

· 专论与综述 ·

土壤环境中锑的生物毒性评价方法比较

席佳锐, 吴玲玲, 付融冰, 陈玲*

(同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 锑的生物毒性测试可以间接反映锑及其化合物对生物与生态系统的影响。在简要介绍锑在土壤环境中赋存特征的基础上, 综述了不同类型生物对土壤及其浸提液中锑的毒性响应, 比较了不同的生物毒性测试方法在土壤环境中锑污染识别的可行性及适应性, 并提出了考虑土壤性质及老化时间对锑生物毒性评价的影响, 以及使用不同营养等级指示生物(微生物、动物和植物)评价等建议。

关键词: 锑; 生物毒性评价; 土壤环境; 浸提液

中图分类号: X826; X53

文献标志码: A

文章编号: 1006-2009(2021)02-0009-05

Comparison of Biototoxicity Evaluation Methods of Antimony in Soil Environment

XI Jia-rui, WU Ling-ling, FU Rong-bing, CHEN Ling*

(College of Environmental Science and Engineering, State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Biototoxicity test of antimony can reflect the influence of antimony on biology and ecosystem. On the basis of a brief introduction of the characteristics of antimony in the soil environment, the toxicity response of different types of organisms to antimony in the soil and its leachate were reviewed, and the feasibility of different biological toxicity test methods in the identification of antimony pollution in the soil environment were compared. Suggestions were made on the effects of soil properties and aging time on antimony biototoxicity evaluation, and using different nutritional grade indicator organisms (microorganisms, animals and plants) for evaluation.

Key words: Antimony; Biological toxicity evaluation; Soil environment; Leachate

锑(Sb)是第V主族元素,近年来含锑化合物在阻燃剂、催化剂、除草剂等制造业广泛应用^[1]。大量研究证实,锑是一种有毒致癌元素,EPA和EU已将其列为优先控制污染物^[2],在土壤中超过一定含量会对生物产生毒性效应。锑与砷同族,性质相似,是砷和铅的共生污染物,而其生态毒性研究在早期常被忽视^[3]。锑的毒性评价根据受试生物分为微生物、动物和植物,样品形式分为土壤试样和土壤浸提液,以土壤为介质对陆生生物进行毒性测试,以土壤浸提液为介质检测水生生物毒性。锑的毒性大小不仅与其形态有关,还与生物类型和毒性指标有关。今针对土壤中锑的赋存特征和生物毒性评价方法进行综述,比较不同锑化合物的生物毒性大小、不同生物类型对相同锑化合物的敏感

性,以及敏感性毒性指标和不同毒性指标的测试时间长短,为进一步开展土壤中锑的毒性研究和生态风险评价提供技术支撑。

1 土壤中锑的赋存特征

1.1 锑的性质和用途

锑有4种价态(-3、0、+3和+5),在环境中主要以三价和五价存在。三硫化二锑和三氧化二

收稿日期:2020-07-18;修订日期:2021-01-21

基金项目:国家重点研发计划基金资助项目(No. 2019YFC1805205)

作者简介:席佳锐(1996—),女,陕西西安人,在读研究生,主要研究方向为环境监测。

*通信作者:陈玲 E-mail: chenling@tongji.edu.cn

锑在常温下不易溶于水,酒石酸锑钾[Sb(III)]和焦锑酸钾[Sb(V)]因具有水溶性而常用于锑的毒性研究,Sb(III)的毒性约为 Sb(V)的 10 倍。工业用途的锑化合物有酒石酸锑钾、三氧化二锑、焦锑酸钾等,前两种应用最为广泛。据估计,锑的全球使用量有 53% 用于阻燃剂,38% 用于铅合金和铅酸电池,6% 用于 PET 催化剂,不到 3% 用于化学品和陶瓷^[2]。

