



请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

多环芳烃和镉土壤复合暴露条件下黑麦草的氧化应激指标变化

李程,姚义鸣,李逍逍,成杰民,孙红文

引用本文:

李程,姚义鸣,李逍逍,成杰民,孙红文.多环芳烃和镉土壤复合暴露条件下黑麦草的氧化应激指标变化[J].农业环境科学学报,2022,41(8):1739-1749.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0002

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

EDTA与耐性细菌对黑麦草吸收复合污染红壤中铅镉的影响

史鼎鼎, 梁小迪, 徐少慧, 蒋代华, 黄智刚 农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1634-1641 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1349

黑麦草与丛枝菌根对大田番茄抗性及Cd吸收的影响

秦余丽, 江玲, 徐卫红, 李桃, 张春来, 李彦华, 王卫中, 迟荪琳, 陈序根, 陈永勤, 赵婉伊, 张进忠, 熊治廷 农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1053-1061 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1515

草酸对镉污染土壤油葵生物量及土壤酶活性和镉形态的影响

韩洋, 乔冬梅, 齐学斌, 李中阳, 胡超, 陆红飞, 赵宇龙, 白芳芳, 庞颖 农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1964-1973 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0233

甜菜与牧草间作对多环芳烃污染土壤的修复作用

王娇娇, 呼世斌, 魏丽琼, 柴琴琴, 刘晋波, 王佳颖, 杨文晓 农业环境科学学报. 2016, 35(6): 1090-1096 https://doi.org/10.11654/jaes.2016.06.010

黑麦草对铀胁迫的光合响应及铀吸收特性研究

赵继武, 罗学刚, 王焯, 黄强 农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2456-2464 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0235



关注微信公众号,获得更多资讯信息

农业环境科学学报 Journal of Agro-Environment Science

LI C, YAO Y M, LI X X, et al. Changes of oxidative stress indexes of ryegrass (*Lolium perenne* L.) under compound exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and cadmium in soil[J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2022, 41(8): 1739–1749.



多环芳烃和镉土壤复合暴露条件下 黑麦草的氧化应激指标变化

李程1,姚义鸣2*,李逍逍2,成杰民1,孙红文2

(1.山东师范大学地理与环境学院,济南 250358; 2.南开大学环境科学与工程学院,教育部环境污染过程与基准教育部重点实验室,天津 300071)

摘 要:为了探究场地土壤多环芳烃(PAHs)和镉(Cd)在复合污染条件下的植物生物效应,本研究以黑麦草(Lolium perenne L.)为 供试植物,采用土培方法进行染毒试验,分析了植物中4种典型氧化应激指标多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)、磷酸烯醇式 丙酮酸羧化酶(Phosphoenolpyruvate carboxylase, PEPC)、脯氨酸(Proline, Pro)和还原性谷胱甘肽(Reduced glutathione, GSH)的响应 变化。结果表明:单一Cd染毒下,黑麦草的PPO活性呈下降趋势,PEPC活性以及Pro浓度均呈先上升后下降的趋势,GSH浓度呈 上升趋势;单一PAHs染毒下,黑麦草的PPO活性呈下降趋势,PEPC活性以及Pro和GSH浓度均呈先上升后下降的趋势。GSH浓度呈 上升趋势;单一PAHs染毒下,黑麦草的PPO活性呈下降趋势,PEPC活性以及Pro和GSH浓度均呈先上升后下降的趋势。GBL、 PAHs和Cd的单一污染胁迫下黑麦草生理系统均受到了影响,产生了氧化应激反应。与单一Cd染毒相比,Cd-PAHs复合染毒下, 黑麦草的4种指标变化趋势均发生了显著变化(P<0.05)。PEPC和PPO的活性以及Pro和GSH浓度的显著下调可能是场地土壤高 浓度PAHs和Cd复合污染的重要指征。在复合染毒胁迫下,黑麦草4种指标普遍呈现拮抗效应。研究表明重金属Cd和PAHs复 合污染对典型植物氧化应激效应指标具有剂量-效应关系。

关键词:镉;多环芳烃;黑麦草;氧化应激;拮抗作用

中图分类号:X53;X173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)08-1739-11 doi:10.11654/jaes.2022-0002

Changes of oxidative stress indexes of ryegrass (*Lolium perenne* L.) under compound exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and cadmium in soil

LI Cheng¹, YAO Yiming^{2*}, LI Xiaoxiao², CHENG Jiemin¹, SUN Hongwen²

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China; 2. MOE Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: To explore the biological effects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and cadmium (Cd) in soil affected by compound pollution, this study involved an exposure test by the soil culture experiment using ryegrass (*Lolium perenne* L.), and analyzed the changes in four typical oxidative stress indices in plants, including polyphenol oxidase (PPO), phosphoenolpyruvate carboxylase (PEPC), proline (Pro), and reduced glutathione (GSH). The results showed that with exposure to Cd only, ryegrass PPO enzyme activity decreased, PEPC enzyme activity and Pro concentration first increased and then decreased, and GSH concentration increased. In contrast, with exposure to PAH only, ryegrass PPO enzyme activity decreased, while PEPC enzyme activity and the concentrations of Pro and GSH first increased

收稿日期:2022-01-02 录用日期:2022-04-26

作者简介:李程(1997—),男,山东济南人,硕士研究生,从事植物生物效应研究。E-mail:chenglistudent@163.com

^{*}通信作者:姚义鸣 E-mail:yimingyao@nankai.edu.cn

基金项目:国家"十三五"重点研发计划项目(2019YFC1804400);天津市自然科学基金项目(19JCQNJC07400);国家自然科学基金项目 (NSFC41807356:22036004)

Project supported: The National Key Technology Research of the Ministry of Science and Technology of China (2019YFC1804400); The Tianjin Natural Science Foundation (19JCQNJC07400); The National Natural Science Foundation of China (NSFC41807356; 22036004)

then decreased. Therefore, when exposed to single stressors (PAH or Cd), the physiological systems within the ryegrass are affected, producing an oxidative stress response. We also found that compared with Cd exposure only, the four ryegrass indices changed significantly under compound exposure to Cd and PAH. The significant downregulation of PEPC and PPO enzyme activity and the concentration of Pro and GSH may be an important indicator of compound pollution of high-concentration PAH and Cd in soil. Moreover, the four ryegrass indices generally showed antagonistic effects under compound exposure stress. This study observed that compound heavy metal pollution, specifically Cd and PAHs, had dose-effect relationship with typical plant oxidative stress indices.

