



不同形态大气铅沉降对茄苗生长和铅积累特征影响

张大庚, 栗杰, 姚忠丽

引用本文:

张大庚, 栗杰, 姚忠丽. 不同形态大气铅沉降对茄苗生长和铅积累特征影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 626–635.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0439>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冬油菜替代种植技术对华北典型镉铅污染农田适用性研究

曹柳, 何孟轲, 杨俊兴, 郑国砥, 郭俊梅, 孟晓飞, 李玉峰

农业资源与环境学报. 2023, 40(2): 261–270 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0222>

施加脱硫石膏对紫色土壤-水稻系统重金属累积的影响

胡翔宇, 向秋洁, 罗伯林, 尚二凤, 木志坚

农业资源与环境学报. 2018, 35(5): 459–466 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0044>

沈抚灌区耕地重金属Cd、Pb的变化特征分析

徐宁, 魏忠义

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 783–791 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0129>

几种有机肥对紫色土Pb有效性和形态的调控效应

李顺奇, 刘洁, 陈杰, 王璐瑶, 柏宏成, 魏世强

农业资源与环境学报. 2019, 36(1): 79–88 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0032>

不同基因型玉米品种对Pb的富集特征

秦榕璘, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 陈建军

农业资源与环境学报. 2016, 33(3): 268–275 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0007>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张大庚, 栗杰, 姚忠丽. 不同形态大气铅沉降对茄苗生长和铅积累特征影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 626–635.

ZHANG D G, LI J, YAO Z L. Effects of Pb deposited from the atmosphere on the growth and Pb accumulation characteristics of eggplant seedlings[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 626–635.

不同形态大气铅沉降对茄苗生长和铅积累特征影响

张大庚, 栗杰, 姚忠丽

(沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 100866)

摘要:为探明不同形态大气沉降Pb对作物幼苗生长和Pb积累的影响,本研究采用盆栽种植试验,研究了PbS、PbSO₄和PbO₂溶液叶面直接沉降和土表沉降对茄苗干质量和植株Pb积累量及迁移率的影响。结果表明,叶面沉降PbO₂降低了茄苗叶片的气孔导度,减少了茄苗根茎叶干质量,PbS、PbSO₄均未显著影响茄苗生长。叶面和土表沉降Pb均能增加茄苗Pb含量,3种形态Pb由叶面向茄苗的迁移率表现为小颗粒PbS(87.01%)>离子态PbSO₄(50.78%)>大颗粒PbO₂(50.44%),由叶向茎的迁移率均低于2%,Pb主要积累在茄苗叶中。3种形态土表沉降Pb由土壤向茄苗的迁移率均低于1%,均未对茄苗生长产生显著影响。研究表明,大气不同形态Pb沉降条件下,小颗粒态Pb更易由叶面进入植物体,离子态Pb更易在植株体内迁移,叶面沉降Pb对茄苗Pb积累贡献较大,土表沉降则相对较小。

关键词: Pb沉降;茄苗;叶沉降;Pb累积;迁移率

中图分类号:X173;S641.1 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2023)03-0626-10 doi: 10.13254/j.jare.2022.0439

Effects of Pb deposited from the atmosphere on the growth and Pb accumulation characteristics of eggplant seedlings

ZHANG Dageng, LI Jie, YAO Zhongli

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 100866, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of Pb deposited from the atmosphere on the growth and Pb accumulation characteristics of eggplant (*Solanum melongena* L.) seedlings. A potted planting simulation test was carried out using eggplant as the test crop. The effects of precipitated Pb on seedling growth and its accumulation and migration characteristics within the eggplant were studied by adding PbS, PbSO₄, and PbO₂ solution to the surface of the leaf and soil. The results showed that both leaf and soil surface settling Pb stress could increase the Pb content of eggplant seedlings. The migration rate of Pb from the leaf to the seedling was PbS (87.01%)>PbSO₄ (50.78%)>PbO₂ (50.44%). The migration rate of Pb from leaf to stem was lower than 2%. Pb primarily accumulated in the eggplant leaves. PbO₂ settling on leaves decreased the stomatal conductance and dry mass of the eggplant seedlings, but PbS and PbSO₄ did not significantly affect their growth ($P<0.05$). The migration rate of Pb deposition from the soil surface to the eggplant seedlings was lower than 1%, which had no significant effect on their growth. Under atmospheric Pb deposition stress, small particle Pb was more likely to enter the plant from the leaf surface, and ionic Pb was more likely to migrate into the plant body. Leaf Pb deposition contributed more to Pb accumulation in the eggplant than soil surface Pb deposition.

Keywords: Pb deposition; eggplant seedling; leaf settlement; Pb accumulation; mobility

收稿日期:2022-07-04 录用日期:2022-08-16

作者简介:张大庚(1975—),女,辽宁凌海人,博士,副教授,主要从事土壤肥力和农业环境与生态研究。E-mail:zhangdageng@syau.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0201004)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2016YFD0201004)

近年来,农业重金属污染引起的农产品安全问题引起人们的广泛关注^[1-2]。土壤重金属积累被认为是农作物吸收重金属的主要来源,研究者针对重金属从土壤向农产品转移的途径、机制等开展了大量研究^[3-5]。但随着大气污染多源化和污染物种类多样化,大气沉降已成为农业地区重金属的重要输入源^[6-7]。据统计,2008—2018年大气沉降对土壤As、Cd、Cr、Hg、Ni和Pb的输入贡献率为50%~93%^[8]。作物不仅可以通过根系,也可以通过叶片吸收重金属^[9]。在工业活动密集区域大气沉降往往成为作物Pb、Cd、As、Hg的主要来源^[6]。通过覆膜和露天对比试验发现大气沉降使大白菜地上部Cd含量增加152.63%,Pb含量增加129.52%^[10]。王京文等^[11]的研究证实了大气沉降对蔬菜地上部分Cd、Pb和Hg等重金属积累有直接作用。

Pb是最常见的“五毒”重金属元素之一,由于其难降解性,在环境中可长期存在^[12],过量积累对人体健康造成危害^[13]。汽车尾气、燃煤燃烧以及各类工业区建设等均可导致大气Pb含量升高^[14],人类活动对区域性及全球性Pb循环的影响大于其他元素。1996—2015年我国大气降尘中Pb均值含量超过《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)一级标准值7.9倍^[15],大气沉降Pb对区域范围内作物生长的影响不容忽视。研究表明,作物对重金属的吸收与其化学形态密切相关,而Pb颗粒物的形态与排放源密切相关,如工业烟气中SO₂含量高,则Pb的排放形态主要是PbSO₄和PbS^[16]。但现有研究大多集中在大气和叶片重金属含量,对重金属在大气颗粒物中的形态关注较少^[17]。因此,本研究以茄子为供试作物,以典型棕壤为供试土壤,通过室内盆栽试验研究了硫化铅(PbS)、二氧