1.2 土壤中锑的赋存形式

锑主要通过化石燃料燃烧、印染废水排放及汽车刹车片等途径进入城市土壤环境,其形态因土壤 pH 值、氧化还原电位(ORP)等而异。锑在不同 pH 值土壤中的存在形式见图 1。Sb(III)在 2.7 ~ 10.8 的环境 pH 值范围内虽然以 Sb(OH)₃ 的形式出现,但易被铁锰氧化物及土壤有机质等氧化成稳定性更强的 Sb(OH)₆⁻,土壤中的酒石酸锑钾在老化较长时间后也可转变为 Sb(V)。因此,土壤环境中锑的存在形态主要是 Sb(V)^[2],几乎占总锑含量的 90% 以上^[4]。环境中的微生物可将 Sb(V)还原为 Sb(III),在缺氧或碱性条件下,Sb(V)还会被土壤中的一种铁络合物[Fe₄(II)Fe₂(III)(OH)₁₂SO₄·3H₂O]还原为 Sb(III)^[5]。

锑在土壤中主要以生物不可利用态存在^[2],铁锰氧化物的还原溶解可使其释放,土壤 pH 值升高也会促进含锑化合物溶解。添加改良剂可使受锑等金属污染土壤中的生物活性增加 50% 以上^[6],而一些碱性改良剂也可以通过增加土壤 pH 值而增加锑的生物可给性^[7]。总之,土壤中的锑主要以稳定的 Sb(OH)₆⁻ 存在,改良剂的添加、土

壤条件如 pH 值和 ORP 的变化及土壤微生物活动等均可能增加其生物可给性,促使 Sb(V)向 Sb(III)转化,增强锑的生物毒性。

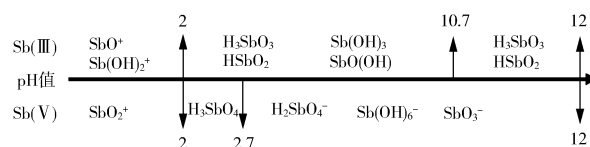


图 1 不同 pH 值下锑的存在形式^[1]

Fig. 1 Antimony speciation at different pH^[1]

2 土壤环境中锑的生物毒性测试方法

生物毒性测试是利用生物的反应来评价污染物的毒性,判定其产生的影响和危害^[8]。目前,锑的毒性研究多为外源性添加锑,土壤试样采用 ISO 规定的人工土壤进行锑毒性研究,土壤条件提供最坏的暴露情况。锑对生物的毒性不仅与其暴露浓度和形态有关,还因受体生物及毒性指标而异。土壤中锑的来源、转化和生物毒性测试方法见图 2。

2.1 毒性指示生物(微生物和动物类)

土壤毒性评价方法有两种样品形式,即土壤浸提液和土壤试样,前者受试生物分为菌类、鱼类和蚤类,后者受试动物为蚯蚓、白符跳、线蚓等陆生无脊椎动物。土壤及其浸提液中的锑化合物对不同微生物和动物的毒性比较见表 1。

由表 1 可见,Sb(III)对大肠杆菌 HB101 等微生物的毒性明显高于 Sb(V)。He 等^[2]报道,Sb(III)比 Sb(V)更易被细胞吸收,土壤浸提液中的真菌种群数量在 Sb(III)胁迫下比在 Sb(V)胁迫