Keywords: cadmium; polycyclic aromatic hydrocarbons; ryegrass; oxidative stress; antagonism

镉(Cd)是一种剧毒重金属元素,是植物非必需元 素,土壤中Cd的来源包括自然来源与人为来源,如肥 料、灌溉水、动物粪便和大气沉降等[1-3]。然而即使在 非常低的浓度状态下,Cd也会强烈抑制植物的生长发 育,甚至导致死亡[4-5]。作为典型传统有机污染物,多 环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)主要 来源于煤的不完全燃烧和其他化学产品的回收和加 工¹⁶。由于其具有易在环境中积累、远距离运输迁移 转化以及极易进入生物体内等特性,对环境、生物和人 类的健康带来潜在的威胁四。随着工业化和城市化的 不断推进,多数大中城市面临着工业企业搬迁,遗留污 染场地增加,且场地土壤中的污染物种类复杂,目前国 内外研究发现的场地 Cd和 PAHs 复合污染主要分布 于矿区、电子垃圾回收场地、油田基地、冶炼厂及钢铁 厂等附近的土壤中^[8-11]。因此,场地中Cd与PAHs的复 合污染问题受到广泛关注。

植物是生态系统的基本且关键的生物成分,当土 壤环境受到污染时,也会不可避免地对植物造成毒性 损害^[12-13]。Cd具有极强的生物积累性,土壤是植物暴 露于Cd的主要途径^[14-15]。有研究表明,大气中的Cd 沉积到土壤中,使得土壤中Cd的生物可利用性提高, 导致水稻中Cd积累增加^[16]。同时,有研究发现当土 壤中Cd浓度达到125 mg·kg⁻¹时,Cd会在野生高粱 (Sorghum bicolor L.) 和小花鬼针草(Bidens parviflora Willd.)这两种植物的地上部富集,且富集系数均大于 1^[17]。植物吸收PAHs的来源复杂,除可以从根部吸收 土壤中PAHs以外,还可能通过叶面从大气中直接吸 收^[18-19]。金发草(Pogonatherum paniceum Lam.)暴露 在芘(Pyrene, Pyr)浓度范围为20~322 mg·kg⁻¹土壤 中,其茎叶部中Pyr的累积浓度最高能达到176 mg· kg⁻¹。因此,土壤中重金属以及有机污染物会在植物 体内累积,从而对植物造成伤害。

植物的抗氧化酶活性和氧化应激产物表达是植物毒性的常见指标^[20-21]。活性氧(Reactive oxygen species, ROS)的过度产生是植物对重金属和有机污染物

应激的早期反应之一^[22],过量的ROS可能导致膜脂 质、蛋白质和核酸氧化,进而导致细胞损伤^[23]。然而 植物的抗氧化酶体系以及氧化应激产物可以减弱这 些有害影响^[24]。有研究报道,植物可以通过调节多酚 氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)和磷酸烯醇式丙酮 酸羧化酶(Phosphoenolpyruvate carboxylase, PEPC)等 抗氧化酶来应对体内氧化应激反应^[25]。同时,还原性 谷胱甘肽(Reduced glutathione, GSH)和脯氨酸(Proline, Pro)可以缓解Cd或者PAHs对植物的胁迫反 应^[26-28]。在植物受到胁迫的过程中,抗氧化酶活性以 及氧化应激产物的浓度均会发生变化。因此,植物体 内的抗氧化酶活性以及氧化应激指示物浓度的变化 可以作为植物受到Cd和PAHs胁迫程度的指标,但目 前仍未有针对这两类典型污染物复合污染条件下植 物氧化应激效应的研究。

黑麦草(Lolium perenne L.)是污染场地中普遍存 在的植物之一,其生长周期较短且对有机和无机复合 污染均具有较高的耐受性^[29-30]。模拟染毒试验中,黑 麦草可以在 PAHs 浓度为 400 mg·kg⁻¹的土壤中生 长^[31],同时在 Cd浓度为 50~400 mg·kg⁻¹的土壤中也具 有一定的耐受性^[32],因此可以作为指示 Cd和 PAHs复 合污染效应的模式生物。本研究以黑麦草作为模式 植物,开展盆栽试验,分别研究 Cd和 PAHs单一暴露 下黑麦草氧化应激指标的剂量-效应关系;同时,考 虑到 PAHs 的面源污染特征,本研究拟以 PAHs 的高、 低浓度为背景值,研究不同土壤 Cd浓度暴露对黑麦 草氧化应激效应的影响,并阐明土壤 PAHs 和 Cd共同 暴露条件下影响植物氧化应激的联合作用机制,以期 为场地土壤 PAHs 和 Cd复合污染指示物的筛选和复 合污染的风险评价提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤与种子

供试土壤为山东滨州典型土壤类型潮土,其基本

理化性质如表1所示。供试黑麦草种子由浙江杭州 金阳光种业提供。

1.1.2 主要试剂

试供试剂萘(Naphthalene, Nap)、菲(Phenanthrene, Phe)、蒽(Anthracene, Ant)、Pyr、蓝(Chrysene, Chr)、苯并[a]芘(Benzo[a]pyrene, BaP)和水合氯化镉 (CdCl₂·2.5H₂O)均购自中国上海麦克林生化科技有 限公司,丙酮(色谱纯)购自中国上海安谱实验科技股 份有限公司。PPO试剂盒(微量法)、PEPC试剂盒(微 量法)、Pro试剂盒(微量法)和GSH试剂盒(微量法) 均购自北京索莱宝科技有限公司。

