

磺胺间甲氧嘧啶胁迫对小麦幼苗生理生化指标的影响

金彩霞, 郭桦, 刘军军

(河南师范大学环境学院, 河南省环境污染控制重点实验室, 黄淮水环境与污染防治省部共建教育部重点实验室, 河南新乡 452007)

摘要:采用室内盆栽法,研究了不同浓度磺胺间甲氧嘧啶(SMM)胁迫对小麦幼苗生化指标的影响,初步阐明了SMM对小麦幼苗的毒害机理。研究表明,在实验前3 d,不同浓度胁迫下,各处理叶绿素(Chl)含量之间差异不显著,在实验第5~7 d,高浓度(10 mg·kg⁻¹和20 mg·kg⁻¹)处理Chl含量显著低于对照。实验期间,随SMM浓度增加可溶性蛋白(SP)含量明显下降,SP可作为SMM污染胁迫的生物标记物。SMM胁迫促使丙二醛(MDA)含量相对对照有所增加,且对根系影响强于叶片。SMM胁迫对过氧化物酶(POD)活性整体上表现为激活作用,呈先下降后上升趋势,且根系POD活性远高于叶片。超氧化物歧化酶(SOD)活性在胁迫下表现出类似规律,但随胁迫时间延长,各处理与对照间的差异逐渐减小。

关键词:磺胺间甲氧嘧啶;小麦;幼苗;生化指标

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)04-0634-06 doi:10.11654/jaes.2014.04.003

Physiological and Biochemical Changes in Wheat Seedlings Under Sulfamonomethoxine Stress

JIN Cai-xia, GUO Hua, LIU Jun-jun

(Key Laboratory for Yellow River and Huaihe River Water Environmental and Pollution Control, Ministry of Education, Henan Key Laboratory of Environmental Pollution Control, School of Chemistry and Environmental Sciences, Henan Normal University, Xinxing 452007, Henan, China)

Abstract: Sulfamonomethoxine, widely used in livestock production, may eventually affect plants after entering the soil environment via animal feces. A pot experiment was carried out to investigate the physiological and biochemical responses of wheat seedlings to different concentrations of sulfamonomethoxine (SMM). Compared to the control, SMM treatments had no significant influences on chlorophyll (Chl) contents during the first 3 days of the stress, but the treatments with 10 mg·kg⁻¹ and 20 mg·kg⁻¹ reduced the Chl contents in the 5th to 7th day. Addition of SMM markedly decreased the contents of soluble protein (SP), but increased methyl di aldehyde (MDA) contents as compared to the control, with stronger influence on root system than blades. Peroxidase (POD) activity was decreased by SMM at lower than 10 mg·kg⁻¹, while increased at higher concentrations. Superoxide dismutase (SOD) activity showed similar patterns to POD under SMM stresses, but the differences from the control became less as the stress time lengthened.

Keywords: sulfamonomethoxine; wheat; seedling; physiological and biochemical parameter

植物在暴露于外界不良环境中会导致体内活性氧(Active oxygen species, AOS)积累进而引起氧化胁迫,使植物组织受到伤害^[1]。AOS能破坏细胞膜质、蛋白质、细胞色素及核酸等^[2],使植物的生活力和生产力下降,生长发育异常^[3]。同时,植物在生长过程中对环境胁迫有一定的抵抗能力,植物的抗氧化酶系统如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、

抗坏血酸过氧化物酶(APX)等能有效去除活性氧自由基,清除和降低AOS的影响^[4-5]。抗氧化酶活性的增加既是一种保护机制,也表明植物受到了胁迫^[6]。

磺胺类兽药长期被用于动物疾病的防治和治疗,现已广泛应用,但由于不易被动物体完全吸收,有50%~90%的药物以原药或代谢物的形式随动物粪尿排出体外。Elena等^[7]测定了畜禽废物中磺胺类、四环素类和甲氧苄氨嘧啶的残留特征,其中,磺胺药物残留量为20~91 mg·kg⁻¹。畜禽废物中磺胺药物通过厩肥进入土壤中,从而对土壤造成污染,影响土壤生态系统稳定性及植物的生长。目前,有关重金属及农药对植物胁迫的报道较多^[8-10],而兽药对植物生化指标