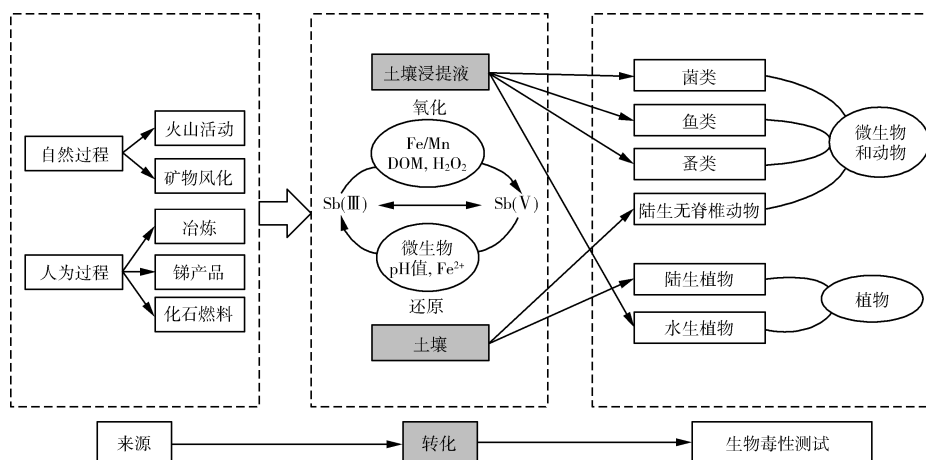


图 2 土壤中锑的来源、转化和生物毒性测试方法

Fig. 2 The sources, conversion and biotoxicity testing methods of Sb in soil

表 1 土壤及其浸提液中的锑化合物对不同微生物和动物的毒性比较

Table 1 Toxicity of antimony compounds in soil and extract liquid to different microorganisms and animals

环境介质	生物类别	指示生物	锑化合物 ^①	毒性指标	EC ₅₀
土壤浸提液	菌类 ^[9-14]	大肠杆菌 HB101	KSbC ₄ H ₄ O ₇ · 1/2H ₂ O	15 min 发光抑制	0.700 mg/L
			KSb(OH) ₆		> 100 mg/L
		枯草芽孢杆菌	C ₈ H ₄ K ₂ O ₁₂ Sb ₂ · 3H ₂ O	12 h 生长抑制	87.0 mg/L
			Sb ₂ O ₃	24 h 生长抑制	145 mg/L
		金黄色葡萄球菌	C ₈ H ₄ K ₂ O ₁₂ Sb ₂ · 3H ₂ O	12 h 生长抑制	101 mg/L
			Sb ₂ O ₃	24 h 生长抑制	324 mg/L
		费式弧菌	Sb ₂ O ₃	30 min 发光抑制	10 mg/L ~ 100 mg/L
		明亮发光杆菌	SbCl ₃	15 min 发光抑制	148 mg/L
	鱼类 ^[13,15-16]	斑马鱼胚胎	KSbC ₄ H ₄ O ₇	24 h LD ₅₀	2.93 mg/L
		斑马鱼	KSbC ₄ H ₄ O ₇	24 h LD ₅₀	66.3 mg/L
日本青鲈		C ₈ H ₄ K ₂ O ₁₂ Sb ₂ · 3H ₂ O	24 h LC ₅₀	261 mg/L	
土壤	蚤类 ^[13,16-17]	大型蚤	含锑离子水溶液	24 h 存活、运动	
		白符跳	C ₈ H ₄ K ₂ O ₁₂ Sb ₂ · 3H ₂ O	28 d 繁殖	307 mg/kg
	陆生无脊椎动物 ^[18-22]			28 d LC ₅₀	703 mg/kg
			KSb(OH) ₆	28 d 繁殖、LC ₅₀	> 8 500 mg/kg
			Sb ₂ (C ₄ H ₄ O ₆) ₃ · 6H ₂ O	28 d 繁殖	169 mg/kg
		蚯蚓	Sb ₂ (C ₄ H ₄ O ₆) ₃ · 6H ₂ O	21 d 繁殖	70 mg/kg
	白丝蚓	C ₈ H ₄ K ₂ O ₁₂ Sb ₂ · 3H ₂ O	28 d LC ₅₀	446 mg/kg	
		Sb ₂ (C ₄ H ₄ O ₆) ₃ · 6H ₂ O	28 d 繁殖	316 mg/kg	