1.2 试验设计

盆栽试验于2021年4—6月在天津市南开大学综 合实验楼温室进行。选取土壤环境中普遍存在的具 有不同苯环数的6种PAHs(Nap、Phe、Ant、Pyr、Chr和 BaP)和Cd作为供试污染物。PAHs和Cd浓度设置如 表2所示,设置依据为葫芦岛场地Cd和PAHs浓度, 场地土壤中Cd浓度范围为0.19~114.00 mg·kg⁻¹,16 种优先控制 PAHs 总浓度范围为 316~492 mg·kg⁻¹。 根据此浓度范围进行人工模拟染毒。土壤单一暴露 Cd和PAHs的染毒方法如下:取6种PAHs标品各500 mg溶于100mL丙酮中,并将其与1kg空白土混匀,配 制PAHs单体浓度均为500 mg·kg⁻¹的染毒土1 kg,然 后与空白土逐级混合,分别配制出名义单体浓度梯度 为0,10(C1),20(C2),50(C3),100(C4) mg·kg⁻¹的 PAHs 染毒土;取 CdCl₂·2.5H₂O 标品 2 500 mg 溶于 100 mL水中,并将其与5 kg空白土混匀,配制500 mg·kg⁻¹的染毒土5 kg,然后与空白土逐级混合,分别 配制出名义浓度梯度为0、10(T1)、20(T2)、50(T3)、 100(T4) mg·kg⁻¹的Cd染毒土。土壤复合暴露Cd和 PAHs的染毒方法如下:将Cd染毒梯度的土壤分成3 组,其中一组用于单一暴露试验,另外两组土壤中分 别加入丙酮配制的 PAHs 染毒液。使其名义单体浓 度分别达到 10 mg·kg⁻¹和 100 mg·kg⁻¹。将对照组 (CK)土壤和各组染毒土壤装于内径12 cm、高15 cm 的花盆中,再向花盆中加入等量去离子水调节土壤含 水量为60%。根据前人对重金属和 PAHs 的研

	(mg·kg)				
分组命名 Group name	PAHs单体浓度 PAHs monomer concentration/ (mg·kg ⁻¹)	Cd浓度 Cd concentration/ (mg•kg ⁻¹)			
СК	0	0			
C1	0	10			
C2	0	20			
C3	0	50			
C4	0	100			
T1	10	0			
Т2	20	0			
Т3	50	0			
Τ4	100	0			
C1T1	10	10			
C2T1	10	20			
C3T1	10	50			
C4T1	10	100			
C1T4	100	10			
C2T4	100	20			
C3T4	100	50			
C4T4	100	100			

表2 土壤 Cd和 PAHs 处理的试验设计($mg \cdot kg^{-1}$) Table 2 Experimental design of Cd and PAHs soil treatment

1 -1)

究^[33-35],确定重金属和PAHs染毒土壤老化时间为两 周。选择饱满、大小均匀的黑麦草种子,用3%H2O2 溶液表面灭菌 20 min,种植在空白土中,14 d后,待黑 麦草长至20 cm左右高度,选取长势相同的黑麦草移 植到装有染毒土的花盆当中,生长21 d。温室条件: 温度 20 °C/15 °C(昼/夜), 光周期 16 h/8 h(昼/夜)。 21 d后收集植物样品。将所有样品叶片用PBS缓冲 溶液清洗后,称量黑麦草地上部生物量,分析其抗氧 化酶活性和氧化应激指示物的浓度。

1.3 黑麦草地上部生物量的测定

将黑麦草植株从盆栽中取出,分离茎叶和根,将 茎叶分别用自来水、蒸馏水冲洗后,用滤纸吸干,用万 分之一天平分别称量每个处理组中黑麦草茎叶质量。 1.4 植物抗氧化酶活性和氧化应激产物的测定

取新鲜的叶片,分别用自来水、蒸馏水和PBS缓 冲液冲洗后,在液氮中均匀磨成细粉,利用试剂盒(微

-	Table 1	Physical	and chemica	d properties of	the ex	xperimental soil
---	---------	----------	-------------	-----------------	--------	------------------

有机质 pH Organic matter/ (g:kg ⁻¹)	有机质 四离子态施量	土壤类型 To Soil type (m	总镉	总镉 多环芳烃PAHs/(µg·kg ⁻¹)						
	四两 J 文決重 CEC/(cmol・kg ⁻¹)		Total Cd/	萘	菲	感	芘	崫	苯并[a]芘	
	(grkg)			(ing•kg)	Naphthalene	Phenanthrene	Anthracene	Pyrene	Chrysene	Benzo[a]pyrene
7.85	12.8	13.6	潮土	0.05	29.6	18.2	11.5	5.08	8.40	10.3

www.ger.org.cn

农业环境科学学报 第41卷第8期

量法)提供的说明书中的方法处理植物,提取植物的抗氧化酶以及氧化应激产物,使用酶标仪(SPARK20M,TECAN,瑞士)测定其抗氧化酶活性以及氧化应激产物的浓度。

1.5 数据统计

用 Microsoft Excel 和 Origin 2018 进行统计分析, 用 SPSS 26 进行单因素 ANOVA 分析,采用 LSD 和沃 勒邓肯法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 单一Cd染毒、单一PAHs染毒和复合染毒对黑麦 草生长的影响

不同处理组黑麦草的地上部生物量如图1所示。 与对照组相比,各处理组黑麦草的生物量在单一和复 合暴露条件下均显著降低,但在复合污染与单一污染 之间,黑麦草的生物量并无显著差异;且在各染毒组 内,随染毒浓度增加黑麦草生物量变化普遍不显著。 上述结果说明Cd和PAHs的单一或复合暴露对黑麦 草的生长状态有一定负面影响,但仍在耐受范围内。

