

DOI: 10.5846/stxb202001140107

刘楚藩, 肖荣波, 黄飞, 戴伟杰, 高中原, 徐美丽, 温小情. 土壤与大气双重胁迫下苋菜幼苗对铅的累积与生理响应. 生态学报, 2020, 40(24): 9174-9183.
Liu C F, Xiao R B, Huang F, Dai W J, Gao Z Y, Xu M L, Wen X Q. Accumulation and physiological response of *Amaranthus tricolor* L. seedlings to lead under soil and atmospheric stress. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 9174-9183.

土壤与大气双重胁迫下苋菜幼苗对铅的累积与生理响应

刘楚藩, 肖荣波*, 黄飞, 戴伟杰, 高中原, 徐美丽, 温小情

广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510000

摘要: 土壤污染被普遍认为是农作物 Pb 的主要来源, 但是针对大气沉降与土壤对作物胁迫效应的研究相对较少。通过喷洒 Pb 溶液和 Pb 污染土壤盆栽试验, 模拟研究大气和土壤不同 Pb 污染源胁迫对苋菜幼苗生长发育和生理生化特征的影响, 以及 Pb 在其体内的累积和化学形态。结果表明, 大气和土壤 Pb 胁迫都能显著提高苋菜幼苗 Pb 含量, 其中土壤影响占 62.64%, 大气影响占 32.89%。不溶性磷酸盐和果胶、蛋白结合态是 Pb 的主要化学形态。单独大气 Pb 胁迫促进了苋菜幼苗的生长和可溶性蛋白质的合成, 而土壤 Pb 胁迫则为抑制作用, 主要表现为 H₂O₂ 和 MDA 含量增加, 造成细胞膜系统损伤。抗氧化酶 (SOD、POD、CAT) 和抗氧化剂 (AsA、GSH) 对土壤和大气 Pb 胁迫均表现出积极有效的响应。研究结果可为大气和土壤重金属共同胁迫地区农作物的环境风险评价以及污染防治提供重要的科学依据。

关键词: 铅; 苋菜幼苗; 土壤与大气胁迫; 化学形态; 生理响应

Accumulation and physiological response of *Amaranthus tricolor* L. seedlings to lead under soil and atmospheric stress

LIU Chufan, XIAO Rongbo*, HUANG Fei, DAI Weijie, GAO Zhongyuan, XU Meili, WEN Xiaoqing

School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510000, China

Abstract: Soil pollution is generally attributed as the main source of Pb in crops. However, there are relatively few studies on the effects of atmospheric deposition and soil stress on crops. In this study, we investigated the influence of Pb due to atmospheric deposition and soil stress on the growth, accumulation, chemical morphology, and physiological and biochemical responses of *Amaranthus tricolor* L. seedlings using Pb solution spraying and Pb contaminated soil pot experiments. The results indicated that both atmospheric and soil Pb stress can significantly increase the Pb content in the *Amaranthus tricolor* L. seedlings. Among them, the effect of soil concentration accounted for 62.64%, and the effect of atmospheric deposition accounted for 32.89%. Insoluble phosphate, pectin, and protein-bound state are the primary chemical forms of Pb. The atmospheric Pb stress alone promoted the growth of the *Amaranthus tricolor* L. seedlings and synthesis of soluble proteins; however, soil Pb stress exhibited an inhibitory effect, increased hydrogen peroxide and malondialdehyde content, and caused damage to the cell membrane system. Antioxidant enzymes (superoxide dismutase, peroxidase, catalase) and antioxidants (ascorbic acid, glutathione) exhibited positive and effective responses to the soil and atmospheric Pb stress. The research results provided an important scientific basis for the environmental risk assessment and pollution prevention of crops in areas under heavy stress from the atmosphere and soil.

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2019B110207001)

收稿日期: 2020-01-14; 网络出版日期: 2020-11-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ecxiaorb@163.com

Key Words: lead; *Amaranthus tricolor* L. seedlings; soil and atmospheric stress; chemical form; physiological response

铅(Pb)是最常见的有毒元素之一,由于其不可降解性,且在土壤、空气和水资源中分布广泛,严重威胁着生态环境与人体健康。土壤污染和根系吸收被普遍认为是农作物 Pb 的主要来源^[1-2],但是针对大气沉降对作物胁迫效应的研究相对较少。大气沉降作为区域土壤重金属积累的主要途径,对农作物特别是叶菜类蔬菜的影响不容忽视^[3]。大气沉积物中的 Pb 具有更强的生物活性^[4],它通过叶表皮、气孔、水孔等途径被作物叶片吸收并转移到其他部位,可显著增加作物 Pb 含量^[5-6]。伴随着城镇化与工业化发展,汽车尾气、燃煤燃烧以及各类工业区建设等导致大气 Pb 含量升高^[7],使得许多地区农作物会受到大气、土壤等多污染源重金属的共同胁迫^[8],但其重金属累积和生长生理响应尚未受到足够重视,不利于区域重金属污染综合防治和农作物安全。

苋菜(*Amaranthus tricolor* L.)作为典型的叶菜类蔬菜,在我国南方地区广泛种植^[9],且对重金属有较强富集能力,易对人体健康产生潜在危害^[10-11]。苋菜生长周期较短(60 d 左右),耐受性较强,是理想的试验作物。考虑到重金属大气沉降中湿沉降部分占比大,且生物有效性更高,更易被植物吸收^[12-13],参照其它研究采用喷洒重金属溶液的方式模拟大气重金属沉降^[14-15]。因此,本文选取苋菜作为供试作物,以典型南方红壤为供试土壤,并模拟了南方酸性湿沉降(pH=5)。通过室内盆栽试验,研究了不同浓度土壤与大气沉降胁迫下,苋菜幼苗体内重金属 Pb 的累积、化学形态以及幼苗生长和生理响应。以揭示大气沉降-土壤双重胁迫下蔬菜对重金属 Pb 吸收累积和生理响应特征,为多环境介质重金属污染综合防治和农产品安全生产提供科学依据。

1 材料与方

1.1 实验材料

从韶关市曲江樟市镇(113.472199°E,24.555156°N)采集农田表层土(0—20 cm)作为供试背景土壤,土壤性质如表 1 所示。土壤去除大颗粒杂质,自然风干,混匀,过 1 cm×1 cm 筛。为增加土壤养分,向每千克风干土壤中添加 0.26 g KH_2PO_4 和 2.9 g NH_4NO_3 ,以溶液的形式与土壤充分混匀^[16-17]。选取华南地区常见的作物-柳叶苋菜(*Amaranthus tricolor* L.)为供试作物(购自武汉田园大丰农业科技有效公司),供试盆栽容器为直径 15 cm、高度为 11 cm 的塑料盆。Pb 的污染物为 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 分析纯化学试剂(购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司)。