收稿日期:2013-09-27

基金项目:国家自然科学基金(21107023);中国博士后科学基金项目(20110491001)

作者简介:金彩霞(1976—),女,博士,硕士生导师,主要研究方向为污染生态学。E-mail:heartjin0509@aliyun.com

的影响研究很少。本实验对常用兽药磺胺间甲氧嘧啶(SMM)胁迫引起的小麦幼苗抗氧化酶活性、叶绿素(CHL)、可溶性蛋白(SP)及丙二醛(MDA)含量的变化进行了研究,旨在探索SMM胁迫下植物的生理反应机制,探索兽药污染土壤的诊断方法,避免单纯依靠化学方法对兽药污染土壤进行诊断的不全面性和不科学性^[11-12]。

1 实验部分

1.1 实验材料

磺胺间甲氧嘧啶原药(Sulfamonomethoxine, SMM),纯度92.9%,购自北京博亚华牧业科技有限公司。SMM分子式 $C_{11}H_{12}N_4O_3S$,分子量280.30,分子结构如图1。

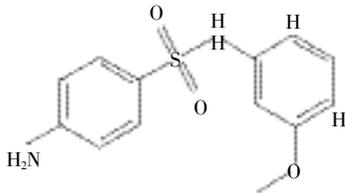


图1 SMM分子结构式

Figure 1 Molecular structural formula of SMM

小麦(*Triticum aestivum* L.),新麦26号,购自新乡市种子公司。供试土壤取自河南师范大学生物园内,属于黄潮土,未受任何化学药品污染的洁净土壤,其理化性质如下:pH6.31;阳离子交换量 $12.26 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$;TP $0.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;TK $0.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;有机质1.65%;粘粒13.4%;粉粒24.2%。

1.2 实验方法

将种子浸泡于3.0%的次氯酸钠溶液灭菌5 min后,用去离子水对种子反复冲洗。将种子放入光照培养箱中于 25°C 下催芽72 h,发芽后将其置于1/2浓度的Hoagland营养液中,在光照培养箱中(25°C)培养7 d(每2 d更换1次培养液),设置12 h光照/12 h黑暗的循环处理。另在500 g风干土中均匀拌入SMM,使土壤中SMM含量分别为0、1、5、10、20 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,将培养箱中水培7 d后的小麦幼苗移植于加有不同浓度SMM的土壤中,并于处理后第1、3、5、7 d分别取幼苗进行各项生理指标的测定,重复3次。

1.3 测定方法

叶绿素含量的测定采用分光光度法^[13-15],可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝G-250法^[13,16],利用双组分分光光度法可分别测定丙二酮和可溶性糖含量^[13,17],过氧化氢酶活性测定采用愈创木酚法^[13],超氧化物歧化酶

活性的测定采用比色法^[13,18]。

1.4 数据处理

所有指标测定均重复3次,实验数据用Microsoft Excel 2003处理后,SPSS17.0软件进行方差分析,差异显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 SMM对小麦幼苗叶片叶绿素含量的影响

在兽药SMM胁迫下,小麦叶片叶绿素含量随药物剂量与时间的变化如图2所示。总体上看,添加药物处理的小麦叶片中叶绿素含量较空白低。在处理的前3 d,各处理与对照之间差异不显著($P > 0.05$),但随着作用时间的延长,SMM逐渐在植物叶片中积累,其毒性表现愈加明显,在处理后第5、7 d,高浓度(10 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和20 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)处理下,叶片叶绿素含量显著低于对照($P < 0.05$)。

