

芸苔素内酯对糜子苯唑·二甲钠药害的缓解作用

林瑞嫦, 高玉萌, 王可心, 李鑫, 杨思敏, 高小丽

引用本文:

林瑞嫦, 高玉萌, 王可心, 李鑫, 杨思敏, 高小丽. 芸苔素内酯对糜子苯唑·二甲钠药害的缓解作用[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 726–734.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0832>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

DEHP短期暴露下的大鼠代谢酶及其代谢动态变化

黄卓权, 刘瑞菁, 黄少文, 贺永健, 刘焕, 郑冬冬, 柳春红

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 943–948 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1200>

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>

氧化石墨烯对玉米幼苗生长及生理特征的影响

赵琳, 宋瑞瑞, 吴琦, 吴希, 云振宇

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1167–1173 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1104>

邻苯二甲酸二甲酯(DMP)对黄瓜抗氧化代谢及果实品质的影响

张颖, 董俊伟, 王蕾, 范新会, 孙瑞雪, 张惠, 单德鑫

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 847–854 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1620>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

林瑞嫦, 高玉萌, 王可心, 等. 芸苔素内酯对糜子苯唑·二甲钠药害的缓解作用[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 726–734.

LIN R C, GAO Y M, WANG K X, et al. The mitigation effect of brassinolide on phytotoxicity of tribenuron-methyl·carfentrazone-ethyl·MCPA-Na on broomcorn millet[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(4): 726–734.



开放科学 OSID

芸苔素内酯对糜子苯唑·二甲钠药害的缓解作用

林瑞嫦, 高玉萌, 王可心, 李鑫, 杨思敏, 高小丽*

(西北农林科技大学农学院/旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为研究芸苔素内酯对糜子苯唑·二甲钠药害的缓解效果,于2020年6—10月在陕西省榆林市以“榆糜2号”糜子品种为材料进行大田试验,在糜子幼苗长至3~4叶期时,喷施0.6 kg·hm⁻²苯唑·二甲钠防除杂草,药后3 d分别叶面喷施0.06、0.08、0.10 mg·L⁻¹的芸苔素内酯,调查除草剂药害和杂草防效,研究糜子功能叶片叶绿素含量、抗氧化酶活性及产量变化。结果表明:叶面喷施0.06、0.08、0.10 mg·L⁻¹芸苔素内酯后除草剂药害指数显著下降,分别较单施除草剂降低了11.34、13.26、12.75个百分点,杂草防效略有降低,但与单施除草剂差异不显著;在苯唑·二甲钠胁迫下,糜子的株高,茎粗,穗长,主穗质量,产量,功能叶片过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽-S-转移酶(GST)活性和叶绿素、还原型谷胱甘肽(GSH)含量均降低,丙二醛(MDA)含量显著升高;药后3 d喷施不同浓度的芸苔素内酯均能缓解苯唑·二甲钠对糜子的药害,提高糜子产量及功能叶片的活性氧代谢酶活性、GST活性和叶绿素、GSH含量,并显著降低MDA含量。研究表明,在0.6 kg·hm⁻²的苯唑·二甲钠胁迫下喷施0.06~0.10 mg·L⁻¹的芸苔素内酯可通过提高糜子叶片抗氧化酶活性维持细胞氧化还原的平衡和提高GST酶活性促进苯唑·二甲钠与GSH形成无毒性的轭合物来缓解苯唑·二甲钠对糜子产生的药害,从而促进糜子正常生长,提高糜子产量,其中浓度为0.08 mg·L⁻¹的芸苔素内酯在缓解除草剂药害、促进糜子增产方面效果较好。

关键词:糜子;芸苔素内酯;苯唑·二甲钠;药害缓解;活性氧代谢

中图分类号:S451.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2022)04-0726-09 doi:10.11654/jaes.2021-0832

The mitigation effect of brassinolide on phytotoxicity of tribenuron-methyl·carfentrazone-ethyl·MCPA-Na on broomcorn millet

LIN Ruichang, GAO Yumeng, WANG Kexin, LI Xin, YANG Simin, GAO Xiaoli*

(College of Agronomy, Northwest A&F University/State Key Laboratory of Crop Stress Biology for Arid Areas, Yangling 712100, China)

Abstract: This study evaluated the mitigation effect of brassinolide (BR) on the phytotoxicity of tribenuron-methyl·carfentrazone-ethyl·MCPA-Na to provide a theoretical basis for the secure application of herbicides and the mitigation of herbicide phytotoxicity in broomcorn millet fields. Yumi 2 was planted in an experimental field located in Yulin, Shaanxi, from June to October 2020. Plants at the three-leaf to four-leaf stage were treated with 0.6 kg·hm⁻² WP mixture of tribenuron-methyl·carfentrazone-ethyl·MCPA-Na. After 3 d, 0.06 mg·L⁻¹ of BR, 0.08 mg·L⁻¹ of BR, and 0.10 mg·L⁻¹ of BR were foliarly applied, respectively. The phytotoxicity and fresh weight control effects of weeds were investigated for each treatment group. We measured the chlorophyll content and level of antioxidant enzymes in the functional leaves of broomcorn millet as well as the overall yield. Phytotoxicity showed a negative correlation with BR concentration. Compared with CK herbicide application, phytotoxicity indexes were reduced by up to 11.34, 13.26, and 12.75 percent points, respectively, depending on

收稿日期:2021-07-22 录用日期:2021-11-01

作者简介:林瑞嫦(1995—),女,海南昌江人,硕士研究生,主要从事糜子田杂草防除及高效安全生产研究。E-mail:1512723575@qq.com

*通信作者:高小丽 E-mail:gao2123@nwsuaf.edu.cn

基金项目:国家谷子高粱产业技术体系项目(CARS-06-13.5-A26);陕西省重点研发计划项目(2018TSCXL-NY-03-01)