①KSb(OH)₆ 为五价锑,其余均为三价的酒石酸锑钾。

下下降更明显,而真菌不易受到砷的影响。C₈H₄K₂O₁₂Sb₂ · 3H₂O 对枯草芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌的生长抑制比相同价态的 Sb₂O₃ 更强。Baek 等^[9]研究了纳米颗粒对微生物的毒性,结果表明枯草杆菌对锑最敏感,大肠杆菌对铜最敏感。操作简便、快速、灵敏的发光细菌测试法在土壤毒性监测中应用广泛,常用的发光菌为费式弧菌和明亮发光杆菌,可检测土壤浸提液中锑的急性生物毒性。杜显元^[14]研究发现,明亮发光杆菌的发光强弱与土壤淋溶液中的锑含量显著相关,显示出良好的土壤锑毒性指示作用。此外,斑马鱼、大型蚤等与人类相关性较好的国际通用模式生物也常被用于锑的毒性测试,已有报道了酒石酸锑钾、氯化锑等对斑马鱼及其胚胎的毒性影响^[13,15]。岳鑫^[15]研究了酒石酸锑钾对成年斑马鱼和斑马鱼胚胎的毒性,其 96 h LD₅₀ 分别为 66.3 mg/L 和 1.96 mg/L。斑马鱼胚胎不仅敏感性高于成鱼,且具有成本低、能分析多项指标等优点。大型蚤是水蚤属中个体最大的种类,繁殖能力强,已被应用于含锑离子水溶液的毒性研究,并被发现其敏感性高于浮萍^[13,16-17]。

ISO 规定了以蚯蚓、白符跳等陆生无脊椎动物为供试生物的生物毒性测试方法。Lin 等^[21]研究发现,C₈H₄K₂O₁₂Sb₂ · 3H₂O 对白符跳的毒性明显

高于 KSb(OH)₆,表明锑对陆生动物的毒性与菌类相同,均为 Sb(III) 毒性高于 Sb(V)。Baek 等^[20]发现土壤中的含锑污染物不仅对蚯蚓的生存和繁殖有影响,还会减弱其掘穴能力。不同生物对于 Sb₂(C₄H₄O₆)₃ · 6H₂O 的繁殖敏感性响应依次为蚯蚓 > 白符跳 > 线蚓^[18]。而 An 等^[19]发现,土壤中的锑对一种白丝蚓暴露 28 d 的 EC₅₀ 为 446 mg/kg,比蚯蚓更为敏感。

综上,发光细菌可实现含锑浸提液毒性的快速评价,枯草芽孢杆菌可作为微生物类敏感指示生物,斑马鱼胚胎和大型蚤也是常用的指示生物。陆生无脊椎动物中白符跳和蚯蚓对锑比较敏感,毒性指标选择繁殖更为合适。

2.2 毒性指示生物(植物类)

含锑土壤的毒性测试可以选择植物受体,受试植物包括小麦、玉米、水稻等农作物及蔬菜。ISO 发布了包括根系生长抑制、植物出苗和早期生长影响在内的植物毒性试验标准方法^[23-24]。以酒石酸锑钾(C₈H₄K₂O₁₂Sb₂ · 3H₂O)为致毒物质,不同类型盆栽植物的毒性响应结果见表 2。

陆生植物一般采用盆栽实验进行毒性研究。研究表明,Sb(III) 对植物的毒性大于 Sb(V)^[2,25-28],且毒性强弱受植物对锑吸收的影响。Feng 等^[28]研究发现,暴露于 C₈H₄K₂O₁₂Sb₂ ·

表2 盆栽土壤中酒石酸锑钾的植物响应比较

Table 2 The comparison of plants responses of antimony potassium tartrate in potted soil

受试植物	EC ₅₀	毒性指标	抑制率/%
小麦 ^[20]	5 217 mg/kg	5 d 根生长 ^①	50
	6 846 mg/kg	茎生长	
黄瓜	5 890 mg/kg	根生长	
	6 170 mg/kg	茎生长	
白菜	4 658 mg/kg	根生长	
	5 937 mg/kg	茎生长	
绿豆	4 373 mg/kg	根生长	
	4 932 mg/kg	茎生长	
水稻 ^[25]	1 000 mg/L	3 d 根伸长	37.1
		茎长	92
玉米 ^[26]	50 mg/L	13 d 根伸长	35
		根鲜重	21
		根干重	-24
菠菜 ^[27]	200 mg/L ^②	7 d 发芽率	19.45
		12 d 幼苗鲜重	86
番茄 ^[28]		7 d 发芽率	12.23