化铅(PbO₂)、硫酸铅(PbSO₄)3种形态Pb在叶面和土表沉降后对茄苗生长的影响及其在茄子植物体的积累迁移特征,旨在为进一步认识大气重金属污染的生态效应、保障农产品安全生产提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

土壤:2020年春季施肥前采自沈阳农业大学后山试验基地(41°49′35″N,123°33′49″E)0~20 cm耕层,为典型棕壤。土样去除砾石和植物残体等物质后自然风干,过2 mm筛备用。供试土壤基本性质如下:pH 4.93,碱解氮98.56 mg·kg⁻¹,有效磷4.6 mg·kg⁻¹,速效钾97.22 mg·kg⁻¹,有机质15.4 g·kg⁻¹,土壤本底Pb含量2.65 mg·kg⁻¹。

作物:紫圆茄(*Solanum melongena* L.),种子购自辽宁富友种业有限公司。

试剂:分析纯PbS(纳米级,水力学直径192 nm)、PbO₂(纳米级,水力学直径630 nm)、PbSO₄,购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

图1为供试PbS、PbO₂和PbSO₄的电镜扫描图,由图可见PbS纳米微粒间较紧密,PbO₂微粒间较分散,PbSO₄可溶于水。

1.2 试验方法与设计

本试验采用盆栽种植方法,在人工气候室中模拟Pb沉降处理,试验设计考虑了大气Pb沉降叶面和土表两种情况。模拟大气沉降Pb量参考了现有大气重金属沉降的研究结果^[18]。

1.2.1 茄子育苗

将紫圆茄种子用清水搓洗,75℃热水浸泡30

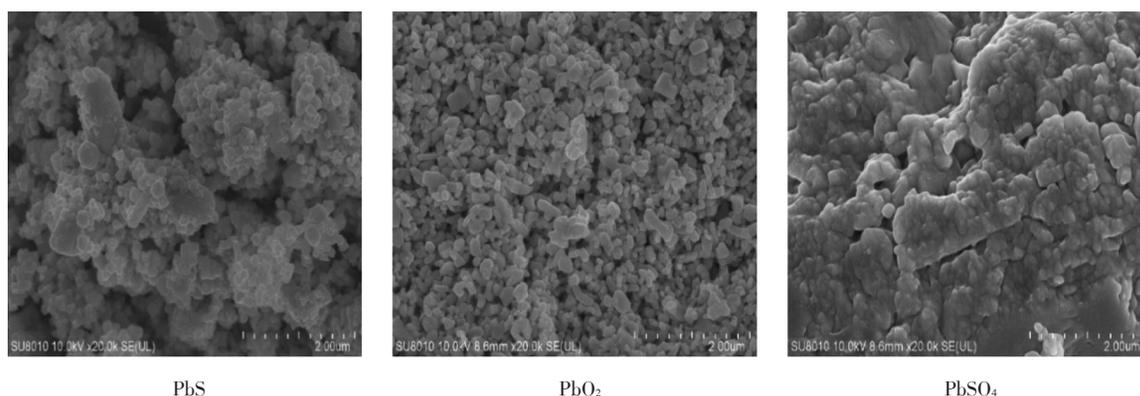


图1 不同形态Pb化合物的扫描电镜图(×10 000倍)

Figure 1 SEM images of different Pb compounds(×10 000 times)

min, 室温浸泡过夜后在育苗盘中播种, 待小苗长到3个叶片后移栽至10 cm×10 cm培养钵, 每个培养钵装土500 g, 种植1株茄苗。

人工气候室温度: 白天25℃, 夜间20℃; 湿度: 70%; 光照时间: 12 h(8:00—20:00)。

1.2.2 叶面沉降Pb试验

试验共设置叶面滴加去离子水(CK)、PbS、PbO₂和PbSO₄ 4个处理, 每个处理20次重复。进行叶面滴加前将PbS、PbO₂、PbSO₄溶液水浴超声均匀, 超声30 min, 功率设置为50 Hz。叶面施加Pb试验: 每天用200 μL移液枪向茄子叶面滴加25 mg·L⁻¹ Pb溶液1.6 mL, 连续滴加5 d, 滴加时注意均匀分散到整个叶面, 试验共21 d。培养钵表面用封口膜覆盖以防止溶液意外滴落。分别在试验的第2、6、11、15、21天收获整株茄苗(破坏性取样), 每个处理每次收获3株。

将采集的整株茄苗用自来水和去离子水洗去附着的灰尘和污染物质, 将样品按照根、茎、叶分成3部分, 将收获的植株进行杀青(105℃杀青30 min)、烘干(75℃烘干72 h)至恒质量, 测定干质量; 将烘干称量后的样品研磨、装袋冷藏保存。

1.2.3 土表沉降Pb试验

试验设置与叶面沉降相同, 共设CK、PbS、PbO₂和PbSO₄ 4个处理, 每个处理20次重复。茄苗移栽3 d后在土壤表面滴加Pb, 每天用200 μL移液枪向土面滴加25 mg·L⁻¹ Pb溶液1.6 mL, 连续施加10 d, 保证均匀分布在土面。考虑到土表Pb沉降量较高, 滴加Pb量设为叶面沉降处理的2倍。分别在试验第10、15、20、25、30天时收获整株茄苗。样品处理方法同上。

1.2.4 土柱淋溶试验

称取土壤样品(过2 mm筛)763 g, 按容重1.25 g·cm⁻³装入有机玻璃淋溶柱(内径6 cm、高25 cm), 土柱高约20 cm。土柱底部铺一层惰性石英砂, 下端用50目滤网封口。淋溶前用0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂从底部对土壤柱进行预润湿, 排出土壤孔隙中空气, 并排出重力水。

试验设置同上, 共设土表滴加CK、PbS、PbO₂和PbSO₄ 4个处理, 每个处理9次重复。每天用200 μL移液枪向土面滴加25 mg·L⁻¹ Pb溶液1.6 mL, 连续滴加10 d, 保持与盆栽试验沉降Pb量相同。每个土柱每次加水100 mL, 每3 d加水1次, 试验结束累积加水量为800 mL。在第10、20、30天时采集土样, 分别采

集0~5、5~10、10~15、15~20 cm土层土样, 风干, 过2 mm筛, 测定不同土层全量Pb。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 茄苗和土壤Pb含量的测定

茄苗植株Pb含量采用混酸(HNO₃-HClO₄)消解, 待测液用PTFE过滤器过滤, 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Vista-MPX美国安捷伦)测定。土壤总Pb含量采用HCl-HNO₃-HClO₄消解, ICP-OES测定。