Project supported: The National Broomcorn Millet and Sorghum Industrial Technology System of China(CARS-06-13.5-A26); The Key Research and Development Program of Shaanxi Province, China(2018TSCXL-NY-03-01)

BR concentration. This was accompanied by a slightly reduced weed control effect. However, there was no significant difference from single application of herbicide. The WP mixture of tribenuron-methyl·carfentrazone-ethyl·MCPA-Na decreased plant height, stem thickness, ear length, main ear weight, yield, the activity levels of peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathione S-transferase (GST), as well as chlorophyll and glutathione (GSH) content, but significantly increased malondialdehyde (MDA) content. The BR treatments increased the yield, activity levels of reactive oxygen metabolizing enzymes and GST, content levels of chlorophyll and GSH, and reduced the level of MDA content. The results indicate that treating broomcorn millet with $0.06\sim 0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BR following application of $0.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ WP mixture of tribenuron-methyl·carfentrazone-ethyl·MCPA-Na can maintain the balance of cell redox by increasing the activity of antioxidant enzymes in the leaves and improving the activity of GST to promote the formation of an avirulence conjugate related to reduced glutathione, alleviating damage while promoting the growth and yield of broomcorn millet. The BR concentration of $0.08\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ shows the best effect, alleviating the phytotoxicity, while promoting the yield of broomcorn millet.

Keywords: broomcorn millet; brassinolide; WP mixture of tribenuron-methyl·carfentrazone-ethyl·MCPA-Na; phytotoxicity mitigation; active oxygen metabolism

糜子(*Panicum miliaceum* L.)具有抗旱耐瘠、耐盐碱、生育期短等优点,是我国北方干旱半干旱地区重要的粮食作物与经济作物^[1-2]。糜子籽粒富含蛋白质、淀粉和矿物质等营养物质,是新时期食物多元化的重要食物来源^[3]。

杂草是糜子减产的主要原因^[4],查顺清等^[5]指出糜子田杂草以阔叶杂草为主,每年陕西榆林地区因草害导致减产的糜子农田占25%左右。糜子属于直播密植作物,相比于传统人工除草,使用化学除草剂可显著减轻草害、降低生产成本、提高农业生产效率,因此在糜子生产中除草剂的使用具有重要意义^[6]。苯唑·二甲钠(WP)是一种由苯磺隆、唑草酮和2甲4氯钠三元复配而成的新型复配除草剂。宇雪靖^[7]研究发现,苯唑·二甲钠对糜子田杂草防效较好,且能显著提高糜子产量。但也有研究表明,除草剂在杀死杂草的同时也会对作物造成一定的药害,抑制作物的生长发育,导致产量降低^[8]。

除草剂安全剂是一种可提升作物新陈代谢功能而又不影响除草剂除草效果的有机化合物^[9]。目前,利用安全剂来减轻除草剂药害并扩大除草剂杀草范围已成为研究热点^[10]。芸苔素内酯(BR)是植物特异性甾体激素^[11-12],可控制气孔关闭进而提高作物的光合作用^[13],广泛参与其他生理过程并促进植株的生长发育^[14],可有效提高作物在多种逆境(包括除草剂药害)中的抗逆性^[15-19]。周小毛等^[20]发现,芸苔素内酯浸种可有效缓解除草剂胺苯磺隆对水稻幼苗的药害。钟杨等^[21]发现,干旱胁迫下喷施适宜浓度的芸苔素内酯可促进辣椒幼苗过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性和叶绿素含量的增加,降低丙二醛(MDA)含量,减轻干旱对辣椒幼苗

的伤害。适宜浓度的芸苔素内酯还可促进糜子叶片叶绿素含量、穗长和地上部生物量的增加,提高糜子产量,缓解阔世玛对糜子的药害作用^[22]。目前,未见芸苔素内酯在缓解除草剂苯唑·二甲钠药害方面的相关报道,因此,本文通过在糜子幼苗期喷施除草剂苯唑·二甲钠后,叶面喷施不同浓度的芸苔素内酯,研究其对苯唑·二甲钠药害的缓解作用和对杂草防效、糜子叶片叶绿素含量、抗氧化酶活性、谷胱甘肽转移酶(GST)活性、MDA含量、还原型谷胱甘肽(GSH)含量及产量的影响,旨在从糜子叶片生理代谢的角度阐明芸苔素内酯缓解苯唑·二甲钠药害的生理机制,期为糜子生产中苯唑·二甲钠的安全应用提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2020年6—10月在西北农林科技大学榆林小杂粮综合试验示范站($37^{\circ}56'N$, $109^{\circ}21'E$)进行,试验地海拔1229 m,年平均气温 $8.5^{\circ}C$,年平均日照数2815.8 h,年平均降水量400 mm,降水主要集中在7—9月。

1.2 试验设计

以“榆糜2号”糜子品种为试验材料,选用的茎叶型除草剂为55%苯唑·二甲钠可湿性粉剂(美国富美实公司),安全剂为0.01%芸苔素内酯可溶性粉剂(河南东立信生物工程有限公司)。本课题组前期的除草剂筛选试验结果发现^[23],苯唑·二甲钠推荐浓度为 $0.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时对糜子田的杂草防效较好,且对糜子生长发育的负面影响较小,较清水不除草对照增产显著,因此本试验将苯唑·二甲钠浓度设置为 $0.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

研究表明,在阔世玛胁迫下喷施 0.05~0.10 mg·L⁻¹ 的芸苔素内酯可有效缓解阔世玛对谷子的伤害,使谷子的株高、叶面积和生物量增大,促进其正常生长^[24]。因此本试验将芸苔素内酯浓度设置为 0.06、0.08、0.10 mg·L⁻¹ 3 个浓度。