①生长包括伸长和鲜重;②致毒物质为 $\text{KSbC}_4\text{H}_4\text{O}_7 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ 。

$3\text{H}_2\text{O}$ 的植物比暴露于 $\text{KSb}(\text{OH})_6$ 积累的锑更多。由表2可见,发芽率实验虽然时间短,但敏感性低于根和茎;小麦、水稻等的根伸长抑制比发芽更敏感,玉米根鲜重比根干重更敏感^[20,27,29]。然而, Ma等^[29]研究表明,相比于小麦根伸长,小麦根鲜重抑制是更敏感的指标,其 EC_{50} 仅为 58.6 mg/L,茎长和湿重抑制的 EC_{50} 分别为 280 mg/L 和 4 269 mg/L,而发芽率在 200 mg/L 时只抑制 30%。在小麦、黄瓜、绿豆中,绿豆对锑最敏感。比较表1和表2可知,植物对于锑毒性的敏感性低于微生物和动物,酒石酸锑钾对最敏感植物绿豆的根和茎生长抑制 EC_{50} 分别高达 4 373 mg/kg 和 4 932 mg/kg,且毒性测试时间较长。

相关研究除了锑对植物生长参数的毒性外,还包括敏感与耐锑植物的致毒机理及其抵抗锑的防御机制,相关标志物见表3。锑对小麦、水稻种子萌发过程中 α -淀粉酶活性及高等植物叶绿素的产生有影响^[25,29],且研究表明,锑会使植物产生氧化应激,出现氧化损伤^[26]。因此,研究抗氧化系统中酶类物质和氧化损伤的一些标志物,有助于进一步了解致毒机理及识别锑污染土壤的耐性植物(如苜蓿)^[30]。Feng等^[28]发现一定浓度的锑会增加水稻体内的MDA及地上部的SOD和APX,抑制根中POD和CAT的活性,表明水稻受到了锑胁迫。张东旭^[27]研究发现,5 mg/L 的酒石酸锑钾虽

然可以促进小麦和玉米主根伸长,但根中CAT浓度明显升高,说明此类标志物比根伸长、生物量等指标对锑更敏感。

表3 锑的植物致毒机理相关标志物

Table 3 Biomarkers of plant toxicity mechanism of antimony

受试植物	致毒机理标志物 ^①
小麦 ^[27,29]	α -淀粉酶活性、GSH、CAT、叶绿素
水稻及根系 ^[25,28]	α -淀粉酶活性、CAT、MDA、SOD、POD、APX
苜蓿 ^[31]	CAT、MDA、SOD、POD
玉米 ^[26-27]	CAT、AOEs、叶绿素
番茄、菠菜 ^[27]	CAT、叶绿素
空心菜 ^[32]	叶绿素

①GSH为谷胱甘肽;CAT为过氧化氢酶;MDA为丙二醛;SOD为超氧化歧化酶;POD为过氧化物酶;APX为抗坏血酸过氧化物酶;AOEs为抗氧化酶。

综上,土壤中锑的生物毒性评价结果与所选取的指示生物密切相关。微生物尤其是发光细菌和水生动物如大型蚤、斑马鱼适用于土壤浸提液中锑毒性的快速检测,陆生无脊椎动物蚯蚓和白符跳逃避实验可用于锑污染土壤的毒性检测。植物的耐受性强于动物,发芽率可用于锑毒性的初步评估。通常根伸长指标最敏感,体内抗氧化系统中酶及光合色素等敏感标志物的变化可用于进一步探究锑的胁迫作用及毒害作用机理,为选择适宜的耐锑植物提供一定的科学依据。