1.3.2 茄苗光合指标的测定

茄苗叶片叶绿素含量采用手持便携式美国CCM-200 plus叶绿素含量测定仪测定。茄苗叶片光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)采用便携式光合测定仪(LI-co 6400XTR, 美国)测定。茄苗光合指标测定均在上午10时进行, 选取茄苗主茎倒3完全展开叶, 每个处理测定3株茄苗, 每株重复测定3次。

1.3.3 茄苗生长不同时期Pb迁移率的计算

迁移率是评判大气沉降Pb在茄子植株、不同土层及土壤-植株间运移能力的重要指标。

(1) 叶面沉降Pb迁移率:

叶面-植株Pb总迁移率=根茎叶中Pb量(mg·株⁻¹)/沉降Pb总量(mg·株⁻¹)×100%

叶-茎Pb迁移率=根茎中Pb量(mg·株⁻¹)/根茎叶Pb总量(mg·株⁻¹)×100%

茎-根Pb迁移率=根中Pb量(mg·株⁻¹)/茎根Pb总量(mg·株⁻¹)×100%

(2) 地表沉降Pb迁移率:

土壤-植株Pb迁移率=植株Pb量(mg·株⁻¹)/[沉降Pb量(mg·株⁻¹)+土壤Pb总量(mg·株⁻¹)]×100%

根-茎叶Pb迁移率=茎叶Pb量(mg·株⁻¹)/植株Pb总量(mg·株⁻¹)×100%

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2013和SPSS 23.0软件进行数据统计分析和绘图, 采用LSD法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 叶面沉降铅对茄苗生长和Pb积累迁移的影响

2.1.1 茄苗生物量

不同形态沉降Pb对茄苗根茎叶干质量的影响规律相似, 在茄苗移栽第2~15天各形态沉降Pb对茄苗生长表现为抑制作用(表1), 茄苗根茎叶干质量及植株总质量均低于CK。在移栽第2天, 茄苗根茎叶干质量在PbO₂处理下达最小值, 第15天时PbO₂沉降影响仍较大。随着茄苗生长, 各形态沉降Pb对其生长

的影响产生了一定差异。在移栽第21天,PbO₂处理对茄苗生长抑制作用仍较大,与CK相比茄苗总质量降低了19.2%;PbSO₄处理的抑制作用相对较小,茄苗叶根干质量略低于CK;PbS处理对茄苗生长表现为

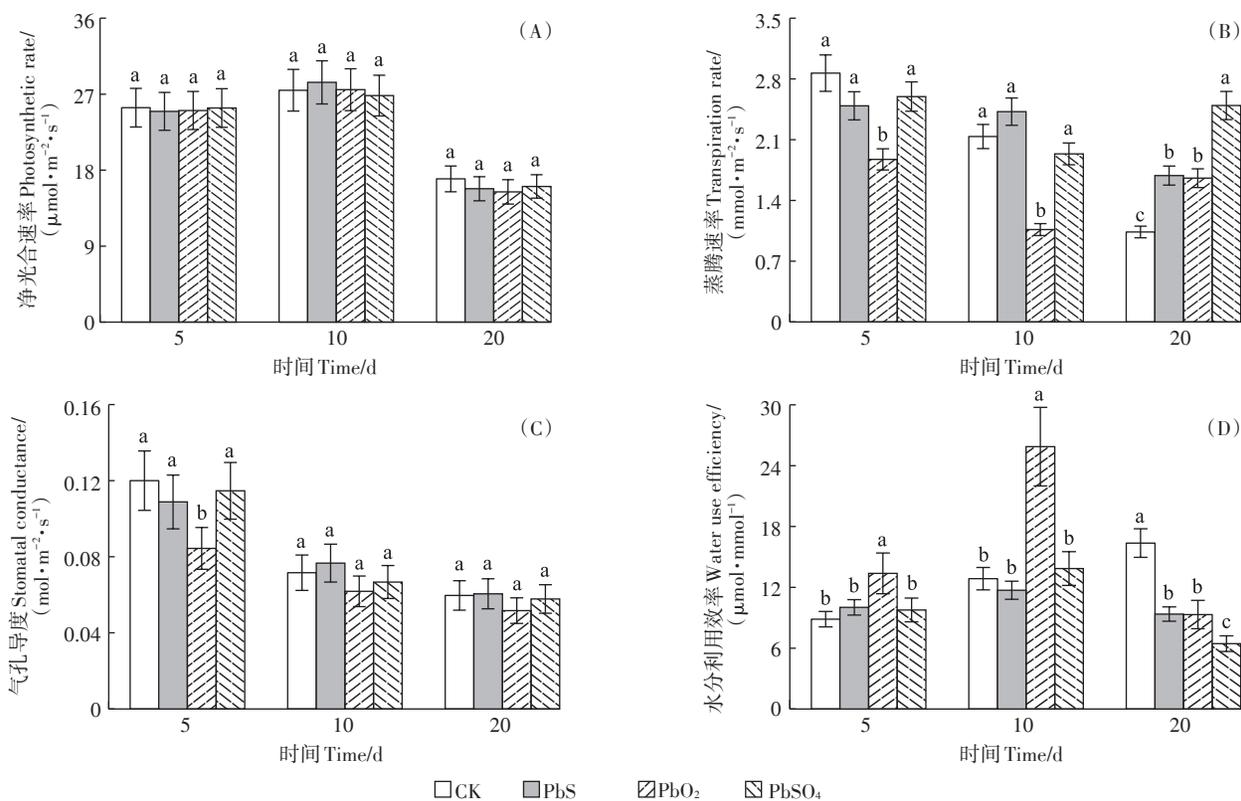
促进作用,与对照相比茄苗叶、茎干质量分别增加了0.13 g和0.04 g,但各处理间的差异不显著。因此,从整个生长过程来看,叶面滴加PbO₂显著抑制了茄苗生长,PbSO₄和PbS对茄苗生长的影响不显著。