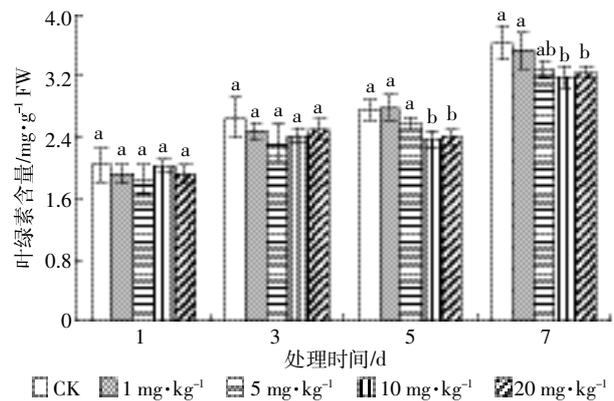


图2 SMM对小麦叶片叶绿素含量的影响

Figure 2 Influence of SMM on chlorophyll(Chl) contents in wheat blades

植物幼苗叶片中叶绿素含量的降低是常用于指示植物在外来污染物胁迫下生长受到损伤的症状之一^[9]。与多数研究结果类似^[9-11],高浓度SMM可抑制植物体内叶绿素的积累。叶绿体膜在农药胁迫下,膜的氧化胁迫可对叶绿素的形成过程产生抑制,合成叶绿素所需的酸受到破坏,叶绿素的含量降低^[18],致使叶绿素的减少与丙二醛的产生是同时发生的。随着实验时间延长,第7 d时,叶绿素含量显著增加,这可能是由于在一定浓度SMM作用下,植物自身修复机能增强,并且随SMM浓度增加这种自我修复能力逐渐减弱。

2.2 SMM对小麦幼苗可溶性蛋白质(SP)含量的影响

SMM胁迫下,小麦幼苗叶片SP含量随药物浓度变化不明显。如图3-A所示,只有当SMM浓度为20

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,叶片 SP 含量显著高于对照($P<0.05$),其余各处理与对照之间差异不显著($P>0.05$)。小麦根系 SP 含量受 SMM 胁迫变化较明显(图 3-B),在处理后的第 1 d,随 SMM 浓度增大,根中 SP 含量呈明显下降趋势。在实验周期内,不同浓度 SMM 处理的根系 SP 含量显著低于对照($P<0.05$),但各浓度之间差异不显著($P>0.05$)。

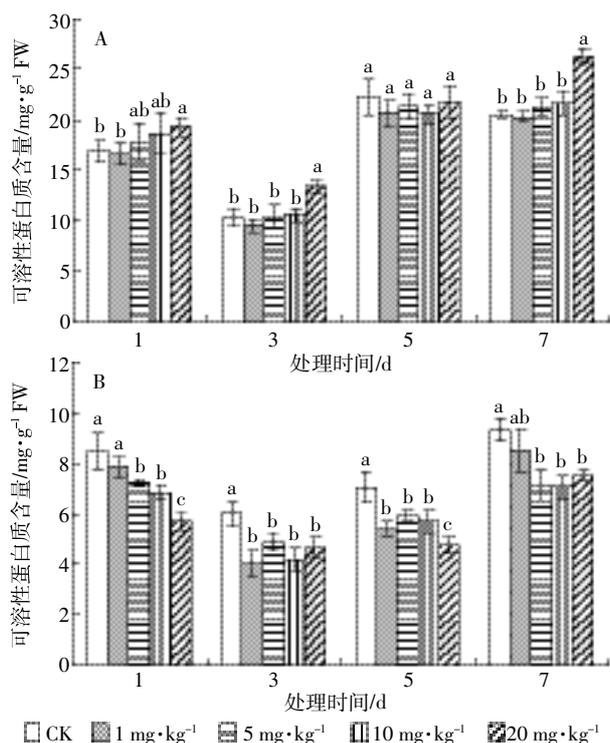


图 3 SMM 对小麦幼苗叶片(A)、根(B)可溶性蛋白质含量的影响
Figure 3 Influence of SMM on contents of soluble protein (SP) in blades (A) and roots (B) of wheat seedlings

在污染、干旱及盐分胁迫下,植物体内的可溶性蛋白含量下降^[19-20]。本研究结果也表明,小麦在 SMM 胁迫下,根 SP 含量显著低于对照,可能是由于药物胁迫使 RNA 转录和翻译受到抑制,蛋白质合成能力降低^[21]。然而,20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ SMM 在处理时间内叶片 SP 含量高于对照。这与 Wang 等^[9]的研究结果类似,其试验结果表明,除草剂豆磺隆可显著降低小麦根系 SP 含量,但在处理 3~4 d 后,叶片中 SP 含量高于对照。各处理叶片和根部 SP 含量分别在第 5、7 d 有所回升,说明此时植物自身修复机能启动。此外,在 0~5 d,小麦根 SP 含量显著下降,表明在一定程度上,根中 SP 含量可作为土壤 SMM 污染的生物标记物。