表 1 土壤性质

Table 1 Characteristics of the soil

参数 Parameters	单位 Unit	值 Value
pH		4.70±0.30
有机质 Organic matter	%	3.71±0.32
阳离子交换量 Cation exchange capacity	cmol ⁺ /kg	3.36
有效磷 Available phosphorous	mg/kg	220.84±16.47
速效钾 Rapidly available potassium	mg/kg	305.27±24.91
氨态氮 Ammonia nitrogen	mg/kg	0.61±0.03
Pb 含量 Pb content	mg/kg	69.95±4.72

数据为平均数±标准差(n=3)

1.2 盆栽模拟实验

实验设计考虑大气沉降与土壤两个因素,分别设置空白、低、高三浓度梯度(表 2)。

其中土壤浓度设置参考了农用地土壤污染风险管控值(GB15618—2018)以及采矿、冶炼等高污染区域农田 Pb 含量^[18-19]。模拟大气沉降参照现有大气重金属沉降的研究结果^[20-21],按照 Pb 大气沉降通量污染程度,分别设置为空白 0 mg m⁻² d⁻¹、低污染 0.3 mg m⁻² d⁻¹、高污染 3 mg m⁻² d⁻¹,换算为喷洒液浓度分别为 0、0.71、

7.1 mg/L。为显著区分不同胁迫浓度对植物的影响,土壤和喷洒 Pb 溶液浓度梯度设置了较大跨度。向预处理后的土壤中加入不同浓度的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液,充分搅拌均匀后平衡两个月。 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 外源添加的 N 含量仅为 NH_4NO_3 的 5%—10%,与空白组相比由 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 中 N 对植物造成的影响可忽略不计^[16]。苋菜种子在多菌灵溶液中浸泡消毒,播种于装有不同浓度土壤的塑料盆中。每个盆栽保持适当间距,待苋菜发芽后每 3 d 向对应的处理组(约 0.2 m²)喷洒不同浓度的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液(pH=5)模拟 Pb 大气沉降,空白组为稀 HNO_3 溶液(pH=5)。每次 250 mL(分为 3 次,每 4h 1 次),共喷洒 5 次,喷洒溶液时用塑料薄膜对其它处理组进行遮挡,防止相互影响。各处理组设置 3 个平行样品,共 27 盆。盆栽实验在温室中进行并暴漏在自然光照下,早晚各浇水一次保持土壤湿润,发芽后 15 d 采集苋菜幼苗样品。

表 2 实验设计

Table 2 Experimental design

大气沉降溶液 Pb 浓度/(mg/L) Pb concentration of atmospheric deposition solution		土壤 Pb 浓度/(mg/kg) Pb concentration of soil	
	69.95	460.23	880.21
0	CK	LS	HS
0.71	LA	LSLA	HSLA
7.1	HA	LSHA	HS HA

CK: 对照组, LS: 低浓度土壤胁迫, HS: 高浓度土壤胁迫, LA: 低浓度大气胁迫, HA: 高浓度大气胁迫, LSHA: 低浓度土壤高浓度大气共同胁迫, HSLA: 高浓度土壤低浓度大气共同胁迫, LSLA: 低浓度土壤低浓度大气共同胁迫, HSHA: 高浓度土壤高浓度大气共同胁迫

1.3 植物样品采集与分析

待苋菜发芽后 15 d 采集植物样本,用去离子水洗涤以去除附着在植物表面的杂质,后自然风干。记录植物样品鲜重、株高和根长,样品在 70 °C 下干燥至恒重后记录干重。耐受指数由公式 1 计算^[22],含水率由公式 2 计算。

$$\text{耐受指数}(\%) = (\text{根长}_{\text{Pb胁迫组}} / \text{根长}_{\text{对照组}}) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{含水率}(\%) = (1 - \text{干重} / \text{鲜重}) \times 100 \quad (2)$$

1.3.1 植物 Pb 含量与化学形态的测定

将收获的植株浸泡在 20 mmol $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 溶液中 20 min,去除吸附在蔬菜表面的 Pb,后用去离子水冲洗。Pb 的化学形态采用植物鲜样测定,Pb 总量采用植物干样测定。参照朱光旭等人的方法用五种萃取剂依次提取植物体内 Pb 的化学形态^[23]。采用混合酸 HNO_3 和 HClO_4 (4:1) 消解所有植物样品,采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, iCAP 7000, Thermo Fisher Scientific, USA)测定样品 Pb 含量。

1.3.2 植物生理指标的测定

植物体内的可溶性蛋白、过氧化氢(H_2O_2)、丙二醛(MDA)、抗坏血酸(AsA)、谷胱甘肽(GSH)含量和超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性均采用生物试剂盒测定(购自南京建成生物工程研究所有限公司)^[24]。新鲜植物样品用预冷的磷酸缓冲液(pH=7.3)研磨,匀浆液在 2500 r/min 离心 15 min,取上清液测定上述指标,整个实验在 4 °C 下进行。

1.4 数据分析

实验数据为三个平行独立实验的平均值±标准差。所有实验数据用 SPSS 软件进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 LSD 多重比较($P < 0.05$)分析不同处理组间的差异。采用 2×3 的双因素方差分析(two-way ANOVA)分析土壤与大气 Pb 胁迫对植物的影响程度。采用 SPSS 软件进行主成分分析(PCA)和皮尔逊相关分析。