2.2 单一Cd染毒下黑麦草抗氧化酶以及氧化应激产物的变化趋势

Cd胁迫导致黑麦草体内抗氧化酶活性和氧化应激产物浓度均发生了显著变化。如图2所示,随着土壤中Cd浓度的升高,PEPC的活性和Pro的浓度均呈现先升高后下降的趋势,在Cd浓度为50 mg·kg⁻¹时均达到最大值;而GSH浓度呈现递增趋势,PPO活性呈现递减趋势。

2.3 单一PAHs染毒下黑麦草抗氧化酶以及氧化应激 产物的变化趋势

PAHs胁迫导致了黑麦草体内抗氧化酶活性和氧

化应激产物浓度均发生了显著变化。由图3可知,随着 土壤中PAHs浓度的升高,PEPC的活性和GSH、Pro的 浓度均呈现先升高后下降的趋势,在PAHs单体浓度为 50 mg·kg⁻¹时达到最大值,PEPC的活性和Pro浓度的变 化与Cd染毒条件下的变化趋势一致;PPO活性呈现显 著下降趋势,但在PAHs单体浓度达到20 mg·kg⁻¹以上 时,抑制水平趋于稳定,不再有显著变化。

2.4 Cd-PAHs复合染毒下黑麦草抗氧化酶以及氧化 应激产物的变化趋势

为了探究 PAHs 高低两个浓度与 Cd 复合染毒对 黑麦草抗氧化酶以及氧化应激产物的影响,分别将 PAHs 高低两个浓度与 Cd 复合染毒下黑麦草的 4 种 指标变化与单一Cd染毒下黑麦草的4种指标变化进 行对比。如图4和图5所示,红线分别代表高低PAHs 浓度与Cd复合染毒下黑麦草4种指标的变化趋势。 由图4可知,对于低浓度PAHs与Cd复合染毒组,随 着Cd浓度升高,黑麦草PEPC活性整体呈上升趋势; PPO活性呈先上升后下降趋势,在Cd浓度为10 mg· kg⁻¹时达到最大值;Pro浓度未发生显著变化,但在Cd 浓度为100 mg·kg⁻¹时显著上调;GSH浓度呈先上升 后下降趋势,在Cd浓度为50 mg·kg⁻¹时达到最大值。 由图5可知,对于高浓度PAHs与Cd复合染毒组,随 着Cd浓度升高,黑麦草PPO活性和Pro浓度均呈现先 上升后下降趋势,在Cd浓度为20mg·kg⁻¹左右时达到 最大值;PEPC活性显著降低,当Cd浓度达到20mg· kg⁻¹时抑制水平趋于稳定,不再有显著变化;而GSH 浓度仅在Cd浓度为50 mg·kg⁻¹时呈显著上升。

同时为了探究复合染毒的剂量效应关系,将单一 Cd染毒下黑麦草的抗氧化酶活性以及氧化应激产物 浓度分别与10 mg·kg⁻¹和100 mg·kg⁻¹两个PAHs染毒



图1 21 d 培养后黑麦草地上部生物量

Figure 1 The aboveground biomass of ryegrass after 21 days of cultivation





Figure 2 The change trend of antioxidant enzyme activities and oxidative stress products in ryegrass under exposure of Cd





Figure 3 The change trend of antioxidant enzyme activities and oxidative stress products in ryegrass under exposure of PAHs

www.aer.org.cn



of low concentrations of PAHs and Cd

浓度下黑麦草的抗氧化酶活性以及氧化应激产物浓度直接加和,产生理论加和效应曲线,如图4和图5中蓝色虚线所示。无论PAHs染毒浓度高低,Cd和PAHs复合染毒时,Pro、GSH的浓度和PEPC、PPO的活性均普遍显著低于理论加和效应的水平,说明Cd和PAHs复合暴露对黑麦草的毒性作用表现为显著的拮抗效应,然而在高浓度的PAHs条件下,Pro浓度在Cd浓度50 mg·kg⁻¹以下时表现为协同效应,随着Cd浓度升高而转变为拮抗效应。

3 讨论

3.1 不同染毒组对黑麦草地上部生物量的影响

黑麦草的生物量是判断植物生长状况的一个重要指标,植物在Cd与PAHs胁迫作用下,生长会受到抑制,导致生物量下降^[36]。本研究发现,与对照组相比,所有染毒组生物量均有不同程度的减少(图1)。说明由于Cd和PAHs的胁迫作用,阻碍了黑麦草根系对营养物质的吸收,从而抑制了根系向地上部运输营

养物质,影响了黑麦草的生长,导致其地上生物量降低^[37],但并未表现出明显剂量-效应关系。

3.2 单一Cd染毒对黑麦草抗氧化酶以及氧化应激产物的影响

当植物受到Cd胁迫时,黑麦草的4种指标均发 生了显著变化,这说明Cd胁迫下,黑麦草体内会产生 大量的ROS,激活植物体内的酶促系统和非酶促系 统,从而产生氧化应激反应来进行自我保护^[38]。其 中,PEPC的活性在一定Cd浓度内呈升高趋势(图1)。 有研究表明PEPC在大麦、小麦等单子叶植物中有重 要的补给功能^[39],并调节参与三羧酸循环(TCA循环) 的有机酸的合成^[40]。植物在受到Cd胁迫时,体内有 机酸也会参与缓解胁迫这一过程,因此随着Cd浓度 的增加,PEPC的活性逐渐增大,缓解了Cd对黑麦草 的胁迫^[41]。PPO活性降低是因为Cd直接抑制了PPO 基因的表达,从而抑制了其活性^[42]。GSH和Pro作为 典型的非酶抗氧化剂,其浓度也随Cd浓度增加而增 加。GSH是植物抗Cd的重要物质之一,是以与重金



of high concentrations of PAHs and Cd

属结合的植物螯合肽的前体,还可以在谷胱甘肽转移 酶的作用下与重金属离子形成复合物,维持细胞内的 离子平衡^[43];GSH还能通过谷胱甘肽-抗坏血酸循环 (GSH-AsA循环),对植物体内产生的ROS进行清 除^[44]。Pro是植物调节细胞渗透压的重要物质,随着 Cd浓度的增加,Pro通过调节细胞渗透压来提高其渗 透吸水的能力,从而增加黑麦草对Cd的耐受能力^[45]。 而当Cd浓度增大至100 mg·kg⁻¹后,除GSH浓度上升 外,PPO、PEPC活性和Pro浓度均呈下降趋势,这是由 于植物对Cd的氧化应激引起了黑麦草生长障碍,随 着Cd浓度的增加,酶活性抑制剂增加^[46-47]。GSH浓度 增加也是由这一原因引起的^[48]。