2.3 SMM 对小麦幼苗 MDA 含量的影响

MDA 是膜脂氧化的主要产物之一,其含量的

高低反映细胞膜受氧自由基毒害的程度。由图 4 可知,在 SMM 的胁迫下,小麦幼苗叶片和根中 MDA 含量相对于对照都有所增加。高浓度 SMM 处理的小麦(20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)在第 3~5 d 叶片中 MDA 水平显著提高,说明细胞膜开始受氧自由基的毒害,而在第 7 d 后各处理与对照之间差异不显著。如图 4-B 所示,SMM 对小麦根 MDA 含量的影响在第 1 d 时最为显著,且各处理的峰值也都出现在第 1 d,随着时间的延长,在处理后的第 5~7 d,各处理 MDA 含量与对照之间无显著性差异,但不同处理呈现一定的波动性,表明 MDA 不适合作为土壤特定的生物标记物。

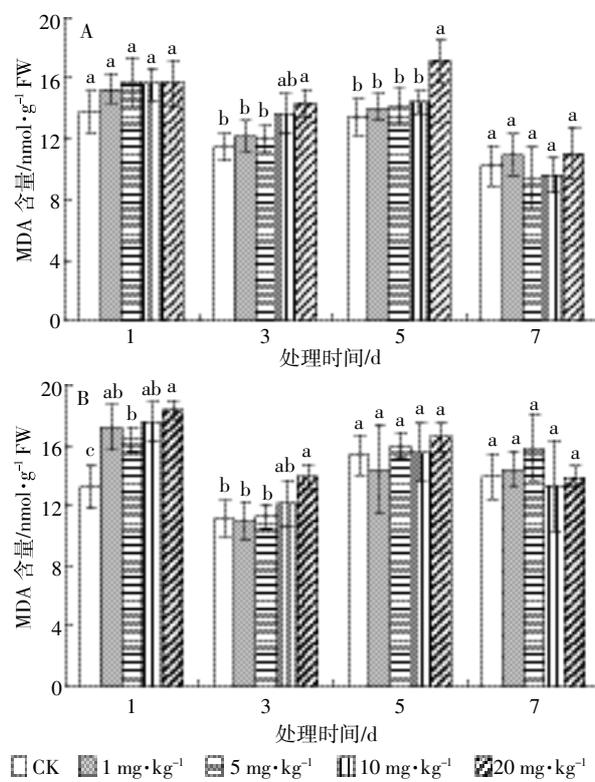


图 4 SMM 对小麦幼苗叶片(A)、根(B)MDA 含量的影响
Figure 4 Influence of SMM on methyl dialdehyde (MDA) contents in blades (A) and roots (B) of wheat seedling

生成 MDA 表明氧化胁迫的存在。在处理的前 3 d,叶片和根中 MDA 含量随 SMM 浓度的增加而增加,且浓度越高差异越显著,表明 SMM 处理诱导了有毒 AOS 生成,与重金属胁迫下植物体内的 MDA 含量变化类似^[20,22]。重金属胁迫下,植物体内 MDA 含量始终高于对照,且浓度越大 MDA 含量越高,说明在开始阶段,SMM 与重金属对植物的正常代谢过程影响的机理可能是相同的。实验中,随着处理时间的延长,植物自身抗性的增强,各处理与对照之间差异不显

著。此外,在处理的第1 d, SMM 对小麦根 MDA 含量的影响强于对叶片中 MDA 含量的影响,这可能是因为 SMM 极易溶解与扩散,植物根系与土壤中的药物直接接触,相对于重金属,根系更容易吸收兽药进而受其影响也较大,其毒害作用表现越明显。这与 SMM 对植物种子发芽影响的试验^[23]一致,即 SMM 在短时间内对根伸长的抑制作用要强于对芽伸长的抑制,植物根受污染物胁迫更敏感。