3 结语

锑的广泛应用已经造成锑及其化合物不断释放到土壤环境中,而土壤环境的变化又会使锑的形态发生变化,进而影响锑的毒性及生物有效性。建议在使用生物毒性测试方法评价锑的毒性时,考虑土壤性质及老化时间的影响。不同类型受试生物对土壤及其浸提液中锑的敏感性不同,适用于不同情况的毒性评价。建议在对土壤中锑的毒性进行评价时,使用不同营养等级的指示生物(微生物、动物和植物),更准确地反映锑对生物及生态系统的毒性作用。

[参考文献]

- UNGUREANU G, SANTOS S, BOAVENTURA R, et al. Arsenic and antimony in water and wastewater: Overview of removal techniques with special reference to latest advances in adsorption [J]. J Environ Manage, 2015, 151: 326-342.
- HE M C, WANG N N, LONG X J, et al. Antimony speciation in

- the environment; Recent advances in understanding the biogeochemical processes and ecological effects[J]. *J Environ Sci-China*, 2019, 75(1): 14 - 39.
- [3] 金文龙, 吴旻妍, 李勤, 等. 环境敏感地区纺织染整工业锑污染物排放限值探究[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31(6): 68 - 71.
- [4] OORTS K, SMOLDERS E, DEGRYSE F, et al. Solubility and toxicity of antimony trioxide (Sb_2O_3) in soil[J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42(12): 4378 - 4383.
- [5] MITSUNOBU S, TAKAHASHI Y, SAKAI Y. Abiotic reduction of antimony(V) by green rust ($\text{Fe}_4(\text{II})\text{Fe}_2(\text{III})(\text{OH})_{12}\text{SO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) [J]. *Chemosphere*, 2008, 70(5): 942 - 947.
- [6] SANDERSON P, NAIDU R, BOLAN N. Ecotoxicity of chemically stabilised metal(loid)s in shooting range soils[J]. *Ecotox Environ Safe*, 2014, 100: 201 - 208.
- [7] 李季, 黄益宗, 胡莹, 等. 改良剂对土壤Sb赋存形态和生物可给性的影响[J]. *环境化学*, 2015, 34(6): 1043 - 1048.
- [8] 陈奕, 刘惠, 宋立杰, 等. 生物毒性试验在工业退役场地调查中的应用[J]. *环境监测管理与技术*, 2017, 29(2): 59 - 63.
- [9] BAEK Y W, AN Y J. Microbial toxicity of metal oxide nanoparticles (CuO , NiO , ZnO , and Sb_2O_3) to *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, and *Streptococcus aureus* [J]. *Sci Total Environ*, 2011, 409(8): 1603 - 1608.
- [10] AN Y J, KIM M. Effect of antimony on the microbial growth and the activities of soil enzymes [J]. *Chemosphere*, 2009, 74(5): 654 - 659.
- [11] ARUOJA V, POKHREL S, SIHTMAE M, et al. Toxicity of 12 metal-based nanoparticles to algae, bacteria and protozoa [J]. *Environ Sci-Nano*, 2015, 2(6): 630 - 644.
- [12] HSIEH C Y, TSAI M H, RYAN D K, et al. Toxicity of the 13 priority pollutant metals to *Vibrio fischeri* in the Microtox[®] chronic toxicity test [J]. *Sci Total Environ*, 2004, 320(1): 37 - 50.
- [13] ZHAO J L, JIANG Y X, YAN B, et al. Multispecies acute toxicity evaluation of wastewaters from different treatment stages in a coking wastewater-treatment plant [J]. *Environ Toxicol Chem*, 2014, 33(9): 1967 - 1975.
- [14] 杜显元. 石油开采区土壤污染物源解析、毒性及快速检测法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [15] 岳鑫. 锑对斑马鱼的急性毒性效应及抗性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- [16] NAM S H, YANG C Y, AN Y J. Effects of antimony on aquatic organisms (Larva and embryo of *Oryzias latipes*, *Moina macrocarpa*, *Simocephalus mixtus*, and *Pseudokirchneriella subcapitata*) [J]. *Chemosphere*, 2009, 75(7): 889 - 893.
- [17] FJALLBORG B, DAVE G. Toxicity of Sb and Cu in sewage sludge to terrestrial plants (lettuce, oat, radish), and of sludge elutriate to aquatic organisms (*Daphnia* and *Lemna*) and its interaction [J]. *Water Air Soil Poll*, 2004, 155(1/2/3/4): 3 - 20.