2 结果与讨论

2.1 土壤与大气胁迫下 Pb 在苋菜幼苗体内的累积与化学形态

植物 Pb 含量随土壤和大气浓度的增加而上升,与对照组相比高浓度土壤和大气单组胁迫组植物 Pb 含

量分布增加了 64.91 mg/kg 和 45.74 mg/kg(图 1)。土壤和大气共同胁迫对植物 Pb 含量均有明显提升作用,并在 HSHA 处理组达到最大值 141.27mg/kg。双因素方差分析结果表明(表 3),土壤和大气胁迫浓度对植物 Pb 含量均存在显著影响($P<0.05$),其中土壤胁迫浓度对植物 Pb 含量的影响较大占 62.64%,大气胁迫浓度影响较小占 32.89%,且两者之间存在交互作用($P<0.05$)。由此可推断土壤与大气双重污染源胁迫下植物中的 Pb 主要来源于根系对土壤中 Pb 的吸收,大气沉降对植物 Pb 含量的贡献较小,但不容忽视。同一土壤浓度下,高、低浓度大气沉降都能有效增加植物 Pb 含量。大气沉降中的 Pb 可以直接或间接地进入植物体内,沉积在叶片上的 Pb 通过叶片表皮、角质层和气孔直接进入植物叶片组织,而沉积在土壤中的 Pb 则通过根系吸收间接进入植物^[25]。双因素方差分析在重金属源分析方面存在一定局限性,后续研究会采用同位素技术更精确的分析不同污染源对植物中 Pb 的贡献率。

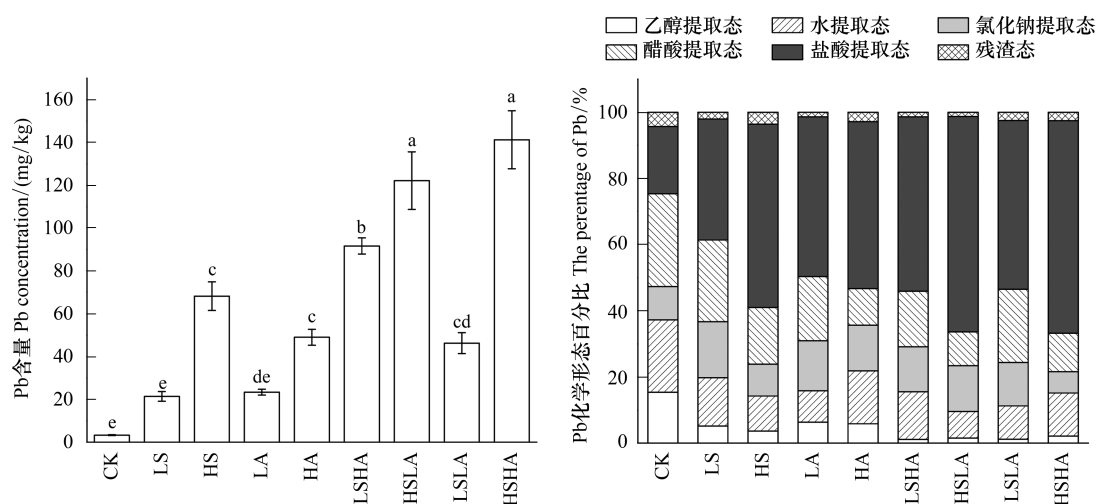


图 1 不同浓度土壤和大气胁迫下苋菜幼苗体内铅的含量和化学形态

Fig.1 Chemical forms and content of Pb in *Amaranthus tricolor* L. seedlings under different concentrations of soil and atmospheric stresses

数据为平均数±标准差($n=3$),不同小写字母分别表示各处理之间有显著差异($P<0.05$); CK:对照组;LS:低浓度土壤胁迫;HS:高浓度土壤胁迫;LA:低浓度大气胁迫;HA:高浓度大气胁迫;LSHA:低浓度土壤高浓度大气共同胁迫;HSLA:高浓度土壤低浓度大气共同胁迫;LSLA:低浓度土壤低浓度大气共同胁迫;HSHA:高浓度土壤高浓度大气共同胁迫

表 3 苋菜幼苗 Pb 含量双因素方差分析结果

Table 3 Results of two-factor analysis of variance for *Amaranthus tricolor* L. seedlings Pb content

源 Source	离差平方和 SS	df	均方 MS	F	P	贡献率% Contribution rate
土壤 Soil	34059.52	2.00	17029.76	328.04	0.00	62.64
大气 Air	17885.25	2.00	8942.62	172.26	0.00	32.89
土壤×大气 Soil×Air	1497.21	4.00	374.30	7.21	0.00	2.75
误差 Error	934.45	18.00	51.91			1.72
总和 Cor total	54376.42	26.00				100.00

SS:离差平方和 Sum of squares of deviations;MS:均方 Mean Square

植物中的重金属以不同的化学形态存在,具有不同的迁移能力和生物毒性。萃取剂的极性越强,其对应的重金属形态迁移能力越弱,对植物的毒性越小^[26]。在本研究中(图 1),不同浓度土壤和大气胁迫下植物体内 Pb 的化学形态以盐酸提取态(37%—64%)为主,其次为醋酸提取态(10%—25%)、氯化钠提取态(6%—17%)和水提取态(8%—16%),其他形态较少。一些研究者在宿根花卉和菊科植物中也发现类似分布规律^[23,27]。这一现象说植物中的 Pb 主要与不溶性磷酸盐和不溶性草酸盐结合,这有利于减小 Pb 的生物有效性,减轻其对植物的毒害作用^[28]。与对照组相比,植物 Pb 乙醇提取态比例在土壤与大气单独胁迫下均下降

了 10%, 土壤和大气的共同胁迫作用更加明显, LSHA、HALA、LSLA、HSHA 四个处理组 Pb 乙醇提取态比例都下降到只剩 1%。同时植物 Pb 盐酸提取态比例随土壤和大气胁迫浓度增加而提高, 在 HSLA 和 HSHA 处理组达到最大, 为对照组的 3.25 倍。土壤和大气胁迫使得植物中的 Pb 从无机态和水溶态等高活性化学形态向不溶性草酸盐等低毒性化学形态转变, 这可能是由于植物体内含量大量的蛋白质和多糖等物质, 其表面丰富的羟基、羧基、氨基、醛基、巯基等官能团和磷酸盐能为 Pb 离子提供配体, 从而减弱 Pb 在植物体内的迁移能力和毒性^[29-30]。