3.3 单一PAHs染毒对黑麦草抗氧化酶以及氧化应激 产物的影响

在PAHs暴露条件下,黑麦草可通过调节各种抗氧化酶活性和氧化应激产物水平来缓解显著增加的ROS^[49]。有研究表明,PAHs胁迫会影响植物的三羧酸循环,植物通过加快CO₂的运送、加速丙酮酸转化成乙酰辅酶A促进三羧酸循环来释放更多能量,从而积极调控植物相关防御基因的表达来应对PAHs胁

迫^[50],因此PEPC活性随着PAHs浓度增加而升高,在 单体浓度为50 mg·kg⁻¹时达到最大值,而PPO活性随 着PAHs浓度的增加逐渐降低,其原因可能是土壤 PAHs毒性较高,超出了PPO的防御范围,从而产生了 酶活性抑制剂,PPO活性逐渐下降^[51]。有研究表明, 在PAHs胁迫下,拟南芥蛋白鸟嘌呤核苷酸结合蛋白 (G蛋白)和核苷二磷酸激酶(NDPK)的表达基因上 调,激活体内丝裂原活化蛋白激酶(MAPK)途径和活 性氧信号途径,使得谷胱甘肽还原酶(Glutathione reductase,GR)相关表达基因上调,因此GSH浓度增 大^[50]。在PAHs胁迫下,植物渗透压升高^[52],导致Pro 浓度升高。当PAHs单体浓度达到100 mg·kg⁻¹时,毒 性较大,导致植物机体受损,因此抗氧化系统受到破 坏,所以PPO、PEPC活性和GSH、Pro浓度均呈下降趋 势^[51]。

3.4 Cd-PAHs复合染毒对黑麦草抗氧化酶以及氧化应激产物的影响

低浓度 PAHs 与 Cd 复合染毒下,黑麦草的 PEPC 活性和 Pro浓度的变化趋势与 Cd 单一染毒相比有明 显差异,而 PPO 活性和 GSH 浓度与 Cd 单一染毒较为

www.aer.org.cn

一致;高浓度 PAHs 与 Cd 复合染毒下, PEPC、PPO 活 性和 Pro、GSH 浓度与 Cd 单一染毒相比均有明显差 异。这说明复合染毒对黑麦草的胁迫与单一染毒存 在显著不同。与单一染毒相比,复合染毒下4种指标 发生不同的变化,推测是由于黑麦草体内的氧化应激 反应程度不同,同时植物的每个指标对过氧化伤害防 御的阈值不同,且控制4种指标相关的基因受到了不 同程度的抑制^[53-54]。因此, PEPC 和 PPO 的活性以及 Pro和GSH浓度的显著下调是土壤高浓度 Cd 和 PAHs 复合污染重要的植物生物效应指示物,这为场地复合 污染风险评价提供了理论支撑。

本研究结果表明,高低浓度的PAHs与Cd的复合 暴露条件下,黑麦草中PEPC、PPO、GSH和Pro4种指 标均普遍低于理论加和效应,这说明PAHs与Cd复合 暴露对黑麦草的氧化应激效应不是简单的加和,而是 呈现拮抗效应。通过分析发生拮抗效应的机理,推测 低浓度 PAHs 的存在改变了黑麦草对 Cd 的吸收过程, 影响了植物的三羧酸循环[40],同时影响了植物的氧化 应激[55]。有学者对羊头鱼的急性毒性反应进行研究, 发现 Phe 与锌(Zn)的拮抗作用可能是因为 Phe 改变 了羊头鱼的溶酶体膜稳定性及其功能,从而缓解了 Zn的毒害作用^[56];ZHANG等^[57]也报道了低浓度的Phe 能够缓解Cd对湿地植物的毒害作用,并推测土壤中 的PAHs可以作为一种碳源被微生物吸收,这对植物 根部微生物的生长发育及其结构调整具有重要意义。 低浓度的PAHs可能缓解Cd对黑麦草的氧化损伤,但 同时也改变了其酶活性,这与前人的研究相符[58]。高 浓度 PAHs 与 Cd 的共存可能刺激了黑麦草体内的保 护机制, PAHs与Cd可以使ROS在植物体内积累增 加,逆境胁迫下植物的抗氧化机制是植物自我保护的 一种适应性反应,一定程度上可以减轻胁迫作用,但 这种调节能力是有限的,一旦高浓度的染毒物胁迫强 度远超过了黑麦草自身的防御能力,植物的抗氧化系 统会遭到破坏,使植物清除ROS的能力减弱,从而在 细胞水平上造成损伤,植物体内的酶活性和氧化应激 产物均受到抑制^[59-61]。有研究发现,高浓度Zn与 PAHs在菠菜(Spinacia oleracea L.)体内呈现拮抗作 用^[62],同时有研究表明高浓度的Pyr与铜(Cu)复合污 染对玉米幼苗的胁迫表现为拮抗作用[63],这种拮抗作 用也可能是黑麦草的氧化指标与单一污染相比发生 显著变化的原因,使黑麦草4种指标在高浓度复合染 毒下普遍呈现拮抗效应。

