⁺ on *Potamogeton crispus* L. under different pH values[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(4):607-615.
- [17] WILSON S C, LOCKWOOD P V, ASHLEY P M, et al. The chemistry and behaviour of antimony in the soil environment with comparisons to arsenic: A critical review[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5):1169-1181.
- [18] HU X Y, HE M C, LI S S, et al. The leaching characteristics and changes in the leached layer of antimony-bearing ores from China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 176:76-84.
- [19] 李立刚, 周建伟, 李伟洁, 等. 某特大型锑矿区废石中锑的释放规律[J]. 地质科技情报, 2018, 37(5):215-221. LI L G, ZHOU J W, LI W J, et al. Release regularity of antimony from waste rock in a super large antimony ore area[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(5):215-221.
- [20] TIGHE M, LOCKWOOD P. Importance of noncrystalline hydroxide phases in sequential extractions to fractionate antimony in acid soils[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2007, 38(11/12):1487-1501.
- [21] CAI Y B, MI Y T, ZHANG H. Kinetic modeling of antimony(Ⅲ) oxidation and sorption in soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016(316):102-109.
- [22] 孙晓宇, 杨雾晨, 唐晓迪, 等. 太浦河流域锑污染环境风险评估[J]. 环境保护科学, 2017, 43(3):120-124. SUN X Y, YANG W C, TANG X D, et al. Environmental risk assessment of antimony pollution in Taipu River Basin[J]. *Environmental Protection Science*, 2017, 43(3):120-124.
- [23] 蔡永兵, 邵俐, 范行军, 等. 安徽花山尾矿库溃坝污染农田土壤中As、Sb的释放及垂向迁移特征[J]. 环境化学, 2020, 39(9):2479-2489. CAI Y B, SHAO L, FAN X J, et al. Study on the release and vertical migration characteristics of As and Sb in farmland soil contaminated by dam break of Huashan tailings pond, Anhui, China[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(9):2479-2489.
- [24] CHEN D M, CHEN D Q, XUE R R, et al. Effects of boron, silicon and their interactions on cadmium accumulation and toxicity in rice plants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 367:447-455.
- [25] 董家瑜, 吴天昊, 孙远涛, 等. 不同锰浓度环境下OsNRAMP5突变对水稻耐热性和主要经济性性状的影响[J]. 杂交水稻, 2021, 36(2):79-88. DONG J Y, WU T H, SUN Y T, et al. Effects of OsNRAMP5 mutation on heat tolerance and main economic traits of rice under the conditions of different manganese[J]. *Hybrid Rice*, 2021, 36(2):79-88.
- [26] 向猛, 黄益宗, 蔡立群, 等. 硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(4):1474-1480. XIANG M, HUANG Y Z, CAI L Q, et al. Effect of boron-antimony interaction on the uptake and accumulation of antimony and boron by rice seedling[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(4):1474-1480.
- [27] LONG J, ZHOU D, LI B, et al. The effect of an antimony resistant bacterium on the iron plaque fraction and antimony uptake by rice seedlings[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 258:113670.
- [28] 陶洪斌, 林杉. 打孔称重法与复印称重法和长宽校正法测定水稻叶面积的方法比较[J]. 植物生理学通讯, 2006(3):496-498. TAO H B, LIN S. Comparison on disc method with copy method and length-width method for measuring leaf area of rice[J]. *Plant Physiology Journal*, 2006(3):496-498.
- [29] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 第一版. 北京:高等教育出版社, 2000:164-167. LI H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. First edition. Beijing:Beijing Higher Education Press, 2000:164-167.
- [30] 刘晓芸, 刘晶晶, 柯勇, 等. 水体中锑的形态及转化规律研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(5):1330-1346. LIU X Y, LIU J J, KE Y, et al. Research progress on speciation of antimony in natural water[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(5):1330-1346.
- [31] JI Y, VOLLENWEIDER P, LENZ M, et al. Can iron plaque affect Sb(Ⅲ) and Sb(V) uptake by plants under hydroponic conditions[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 148:168-175.
- [32] 鞠鑫. 锑对不同植物的毒理效应及其土壤生态基准研究[D]. 北京:华北电力大学, 2016:4-5. JU X. The toxicological effects of antimony on different plants and its soil ecological criteria[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2016:4-5.
- [33] FENG R W, WEI C Y, TU S X, et al. Detoxification of antimony by selenium and their interaction in paddy rice under hydroponic conditions[J]. *Microchemical Journal*, 2011, 97(1):57-61.
- [34] PAN X, ZHANG D, XI C, et al. Antimony accumulation, growth performance, antioxidant defense system and photosynthesis of *Zea mays* in response to antimony pollution in soil[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2011, 215(1/4):517-523.