2.2 土壤与大气胁迫下 Pb 对苋菜幼苗生长的影响

生长参数是评价植物对环境污染响应的最佳指标之一。植物的株高、鲜重、干重在 Pb 胁迫下表现出相似的规律, 大气单独胁迫 (LA、HA 处理组) 对植物的生长表现为促进作用, 其他土壤胁迫和土壤大气共同胁迫处理组均为抑制作用 (表 4)。植物的鲜重和干重在 HSHA 处理组达到最小值, 与对照组相比分别减少了 53.8 mg 和 4.37 mg。植物根长和耐性指数在高浓度土壤胁迫下 (HS、HSLA、HSHA 处理组) 减小 (11%—22%), 大气单独胁迫下 (LA、HA 处理组) 增加 (22%—33%), 其他处理组变化不明显。植物含水率在各实验组间无显著变化。植物对重金属的耐受程度可以通过耐受指数来反映, 当其大于 50% 时说明植物对该重金属有较强的耐受性^[31], 本实验中耐受指数最小值为 77.78%, 说明苋菜幼苗在此 Pb 胁迫环境下生长良好。双因素方差分析结果表明多源胁迫下植物的生长参数 (除含水率外) 主要受到土壤 Pb 浓度的影响, 大气沉降影响不显著 (表 5)。大气单独胁迫下 (LA、HA 处理组) 植物生长参数都高于对照组, 这可能是由于沉降在土壤中的 Pb 含量较低, 对植物生长发育有促进作用。在他人的研究中 Pb 对类芦、中华常春藤和紫茉莉的生长也表现为低浓度促进高浓度抑制作用^[32-34]。HS 与 HA 处理组植物 Pb 含量没有显著性差异, 但 HS 组鲜重远低于 HA 组。这可能是由于 HS 组植物中的 Pb 全部来源于根部从土壤吸收, 并在根部大量累积, 而 HA 组大气沉降中的 Pb 可通过植物叶片吸收更多的储存于地上部分。HS 组高浓度 Pb 对根细胞造成氧化损伤, 影响植物吸收水分和营养元素, 从而抑制植物的生长发育^[35]。

表 4 土壤和大气沉降 Pb 胁迫对苋菜幼苗生长的影响

Table 4 Effects of Pb stress in soil and atmospheric deposition on growth of *Amaranthus tricolor* L. seedlings

处理组 Treatment group	生长参数 Growth parameters					
	根长/cm Root length	株高/cm Plant height	鲜重/mg Fresh weight	干重/mg Dry weight	含水量/% Water content	耐受指数/% Tolerance index
CK	0.90±0.10bc	5.20±0.60abc	74.73±3.96b	7.30±0.22b	90.23±8.03a	100.00bc
LS	1.10±0.15ab	4.90±0.55bc	69.30±4.26b	6.60±0.67b	90.48±10.40a	122.22±6.72ab
HS	0.70±0.05c	3.40±0.35d	39.33±1.81cd	5.13±0.26c	86.95±8.78a	77.78±6.84c
LA	1.10±0.05ab	5.80±0.65ab	99.70±4.79a	9.77±0.23a	90.20±2.53a	122.22±11.86ab
HA	1.20±0.05a	6.40±0.40a	98.63±10.55a	10.47±0.46a	89.39±2.68a	133.33±11.33a
LSHA	1.05±0.10ab	4.20±0.30cd	47.60±4.05c	4.10±0.32cde	91.39±8.32a	116.67±12.95ab
HSLA	0.80±0.05c	4.00±0.30cd	30.67±1.93de	3.83±0.27de	87.50±6.39a	88.89±4.10bc
LSLA	0.90±0.10bc	4.50±0.50bed	40.57±2.52cd	4.23±0.43cd	89.56±9.94a	100.00±9.10bc
HSHA	0.70±0.05c	3.80±0.25cd	20.93±1.21e	2.93±0.25e	85.99±4.64a	77.78±7.47c

数据为平均数±标准差 (n=3), 不同小写字母分别表示各处理之间有显著差异 (P<0.05)

2.3 土壤与大气胁迫下苋菜幼苗对 Pb 的生理响应

植物可溶性蛋白含量在大气单独胁迫 (LA、HA 处理组) 下轻微上升 (2%—7%), 其余处理组都出现了下降 (9%—32%), 其中高浓度土壤胁迫下降较为明显, HS 处理组相比于对照组下降了 32% (图 2)。蛋白质含量的增加是植物应对环境胁迫的防御机制之一, 植物能合成特异性蛋白和多肽物质与 Pb 离子结合, 从而减轻氧化损伤^[36]。高浓度土壤 Pb 胁迫可能会抑制 DNA 的合成, 增加蛋白水解酶的活性, 导致蛋白质含量下降^[37]。活性氧 (如 O₂⁻、·OH 和 H₂O₂) 作为植物叶绿体、线粒体和过氧化物酶体的副产物, 正常情况下受到植物抗氧化系统的高度调节, 但重金属的外源胁迫可能会促使植物细胞产生过量的活性氧, 从而对细胞膜造

成氧化损伤,这是重金属对植物的主要毒性作用^[38]。与对照组相比,植物 H₂O₂ 含量在 Pb 胁迫下都有所上升(20%—98%),其中低浓度土壤胁迫(LS、LSLA、LSHA 处理组)下增加明显(图 2)。高浓度土壤处理组相比于低浓度土壤处理组植物 H₂O₂ 含量有所下降(42%—80%),这可能是因为高浓度土壤 Pb 胁迫增加了植物体内抗氧化酶活性,加速 H₂O₂ 的分解。MDA 是植物细胞膜脂质过氧化产物,是反应生物体过氧化强度和膜系统损害程度的重要指标。它还能与蛋白质游离的氨基反应,引起蛋白分子内和分子间相互作用,导致细胞受损^[39]。相比于对照组,植物 MDA 含量在高浓度土壤胁迫下有所上升(23%—48%),其他处理组变化不明显(图 2),说明高浓度土壤 Pb 胁迫引起植物氧化应激,细胞膜受损。其他研究表明小蓬草和高羊茅草在 Pb 胁迫下也有相似反应^[39-40]。

表 5 苋菜生长参数双因素方差分析结果

Table 5 Results of two-factor analysis of variance for *Amaranthus tricolor* L. seedlings growth parameters

源 Source	土壤 Soil		大气 Air		土壤×大气 Soil×Air	
	F	P	F	P	F	P
根长 Root length	19.96	0.00	1.09	0.38	3.32	0.06
株高 Plant height	15.12	0.00	0.38	0.70	1.15	0.39
鲜重 Fresh weight	132.88	0.00	1.12	0.37	11.37	0.00
干重 Dry weight	162.88	0.00	1.54	0.27	20.45	0.00
含水量 Water conten	0.21	0.81	0.00	1.00	0.01	1.00
耐受指数 Tolerance index	14.66	0.00	0.80	0.48	2.44	0.12