此外,有研究发现在硒(Se)和汞(Hg)污染体系

农业环境科学学报 第41卷第8期

中也存在着拮抗作用,Se可以降低大蒜(Allium sativum)体内Hg与GSH的结合,从而降低Hg在植物体内的转运、积累和毒性,这说明氧化应激指标是复合 污染暴露联合作用的关键靶点^[64];同时也有研究发现 在Cu和盐的胁迫下白桦茸(Anabaena doliolum)的抗 氧化系统发生了变化,Cu离子可能与细胞膜蛋白结 合从而改变盐离子的通道,使盐胁迫引起的GSH、过 氧化氢酶(Catalase,CAT)和GR的水平下降,表现为 拮抗效应^[65]。但目前尚未有将PEPC、PPO和Pro作为 生物效应靶点的复合污染暴露研究,推测在PAHs和 Cd复合污染体系中可能存在类似的拮抗作用,使 PAHs和Cd复合暴露条件下黑麦草的PEPC和PPO的 活性以及Pro和GSH浓度与理论单一暴露的加和效 应相比显著下降。

4 结论

(1)单一Cd染毒和单一PAHs染毒胁迫均会引起 黑麦草氧化应激反应,但两种染毒引起的氧化应激反 应程度不同。

(2)在 PAHs 与 Cd 复合染毒下, PEPC、PPO、GSH 和 Pro 4种指标普遍呈现拮抗效应。

(3)PEPC和PPO的活性以及Pro和GSH浓度的 显著下调可能是场地土壤高浓度PAHs和Cd复合污 染的重要指征。

参考文献:

- LUO L, MA Y, ZHANG S, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8):2524–2530.
- [2] TANG Q F, YANG Z F, ZHANG B R, et al. Cadmium flux in soils of the agroecosystem in the Chengdu economic region, Sichuan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(7):869–877.
- [3] ZHOU J, DU B, LIU H, et al. The bioavailability and contribution of the newly deposited heavy metals (copper and lead) from atmosphere to rice(Oryza sativa L.)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 384 (2):121285.
- [4] HERNANDEZ L E, CARPENA-RUIZ R, GARATE A. Alterations in the mineral nutrition of pea seedlings exposed to cadmium[J]. *Journal* of Plant Nutrition, 1996, 19(12):1581-1598.
- [5] MACEK T, MACKOVÁ M, PAVLÍKOVÁ D, et al. Accumulation of cadmium by transgenic tobacco[J]. Acta Biotechnologica, 2002, 22(1/ 2):101-106.
- [6] 周若凡. 典型焦化场地污染特征研究进展[J]. 山东化工, 2020, 49 (14):51-52, 56. ZHOU R F. Research progress on pollution characteristics of typical coking sites[J]. Shandong Chemical, 2020, 49(14): 51-52, 56.

- [7] 宋玉芳, 孙铁珩, 张丽珊. 土壤-植物系统中多环芳烃和重金属的行为研究[J]. 应用生态学报, 1995, 6(4):417-422. SONG Y F, SUN T H, ZHANG L S. Behaviors of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heavy metals in soil-plant system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1995, 6(4):417-422.
- [8] TANG X, SHEN C, SHI D, et al. Heavy metal and persistent organic compound contamination in soil from Wenling: An emerging E-waste recycling city in Taizhou area, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173(1/2/3):653-660.
- [9] SUN L, LIAO X, YAN X, et al. Evaluation of heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbons accumulation in plants from typical industrial sites: Potential candidate in phytoremediation for co-contamination[J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2014, 21(21):12494-12504.
- [10] PARIZANGANEH A, HAJISOLTANI P, ZAMANI A. Concentration, distribution and comparison of total and bioavailable metals in top soils and plants accumulation in Zanjan zinc industrial town-Iran[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2(6):167-174.
- [11] SARMA H, ISLAM N F, BORGOHAIN P, et al. Localization of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in surface soil of Asia's oldest oil and gas drilling site in Assam, north-east India: Implications for the bio-economy[J]. *Emerging Contaminants*, 2016, 2(3): 119–127.
- [12] GUO X, LI J, YANG F, et al. Prevalence of sulfonamide and tetracycline resistance genes in drinking water treatment plants in the Yangtze River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 493 (15):626-631.
- [13] KHODAKOVSKAYA M V, SILVA K D, NEDOSEKIN D A, et al. Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle-plant interactions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(3):1028– 1033.
- [14] LI H, ABBAS T, CAI M, et al. Cd bioavailability and nitrogen cycling microbes interaction affected by mixed amendments under paddy-pak choi continued planting[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 275 (8): 116542.
- [15] HAIDER F U, LIQUN C, COULTER J A, et al. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies[J]. *Ecotoxicology and Envi*ronmental Safety, 2021, 211:111887.
- [16] YANG W, WANG S, ZHOU H, et al. Combined amendment reduces soil Cd availability and rice Cd accumulation in three consecutive rice planting seasons[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 111:141–152.
- [17] 董林林,赵先贵,张素娟,等. 污染土壤中植物富集重金属的差异 性研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(2):374-377. DONG L L, ZHAO X G, ZHANG S J, et al. The difference of plants accumulating heavy metal in polluted soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40 (2):374-377.
- [18] ZHANG Y H, HOU D, XIONG G N, et al. Structural equation modeling of PAHs in ambient air, dust fall, soil, and cabbage in vegetable bases of northern China[J]. Environmental Pollution, 2018, 239(8):

13-20.