表1 叶面沉降Pb对茄子根茎叶干质量的影响(g)
Table 1 Effects of deposited Pb on dry weight of eggplant(g)

| 处理 Treatment | 器官 Organ | 第2天 Day 2 | 第6天 Day 6 | 第11天 Day 11 | 第15天 Day 15 | 第21天 Day 21 |
|-------------------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| CK | 叶 Leaf | 0.60±0.08a | 0.87±0.11a | 1.50±0.20a | 1.85±0.21a | 1.91±0.23a |
| | 茎 Stem | 0.23±0.03b | 0.32±0.04b | 0.71±0.09b | 1.10±0.17b | 1.08±0.13b |
| | 根 Root | 0.13±0.02bc | 0.14±0.02c | 0.24±0.04c | 0.32±0.03d | 0.34±0.03d |
| PbS | 叶 Leaf | 0.47±0.05a | 0.76±0.11a | 1.10±0.15ab | 1.61±0.20a | 2.04±0.25a |
| | 茎 Stem | 0.11±0.02b | 0.24±0.03b | 0.73±0.11b | 0.98±0.14b | 1.12±0.16b |
| | 根 Root | 0.09±0.01b | 0.11±0.01c | 0.17±0.02c | 0.29±0.05d | 0.33±0.03d |
| PbO ₂ | 叶 Leaf | 0.20±0.03b | 0.44±0.05ab | 0.72±0.08b | 1.35±0.17ab | 1.71±0.21ab |
| | 茎 Stem | 0.10±0.01b | 0.22±0.04b | 0.31±0.05c | 0.67±0.08c | 0.75±0.11c |
| | 根 Root | 0.06±0.01b | 0.10±0.01c | 0.15±0.01c | 0.18±0.02d | 0.23±0.02d |
| PbSO ₄ | 叶 Leaf | 0.46±0.05a | 0.51±0.07ab | 0.89±0.13b | 1.08±0.13b | 1.83±0.23ab |
| | 茎 Stem | 0.13±0.02b | 0.28±0.05b | 0.33±0.05c | 0.69±0.09c | 1.35±0.12b |
| | 根 Root | 0.08±0.01b | 0.09±0.01c | 0.16±0.02c | 0.28±0.04d | 0.32±0.04d |

注:表中同列不同小写字母表示在P<0.05水平差异显著。

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



不同小写字母表示处理间在P<0.05水平差异显著。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at P<0.05. The same below.

图2 叶面沉降Pb对茄苗叶片光合特征的影响

Figure 2 Effects of deposited Pb on photosynthetic characteristics of eggplant seedling leaves

2.1.2 茄苗光合特征

在茄苗的生长过程中,净光合速率(Pn)呈先升后降的规律(图2)。在整个培养过程中,各处理间茄子Pn的差异均不显著。移栽第20天PbS、PbO₂和PbSO₄处理Pn较CK分别降低6.89%、9.07%和5.30%。随幼苗生长,CK和PbS处理下茄苗蒸腾速率(Tr)呈持续下降趋势,PbO₂和PbSO₄则均呈先降低后升高规律,其中PbO₂在移栽第5、10天叶片Tr较CK显著降低。移栽第20天,叶面沉降Pb各处理Tr均高于CK。各处理叶片气孔导度(Gs)随茄苗生长呈逐渐降低的趋势。在整个培养过程中PbO₂处理Gs均较低,移栽第5天时与其他处理间差异显著。移栽第20天时各处理Gs差异均不显著。叶片水分利用效率(WUE)反映了植物耗水与其干物质生产之间的关系,为净光合速率与蒸腾速率的比值。在移栽的第5、10天,滴加PbO₂显著增加了茄苗WUE值,滴加PbS和PbSO₄则无显著影响。但在第20天,3种形态沉降Pb处理WUE值均显著降低,表明Pb对水分利用效率具有抑制作用。根据茄苗光合特征指标的变化趋势,3种形态叶面沉降Pb对茄苗生长均产生了一定影响,其中PbO₂的抑制作用相对较大。

2.1.3 茄苗不同器官Pb积累

图3表明,Pb在叶的积累量随幼苗生长呈先快速上升后降低的趋势。在移栽第11天,3种形态Pb处理叶中Pb积累量达峰值,随茄苗生长,叶中Pb积累量逐渐减少,在整个生长过程中,叶面滴加PbS处理叶中Pb积累量均显著高于PbO₂和PbSO₄处理。茎中Pb积累量随茄苗生长变化不同,其中滴加PbS处理变化幅度最大,呈先增加后降低的变化趋势,在移栽11d后茎中Pb积累量与其他处理之间的差异达到显著水平,其他处理则随茄苗生长呈缓慢增加趋势,且变化幅度较小。但茄苗茎中Pb的积累量较少,最高仅为0.60 μg。茄苗根中Pb积累量随其生长呈逐渐增加的趋势,在茄苗移栽第2~11天呈缓慢增加趋势,且各沉降Pb处理之间的差异均不显著。移栽11d后根中Pb积累量呈相对快速增加的趋势,各处理间差异均达到了显著水平,积累量表现为PbS>PbSO₄>PbO₂>CK。与茄苗叶中Pb积累量相比,根中Pb积累量也相对较低,最高仅为1.37 μg·株⁻¹。