SOD 能将超氧阴离子转化为 H₂O₂ 和 O₂,是植物抗氧化系统的第一道防线,此外 POD 和 CAT 在植物细胞清除 H₂O₂ 中也起重要作用^[41]。在本研究中(图 2),SOD 活性随土壤和大气浓度先增加(29%—34%)后下降(10%—13%),但都高于对照组。POD 活性随土壤和大气浓度上升而增加(16%—50%),在高浓度土壤胁迫(HS、HSLA、HSHA 处理组)下达到最大活性。CAT 活性在 Pb 胁迫下也都有所增加(35%—49%)。其他研究发现 Pb 胁迫对荞麦、印度苋菜和鱼腥草体内抗氧化酶的活性同样具有提高作用^[35,42-43]。Pb 胁迫下植物通过提高三种抗氧化酶活性清除过量的超氧自由基和 H₂O₂ 保护细胞免受活性氧侵害,SOD 活性降低的原因可能是 H₂O₂ 与酶的相互作用或 Pb 离子与其活性位点的结合导致失活^[35]。POD 和 CAT 在 Pb 胁迫下表现出相似的响应模式,说明它们在清除 H₂O₂ 方面可能具有协同效应,从而降低植物的氧化损伤。AsA 含量随土壤和大气浓度增加而上升(25%—69%),相比于大气沉降,土壤胁迫下植物 AsA 含量增加更为显著(图 2)。植物 GSH 含量在土壤与大气单独胁迫下均无明显变化,但土壤与大气共同胁迫对 GSH 含量提升作用显著(40%—71%)(图 2)。AsA 和 GSH 是植物细胞中重要的氧化还原因子,通过清除活性氧调节植物的氧化应激反应,维持氧化还原平衡。AsA 和 GSH 含量的增加可以促进植物细胞 AsA-GSH 循环,加速 H₂O₂ 的清除^[42]。同时,GSH 中的巯基(-SH)作为高效电子供体/受体能与重金属结合形成螯合物。GSH 在植物螯合素(PCs)的合成中也起着重要的作用,植物螯合素可以与重金属结合并以络合物的形式转移到液泡中,降低 Pb 的毒性^[44]。

2.4 土壤和大气 Pb 胁迫与苋菜幼苗响应参数相关性

为进一步研究不同浓度土壤和大气胁迫下植物对 Pb 的累积和响应,对植物 Pb 含量、生长参数和生理指标进行了主成分和 Pearson 相关性分析。如图 3 和表 5 所示,前两个主成分共解释了 80.92% 的总方差,其中 PC1 占 58.58%,PC2 占 22.35%。土壤浓度与植物 Pb、MDA、AsA、GSH 含量和 POD 活性呈显著正相关($P < 0.05$),说明植物体内 Pb 含量随土壤浓度增加,同时植物受到氧化胁迫程度增加,细胞膜受损。植物鲜重、干重、株高与可溶性蛋白含量呈显著正相关($P < 0.05$),说明植物蛋白对其生长发育有重要作用。高、低浓度的大气胁迫对植物的生长都表现为促进作用,这可能是因为大气喷洒 Pb 溶液浓度较低,而低浓度的重金属胁迫能促进植物生长。大气浓度与植物 Pb 含量、生长参数和生理指标相关性较低,说明大气沉降对植物的影

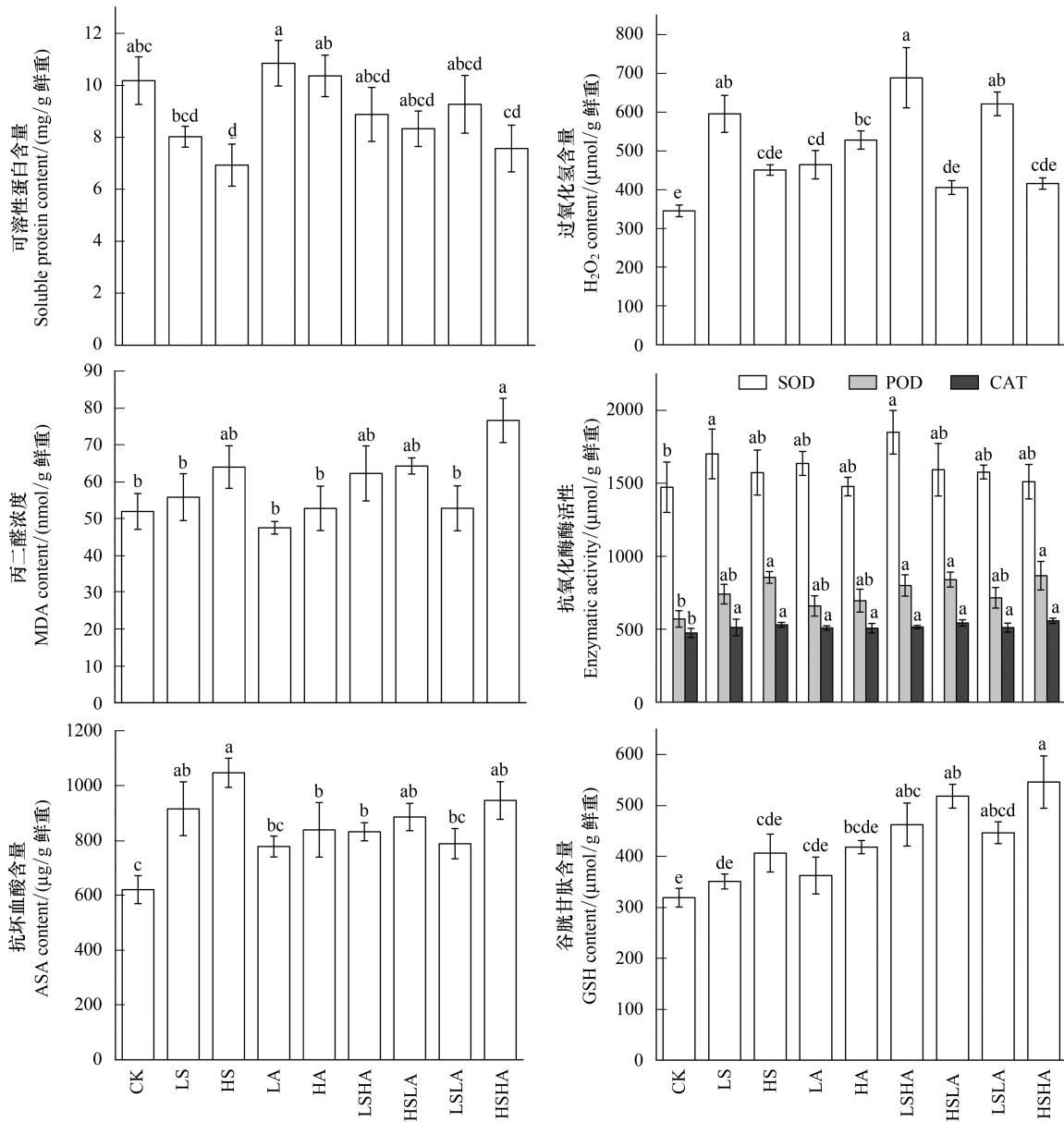


图2 土壤和大气中 Pb 对苋菜幼苗生理指标的影响

Fig.2 Influence of Pb in soil and atmosphere on physiological indexes of *Amaranthus tricolor* L.