2.4 SMM 对小麦幼苗 POD 活性的影响

小麦幼苗 POD 酶活性的变化如图 5 所示。在 SMM 胁迫下,根 POD 酶活性比叶片 POD 高很多,对照中叶片 POD 最高值为 $210 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW}$ 左右,而根 POD 酶活的最低值也超过 $800 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW}$ 。SMM 暴露 1 d 后,各浓度处理的小麦幼苗叶片 POD 酶活性显著低于对照,但不同浓度 SMM 处理之间差异不显著。在处理的第 5 d 之后,对照叶片中 POD 酶活性低于 SMM 处理的叶片 POD 酶活性,并且高浓度 ($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 处理与对照之间差异显著 ($P < 0.05$)。图 5-B 显示, SMM 对小麦根 POD 活性整体上有激活作用,且在处理后第 1 d 激活作用最为显著。

愈创木酚过氧化物酶是清除植物体内有毒 AOS

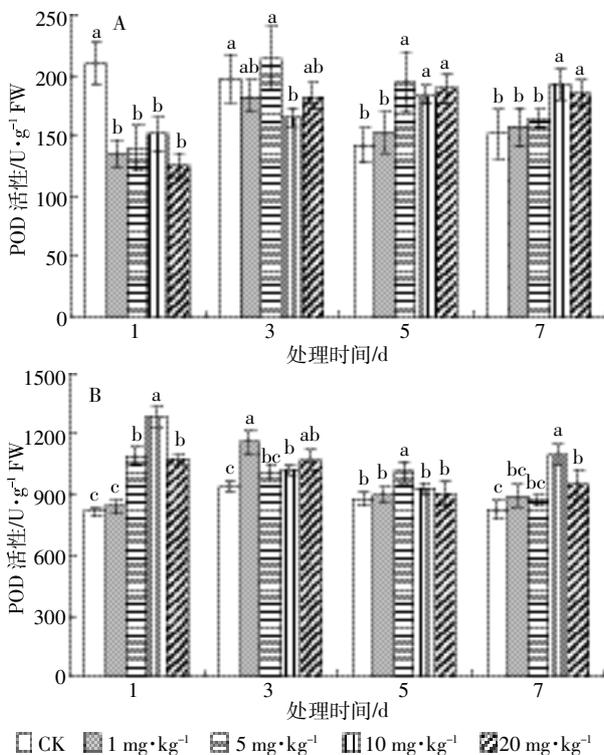


图 5 SMM 对小麦幼苗叶片(A)、根系(B)中 POD 活性的影响

Figure 5 Influence of SMM on peroxidase(POD) activity in blades(A) and roots(B) of wheat seedlings

最重要的酶之一,它既可作为胞内酶又可作为胞外酶参与 H_2O_2 的分解^[1]。本实验中小麦幼苗根 POD 酶活显著比叶片 POD 酶活性高,有研究认为,POD 酶活升高与根系离子微环境或根系组织专性基因表达有关,而在本实验中并没有添加重金属离子,因此认为是后者导致^[4]。本实验中对照组小麦叶片 POD 活性在第 1 d 高于各处理组,而在第 5 d 又低于各处理组, SMM 胁迫下小麦幼苗叶片 POD 酶活性总体上先下降后上升,与重金属和豆磺隆单因子对小麦叶片 POD 的影响一致^[10]。但 SMM 胁迫下根 POD 在处理时间内都高于对照,因此可认为在污染物胁迫下,小麦幼苗叶片 POD 酶活能够被诱导而升高,小麦植株具有抵抗氧化胁迫的能力。有研究认为,POD 酶活对重金属或其它化合物的反应与细胞内已有的或由胁迫诱导的巯基基团的浓度有关,因为这些基团的作用是抵抗氧化胁迫^[24]。一般说来,POD 酶活性越高,则清除活性氧的能力越强,脂质过氧化产物 MDA 的含量就越低,但在本实验中, SMM 根系 POD 酶活高于对照,胁迫下的 MDA 含量也高于对照,与其他研究相矛盾^[21]。这可能是因为抗氧化酶系统还涉及到过氧化氢酶、谷胱甘肽-抗坏血酸循环中的各种酶以及维生素 C 和维生素 E 等抗氧化剂,它们均能在一定范围内及时清除生物体内过多的活性氧以维持机体内自由基代谢的动态平衡,所以这种矛盾的形成还需要对以上酶系的进一步研究来解释^[11]。