2.1.4 茄苗不同器官间Pb迁移

由于茄苗茎和根中Pb积累量较少,因此在计算茄苗不同器官间Pb的迁移率过程中忽略了由根进入土中的Pb量。本研究对不同迁移路径Pb最大迁移

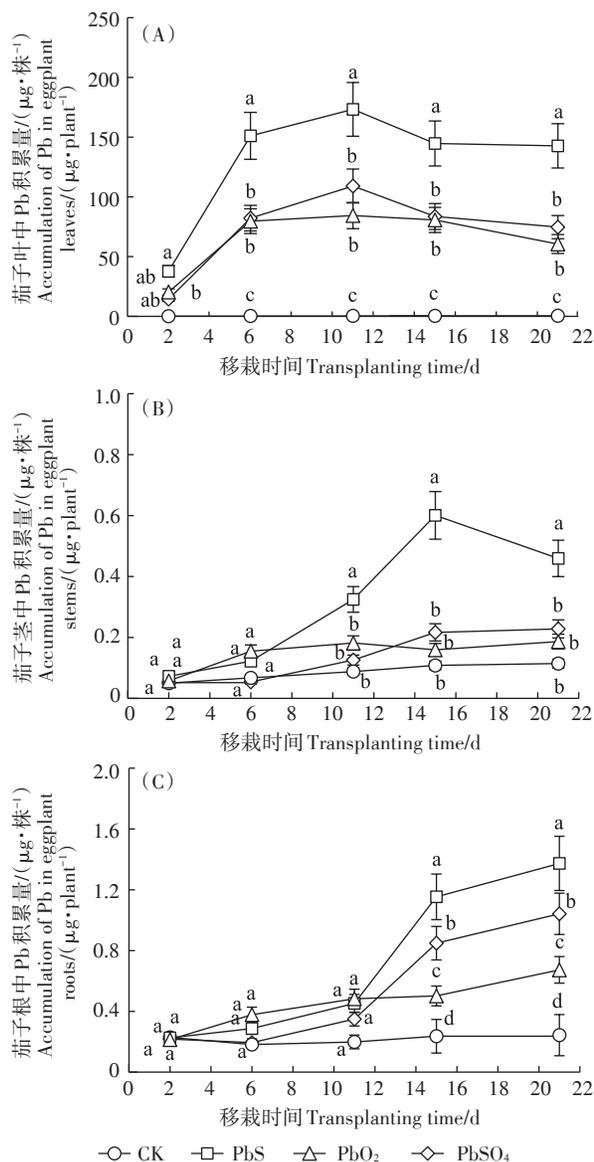


图3 叶面沉降Pb在茄苗叶、茎、根的积累量

Figure 3 Accumulations of deposited Pb in eggplant leaves, stems and roots

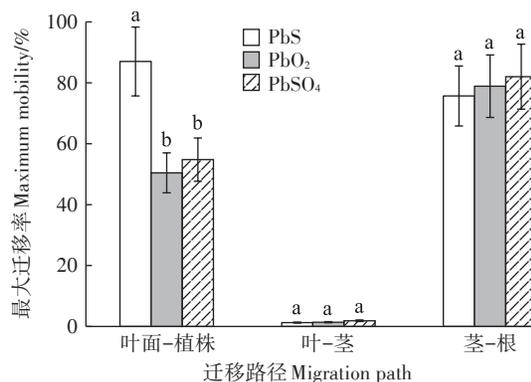


图4 叶面沉降Pb在叶面-植株间的最大迁移率

Figure 4 Maximum mobilities of leaf Pb deposition between leaf surface and plants

率进行了比较(图4),由图可知PbS由叶面进入茄苗植株的迁移率相对较高,最高达到87.01%,与PbO₂和PbSO₄之间的差异达到了显著水平。PbO₂和PbSO₄叶面-植株迁移率分别为50.44%和50.78%,两者差异不显著。

PbS、PbO₂和PbSO₄3种形态Pb由茄苗叶向茎的迁移率仅为1.27%、1.39%和1.87%。Pb由茎向根的迁移率均相对较高,PbS、PbO₂和PbSO₄处理分别为75.69%、78.90%和82.03%。各处理Pb叶-茎和茎-根迁移率的差异均不显著,其中PbSO₄迁移率均相对较高。因此,由叶面进入茄苗的Pb主要积累在叶中,由叶向茎迁移的量极少。虽然PbS最易由沉降的叶面进入茄苗植株,但PbSO₄向下迁移的能力相对更强。

2.2 土表沉降Pb对茄苗生长和铅积累迁移的影响

2.2.1 茄苗生物量

土表沉降各形态Pb对茄苗生长的抑制作用较小,随移栽时间的增加,影响逐渐增强(图5)。移栽第10~20天,添加3种形态Pb对茄苗地上部和根部干质量的影响差异均不显著。在移栽20d后茄苗生长加快,土表沉降Pb对茄苗生长表现出一定的抑制作用。移栽第25天和第30天各形态Pb均降低了茄苗

地上部干质量,但差异仍不显著。3种形态Pb对茄苗根部干质量的影响大于地上部。在移栽第25天,各形态Pb处理茄苗根部干质量均略低于对照,但差异不显著。在移栽第30天各形态Pb处理对茄苗根生长的影响程度增强,其中PbS和PbO₂处理对茄苗根部干质量的影响差异达到了显著水平,表现为CK>PbSO₄>PbO₂>PbS。

2.2.2 茄苗不同器官Pb积累

PbS、PbO₂和PbSO₄3种形态沉降Pb进入土壤后,随茄苗生长,Pb在茄苗地上部和根部逐渐积累(图6)。添加外源沉降Pb各处理茄苗地上部Pb积累量均高于CK,其中PbS处理茄苗地上部Pb积累量最高,在移栽第30天,增幅约为121.4%。PbO₂和PbSO₄处理的变化趋势与PbS相似,但Pb积累量显著低于PbS处理。在移栽第30天,PbS、PbO₂和PbSO₄处理茄苗地上部Pb积累量分别是CK的2.1、1.7倍和1.6倍。

PbS处理茄苗根Pb积累量随茄苗的生长也呈逐渐增加的趋势,在移栽第30天,茄苗根中Pb积累量达到2.26 μg·株⁻¹,是CK处理的3.53倍。添加PbO₂和PbSO₄处理茄苗根中Pb积累量在移栽第10~25天呈增加的趋势,但在第25~30天则略有降低。各处理