数据为平均数±标准差 (n=3), 不同小写字母分别表示各处理之间有显著差异 (P<0.05); MDA: 丙二醛 Malondialdehyde; SOD: 超氧化物歧化酶 Superoxide Dismutase; POD: 过氧化物酶 Peroxidase; CAT: 过氧化氢酶 Catalase; AsA: 抗坏血酸 Ascorbic Acid; GSH: 谷胱甘肽 Glutathione

响较小。主成分分析还区分了不同 Pb 胁迫对植物的影响, 其中 LA、HA 处理组影响相似, LS、LSLA、LSHA 处理组影响相似, HS、HSLA、HSHA 处理组影响相似, 所有处理组均与对照组显著不同。说明土壤和大气 Pb 胁迫对苋菜幼苗的 Pb 含量和生长发育都有显著影响, 其中土壤胁迫的影响较大, 而大气胁迫的影响有限。

3 结论

在模拟的土壤-大气 Pb 胁迫环境下, 苋菜幼苗 Pb 含量不仅受到土壤重金属的影响 (62.64%), 也受到大气胁迫的重要影响 (32.89%)。苋菜幼苗体内的 Pb 通过与不溶性草酸盐结合, 降低 Pb 的迁移能力和毒性, 从而提高植物对 Pb 的耐受程度。苋菜幼苗体内抗氧化酶活性增加和 AsA-GSH 循环同样在植物 Pb 解毒的过程中起到了重要作用。Pb 大气沉降促进了苋菜幼苗的生长和可溶性蛋白的合成, 而土壤 Pb 胁迫都起到了抑

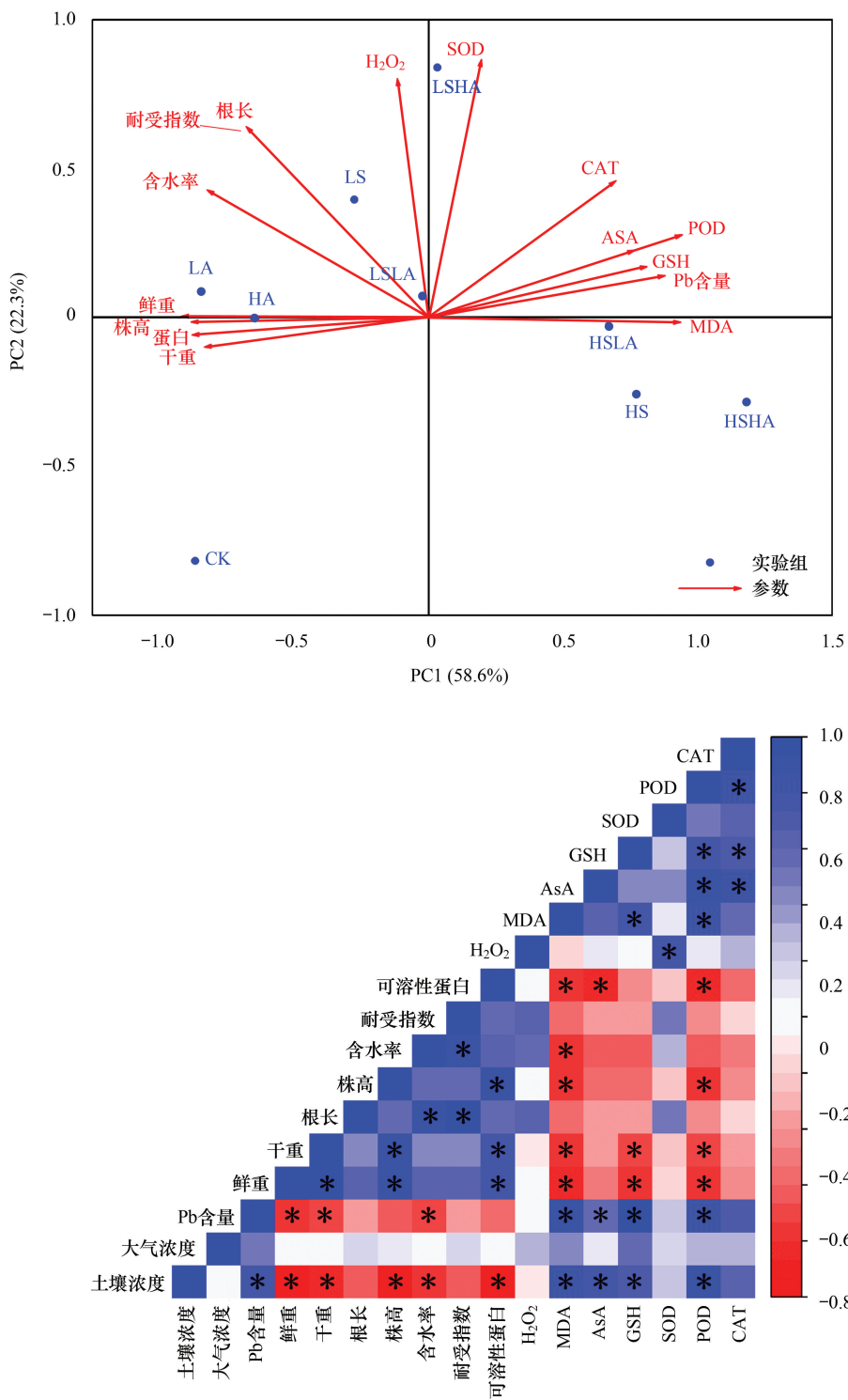


图3 土壤和大气 Pb 胁迫与苋菜幼苗响应参数的主成分和相关性分析

Fig.3 Principal components and correlation analysis of response parameters of *Amaranthus tricolor* L. seedlings to Pb stress in soil and atmosphere