试验田间种植采取随机区组排列,小区面积为 20 m² (4 m×5 m),共设置 6 个处理:人工除草(CK1)、喷施等量清水不除草(CK2)、0.6 kg·hm⁻² 苯唑·二甲钠(M1)、0.6 kg·hm⁻² 苯唑·二甲钠+0.06 mg·L⁻¹ 芸苔素内酯(M1S1)、0.6 kg·hm⁻² 苯唑·二甲钠+0.08 mg·L⁻¹ 芸苔素内酯(M1S2)、0.6 kg·hm⁻² 苯唑·二甲钠+0.10 mg·L⁻¹ 芸苔素内酯(M1S3),每个处理 4 次重复。待糜子幼苗长至 3~4 叶期时,选择晴朗、无风的下午喷施 0.6 kg·hm⁻² 的苯唑·二甲钠。喷药 3 d 后,喷施不同浓度(0.06、0.08、0.10 mg·L⁻¹)的芸苔素内酯缓解药害,采用茎叶喷雾,药液施用量为 450 L·hm⁻²。

1.3 测定方法及指标

1.3.1 药害指数调查

喷施安全剂芸苔素内酯 7 d 后,统一在田间观察并记录糜子叶片的药害及缓解情况,统计各处理重复小区的药害级别及株数,计算药害指数,见公式(1)。药害等级参考字雪靖^[7]的药害分级标准:植株正常生长发育、无明显伤害为 0 级药害;0~20% 的叶片枯黄或带斑点为 1 级药害;20%~50% 的叶片变黄且卷曲为 2 级药害;50%~70% 的叶片卷曲枯黄为 3 级药害;70%~90% 的叶片枯萎或 20% 死亡为 4 级药害。

$$\text{药害指数} = \frac{\sum (\text{药害级数} \times \text{该药害等级的植株数})}{\text{调查总株数} \times \text{最高药害级数}} \times 100 \quad (1)$$

1.3.2 田间杂草防效调查

采用大小为 0.25 m² 的铁丝框随机取样,拔取各处理取样框内的杂草,对杂草鲜质量进行称量,药后 15 d 开始调查,之后以 15 d 为间隔开展调查,直至糜子成熟,总计调查 4 次,糜子田间杂草防效以鲜质量防效表示。

$$C = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: C 为鲜质量防效,%; W₁ 为对照 CK2 杂草鲜质量, g; W₂ 为处理(M1、M1S1、M1S2、M1S3)杂草鲜质量, g。

1.3.3 糜子叶片叶绿素含量测定

喷施芸苔素内酯后,分别在糜子苗期(P1)、拔节期(P2)、抽穗期(P3)、灌浆前期(P4)及灌浆后期(P5)

在各处理小区随机选取 3 株糜子植株,采用手持式 SPAD-502 叶绿素测定仪测定糜子顶部展开叶片的叶绿素含量。

1.3.4 糜子叶片抗氧化酶、GST 活性和 MDA、GSH 含量测定

喷施芸苔素内酯后,分别在糜子苗期、拔节期、抽穗期、灌浆前期及灌浆后期采集糜子顶部展开叶片。每次所取叶片样品放入液氮冷冻保存并储存在 -80 ℃ 冰箱中。POD、SOD、CAT、GST 活性和 MDA、GSH 含量采用相应的检测试剂盒测定,试剂盒均购自北京索莱宝科技有限公司。

1.3.5 糜子农艺性状及产量测定

糜子成熟后,各处理随机选取 5 株糜子植株进行考种,测量糜子株高、茎粗、穗长、穗质量。各处理重复小区未取样行进行单收计产。

1.4 统计与分析

利用 Excel 2007 处理数据, Origin 2017 绘图, SPSS 22 对数据进行分析, Duncan 新复极差法进行差异性分析。表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 芸苔素内酯对除草剂药害及杂草防效的影响

由表 1 可知, M1 处理在糜子各生育时期的杂草鲜质量平均防效均在 80% 以上(45 d 除外), 且随着生育进程的推进呈先减弱后增强的趋势。喷施芸苔素内酯处理(M1S1、M1S2、M1S3)较 M1 处理杂草防效略有降低, 且随着生育进程的推进呈逐渐降低的趋势。M1S1、M1S2、M1S3 处理的药害指数均显著低于 M1 处理, 分别较 M1 处理下降了 11.34、13.26、12.75 个百分点, 说明喷施芸苔素内酯可以显著减轻除草剂苯唑·二甲钠对糜子的药害。

表 1 糜子田杂草鲜质量防效和药害指数

Table 1 Broomcorn millet farmland weeds' fresh weight control effect and phytotoxicity index

处理 Treatment	鲜质量防效 Fresh weight control effect/%				药害指数 Phytotoxicity index
	15 d	30 d	45 d	60 d	
M1	84.60a	80.40ab	79.60a	89.50a	37.17a
M1S1	83.80a	86.70ab	81.20a	66.70b	25.83b
M1S2	84.30a	87.30a	77.90a	68.90b	23.91b
M1S3	78.90a	79.20b	75.40a	70.80b	24.42b

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at P<0.05. The same below.

2.2 除草剂及安全剂对糜子叶片叶绿素含量的影响

由表2可知,随着生育进程的推进,各处理的糜子叶片叶绿素含量呈先升高后降低的趋势,且除M1S3处理外,其余均在P4期达到峰值。M1处理糜子叶片的叶绿素含量较CK1有所降低(P3除外),喷施芸苔素内酯后(M1S1、M1S2、M1S3)的糜子叶片叶绿素含量均高于M1处理,说明叶面喷施芸苔素内酯可提高糜子叶片叶绿素含量,进而提高糜子叶片光合作用,减轻苯唑·二甲钠对叶片叶绿素的不利影响。

2.3 除草剂及安全剂对糜子叶片生理代谢的影响

2.3.1 糜子叶片活性氧代谢

由图1a可知,各处理糜子叶片POD活性随生育期推进呈先增加后减小的趋势,在P4期POD活性达到最大值。M1处理的POD活性在P1期、P2期有所上升,且高于CK2,在P3期缓慢上升但开始低于CK2;与M1处理相比,喷施芸苔素内酯处理的POD活性在各时期均有所提升。在P4期,M1S1、M1S2、M1S3处理的POD活性较M1处理分别提升了32.0%、40.1%、33.9%。