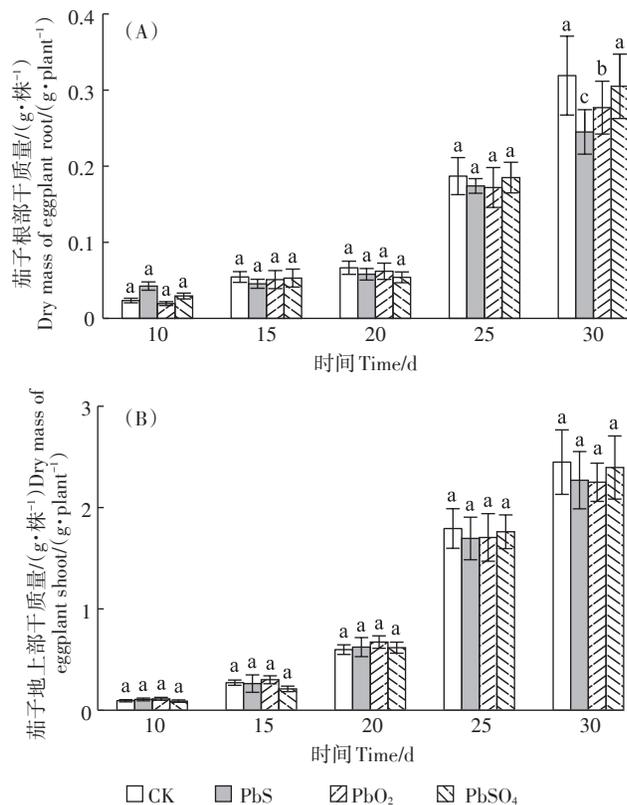


图5 土表沉降Pb对茄苗地上部、根部干质量的影响

Figure 5 Effects of soil Pb deposition on dry mass of eggplant

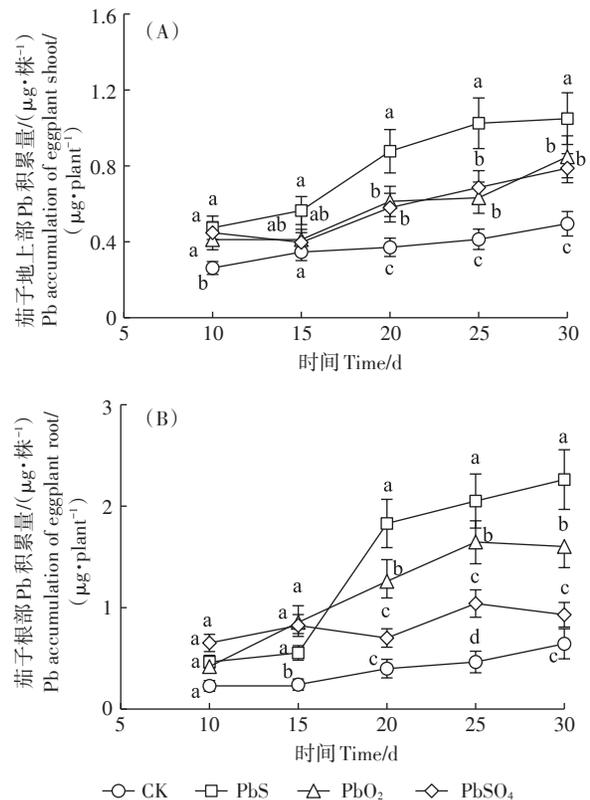


图6 土表沉降Pb在茄苗地上部和根部的积累量

Figure 6 Accumulations of soil Pb deposition in eggplant

土表沉降Pb在茄苗根部的积累量表现为PbS>PbO₂>PbSO₄>CK。

2.2.3 茄苗不同器官Pb迁移

Pb沉降在土表后,与土壤发生相互作用,并产生迁移和转化。随着茄苗生长,其会吸收一定数量土壤Pb,但Pb在土壤-植株间的迁移率很低(图7)。随移栽时间增加,Pb在土壤-植株间的迁移率略有增加。在移栽第30天,添加PbS、PbO₂和PbSO₄处理Pb在土壤-植株间的迁移率分别为0.83%、0.61%和0.43%,处理间无显著差异。

茄苗根部从土壤中吸收3种形态Pb后,部分Pb从根部迁移至茎叶。在移栽第30天,滴加PbSO₄处理茄苗根-茎叶的迁移最高,达到45.9%,PbO₂和PbS处理分别为34.6%和34.7%。各形态Pb在茄苗根-茎叶的迁移率均未超过50%,表明茄子吸收的Pb主要积累在根部。

2.2.4 不同土层间Pb迁移

图8表明,大气Pb沉降在土表后,随淋洗时间的

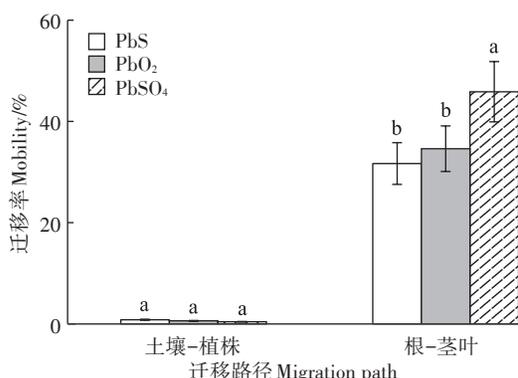


图7 土表沉降Pb在土壤和茄苗植株间的迁移率
Figure 7 Migration of soil Pb deposition between soil and eggplants

增加,各土层迁移率均呈增加趋势,不同处理间的差异则逐渐减小。在淋洗第10天和第20天,PbSO₄由0~5 cm向5~10 cm土层和5~10 cm向10~15 cm土层的迁移率最高,且与PbS和PbO₂处理的差异均达到了显著水平。在淋洗第30天,Pb的迁移率增加,但差异均不显著,其中由0~5 cm向5~10 cm土层的迁移率相对较高,均在40%左右;5~10 cm向10~15 cm土层的迁移率则显著降低,在16.67%~10.12%之间;10~15 cm向15~20 cm土层的迁移率则更低,在9.59%~5.21%之间。因此,外源Pb主要积累在0~10 cm土层。比较3种沉降Pb迁移特性可知,离子态的PbSO₄更易由土表向下层迁移,小颗粒的PbS则更易在土壤中积累。

3 讨论

3.1 叶面沉降Pb对茄苗生长的影响与积累迁移

本研究通过开展3种不同形态Pb叶面沉降对茄苗生长的影响试验发现,PbO₂对茄苗生长表现出显著的抑制作用,PbS和PbSO₄影响不显著。结合茄苗叶片光合特征分析可知,在相同条件下,Tr越大累积的光合产物越多^[19],叶面沉降Pb一定程度上降低了茄苗对光合产物的积累,PbO₂处理影响最大。气孔作为CO₂和水分进出叶片的共同通道,Gs调节着碳固定和水分散失的平衡关系,二者的不同步影响WUE,WUE随Gs的下降反而升高。叶面沉降大颗粒态PbO₂在茄苗移栽过程中降低了叶片的Gs和Pn。因此叶面沉降PbO₂在一定程度上影响了茄苗叶对光合作用所需的CO₂和水分运输,进而影响了光合产物的合成。

Gaibhive等^[20]利用扫描电镜(SEM-EDX)观测发

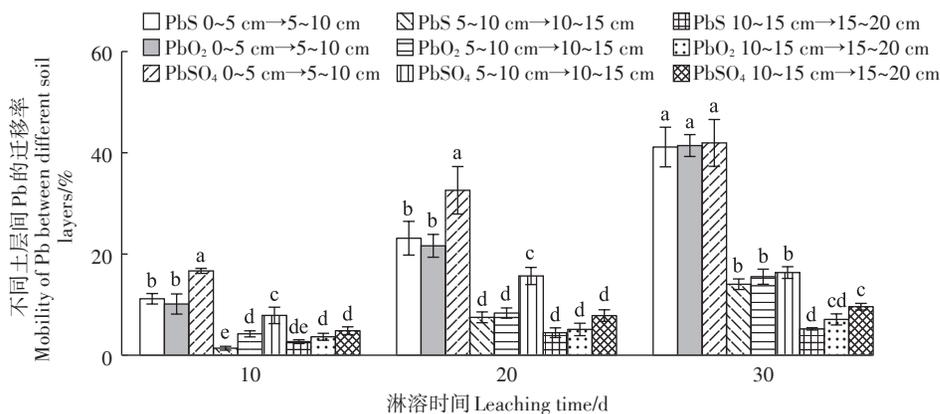


图8 Pb在不同土层中迁移率随时间的变化

Figure 8 Change of Pb mobility in different soil layers over time

现细颗粒物(1~2 μm)直接覆盖在气孔和保卫细胞上,因此沉降颗粒的大小直接影响叶片对重金属的吸收。Birbaum等^[21]的研究也表明细微颗粒可以直接渗透到叶片内部,而大颗粒则被黏附在表面蜡质层上。在3种形态沉降Pb中,PbO₂颗粒最大,直径为630 nm,颗粒间较分散,覆盖在叶片气孔上会降低茄苗叶片Gs,对茄苗叶光合特征产生一定的影响,进而抑制茄苗生长。PbS的直径仅为192 nm,PbSO₄可溶于水,均可直接进入叶片,对光合特征未产生显著影响,因此对茄苗的生长影响相对较小。