* 表示在 0.05 水平上显著相关

制作用,植物对 Pb 的生理生化响应与土壤浓度有关。由此可见,在矿山、冶炼厂、燃煤电厂等周边区域,农作物环境安全不仅受到土壤 Pb 污染的影响,大气沉降污染也不容忽视。对于这些大气和土壤重金属共同胁迫

的地区,农作物环境风险评价以及污染防治应考虑多介质污染源的影响。

表 6 主成分分析结果

Table 6 Results of principal component analysis

植物响应参数 Plant response parameters	第一主成分 PC1	第二主成分 PC2	第三主成分 PC3	第四主成分 PC4
Pb 含量 Pb content	0.87	-0.15	-0.10	-0.44
鲜重 Fresh weight	-0.91	0.00	-0.40	0.06
干重 Dry weight	-0.82	0.11	-0.54	0.09
根长 Root length	-0.67	-0.70	0.02	-0.14
株高 Plant height	-0.87	0.02	-0.40	-0.21
含水率 Water conten	-0.81	-0.47	0.34	0.03
耐受指数 Tolerance index	-0.67	-0.70	0.02	-0.14
可溶性蛋白 Soluble protein	-0.87	0.06	-0.11	-0.43
过氧化氢 H ₂ O ₂	-0.11	-0.88	0.18	0.12
丙二醛 MDA	0.92	0.02	0.02	-0.14
抗坏血酸 AsA	0.76	-0.25	-0.42	0.43
谷胱甘肽 GSH	0.80	-0.19	-0.09	-0.54
超氧化物歧化酶 SOD	0.19	-0.95	0.01	0.12
过氧化物酶 POD	0.93	-0.30	-0.16	0.05
过氧化氢酶 CAT	0.69	-0.50	-0.47	-0.03
特征值 Characteristic value	8.79	3.35	1.21	1.01
方差百分比 Variance percentage/%	58.58	22.35	8.09	6.72
累积 Accumulation/%	58.58	80.92	89.01	95.73

参考文献 (References):

- [1] Chen J R, Shafi M, Wang Y, Wu J S, Ye Z Q, Liu C, Zhong B, Guo H, He L Z, Liu D. Organic acid compounds in root exudation of Moso Bamboo (*Phyllostachys pubescens*) and its bioactivity as affected by heavy metals. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(20): 20977-20984.
- [2] Bermudez G M A, Jasan R, Plú R, Pignata M L. Heavy metals and trace elements in atmospheric fall-out; their relationship with topsoil and wheat element composition. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 213-214: 447-456.
- [3] Pandey R, Shubhashish K, Pandey J. Dietary intake of pollutant aerosols via vegetables influenced by atmospheric deposition and wastewater irrigation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 76: 200-208.
- [4] Zhou J, Du B Y, Liu H L, Cui H B, Zhang W T, Fan X J, Cui J, Zhou J. The bioavailability and contribution of the newly deposited heavy metals (copper and lead) from atmosphere to rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384: 121285.
- [5] 孙洪欣, 赵纪舒, 付洁, 刘文菊, 王雪君, 高志岭, 杨铮铮. 大气颗粒物对水芹和白菜可食部位铅镉砷累积的影响. *环境科学学报*, 2017, 37(9): 3568-3575.
- [6] 王京文, 谢国雄, 章明奎. 大气沉降对萝卜地上和地下部分铅镉汞砷积累的影响. *土壤通报*, 2018, 49(1): 184-190.
- [7] 杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希. 上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析. *环境科学*, 2018, 39(9): 3987-3994.
- [8] Zhou J, Wang Z W, Zhang X S. Deposition and fate of mercury in litterfall, litter, and soil in coniferous and broad-leaved forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(8): 2590-2603.
- [9] Guo S H, Hu N, Li Q S, Yang P, Wang L L, Xu Z M, Chen H J, He B Y, Zeng E Y. Response of edible amaranth cultivar to salt stress led to Cd mobilization in rhizosphere soil: a metabolomic analysis. *Environmental Pollution*, 2018, 241: 422-431.
- [10] Wang J, Su J W, Li Z G, Liu B X, Cheng G H, Jiang Y H, Li Y C, Zhou S Q, Yuan W Y. Source apportionment of heavy metal and their health risks in soil-dustfall-plant system nearby a typical non-ferrous metal mining area of Tongling, eastern China. *Environmental Pollution*, 2019, 254: 113089.
- [11] Zou R, Wang L, Li Y C, Tong Z H, Huo W M, Chi K Y, Fan H L. Cadmium absorption and translocation of amaranth (*Amaranthus mangostanus* L.) affected by iron deficiency. *Environmental Pollution*, 2020, 256: 113410.
- [12] Liu H L, Zhou J, Li M, Hu Y M, Liu X L, Zhou J. Study of the bioavailability of heavy metals from atmospheric deposition on the soil-pakchoi (*Brassica chinensis* L.) system. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 362: 9-16.
- [13] Fernández-Olmo I, Puente M, Montecalvo L, Irabien A. Source contribution to the bulk atmospheric deposition of minor and trace elements in a northern Spanish coastal urban area. *Atmospheric Research*, 2014, 145-146: 80-91.
- [14] Cui J, Wang W Q, Peng Y, Zhou F W, He D Y, Wang J J, Chang Y J, Yang J, Zhou J, Wang W, Yao D R, Du F F, Liu X J, Zhao H T. Effects of simulated Cd deposition on soil Cd availability, microbial response, and crop Cd uptake in the passivation-remediation process of Cd-

