

植物对土壤钼污染的响应及其耐钼机制研究进展

李路, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成

引用本文:

李路, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成. 植物对土壤钼污染的响应及其耐钼机制研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 700–706.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0357>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

镍污染土壤修复技术研究进展

王丙烁, 黄益宗, 王农, 李娟, 龙健

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2392–2402 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0862>

焉耆盆地小麦地土壤重金属污染及生态风险

麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 买托合提·阿那依提, 艾尼瓦尔·买买提

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 921–929 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1633>

土壤微塑料污染及生态效应研究进展

任欣伟, 唐景春, 于宸, 何娟

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1045–1058 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1409>

农田土壤重金属污染评价研究进展

王玉军, 吴同亮, 周东美, 陈怀满

农业环境科学学报. 2017, 36(12): 2365–2378 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1317>

基于风险等级的重金属污染耕地土壤修复技术集成体系研究

王进进, 杨行健, 胡峥, 张玉龙, 徐会娟, 李永涛

农业环境科学学报. 2019, 38(2): 249–256 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1584>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李路, 胡承孝, 谭启玲, 等. 植物对土壤钼污染的响应及其耐钼机制研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 700–706.

LI L, HU C X, TAN Q L, et al. Responses and tolerance mechanisms of plants to molybdenum pollution in soil: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(4): 700–706.



开放科学 OSID

植物对土壤钼污染的响应及其耐钼机制研究进展

李路^{1,2,3}, 胡承孝^{1,3}, 谭启玲^{1,3}, 孙学成^{1,3*}

(1. 华中农业大学资源与环境学院/微量元素研究中心, 武汉 430070; 2. 西藏自治区农牧科学院农业质量标准与检测研究所, 拉萨 850032; 3. 新型肥料湖北省工程实验室, 武汉 430070)

摘要: 钼是植物、动物和微生物必需的微量元素之一, 同时也是一种重金属元素。以往对钼的研究主要关注钼缺乏对农作物产量与品质的影响及危害, 对钼污染导致的生态风险及应对策略研究较少。本文在分析我国土壤钼污染现状及其生态风险的基础上, 综述了钼污染对植物生长发育的影响、钼对植物的毒害阈值及其影响因子, 以及植物对钼污染的耐性机制, 并展望了未来土壤-植物系统钼污染的研究方向, 以期对土壤钼污染的风险管控及修复提供参考。

关键词: 钼; 污染; 生态风险; 毒害阈值; 花青素; 耐性机制

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2022)04-0700-07 doi:10.11654/jaes.2021-0357

Responses and tolerance mechanisms of plants to molybdenum pollution in soil: A review

LI Lu^{1,2,3}, HU Chengxiao^{1,3}, TAN Qiling^{1,3}, SUN Xuecheng^{1,3*}

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University /Micro-element Research Center, Wuhan 430070, China; 2. Institute of Agriculture Product Quality Standard and Testing Research, Tibet Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850032, China; 3. Hubei Provincial Engineering Laboratory for New-Type Fertilizers, Wuhan 430070, China)

Abstract: Molybdenum (Mo) is one of the essential trace minerals and an important strategic resource for plants, animals, and microorganisms. Previous research mainly focused on the effects of Mo deficiency on the yield and quality of crops, while the studies on ecological risks and curative measures have not been reported. In this study, the current position and ecological risk of soil Mo pollution in China were analyzed. The effects of Mo pollution on the growth and development of plants, the toxicity threshold in plants and its influencing factors, and the tolerance mechanisms of plants to Mo pollution were reviewed, and the prospects of Mo contamination in soil-plant systems were proposed. The information is useful in providing guidance for risk control and remediation of soil Mo pollution.

Keywords: molybdenum; pollution; ecological risk; toxicity threshold value; anthocyanin; tolerance mechanism

钼是植物、动物、微生物必需的微量元素之一, 主要通过含钼酶发挥其生理功能, 进而对全球碳、氮、硫循环产生影响, 在生态系统中具有不可或缺的作用^[1]。土壤缺钼可引起农作物减产及品质下降, 有关钼对作物的营养作用及其调控机制的研究报道较

多^[2-4]。近年来, 随着钼矿资源的采掘, 其引发的土壤钼污染问题不容小觑, 过量钼可经食物链传递引发动植物钼中毒症, 诱发人体病害, 如肾结石及痛风症等^[5-7]。然而, 土壤钼污染条件下作物对钼的吸收转运机制、钼对作物的毒害阈值、钼通过食物链向动物或人体迁

收稿日期: 2021-03-24 录用日期: 2021-08-27

作者简介: 李路(1991—), 女, 河南泌阳人, 硕士, 研究实习员, 主要从事植物营养机理研究。E-mail: lianlude@163.com

*通信作者: 孙学成 E-mail: sxcn@mail.hzau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077095); 湖北省重点研发计划项目(2020BCB061); 国家现代农业产业技术体系(CARS-05-02A-13)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(42077095); Key Research and Development Projects of Hubei Province(2020BCB061); National Modern Agricultural Industrial Technology System (CARS-05-02A-13))