Eichert等^[22]的研究表明较小的Cu颗粒(43 nm)可以通过气孔渗透进入蚕豆叶片,而较大Cu颗粒(1.1 μm)则不能。本研究结果表明,沉降Pb的颗粒大小影响了叶面沉降Pb在茄苗植株的积累量。随着叶面Pb的沉降,颗粒较小的PbS处理茄苗叶中Pb积累量和迁移率相对较高,表现为PbS(小颗粒)>PbSO₄(离子态)>PbO₂(大颗粒)。结合上述分析可知,PbS在茄苗叶中的积累量相对较高,但对茄苗生长未产生显著影响。外源Pb进入叶片后,可激活其适应机制,植物为增强对重金属的抗性,进入植物体的Pb等重金属将大量沉积在细胞壁上,当细胞壁结合的重金属离子饱和后,进入细胞内的大部分重金属离子被转运到液泡内储存起来^[23-24]。因此,虽然叶面沉降PbS在茄苗叶中积累量较高,但影响较小。叶面沉降PbO₂在茄苗叶中积累量最低,但对茄苗的生长影响最大,这也进一步证明了PbO₂通过影响光合特征进而影响茄苗的生长。Larue等^[25]的研究认为叶片对重金属的吸收分为脂溶性通道和水溶性通道两种途径,亲水性物质可以通过表皮的气孔和水孔进入表皮,而亲脂物质则吸附在蜡质层上通过角质层扩散进入表皮。PbSO₄具有水溶性,属于亲水性物质,因此也较易通过气孔进入叶片。

由叶面迁移进入植株的Pb主要积累在叶中,向茎、根迁移的量较少,迁移率仅为1.27%~1.87%。Sheng等^[26]发现Pb在表皮细胞中的含量远高于周围细胞和叶肉细胞,说明Pb向叶肉细胞的转运是有限的。Dollard等^[27]研究发现,Pb会以磷酸盐的形式沉淀,因此叶片吸收的Pb极少转运到其他器官,这与本研究结果基本一致。由茎向根迁移过程中离子态PbSO₄的迁移率相对较高,表明离子形态Pb较易在植物体内迁移。

3.2 土表沉降Pb对茄苗生长的影响与积累迁移

土壤Pb污染和根系吸收被认为是作物Pb的主

要来源,针对土壤Pb污染对作物生长和Pb吸收影响的研究已大量开展^[28-29]。本试验中,土表沉降3种形态Pb在移栽30 d后显著降低了茄苗根干质量。随移栽时间的增加,茄苗中Pb积累量呈增加的趋势,但外源Pb在茄苗中的积累量较低。分析可知,沉降在土表的不同形态Pb在土层间的迁移特性不同,其中PbS更易在土层中积累,导致茄苗对Pb的吸收量相对较高,而离子态PbSO₄则易在土层中向下迁移,被吸收的量相对较低。

本试验中,三种形态Pb从土壤到茄苗的迁移率均低于1%。有研究表明,进入土壤的Pb绝大部分会被固定在土壤中或植物根表,只有极少部分Pb能够被吸收进入植物体^[30],这与本试验的研究结果相一致,即进入茄苗的Pb由根系向地上部迁移率均低于50%,主要积累在茄苗根部。研究也表明,土壤中的重金属只有极少数能运输到叶片,植物叶片内重金属主要来源于叶片吸收^[31]。本研究中,PbSO₄处理由根部向地上部的迁移率最高,说明离子态Pb更易在植株体内迁移。

在本试验中,颗粒较小的PbS叶面直接沉降和土表间接沉降处理茄苗根部和地上部Pb积累量均高于PbO₂和PbSO₄。叶面直接沉降PbO₂在根中积累量低于PbSO₄,地表间接沉降PbSO₄处理根部的积累量低于PbO₂,地上部积累量则差异较小。比较茄苗移栽第20天时Pb积累量可知,叶面沉降PbS、PbO₂和PbSO₄处理茄苗地上部Pb积累量是土表沉降的163.2、99.1倍和129.1倍。因此,茄苗叶片中重金属积累主要来源于叶面Pb沉降,其中颗粒较大的PbO₂叶面沉降对Pb积累的影响相对较小。已有的研究也表明,大气源对农产品Pb贡献率为32%~91%,大气沉降对农作物重金属积累有重要的贡献^[3],说明根系对土壤中重金属的吸收不是农产品重金属积累的唯一来源,甚至不是主要的来源,但是在土壤污染较重的情况下其对农作物重金属积累的影响也不可忽视。

4 结论

(1)大气不同形态Pb沉降处理中,小颗粒态PbS更易由叶面进入茄苗植株体内,且主要积累在茄苗叶中,离子态PbSO₄更易在植株体内迁移,叶面沉降PbO₂通过降低叶片气孔导度影响茄苗生长。3种形态土表沉降Pb由土壤向茄苗植株的迁移率均低于1%,Pb积累量较低。

(2)叶面沉降Pb由茄苗叶面向植株的迁移率较

高,对茄苗体内Pb积累的贡献较大,土表沉降Pb对茄苗的生长和Pb积累和迁移的影响则相对较小。

参考文献:

- [1] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(22): 153-159. XU J M, MENG J, LIU X M, et al. Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security[J]. *Proceedings of the Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(22): 153-159.
- [2] 杜锦梦, 易秀, 崔健, 等. 模拟大气镉沉降量对空心菜种子发芽的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 287-299. DU J M, YI X, CUI J, et al. Effects of simulated atmospheric Cd deposition flux on seed germination of water spinach[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2): 287-299.
- [3] BERMUDEZ G M A, JASAN R, PLÁ R, et al. Heavy metals and trace elements in atmospheric fall-out: Their relationship with topsoil and wheat element composition[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 213/214: 447-456.
- [4] CHEN J R, SHAFI M, WANG Y, et al. Organic acid compounds in root exudation of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) and its bioactivity as affected by heavy metals[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(20): 20977-20984.
- [5] 邹素敏, 杜瑞英, 文典, 等. 不同品种蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(4): 714-720. ZOU S M, DU R Y, WEN D, et al. Enrichment characteristics analysis and assessment on heavy metal contamination of different vegetables[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(4): 714-720.
- [6] 翟振, 张艳玲, 杨欣, 等. 大气沉降对烟叶重金属含量的影响及溯源分析[J]. 烟草科技, 2019, 52(6): 9-15. ZHAI Z, ZHANG Y L, YANG X, et al. Effects of atmospheric deposition on heavy metal contents in tobacco leaves and traceability analysis[J]. *Tobacco Science and Technology*, 2019, 52(6): 9-15.
- [7] CUI J, WANG W Q, PENG Y, et al. 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[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 683(9): 782-792.
- [8] HAO P, YA L C, LI P W, et al. Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in north and south China: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660(3): 776-786.
- [9] 孙洪欣, 赵纪舒, 付洁, 等. 大气颗粒物对水芹和白菜可食部位铅镉砷积累的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(9): 3568-3575. SUN H X, ZHAO J S, FU J, et al. Effects of atmospheric particulate matters on accumulation of Pb, Cd, As in edible parts of cress and cabbage[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(9): 3568-3575.
- [10] 章明奎, 刘兆云, 周翠. 铅锌矿区附近大气沉降对蔬菜中重金属积累的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2010, 36(2): 221-229. ZHANG M K, LIU Z Y, ZHOU C. Effect of atmospheric deposition on heavy metal accumulation in vegetable crop near a lead-zinc smelt mine[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci)*, 2010, 36(2): 221-229.
- [11] 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砷积累的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(1): 184-190. WANG J W, XIE G X, ZHANG M K. Effects of atmospheric deposition on the accumulation of lead, cadmium, mercury and arsenic in aboveground and underground parts of radish[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(1): 184-190.
- [12] 刘楚藩, 肖荣波, 黄飞, 等. 土壤与大气双重胁迫下苋菜幼苗对铅的累积与生理响应[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9174-9183. LIU C F, XIAO R B, HUANG F, et al. Accumulation and physiological response of *Amaranthus tricolor* L. seedlings to lead under soil and atmospheric stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(24): 9174-9183.
- [13] 朱臻, 杨相东, 徐章倩, 等. 农作物叶片对大气沉降重金属的吸收转运和积累机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2): 332-345. ZHU Z, YANG X D, XU Z Q, et al. Foliar uptake, translocation and accumulation of heavy metals from atmospheric deposition in crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(2): 332-345.
- [14] 杨静, 陈龙, 刘敏, 等. 上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 3987-3994. YANG J, CHEN L, LIU M, et al. Historical trends of atmospheric Pb and Hg emissions from fossil fuel combustion in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(9): 3987-3994.
- [15] 王梦梦, 原梦云, 苏德纯. 我国大气重金属干湿沉降特征及时空变化规律[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4085-4096. WANG M M, YUAN M Y, SU D C. Characteristics and spatial-temporal variation of heavy metals in atmospheric dry and wet deposition of China[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(11): 4085-4096.
- [16] SAMMUT M, NOACK Y, ROSE J, et al. Speciation of Cd and Pb in dust emitted from sinter plant[J]. *Chemosphere*, 2010, 78(4): 445-450.
- [17] 刘宇, 张银龙. 植物叶面吸附与吸收PM_{2.5}等颗粒物中重金属研究进展[J]. 世界林业研究, 2022, 35(4): 8-13. LIU Y, ZHANG Y L. Research progress in heavy metals in PM_{2.5} and other atmospheric particulate matters retained and absorbed on plant leaf surface[J]. *World Forestry Research*, 2022, 35(4): 8-13.
- [18] 柯馨妹, 张凯, 盛立芳. 大气沉降中重金属元素污染研究进展[C]//中国环境科学学会学术年会论文集. 成都: 中国环境科学学会, 2014: 247-254. KE X S, ZHANG K, SHENG L F. Research progress of heavy metal pollution in atmospheric deposition[C]//Proceedings of the Annual Conference of Chinese Society for Environmental Sciences. Chengdu: Chinese Society of Environmental Sciences, 2014: 247-254.
- [19] 张春芳, 杨劲峰, 韩晓日, 等. 不同品种花生叶片光合特性及产量比较研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(2): 152-157. ZHANG C F, YANG J F, HAN X R, et al. Difference of photosynthetic characteristics and pod yield of two peanut varieties[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2014, 45(2): 152-157.
- [20] GAIBHIVE T, PANDEY S, KIM K H, et al. Airborne foliar transfer of PM bound heavy metals in *Cassia siamea*: A less common route of heavy metal accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 573: 123-130.
- [21] BIRBAUM K, BROGIOLI R, SCHELLENBERG M, et al. No evi-

- dence for cerium dioxide nanoparticle translocation in maize plants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(15):8718-8723.
- [22] EICHERT T, KURTZ A, STEINER U, et al. Size exclusion limits and lateral heterogeneity of the stomatal foliar uptake pathway for aqueous solutes and water-suspended nanoparticles[J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 134(1):151-160.
- [23] 李文学, 陈同斌. 超富集植物吸收富集重金属的生理和分子生物学机制[J]. *应用生态学报*, 2003(4):627-631. LI W X, CHEN T B. Physiological and molecular biological mechanisms of heavy metal absorption and accumulation in hyperaccumulators[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003(4):627-631.
- [24] 王志勇, 廖丽, 袁学军. 重金属铅对草坪植物的毒害研究进展[J]. *草原与草坪*, 2010, 30(2):8-15. WANG Z Y, LIAO L, YUAN X J. Research progress on lead poisoning of turf grasses[J]. *Grassland and Turf*, 2010, 30(2):8-15.
- [25] LARUE C, HIRAM C M, SOBANSKA S. Fate of pristine TiO₂ nanoparticles and aged paint-containing TiO₂ nanoparticles in lettuce crop after foliar exposure[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 273(5):17-26.
- [26] SHENG Y, YU L Y, SHEN Y, et al. Distribution characteristics of phenanthrene in wheat, soybean and maize leaves[J]. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2022, 42(1):123-136.
- [27] DOLLARD G J. Glasshouse experiments on the uptake of foliar applied lead[J]. *Environmental Pollution Series A: Ecological and Biological*, 1986, 40:109-119.
- [28] 寇太记, 侯宇朋, 王俪睿, 等. 夜间增温对小麦吸持铅素的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1):139-147. KOU T J, HOU Y P, WANG L R, et al. Effects of night warming on Pb retention of wheat[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(1):139-147.
- [29] 邹天森, 潘立波, 王慢想, 等. 某废弃铅冶炼企业周边土壤和蔬菜的铅含量及分布特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(4):376-383. ZOU T S, PAN L B, WANG M X, et al. Lead contents and distribution characteristics of soils and vegetables around an abandoned lead smeltery[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(4):376-383.
- [30] CHANDRA R, KUMAR V, TRIPATHI S, et al. Heavy metal phytoextraction potential of native weeds and grasses from endocrine-disrupting chemicals rich complex distillery sludge and their histological observations during *in-situ* phytoremediation[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 111(2):143-156.
- [31] ALTAF R, ALTAF S, HUSSAIN M, et al. Heavy metal accumulation by roadside vegetation and implications for pollution control[J]. *PLoS ONE*, 2021, 16(15):e0249147.