- contaminated purple soil. *Science of the Total Environment*, 2019, 683: 782-792.
- [15] Cao X Y, Tan C Y, Wu L H, Luo Y M, He Q H, Liang Y F, Peng B, Christie P. Atmospheric deposition of cadmium in an urbanized region and the effect of simulated wet precipitation on the uptake performance of rice. *Science of the Total Environment*, 2020, 700: 134513.
- [16] Zhan J, Li T X, Zhang X Z, Yu H Y, Zhao L. Rhizosphere characteristics of phytostabilizer *Athyrium wardii* (Hook.) involved in Cd and Pb accumulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 148: 892-900.
- [17] 阳丹萍. 蔬菜重金属累积特征及生物炭施用影响效应研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [18] 刘智峰, 呼世斌, 宋凤敏, 赵佐平, 李琛, 葛红光. 陕西某铅锌冶炼区土壤重金属污染特征与形态分析. *农业环境科学学报*, 2019, 38(4): 818-826.
- [19] 张浩, 王辉, 汤红妍, 温嘉伟, 徐仁扣. 铅锌尾矿库土壤和蔬菜重金属污染特征及健康风险评价. *环境科学学报*, 2020, 40(3): 1085-1094.
- [20] 柯馨妹, 张凯, 盛立芳. 大气沉降中重金属元素污染研究进展//2014 中国环境科学学会学术年会论文集(第八、九章). 成都: 中国环境科学学会, 2014: 247-254.
- [21] 王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹. 株洲市大气降尘中元素特征及来源分析. *环境科学*, 2017, 38(8): 3130-3138.
- [22] Yang L P, Zhu J, Wang P, Zeng J, Tan R, Yang Y Z, Liu Z M. Effect of Cd on growth, physiological response, Cd subcellular distribution and chemical forms of *Koeleria paniculata*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 160: 10-18.
- [23] 朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 张忠义, 杨曦, 孔静. 铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征. *环境科学*, 2017, 38(7): 3054-3060.
- [24] Yu Y, Fu P N, Huang Q Q, Zhang J S, Li H F. Accumulation, subcellular distribution, and oxidative stress of cadmium in *Brassica chinensis* supplied with selenite and selenate at different growth stages. *Chemosphere*, 2019, 216: 331-340.
- [25] Schreck E, Foucault Y, Sarret G, Sobanska S, Cécillon L, Castrec-Rouelle M, Uzu G, Dumat C. Metal and metalloid foliar uptake by various plant species exposed to atmospheric industrial fallout: mechanisms involved for lead. *Science of the Total Environment*, 2012, 427-428: 253-262.
- [26] Qiu Q, Wang Y T, Yang Z Y, Yuan J G. Effects of phosphorus supplied in soil on subcellular distribution and chemical forms of cadmium in two Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L.) cultivars differing in cadmium accumulation. *Food and Chemical Toxicology*, 2011, 49(9): 2260-2267.
- [27] 李红婷, 董然. 铅在 4 种宿根花卉中的亚细胞分布及迁移转化特点. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2015, 39(4): 57-62.
- [28] Zhao L, Li T X, Yu H Y, Chen G D, Zhang X Z, Zheng Z C, Li J X. Changes in chemical forms, subcellular distribution, and thiol compounds involved in Pb accumulation and detoxification in *Athyrium wardii* (Hook.). *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(16): 12676-12688.
- [29] Zhou C F, Huang M Y, Li Y, Luo J W, Cai L P. Changes in subcellular distribution and antioxidant compounds involved in Pb accumulation and detoxification in *Neyraudia reynaudiana*. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(21): 21794-21804.
- [30] 王梦, 段德超, 徐辰, 于明革, 施积炎. 茶树根细胞壁不同组分对铅的吸附性能及其功能团的傅里叶红外光谱学研究. *生态学报*, 2015, 35(6): 1743-1751.
- [31] 吴彬艳, 邵冰洁, 赵惠恩, 万小铭, 雷梅. 11 种广义景天属植物对 Cd 的耐性和积累特性. *环境科学学报*, 2017, 37(5): 1947-1956.
- [32] 韩航, 陈雪娇, 陈顺钰, 侯晓龙, 刘爱琴, 蔡丽平. 类芦对铅胁迫的生理响应. *森林与环境学报*, 2017, 37(4): 398-404.
- [33] 李琬婷, 黄轩, 程小毛, 黄晓霞. 铅胁迫对中华常春藤生长和生理特性的影响. *云南农业大学学报: 自然科学*, 2019, 34(1): 103-109.
- [34] 薛生国, 朱锋, 叶晟, 王钧, 吴雪娥. 紫茉莉对铅胁迫生理响应的 FTIR 研究. *生态学报*, 2011, 31(20): 6143-6148.
- [35] Venkatachalam P, Jayalakshmi N, Geetha N, Sahi S V, Sharma N C, Rene E R, Sarkar S K, Favas P J C. Accumulation efficiency, genotoxicity and antioxidant defense mechanisms in medicinal plant *Acalypha indica* L. under lead stress. *Chemosphere*, 2017, 171: 544-553.
- [36] Ashraf U, Hussain S, Anjum S A, Abbas F, Tanveer M, Noor M A, Tang X R. Alterations in growth, oxidative damage, and metal uptake of five aromatic rice cultivars under lead toxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 115: 461-471.
- [37] Li X X, Cui X W, Zhang X, Liu W, Cui Z J. Combined toxicity and detoxification of lead, cadmium and arsenic in *Solanum nigrum* L. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389: 121874.
- [38] Zhang Y F, Deng B L, Li Z T. Inhibition of NADPH oxidase increases defense enzyme activities and improves maize seed germination under Pb stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 158: 187-192.
- [39] Li Y, Zhou C F, Huang M Y, Luo J W, Hou X L, Wu P F, Ma X Q. Lead tolerance mechanism in *Conyza canadensis*: subcellular distribution, ultrastructure, antioxidative defense system, and phytochelatins. *Journal of Plant Research*, 2016, 129(2): 251-262.
- [40] Zhong W X, Xie C C, Hu D, Pu S Y, Xiong X, Ma J, Sun L X, Huang Z, Jiang M Y, Li X. Effect of 24-epibrassinolide on reactive oxygen species and antioxidative defense systems in tall fescue plants under lead stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 187: 109831.
- [41] Xu X H, Yang B S, Qin G H, Wang H, Zhu Y D, Zhang K Z, Yang H Q. Growth, accumulation, and antioxidative responses of two *Salix* genotypes exposed to cadmium and lead in hydroponic culture. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(19): 19770-19784.
- [42] Hakeem K R, Alharby H F, Rehman R. Antioxidative defense mechanism against lead-induced phytotoxicity in *Fagopyrum kashmirianum*. *Chemosphere*, 2019, 216: 595-604.
- [43] 李铮铮, 伍钧, 唐亚, 杨刚. 铅、锌及其交互作用对鱼腥草 (*Houttuynia cordata*) 叶绿素含量及抗氧化酶系统的影响. *生态学报*, 2007, 27(12): 5441-5446.
- [44] Estrella-Gómez N E, Sauri-Duch E, Zapata-Pérez O, Santamaría J M. Glutathione plays a role in protecting leaves of *Salvinia minima* from Pb²⁺ damage associated with changes in the expression of SmGS genes and increased activity of GS. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 75: 188-194.