2.5 SMM 对小麦幼苗 SOD 活性的影响

小麦幼苗 SOD 活性随 SMM 浓度与时间的变化关系如图 6 所示。在 SMM 胁迫下,小麦叶片与根 SOD 活性表现出了相似的规律性:在处理后第 1 d,叶片和根 SOD 活性都显著低于对照 ($P < 0.05$),高浓度处理组的 SOD 活性较低,但各浓度处理之间差异不显著,随着时间的延长,处理与对照之间的差异逐渐减小,第 7 d 后各处理与对照之间无显著性差异 ($P > 0.05$)。

在逆境条件下,植物体内活性氧代谢系统的平衡会受到影响,体内活性氧含量的升高能启动膜脂过氧化或膜脂脱脂作用,从而破坏膜结构^[22]。SOD 酶是清除正常代谢过程以及氧化因子诱导产生的 O_2 的首要酶,因此其含量或活性水平的高低对植物的逆境能力具有重要的意义。本实验表明,在 SMM 处理的第 1 d,小麦幼苗 SOD 活性显著降低,与此同时 MDA 的含量显著增加,说明在药物添加的初期,小麦受到了较强的胁迫。有研究表明,当植物受到氧化损伤时,正常的

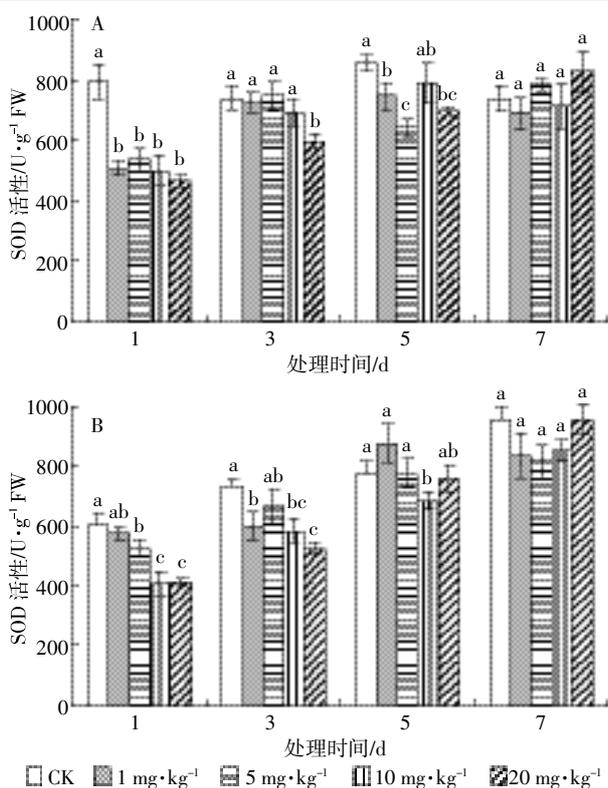


图6 SMM对小麦幼苗叶片(A)、根系(B)中SOD活性的影响

Figure 6 Influence of SMM on superoxide dismutase (SOD) activity in blades (A) and root (B) of wheat seedlings

代谢过程受到影响,SOD活性会下降^[25]。本实验中,SMM处理后的前3d对小麦SOD活性有抑制作用,说明加药初期SMM干扰了植物细胞正常的代谢过程,从而导致SOD活性降低。随着时间的延长,小麦的代谢过程逐渐恢复正常,SOD的活性也逐渐恢复。

3 结论

(1)在SMM胁迫下,小麦幼苗叶片叶绿素积累受影响,作为可见症状,叶绿素含量可用来指示SMM对小麦幼苗的危害程度。根系SP含量随SMM浓度变化明显,二者之间有较好的剂量-效应关系,其可作为SMM污染胁迫的生物标记物。在SMM胁迫下,小麦叶片与根SOD活性表现出了相似的规律性,SOD有作为SMM污染生物标记物的可能。