由图1b可知,各处理叶片SOD活性随生育进程推进呈先升高后降低的趋势,在P4期SOD活性达到最大值。M1处理的SOD活性在各时期均为最低且大多时期显著低于CK2;M1S1、M1S2、M1S3处理的SOD活性均显著高于M1处理且在P4期缓慢上升至峰值,较M1处理分别提高了10.8%、15.4%、8.7%,喷施中浓度芸苔素内酯的M1S2处理的SOD活性高于低浓度处理(M1S1)和高浓度处理(M1S3, $P<0.05$)。

由图1c可知,各处理叶片CAT活性随生育进程推进呈先增加后减小的趋势,在P4期CAT活性达到最大值。M1处理的CAT活性在各时期均最低且显著低于CK2;M1S1、M1S2、M1S3处理的CAT活性在各时期均有所提高且显著高于M1处理(P1期M1S1除外)。在P4期,M1S1、M1S2、M1S3处理的CAT活性较M1处理分别提升了14.8%、33.3%、26.8%。除P2期外,其余时期M1S2、M1S3处理的CAT活性均高于

M1S1处理。

由图1d可知,各处理的糜子叶片MDA含量随生育进程推进呈逐渐增加的趋势,在P3期、P4期、P5期上升迅速。M1处理的叶片MDA含量在各时期均显著高于CK2,喷施芸苔素内酯处理的MDA含量较M1处理均显著下降,不同浓度芸苔素内酯处理间差异不显著(P5期除外)。M1S2处理在P2期、P3期及P5期的MDA含量在3个芸苔素内酯处理中最小,分别较M1处理显著下降了33.05%、28.48%、20.01%。说明苯唑·二甲钠胁迫下喷施芸苔素内酯可显著降低糜子叶片细胞内的MDA含量,缓解苯唑·二甲钠胁迫造成的细胞膜脂过氧化,从而减小了苯唑·二甲钠对糜子叶片细胞膜系统的伤害。

2.3.2 糜子叶片GSH含量和GST活性

由图2a可知,随着生育进程的推进,各处理叶片GSH含量先升高后降低,在P4期GSH含量达到最大值。与CK2相比,M1处理在各时期的GSH含量均显著降低;M1S1、M1S2、M1S3处理的GSH含量较M1处理均有不同程度的提高;M1S2、M1S3处理的GSH活性除P5期外,其余时期均高于M1S1处理。在P4期,M1S1、M1S2、M1S3处理较M1处理的GSH含量分别显著提高了23.3%、30.8%、25.3%。

由图2b可知,各处理的糜子叶片GST活性随生育进程推进呈先升高后降低的趋势,在P3期GST活性达到最大值。M1处理的GST活性在各时期均最低且大多时期显著低于CK2;M1S1、M1S2、M1S3处理在各时期的GST活性均显著高于M1处理;M1S2、M1S3处理在各时期的GST活性均高于M1S1处理。在P3期,M1S1、M1S2、M1S3处理的GST活性较M1处理分别显著升高了29.6%、52.4%、39.7%。