- [35] SHTANGEEVA I, BALI R, HARRIS A. Bioavailability and toxicity of antimony[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 110(1):40-45.
- [36] ZHU Y M, W Q H, LÜ H Q, et al. Toxicity of different forms of antimony to rice plants: Effects on reactive oxidative species production, antioxidative systems, and uptake of essential elements[J]. *Environ-*

- mental Pollution, 2020, 263(Pt B):114544.
- [37] FENG R W, WEI C Y, TU S X, et al. The uptake and detoxification of antimony by plants: A review[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 96:28-34.
- [38] 王丽红, 孙飞, 陈春梅, 等. 酸化土壤铝和镉对水稻幼苗根系生长的复合影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12):2511-2512. WANG L H, SUN F, CHEN C M, et al. Combined effects of aluminum and cadmium in acidified soil on root growth in rice seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12):2511-2512.
- [39] KOBAYASHI Y, KOBAYASHI Y, WATANABE T, et al. Molecular and physiological analysis of Al^{3+} and H^{+} rhizotoxicities at moderately acidic conditions[J]. *Plant Physiology*, 2013, 163(1):180-192.
- [40] STOEVA N, BEROVA M, ZLATEV Z. Physiological response of maize to arsenic contamination[J]. *Biologia Plantarum*, 2003, 47(3):449-452.
- [41] DEMETRIOU G, NEONAKI C, NAVAPOUDIS E, et al. Salt stress impact on the molecular structure and function of the photosynthetic apparatus: The protective role of polyamines[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2007, 1767(4):272-280.
- [42] GUNAWAN M I, BARRINGER S A. Green color degradation of blanched broccoli (*Brassica Oleracea*) due to acid and microbial growth[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2000, 24(3):253-263.
- [43] 张丽芳, 胡海林. 土壤酸碱性对植物生长影响的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(8):40-43. ZHANG L F, HU H L. Research progression effect of soil pH on plant growth[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2020, 48(8):40-43.
- [44] 向猛. 硅、钙和硼对水稻吸收、积累镉的影响及其缓解机制研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015:9-37. XIANG M. Effects of silicon and boron and calcium on antimony uptake by rice plants (*Oryza sativa* L.) and possible mechanisms[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2015:9-37.
- [45] 刘红梅, 新跃, 李先喆, 等. 基于叶绿素荧光参数的籼型杂交稻杂种优势分析[J]. 植物生理学报, 2014, 50(6):855-860. LIU H M, XIN Y, LI X Z, et al. Heterosis analysis of chlorophyll fluorescence parameters in indica hybrid rice[J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(6):855-860.
- [46] 孙文君, 江晓慧, 付媛媛, 等. 盐胁迫对棉花幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(7):23-28. SUN W J, JIANG X H, FU Y Y, et al. The effects of salt stress on chlorophyll fluorescence of cotton seedling leaves[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(7):23-28.
- [47] 李朝阳, 吴昊, 田向荣, 等. Cd、Pb胁迫下湿地甸灯藓 (*Plagiomnium acutum*) 叶绿素荧光特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1):49-56. LI Z Y, WU H, TIAN X R, et al. Fluorescent characteristics of chlorophylls in *Plagiomnium acutum* under Cd and Pb stresses[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1):49-56.
- [48] 沈燕, 伊力塔, 殷秀敏, 等. 模拟酸雨对马尾松叶绿素荧光特性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(5):706-713. SHEN Y, YI L T, YIN X M, et al. Acid rain stress with leaf chlorophyll fluorescence in *Pinus massoniana*[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2013, 30(5):706-713.
- [49] MA C L, HE M C, ZHONG Q, et al. Uptake, translocation and phytotoxicity of antimonite in wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669(15):421-430.
- [50] 任怀新, 王冬梅, 王慧, 等. 生物炭对盐碱胁迫下黑麦草和紫花苜蓿光合及抗氧化特征的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17):116-123. REN H X, WANG D M, WANG H, et al. Effects of biochar on the photosynthetic and antioxidant characteristics of ryegrass and alfalfa under saline-alkali stress[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(17):116-123.
- [51] FENG R W, LEI L, SU J M, et al. Toxicity of different forms of antimony to rice plant: Effects on root exudates, cell wall components, endogenous hormones and antioxidant system[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 711:134589.
- [52] 王菲, 肖雨, 程小毛, 等. 镉胁迫对吊兰及银边吊兰生长及镉富集特性的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5):1835-1844. WANG F, XIAO Y, CHENG X M, et al. Effects of cadmium stress on growth and cadmium enrichment of *Chlorophytum comosum* and *Chlorophytum comosum* var. *variegatum*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(5):1835-1844.

(责任编辑:叶飞)