(2)小麦幼苗叶片和根在SMM胁迫后期,各处理MDA含量与对照之间差异不显著,且不同处理间呈现一定的波动性。SMM对小麦幼苗叶片POD含量抑制作用较强,且各浓度处理间差异较大,对根部POD酶活性则有明显激活作用。POD酶活性和MDA含量不适宜作为指示土壤SMM污染的生物标记物。

(3)上述生化指标的研究表明:处理第0~5d为

植物自身修复开始之前的调整期,其特点为伤害迅速加深,为伤害加剧与耐受性增强的抗争阶段,启动保护性应激反应;第5~7d,除SOD外均有所恢复,植物根受污染物胁迫更敏感,恢复速度也更快。

参考文献:

- [1] Foyer C H, Lelandais M, Kunert K J. Photooxidative stress in plants[J]. *Physiologia Plantarum*, 1994, 92:696-717.
- [2] 赵天宏,孙加伟,付宇. 逆境胁迫下植物活性氧代谢及外源调控机理的研究进展[J]. 作物杂志, 2008(3):10-13.
ZHAO Tian-hong, SUN Jia-wei, FU Yu. Advances of research on metabolism of plant reactive oxygen species and exogenous regulation under abiotic stresses[J]. *Crop*, 2008(3):10-13.
- [3] 王正贵,周立云,郭文善,等. 除草剂对小麦光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(6):1037-1043.
WANG Zheng-gui, ZHOU Li-yun, GUO Wen-shan, et al. Effects of herbicides on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters in wheat leaves[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(6):1037-1043.
- [4] Srivastava M, Ma L Q, Singh N, et al. Antioxidant response of hyperaccumulator and sensitive fern species to arsenic[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56:1335-1342.
- [5] 吴建慧,杨玲,孙国荣. 低温胁迫下玉米幼苗叶片活性氧的产生及保护酶活性的变化[J]. 植物研究, 2004, 24(10):456-459.
WU Jian-hui, YANG Ling, SUN Guo-rong. Generation of activated oxygen and change of cell defense enzyme activity in leaves of maize seedling under the stress of low temperature[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2004, 24(10):456-459.
- [6] 谢飞,王宏斌,王海娟,等. 砷胁迫对不同砷富集能力植物叶片抗氧化酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7):1379-1385.
XIE Fei, WANG Hong-bin, WANG Hai-juan, et al. Effects of arsenic stress on activities of antioxidant enzymes in the fronds of plants with different abilities to accumulate arsenic[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 28(7):1379-1385.
- [7] Elena M C, Carmen G B, Scharf S, et al. Environment monitoring study of selected veterinary antibiotics in Austria[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 148(2):1-10.
- [8] Ranieri A, Castagna A, Scebba F. Oxidative stress and phytochelatin characterization in bread wheat exposed to cadmium excess[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2005, 43:45-54.
- [9] Wang M E, Zhou Q X. Effects of herbicide chlorimuron-ethyl on physiological mechanisms in wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, 64:190-197.
- [10] 王美娥,周启星. 重金属Cd、Cu对小麦 (*Triticum aestivum*) 幼苗生理生化过程的影响及毒性机理研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(12):2033-2038.
WANG Mei-e, ZHOU Qi-xing. Effects of Cd and Cu on physiological and biochemical processes of wheat (*Triticum aestivum*) seedlings and their toxic mechanisms[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(12):2033-2038.