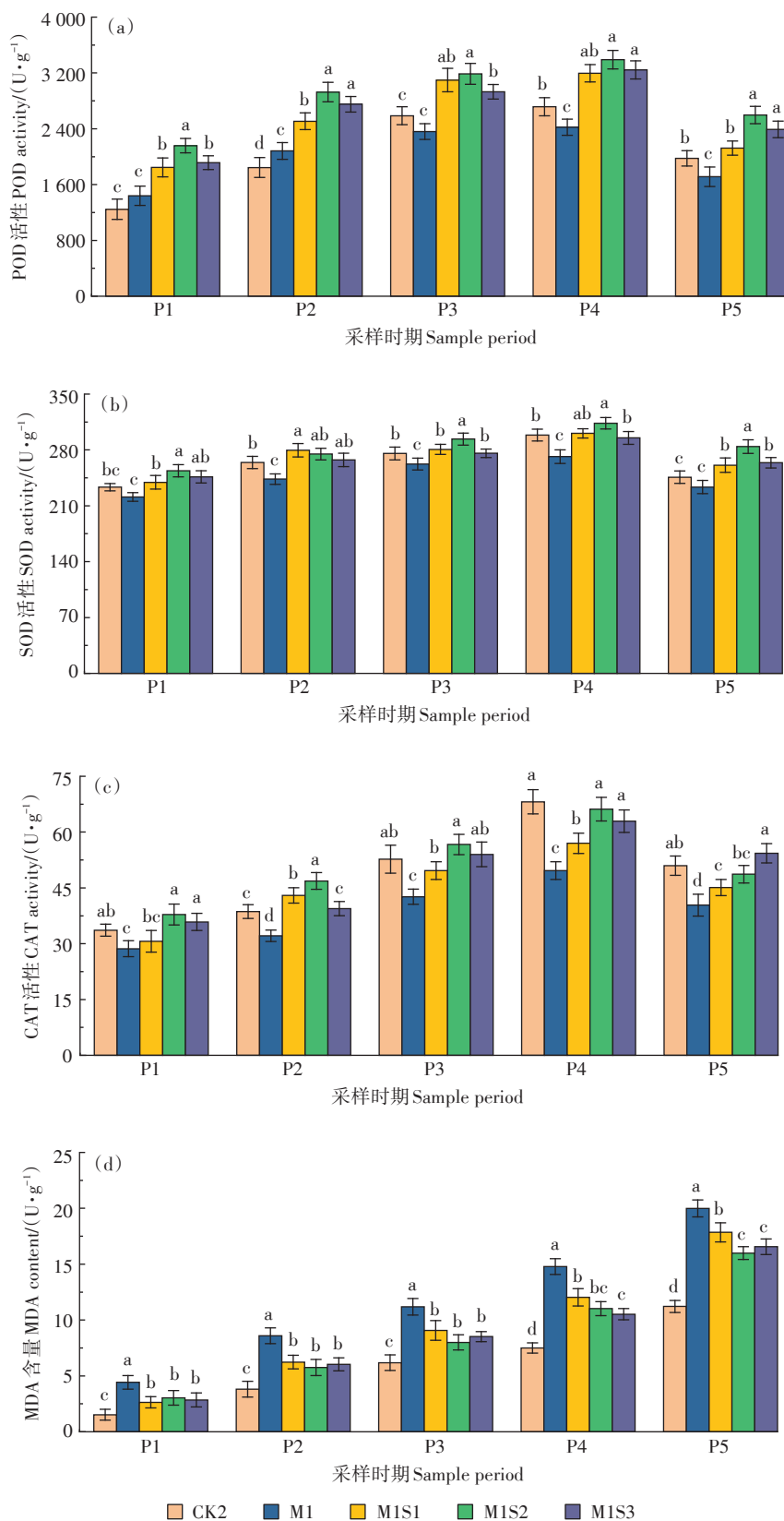
2.4 除草剂及安全剂对糜子农艺性状及产量的影响

由表3可知,M1处理的株高、穗长显著低于CK1,茎粗与CK1无显著差异。叶面喷施芸苔素内酯后,各处理的株高、茎粗均显著高于M1处理,穗长与

表2 糜子叶片叶绿素含量

Table 2 Chlorophyll content of leaf of broomcorn millet

处理 Treatment	P1	P2	P3	P4	P5
CK1	37.27±3.51a	35.50±1.30bc	38.30±3.61a	42.60±4.33bc	38.23±1.63ab
CK2	30.17±6.04b	34.07±2.08bc	33.93±2.47b	35.70±2.88d	34.93±2.14b
M1	34.17±1.69ab	32.90±2.95c	39.43±0.78a	39.87±1.42cd	36.73±2.72ab
M1S1	35.03±0.58ab	35.93±1.40bc	39.87±1.18a	45.27±1.53ab	37.43±0.78ab
M1S2	35.80±1.91ab	36.90±0.72b	41.23±1.99a	47.43±1.65a	38.40±2.81ab
M1S3	35.13±0.47ab	40.97±0.87a	39.90±0.40a	40.27±0.78c	39.93±2.20a



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below

图1 糜子叶片活性氧代谢

Figure 1 Active oxygen metabolism in the leaves of broomcorn mille

M1处理无显著差异,说明苯唑·二甲钠胁迫显著抑制了糜子的生长,叶面喷施不同浓度的芸苔素内酯能减轻除草剂对糜子株高和茎粗的不利影响。

由表3还可以看出,CK1的主穗质量最大,达16.67 g;CK2最小,仅为8.49 g;M1处理的主穗质量小于M1S1、M1S2、M1S3处理,但无显著差异。从产量来看,CK2产量最低,仅为962.50 kg·hm²,CK1产量最高,达4 041.80 kg·hm²,M1处理产量仅高于CK2,而低于喷施芸苔素内酯处理。M1S1、M1S2、M1S3处理的产量均显著高于CK2和M1处理,分别较M1处理增产8.5%、19.7%、11.4%。综上可知,在苯唑·二甲钠胁迫

下,喷施不同浓度的芸苔素内酯均能使糜子株高、茎粗、穗长和主穗质量增加,促进糜子正常生长发育,提高产量。

3 讨论

大量研究表明,植物在正常生长条件下活性氧(ROS)的产生与消除处于动态平衡,胁迫可导致植物体内产生大量ROS,过多的ROS打破了平衡状态,使细胞膜质过氧化作用增强,ROS清除酶结构受到破坏,导致细胞膜相对透性提高、生理代谢紊乱等不良反应^[25-27]。同时ROS还会对叶绿体和线粒体等细胞