- [19] KOŁTOWSKI M, HILBER I, BUCHELI T D, et al. Activated biochars reduce the exposure of polycyclic aromatic hydrocarbons in industrially contaminated soils[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 310: 33– 40.
- [20] CHANDRA R, YADAV S, MOHAN D. Effect of distillery sludge on seed germination and growth parameters of green gram (*Phaseolus* mungo L.) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(1):431-439.
- [21] LAHIANI M H, DERVISHI E, CHEN J, et al. Impact of carbon nanotube exposure to seeds of valuable crops[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(16):7965-7973.
- [22] LIN A J, ZHANG X H, CHEN M M, et al. Oxidative stress and DNA damages induced by cadmium accumulation[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(5):596-602.
- [23] FLORA S J S. Structural, chemical and biological aspects of antioxidants for strategies against metal and metalloid exposure[J]. Oxidative Medicine & Cellular Longevity, 2009, 2(4):191–206.
- [24] SANDALIO L, DALURZO H, GOMEZ M, et al. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2001, 52(364):2115-2126.
- [25] APEL K, HIRT H. Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction[J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55:373-399.
- [26] PER T S, MASOOD A, KHAN N A. Nitric oxide improves S-assimilation and GSH production to prevent inhibitory effects of cadmium stress on photosynthesis in mustard (*Brassica juncea L.*)[J]. *Nitric Oxide*, 2017, 68:111-124.
- [27] 李霞, 马晓东, 邹竣竹, 等. 菲胁迫下蒿柳抗氧化系统的响应[J]. 林 业科学研究, 2020, 33(2):138-144. LI X, MA X D, ZOU J Z, et al. Response of antioxidant system of *Salix viminalis* under phenanthrene stress[J]. *Forest Research*, 2020, 33(2):138-144.
- [28] 杨丹, 王罡, 王戊腾, 等. 大豆对菲胁迫的生理响应及耐菲机理研究[J]. 生物技术通报, 2020, 36(10):1-7. YANG D, WANG G, WANG W T, et al. Physiological responses of soybean to phenanthrene and its tolerance mechanism[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2020, 36(10):1-7.
- [29] WANG J, ZHAO J, FENG S, et al. Comparison of cadmium uptake and transcriptional responses in roots reveal key transcripts from high and low-cadmium tolerance ryegrass cultivars[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 203:110961.
- [30] BINET P, PORTAL J M, LEYVAL C. Dissipation of 3–6–ring polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere of ryegrass[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14):2011–2017.
- [31] 蔡顺香,林琼,邱孝煊,等.黑麦草及其根际土壤酶对芘胁迫的响应与植物修复研究[J]. 福建农业学报, 2013. 28(3): 262-267.
 CAI S X, LIN Q, QIU X X, et al. Physiological response of ryegrass and its rhizospheric soil enzymes under pyrene stress and the phytore-mediation[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2013, 28(3): 262-267.
- [32] 徐佩贤, 费凌, 陈旭兵, 等. 四种冷季型草坪植物对镉的耐受性与

积累特性[J]. 草业学报, 2014, 23(6):176-188. XU P X, FEI L, CHEN X B, et al. Cadmium tolerance and accumulation four cool-season turfgrasses[J]. *Acta Prataculture Sinica*, 2014, 23(6):176-188.

- [33] 郑明霞, 冯流, 刘洁, 等. 螯合剂对土壤中镉赋存形态及其生物有效性的影响[J]. 环境化学, 2007, 26(5):606-609. ZHENG M X, FENG L, LIU J, et al. Effects of chelators on species and bioavailability of cadmium in soil[J]. Environment Chemistry, 2007, 26(5):606-609.
- [34] 郝利君,潘亮,郝百惠,等. AM 真菌和铅处理对镧胁迫下玉米生长 和镧吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6):1177-1184. HAO L J, PAN L, HAO B H, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and Pb on the growth and La uptake of maize grown in La-contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(6): 1177-1184.
- [35] 谷娜, 赵佩, 高金龙, 等. Cl02-CuO@蒙脱土催化氧化降解土壤中 的蒽[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11):6781-6788. GU N, ZHAO P, GAO J L, et al. Degradation of anthracene-contaminated soil by ClO2 - CuO@montmorillonite catalytic oxidation process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(11):6781-6788.
- [36] 胡容平,李欣欣,林立金,等. 混种龙葵对番茄和茄子生理生化特 性及镉含量的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(26):57-63. HU R P, LI X X, LIN L J, et al. Effects of intercropping with solanum nigrum on physiological and biochemical characteristics and cadmium content of *Lycopersicon esculentum* and *Solanum melongena*[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(26):57-63.
- [37] 韩航,陈顺钰,薛凌云,等.铅胁迫对金丝草生长及生理生化的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(4):131-138. HAN H, CHEN S Y, XUE L Y, et al. Effects of lead stress on growth and physiology of *Pogonatherum crinitum*[J]. Acta Prataculture Sinica, 2018, 27(4):131-138.
- [38] ZHANG J J, YI C L, JIN J Z, et al. Accumulation and toxicological response of atrazine in rice crops[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 102(4):105–112.
- [39] IZUI K, MATSUMURA H, FURUMOTO T, et al. Phosphoenolpyruvate carboxylase: A new era of structural biology[J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55(1):69-84.
- [40] FERIA A B, ALVAREZ R, COCHEREAU L, et al. Regulation of phosphoenol pyruvate carboxylase phosphorylation by metabolites and abscisic acid during the development and germination of barley seeds[J]. *Plant Physiology*, 2008, 148(2):761-774.
- [41] WILLICK I R, PLAXTON W C, LOLLE S J, et al. Transcriptional and post-translational upregulation of phosphoenolpyruvate carboxylase in Arabidopsis thaliana (L. Heynh) under cadmium stress[J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, 164(8):29–39.
- [42] KHANNA K, JAMWAL V L, KOHLI S K, et al. Plant growth promoting rhizobacteria induced Cd tolerance in *Lycopersicon esculentum* through altered antioxidative defense expression[J]. *Chemosphere*, 2019, 217:463-474.
- [43] 宋瑜, 金樑, 曹宗英, 等. 植物对重金属镉的响应及其耐受机理[J]. 草业学报, 2008, 17(5): 84-91. SONG Y, JIN L, CAO Z Y, et al. Response and resistance mechanisms of plants to cadmium[J]. Acta

农业环境科学学报 第41卷第8期

Prataculture Sinica, 2008, 17(5):84-91.