- [18] KUPERMAN R G, CHECKAI R T, SIMINI M, et al. Toxicity benchmarks for antimony, barium, and beryllium determined using reproduction endpoints for *Folsomia candida*, *Eisenia fetida*, and *Enchytraeus crypticus* [J]. *Environ Toxicol Chem*, 2006, 25(3): 754 - 762.
- [19] AN Y J, YANG C Y. *Fridericia peregrinabunda* (Enchytraeidae) as a new test species for soil toxicity assessment [J]. *Chemosphere*, 2009, 77(3): 325 - 329.
- [20] BAEK Y W, LEE W M, JEONG S W, et al. Ecological effects of soil antimony on the crop plant growth and earthworm activity [J]. *Environ Earth Sci*, 2014, 71(2): 895 - 900.
- [21] LIN X L, SUN Z J, MA J, et al. Effects of soil properties and long aging time on the toxicity of exogenous antimony to soil-dwelling springtail *Folsomia candida* [J]. *Chemosphere*, 2020, 241: 311 - 318.
- [22] 林祥龙, 孙在金, 陈卫玉, 等. 锑对土壤跳虫 (*Folsomia candida*) 的毒性效应 [J]. *环境科学研究*, 2017, 30(7): 1089 - 1097.
- [23] Standardization I O F. ISO 11269-1 Soil quality-Determination of the effects of pollutants on soil flora-Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2012.
- [24] Standardization I O F. ISO 11269-2 Soil quality-Determination of the effects of pollutants on soil flora-Part 2: Effects of contaminated soil on the emergence and early growth of higher plants [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2012.
- [25] HE M, YANG J. Effects of different forms of antimony on rice during the period of germination and growth and antimony concentration in rice tissue [J]. *Sci Total Environ*, 1999, 243(99): 149 - 155.
- [26] VACULIKOVA M, VACULIK M, SIMKOVA L, et al. Influence of silicon on maize roots exposed to antimony-Growth and antioxidative response [J]. *Plant Physiol Bioch*, 2014, 83: 279 - 284.
- [27] 张东旭. 锑胁迫对作物种子萌发及幼苗生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [28] FENG R W, LEI L, SU J M, et al. Toxicity of different forms of antimony to rice plant: Effects on root exudates, cell wall components, endogenous hormones and antioxidant system [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 711: 111 - 120.
- [29] MA C L, HE M C, ZHONG Q Y, et al. Uptake, translocation and phytotoxicity of antimonite in wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 669: 421 - 430.
- [30] RAJABPOOR S, GHADERIAN S M, SCHAT H. Effects of antimony on enzymatic and non-enzymatic antioxidants in a metallophilous and a non-metallophilous population of *Salvia spinosa* L [J]. *Plant Physiol Bioch*, 2019, 144: 386 - 394.
- [31] CHAI L Y, MUBARAK H, YANG Z H, et al. Growth, photosynthesis, and defense mechanism of antimony (Sb)-contaminated *Boehmeria nivea* L [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2016, 23(8): 7470 - 7481.
- [32] EGODAWATTA L P, HOLLAND A, KOPPEL D, et al. Interactive effects of arsenic and antimony on *Ipomoea aquatica* growth and bioaccumulation in co-contaminated soil [J]. *Environ Pollut*, 2020, 259: 421 - 431.