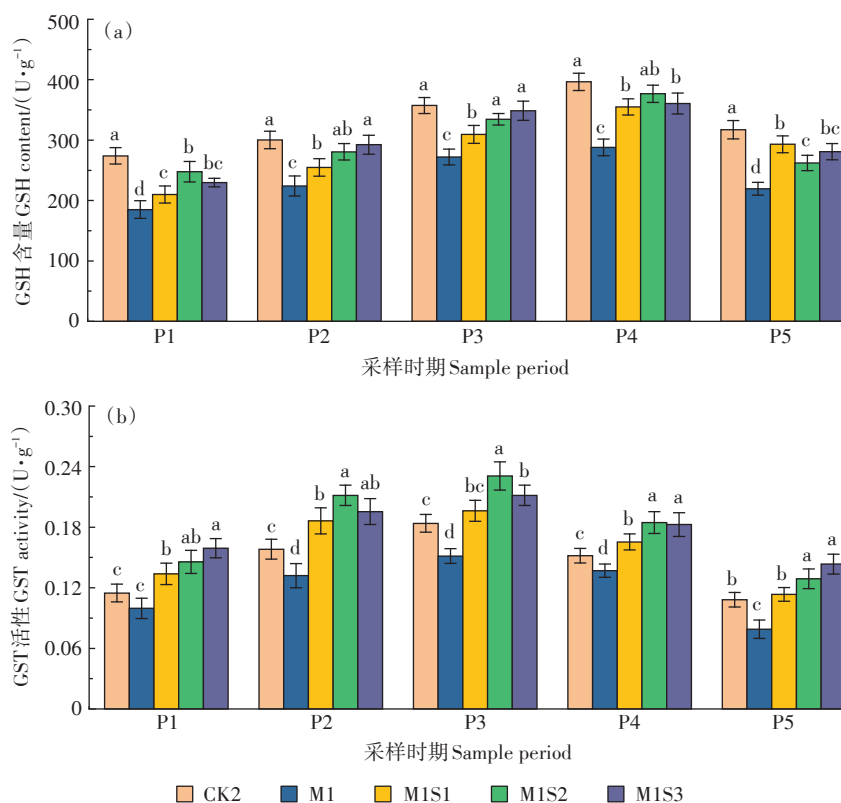


图2 糜子叶片 GSH 含量和 GST 活性

Figure 2 GSH content and GST activity of broomcorn millet leaves

表3 糜子农艺性状和产量

Table 3 Agronomic traits and yield of broomcorn millet

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem thickness/cm	穗长 Spike length/cm	主穗质量 Main ear weight/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
CK1	164.00±7.11a	7.49±1.11ab	43.00±3.16a	16.67±4.33a	4 041.80±165.54a
CK2	148.40±2.70b	5.85±0.64b	33.40±3.85b	8.49±1.84c	962.50±46.09d
M1	137.00±10.77c	5.83±0.86b	33.80±3.27b	9.74±2.26bc	3 208.30±153.69c
M1S1	153.40±7.70b	7.01±1.51ab	35.80±5.07b	12.34±2.09bc	3 479.10±137.04b
M1S2	155.80±4.76ab	7.63±1.82a	36.80±4.92b	12.72±2.66b	3 840.40±183.97a
M1S3	156.20±7.85ab	7.69±0.98a	38.80±3.42ab	13.55±3.25ab	3 575.60±134.95b

器的功能造成损害,造成细胞凋亡,从而抑制作物正常的生长发育,此时植物可通过增加或激活抗氧化酶来防御 ROS 对细胞造成的伤害^[28]。SOD 作为植物体内 ROS 清除系统中最有效的物质,可使 O_2 转化成 H_2O_2 ,是抗氧化酶系统中的第一道防线,POD 和 CAT 则是细胞内清除 H_2O_2 的关键酶^[29]。MDA 是膜脂过氧化的主要产物,其含量可以反映膜脂的损伤^[30]。植物在受到胁迫时通常会提高抗氧化酶活性,增加 MDA 含量^[31]。本研究结果表明,苯唑·二甲钠胁迫下糜子叶片在不同生育期的 POD、SOD、CAT 活性均有所下降,MDA 含量显著增加,说明药害程度已经超过了糜子本身的应激能力,糜子体内的抗氧化酶(POD、SOD、CAT)不足以消除因胁迫产生的 ROS,此时细胞中 ROS 就会造成生物膜的过氧化损伤,细胞膜结构遭到破坏,细胞膜内物质外渗,导致 MDA 含量增加,这与肖家昶等^[32]的研究结果相近。药后喷施不同浓度的芸苔素内酯均提升了糜子叶片的 POD、SOD、CAT 活性,同时显著降低了 MDA 含量,说明叶面喷施芸苔素内酯可提升糜子叶片细胞内各抗氧化酶的合成能力,孙石昂等^[33]的研究也得出了类似结果。首先通过提高 SOD 活性促进糜子叶绿体中水-水循环,使 O_2 转化成 H_2O_2 ,接着提高 POD 和 CAT 活性,在过氧化物酶体中直接清除 H_2O_2 ,三者协同运作,使自由基维持在一个较低的水平,维持苯唑·二甲钠胁迫下糜子叶片细胞氧化还原的平衡,从而减轻苯唑·二甲钠胁迫对糜子叶片细胞的伤害,维持细胞膜的稳定性,进而降低了糜子叶片细胞内的 MDA 含量,有效缓解苯唑·二甲钠胁迫对糜子叶片细胞膜的膜脂过氧化作用,提高糜子对苯唑·二甲钠胁迫引起的氧化胁迫的抵抗能力^[34]。同时可减轻 ROS 对糜子叶绿体与线粒体等细胞器结构的破坏,延缓叶绿素的分解,减轻苯唑·二甲钠对糜子叶片光合作用及生长发育的抑制作用,有利于糜子叶片的生长及光合作用,最终促进了糜子产量的增加^[35]。

除草剂在植物体内的一个重要降解途径就是与 GSH 结合,再通过体内的运输系统将其转运到细胞外或液泡内,从而避免除草剂对作物的伤害。这一结合反应在植物体内是受 GST 催化完成的,因此作物体内的 GSH 含量和 GST 活性在一定程度上决定着其对除草剂的解毒程度^[36]。本研究结果表明,苯唑·二甲钠胁迫下糜子叶片在不同生育期的 GSH 含量和 GST 活性均显著降低,药后喷施芸苔素内酯可显著提高糜子叶片的 GSH 含量和 GST 活性,有效缓解了苯唑·二甲

钠对糜子的药害。说明芸苔素内酯缓解糜子苯唑·二甲钠药害的作用机理可能是通过促进糜子叶片细胞内 GSH 含量的增加及 GST 酶活性的提高,从而催化并提升了苯唑·二甲钠在糜子体内的代谢速率,促进苯唑·二甲钠与 GSH 形成无毒性的结合物排至细胞外或液泡内,从而达到缓解苯唑·二甲钠药害的效果^[37],这与赵颖楠^[38]的研究结果一致。

4 结论

(1)在 $0.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 苯唑·二甲钠胁迫下喷施 $0.06\sim 0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的芸苔素内酯可有效缓解苯唑·二甲钠对糜子的伤害,使糜子叶片叶绿素含量、株高、茎粗、穗长和穗质量增加,促进糜子的生长发育及叶片的光合作用,显著提高糜子产量。

(2)芸苔素内酯缓解糜子苯唑·二甲钠药害的部分机理是通过提高糜子叶片抗氧化酶的酶活性来清除活性氧,维持苯唑·二甲钠胁迫下糜子叶片细胞氧化还原的平衡;同时促进还原型谷胱甘肽含量的增加及谷胱甘肽-S-转移酶活性的提高,催化并加快苯唑·二甲钠在糜子体内的代谢速率,促进苯唑·二甲钠与还原型谷胱甘肽形成无毒性的结合物。

参考文献:

- [1] 柴岩. 中国小杂粮产业发展报告[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007: 73-78. CHAI Y. Report for Chinese minor grain crops industry development[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007: 73-78.
- [2] 柴岩, 冯佰利, 孙世贤. 中国小杂粮品种[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007: 105-107. CHAI Y, FENG B L, SUN S X. Varieties of minor grain crops in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007: 105-107.
- [3] 乔治军. 糜子产业发展现状与思路[J]. 作物杂志, 2013(5): 25-27. QIAO Z J. Present situation and developing thought of broomcorn millet industry[J]. Crops, 2013(5): 25-27.
- [4] 冯煜, 黄贵斌, 赵颖楠, 等. 不同除草剂对糜子田杂草的防除效果及糜子产量的影响[J]. 草业科学, 2021, 38(2): 288-295. FENG Y, HUANG G B, ZHAO Y N, et al. Effect of different herbicides on weed control and yield of *Panicum miliaceum*[J]. Pratacultural Science, 2021, 38(2): 288-295.
- [5] 查顺清, 戴蓬博, 冯佰利, 等. 陕北地区糜子田杂草组成及群落特征[J]. 西北农业学报, 2014, 23(5): 164-170. ZHA S Q, DAI P B, FENG B L, et al. Species composition and characterization of weed community in broomcorn millet fields in northern Shaanxi[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2014, 23(5): 164-170.
- [6] 周燕芝, 王文霞, 陈丽明. 直播稻田杂草发生与防除研究进展[J]. 作物杂志, 2019(4): 1-9. ZHOU Y Z, WANG W X, CHEN L M. Progress on weed occurrence and control in direct seeded rice fields[J].

- Crops*, 2019(4):1-9.
- [7] 字雪靖. 不同除草剂的田间防效及对糜子生长发育的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018:6-8. ZI X J. Effect of different herbicides on weeds in millet field and their effects on growth and development of broomcorn millet[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018:6-8.
- [8] 徐田军, 吕天放, 赵久然, 等. 除草剂对不同玉米品种生长发育和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(8):1159-1169. XU T J, LÜ T F, ZHAO J R, et al. Effects of herbicides on growth, development and yield of different maize varieties[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(8):1159-1169.
- [9] RIECHERS D E, KREUZ K, ZHANG Q. Detoxification without intoxication: Herbicide safeners activate plant defense gene expression[J]. *Plant Physiology*, 2010, 153(1):3-13.
- [10] 陶波, 王禹堃, 李德萍, 等. 安全剂AD-67对精异丙甲草胺解毒效应研究[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(1):29-35, 51. TAO B, WANG Y K, LI D P, et al. Study on detoxification effect of safeners AD-67 on S-metolachlor[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2019, 50(1):29-35, 51.
- [11] SASSE J M. Recent progress in brassinosteroid research[J]. *Physiologia Plantarum*, 2010, 100(3):696-701.
- [12] 韩云, 闫凯莉, 吴建辉, 等. 0.007 5% 芸苔素内酯水剂对小白菜生长和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(13):81-84. HAN Y, YAN K L, WU J H, et al. Effect of 0.007 5% brassinolide water aqua on regulating growth and quality in pakchoi[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(13):81-84.
- [13] SIDDQUI H, HAYAT S, BAJGUZ A. Regulation of photosynthesis by brassinosteroids in plants[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2018, 40(3):59.
- [14] 罗杰, 陈季楚. 油菜素内酯的生理和分子生物学研究进展[J]. 植物生理学报, 1998, 34(2):81-87. LUO J, CHEN J C. The physiological and molecular biological advances of brassinosteroids[J]. *Plant Physiology Communications*, 1998, 34(2):81-87.
- [15] 高新菊, 葛玉红, 王恒亮, 等. 缓解剂对2甲4氯钠玉米药害的解除作用[J]. 农药, 2014, 53(2):109-112. GAO X J, GE Y H, WANG H L, et al. Relief effects of antidotes on the MCPA-Na phytotoxicity in maize[J]. *Agrochemicals*, 2014, 53(2):109-112.
- [16] 尚庆茂, 宋士清, 张志刚, 等. 外源BR诱导黄瓜(*Cucumis sativus* L.)幼苗的抗盐性[J]. 中国农业科学, 2006, 39(9):1872-1877. SHANG Q M, SONG S Q, ZHANG Z G, et al. Exogenous brassinosteroid induced the salt resistance of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(9):1872-1877.
- [17] 万群. 芸苔素内酯对低温胁迫下樱桃五彩椒种子萌发及幼苗抗逆性的影响[J]. 北方园艺, 2016(13):13-17. WAN Q. Effect of brassinolide on germination and resistance under low temperature stress of colorful cherry pepper[J]. *Northern Horticulture*, 2016(13):13-17.
- [18] 陈秀, 方朝阳. 植物生长调节剂芸苔素内酯在农业上的应用现状及前景[J]. 世界农药, 2015, 37(2):34-36. CHEN X, FANG C Y. Application status and development prospect of plant growth regulator brassinolide in agriculture[J]. *World Pesticide*, 2015, 37(2):34-36.
- [19] 康云艳, 郭世荣, 段九菊. 外源24-表油菜素内酯对低氧胁迫下黄瓜幼苗抗氧化系统及蛋白含量的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊):82-86. KANG Y Y, GUO S R, DUAN J J. Effect of exogenous 24-epibrassinolide on antioxidant system and protein content in cucumber seedlings under nutrient solution hypoxia stress[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(Suppl):82-86.
- [20] 周小毛, 柏连阳, 黄柯程, 等. 天然芸苔素内酯减轻胺苯磺隆对水稻药害的作用[J]. 杂草科学, 2003(1):26-27. ZHOU X M, BAI L Y, HUANG K C, et al. The effects of natural brassinolide alleviates the injury of ethametsulfuron in rice[J]. *Weed Science*, 2003(1):26-27.
- [21] 钟杨, 陈洪国. 芸苔素内酯水剂对辣椒幼苗水分胁迫生理的影响[J]. 北方园艺, 2011(2):42-44. ZHONG Y, CHEN H G. Effect of brassinolide aqueous solution on water stress physiology of pepper seedlings[J]. *Northern Horticulture*, 2011(2):42-44.
- [22] 王婉. 安全剂除草剂复配对糜子药害缓解及生长发育的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019:13-15. WANG W. Effects of compound safety agent and herbicide on the mitigation of herbicide injury and the growth and development of millet[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019:13-15.
- [23] 赵颖楠, 字雪靖, 王婉, 等. 不同除草剂的田间杂草防效及对糜子生长发育的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7):2415-2421. ZHAO Y N, ZI X J, WANG W, et al. Control effects of different herbicides on weeds as well as their effects on growth and development of broomcorn millet[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(7):2415-2421.
- [24] 杨慧杰, 原向阳, 郭平毅, 等. 油菜素内酯对阔世玛胁迫下谷子叶片光合荧光特性及糖代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(13):2508-2518. YANG H J, YUAN X Y, GUO P Y, et al. Effects of brassinolide on photosynthesis, chlorophyll fluorescence characteristics and carbohydrates metabolism in leaves of foxtail millet (*Setaria italica*) under sigma broad stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(13):2508-2518.
- [25] 杨敏, 李向岭, 韩金玲, 等. 烟嘧磺隆胁迫对甜玉米幼苗活性氧积累、抗氧化系统及相关基因表达的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(9):2182-2193. YANG M, LI X L, HAN J L, et al. Nicosulfuron stress on active oxygen accumulation, antioxidant system and related gene expression in sweet maize seedlings[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(9):2182-2193.
- [26] 卢奕霏, 顾迎港, 陈威, 等. 高温胁迫对小麦花药活性氧代谢的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(4):488-493. LU Y F, GU Y G, CHEN W, et al. Effect of high-temperature stress on reactive oxygen metabolism of wheat anther[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(4):488-493.
- [27] 沈金玲, 钟镇芬, 黄永健, 等. 盐胁迫对桉树(*Eucalyptus*)活性氧代谢和CAT基因表达的影响[J]. 分子植物育种, 2020, 18(5):1661-1665. SHEN J L, ZHONG Z F, HUANG Y J, et al. Effects of exogenous CaCl₂ on reactive oxygen species metabolism in *Nitraria sibirica* under NaCl stress[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(5):1661-1665.
- [28] 赵宝泉, 邢锦城, 王静, 等. 水杨酸对盐胁迫下杭白菊幼苗生长和