- [11] 晁雷,周启星,陈苏,等.乙草胺对小麦生理机能的影响与生物标记物识别[J].环境科学,2007,28(4):866-871.
CHAO Lei, ZHOU Qi-xing, CHEN Su, et al. Effects of herbicide acetochlor on physiological mechanisms in wheat and biomarkers identification[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4):866-871.
- [12] Oberoi H S, Babbar N, Dhaliwal S S, et al. Enhanced oil recovery by pre-treatment of mustard seeds using crude enzyme extract obtained from mixed-culture solid-state fermentation of kinnow (*Citrus reticulata*) waste and wheat bran[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(2):759-767.
- [13] 侯福林.植物生理学实验教程[M].北京:科学出版社,2004.
- [14] 曾家豫,武伟国,孔维宝,等.红三叶预加工废水中叶绿素的提取及其稳定性研究[J].食品工业科技,2013(5):204-208.
ZENG Jia-yu, WU Wei-guo, KONG Wei-bao, et al. Extraction of chlorophyll from red clover advance processing waste water and its stability study[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013(5):204-208.
- [15] 袁方,李鑫,余君萍,等.分光光度法测定叶绿素含量及其比值问题的探讨[J].植物生理学通讯,2009,45(1):63-66.
YUAN Fang, LI Xin, YU Jun-ping, et al. Methodological study on determination of chlorophyll contents and ratio of Chl a/Chl b by spectrophotometry[J]. *Plant Physiology Journal*, 2009, 45(1):63-66.
- [16] 杜长霞,邵俏赛,樊怀福,等.外源NO对Ca(NO₃)₂胁迫下黄瓜幼苗生长和抗氧化系统的影响[J].核农学报,2013,27(6):854-860.
DU Chang-xia, SHAO Qiao-sai, FAN Huai-fu, et al. Effects of exogenous NO on cucumber seedlings growth and antioxidant system under NO₃-stress[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2013, 27(6):854-860.
- [17] 郭新梅,陈耀锋,李春莲,等.禾谷镰刀菌粗毒素对不同小麦品种幼苗MDA含量和SOD、PAL活性的影响[J].西北植物学报,2007,27(1):68-73.
GUO Xin-mei, CHEN Yao-feng, LI Chun-lian, et al. Effects of fusarium graminearum crude toxin on MDA contents and SOD and PAL activities in the seedlings of different wheat varieties[J]. *Acta Bot Borealis-Occident Sin*, 2007, 27(1):68-73.
- [18] 冯绪猛,罗时石,胡建伟,等.农药对水稻叶片丙二醛及叶绿素含量的影响[J].核农学报,2003,17(6):481-484.
FENG Xu-meng, LUO Shi-shi, HU Jian-wei, et al. Effect of pesticides on MDA and chlorophyll content of rice leaves[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2003, 17(6):481-484.
- [19] Wu X Y, Von Tiedemann A. Impact of fungicides on active oxygen species and antioxidant enzymes in spring barley (*Hordeum vulgare* L.) exposed to ozone[J]. *Environ Pollution*, 2002, 116:37-47.
- [20] 靳萍,马剑敏,杨柯金,等.Hg对小麦种子萌发及幼苗生长的影响研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2002,30(4):81-84.
JIN Ping, MA Jian-min, YANG Ke-jin, et al. Effect of soaking of Hg²⁺ on wheat during its germination and seedling growth[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science)*, 2002, 30(4):81-84.
- [21] 张惠,汪沛洪.渗透胁迫下小麦叶片蛋白质合成与降解的示踪研究[J].植物生理学报,1991,17(3):259-266.
ZHANG Hui, WANG Pei-hong. A tracer study of protein synthesis and degradation in wheat leaves during osmotic stress[J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1991, 17(3):259-266.
- [22] 庞欣,王东红,彭安.铅胁迫对小麦幼苗抗氧化酶活性的影响[J].环境科学,2001,22(5):108-111.
PANG Xin, WANG Dong-hong, PENG An. Effect of lead stress on the activity of antioxidant enzymes in wheat seedling[J]. *Environmental Science*, 2001, 22(5):108-111.
- [23] 金彩霞,陈秋颖,刘军军,等.两种常用兽药对作物发芽的生态毒性效应[J].环境科学学报,2009,29(3):619-625.
JIN Cai-xia, CHEN Qiu-ying, LIU Jun-jun, et al. The Eco-toxicological effect of two common veterinary drugs on crop germination[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(3):619-625.
- [24] Sanita di Toppi L, Gabbrielli R. Response to cadmium in higher plants[J]. *J Environ Exp Bot*, 1999, 41:105-113.
- [25] 刘支前,杨艳华,申继中.需光型除草剂对植物SOD活力的影响[J].北京农业大学学报,1994,20:157-159.
LIU Zhi-qian, YANG Yan-hua, SHEN Ji-zhong. The effect of photo-dependent herbicides on plant SOD activity[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis*, 1994, 20:157-159.