- [44] PEREIRA G, MOLINA S, LEA P J, et al. Activity of antioxidant enzymes in response to cadmium in *Crotalaria juncea*[J]. *Plant & Soil*, 2002, 239(1):123–132.
- [45] 刘慧芹, 韩巨才, 刘慧平, 等. 铅梯度胁迫对多年生黑麦草幼苗生 理生化特性影响[J]. 草业学报, 2012, 21(6):57-63. LIU H Q, HAN J C, LIU H P, et al. Influence of lead gradient stress on the physiological and biochemical characteristics of perennial ryegrass (*Loli-um perenne* L.) seedlings[J]. *Acta Prataculture Sinica*, 2012, 21(6): 57-63.
- [46] NAJEEB U, JILANI G, ALI S, et al. Insights into cadmium induced physiological and ultra-structural disorders in *Juncus effusus* L. and its remediation through exogenous citric acid[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(1):565-574.
- [47] JAKUBOWSKA D, JANICKA-RUSSAK M, KABALA K, et al. Modification of plasma membrane NADPH oxidase activity in cucumber seedling roots in response to cadmium stress[J]. *Plant Science*, 2015, 234(2):50-59.
- [48] GALLEGO S M, PENA L B, BARCIA R A, et al. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms[J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, 83:33-46.
- [49] 刘泓, 叶媛蓓, 崔波, 等. 多环芳烃荧蒽诱导拟南芥氧化胁迫[J]. 应 用生态学报, 2008, 19(2):413-418. LIU H, YE Y B, CUI B, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon fluoranthene induces oxidative stress in Arabidopsis thaliana[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2):413-418.
- [50] 林章萍,陈能海,崔波,等. 菲胁迫下拟南芥转录水平早期应答[J]. 河南农业大学学报, 2016, 50(1):79-84, 96. LIN Z P, CHEN N H, CUI B, et al. The early response of differential genes to phenanthrene stress in Arabidopsis thaliana[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2016, 50(1):79-84, 96.
- [51] 卢晓丹,高彦征,凌婉婷,等.多环芳烃对黑麦草体内过氧化物酶和多酚氧化酶的影响[J].农业环境科学学报,2008,27(5):1969-1973. LUXD,GAOYZ,LINGWT,et al. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on POD and PPO in *Lolium multiflorum* Lam.[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5):1969-1973.
- [52] 张会敏, 龙明华, 乔双雨, 等. 叶片涂施多环芳烃在黄瓜体内的积 累效应及对其生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2019, 39(6): 1064-1074. ZHANG H M, LONG M H, QIAO S Y, et al. Accumulations and physiological performance effects on cucumber after application of polycyclic aromatic hydrocarbons to leaf[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2019, 39(6):1064-1074.
- [53] 陆志强, 陈昌徐, 马丽, 等. 镉和萘单一及复合胁迫对红树植物白 骨壤幼苗生理影响的差异分析[J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24 (3):60-67. LUZQ, CHENCX, MAL, et al. Difference analysis on effects of single and combination stresses of Cd and Nap on physiology of mangrove Avicennia marina seedlings[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2015, 24(3):60-67.
- [54] 孙娟, 郑文教, 赵胡. 萘胁迫对白骨壤种苗萌生及抗氧化作用的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2005, 44(3):433-436. SUN J, ZHENG W J, ZHAO H. Effect of Naphthalene in timidation on

seedling gemination and antioxidase in Avicennia marina[J]. Journal of Xiamen University(Natural Science), 2005, 44(3):433-436.

[55] WANG Y, LI M, LIU Z, et al. Interactions between pyrene and heavy metals and their fates in a soil-maize (*Zea mays L.*) system: Perspectives from the root physiological functions and rhizosphere microbial community[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 287(8):117616.

2022年8月

- [56] MOREAU C J, HAAS P. Interaction between phenanthrene and zinc in their toxicity to the sheepshead minnow (*Cyprinodon variegatus*)[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1999, 37 (2):251-257.
- [57] ZHANG Z, RENGEL Z, MENEY K, et al. Polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) mediate cadmium toxicity to an emergent wetland species[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 189(1):119–126.
- [58] TEISSEIRE H, COUDERCHET M, VERNET G. Toxic responses and catalase activity of *Lemna minor* L. exposed to folpet, copper, and their combination[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 1998, 40 (3):194-200.
- [59] 李悦,谢诗,陈忠林,等. 锌、苯并[a]芘及其复合胁迫对小麦幼苗生 长及抗氧化酶的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2):358-362. LI Y, XIE S, CHEN Z L, et al. Impacts of zinc, benzo[a] pyrene, and their combination on the growth and antioxidant enzymes activities of wheat(*Triticum aestivum* L.) seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2):358-362.
- [60] SIMOVA-STOILOVA L, DEMIREVSKA K, PETROVA T, et al. Antioxidative protection and proteolytic activity in tolerant and sensitive

wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties subjected to long-term field drought[J]. *Plant Growth Regulation*, 2009, 58(1):107-117.

- [61] ZBIGNIEW T, WOJCIECH P. Individual and combined effect of anthracene, cadmium, and chloridazone on growth and activity of SOD izoformes in three *Scenedesmus* species[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, 65(3); 323–331.
- [62] 陈建, 夏星辉, 张真瑞, 等. 增温和锌复合作用对菠菜富集多环芳 烃的影响[J]. 环境科学学报, 2020, 40(12):4531-4539. CHEN J, XIA X H, ZHANG Z R, et al. The effects of elevated temperature and zinc combination on the accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in spinach[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(12): 4531-4539.
- [63] 赵娟娟,杨波,王宇晖,等.土壤芘、铜及其复合污染对玉米幼苗生理胁迫的拮抗作用[J].东华大学学报(自然科学版),2020,46(4): 643-649. ZHAO J J, YANG B, WANG Y H, et al. Antagonistic effects of soil pyrene/copper and their co-contamination on physiological stress of maize seedlings[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2020, 46(4):643-649.
- [64] ZHAO J T, GAO Y X, LI Y F, et al. Selenium inhibits the phytotoxicity of mercury in garlic (*Allium sativum*) [J]. *Environmental Research*, 2013, 125:75–81.
- [65] SRIVASTAVA A K, BHARGAVA P, RAI L C. Salinity and copperinduced oxidative damage and changes in the antioxidative defence systems of Anabaena doliolum[J]. World Journal of Microbiology & Biotechology, 2005, 21(6/7):1291-1298.

(责任编辑:宋潇)