- 生理特性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2020, 42(4): 370-379.
- ZHAO B Q, XING J C, WANG J, et al. Effects of exogenous salicylic acid on growth and physiological properties of *Chrysanthemum morifolium* seedlings under salt stress[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2020, 42(4): 370-379.
- [29] XU Q, HUANG B R. Antioxidant metabolism associated with summer leaf senescence and turf quality decline for creeping bentgrass[J]. *Crop Science*, 2004, 44(2): 553-560.
- [30] WEISMANN D, HARTVIGSEN K, LAUER N, et al. Complement factor H binds malondialdehyde epitopes and protects from oxidative stress[J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 76-81.
- [31] 周娜娜, 武耀廷, 高华援, 等. 铜胁迫对花生幼苗生长及生理代谢的影响[J]. 东北农业科学, 2019, 44(6): 6-9. ZHOU N N, WU Y T, GAO H Y, et al. Effects of copper stress on growth and physiological metabolism of peanut seedlings[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2019, 44(6): 6-9.
- [32] 肖家昶, 郑开敏, 马俊英, 等. 外源NO对铝胁迫下西瓜幼苗生长及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1650-1658. XIAO J C, ZHENG K M, MA J Y, et al. Effects of exogenous NO on growth and physiological characteristics of watermelon seedlings under aluminum stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(8): 1650-1658.
- [33] 孙石昂, 何发林, 姚向峰, 等. 芸苔素内酯可提高玉米幼苗的抗旱性[J]. 植物生理学报, 2019, 55(6): 829-836. SUN S A, HE F L, YAO X F, et al. Brassinolide improves the drought resistance of maize seedlings[J]. *Plant Physiology Communications*, 2019, 55(6): 829-836.
- [34] 王鑫, 刘丹, 陈婧婷, 等. 外源BR对盐碱胁迫下甜菜内源激素含量及保护酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(7): 20-30, 41. WANG X, LIU D, CHEN J T, et al. Effect of exogenous BR on endogenous hormone and protective enzyme activities in sugar beet under saline-alkali stress[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2021, 49(7): 20-30, 41.
- [35] 杨万基, 蒋欣梅, 高欢, 等. 28-高芸苔素内酯对低温弱光胁迫辣椒幼苗光合和荧光特性的影响[J]. 南方农业学报, 2018, 49(4): 741-747. YANG W J, JIANG X M, GAO H, et al. Effects of 28-homobrassinolide on photosynthetic and fluorescence characteristics of pepper seedlings under low temperature with dim light[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49(4): 741-747.
- [36] 胡利锋, 刘小安, 孙兰, 等. 除草剂安全剂作用机理研究进展[J]. 农药学报, 2017, 19(2): 152-161. HU L F, LIU X A, SUN L, et al. Progresses in the action mechanism of herbicide safeners[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2017, 19(2): 152-161.
- [37] 王丹, 汪宽, 鸿杨静, 等. 外源谷胱甘肽喷施对缺硫胁迫下小白菜谷胱甘肽代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(3): 511-519. WANG D, WANG K, HONG Y J, et al. Effects of exogenous glutathione on glutathione metabolism in pakchoi under sulfur deficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2021, 27(3): 511-519.
- [38] 赵颖楠. 安全剂与除草剂复配对糜子生理代谢的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021: 7-9. ZHAO Y N. Study on effects of safety agents and herbicides on the physiological metabolism of broomcorn millet[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021: 7-9.

(责任编辑: 李丹)