移的生态风险等问题尚未受到充分关注。本文在分析我国土壤钼污染现状及其生态风险的基础上,综述了植物对土壤钼污染的响应特征、钼对植物的毒害阈值、植物耐高钼的调控机理等,以期对土壤钼污染的风险管控及修复提供参考。

1 土壤钼污染现状及其生态风险

钼不仅是动植物生长必需的营养元素,同时也是非常重要的战略资源,在钢铁、石油、化工及航空航天等行业被广泛应用^[8],然而钼矿开采技术相对落后,尾矿管理力度不够,导致部分地区产生了相对严重的钼污染事件,如美国科罗拉多州钼矿区、加拿大哥伦比亚地区钼矿区以及我国辽宁省葫芦岛市钼矿区等^[9-12]。我国的钼矿资源大约占世界钼矿资源四分之一,探明储量的大中小型钼矿区共有200多个,广泛分布于河南、陕西、吉林、福建、四川、江西等省^[13-16]。随着钼矿开采的加速,土壤钼污染问题日益显现。表1列出了我国钼矿区及其周边土壤钼污染状况,从污染情况来看,钼矿区及周边土壤钼含量远高于我国土壤钼含量背景值($2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),最高超出几千甚至上万倍,说明文献报道区域土壤钼污染情况相当严重。

表1 我国钼矿区及周边土壤钼污染状况

Table 1 The soil pollution condition of molybdenum mine area and its surrounding in China

地点 Site	土壤性质 Soil property	土壤钼含量 Mo content in soil/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		文献来源 Source
		均值	最大值	
		Average value	Maximum value	
辽宁葫芦岛	矿山山沿	6 105	21 367	[17]
	选矿区	1 143	2 904	
	公路运输区	912	3 987	
	矿山附近山地	721	1 472	
辽宁葫芦岛	矿区农业土壤	1 360	9 017	[18]
辽宁葫芦岛	矿区果园	1 071	—	[5]
辽宁葫芦岛	矿区菜地	710	—	[19]
辽宁葫芦岛	矿区周边耕地	589	—	[20]
辽宁葫芦岛	矿区周边农田	305	—	[21]
广东	矿区土壤	—	857	[22]
江西大余	矿区污灌土壤	25~50	—	[6]
安徽马鞍山	矿区土壤	—	1 007	[23]
福建	矿区周边农田	—	326	[24]
河南洛阳	矿区土壤	784	2 072	[25]
河南	矿区周边农田	—	323	[26]
福建	矿区周边农田	—	2 229	[27]

土壤钼污染可通过食物链的传递威胁动物及人体健康。FERGUSON等^[28]首次发现反刍动物因食用钼含量高的草出现钼中毒症状,自此钼污染问题受到关注,后续研究表明,当饲料钼含量大于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,即可引起动物尤其是反刍动物出现腹泻等中毒症状^[29];我国于1981年在江西大余县发现耕牛因食用钼含量高的饲料而出现中毒现象,随后在陕西、河南等土壤高钼区域均发现牛、羊等动物钼中毒症^[30-31]。过量的钼对人体健康危害极大,能诱发心肌坏死、肾结石、尿道结石及痛风等疾病^[7,32]。土壤钼污染会引起作物可食部位钼水平的大幅提高,从而影响人类对钼的吸收。成年人钼的可耐受最高摄入量(UL)为 $900 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[33],而闽东某钼矿区大米中的钼含量为 $0.58 \sim 12.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,该地区米及其制品的消费量为 $484.6 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,则人体仅通过米及其制品的钼摄入量为 $282.23 \sim 5 858.66 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[24];杨家子钼矿区周边果园水果钼含量均值为 $27.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[34],中国营养学会推荐的水果摄入量为 $200 \sim 350 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,则人体仅通过水果摄入钼量就可达 $5 490.0 \sim 9 607.5 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$,远高于人体每日最高可耐受摄入量^[33]。这些结果表明我国部分钼矿区存在因农田土壤钼污染引发农产品中钼含量过高的风险。但有关钼污染引起的生态风险评价的方法、模型均尚未建立,也缺乏土壤和农产品中钼的限量标准,对产地和农产品中钼含量监测尚不到位,因此对土壤钼污染引起的生态风险及管控策略研究亟待加强。

2 植物对土壤钼污染的响应

虽然土壤钼缺乏会影响作物产量和品质,但过量钼也会对植物生长和发育造成不良影响。钼污染会导致西红柿和甘蓝叶色变紫,大豆叶色变黄^[35-38]; $50 \sim 600 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的钼使菱角根、茎、叶剖面结构发生改变,地下、地上部长度降低^[39]; $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的钼使花椰菜根及胚轴长度、子叶长宽度降低^[40]; $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的钼使野苣荬株高、地上部和根部干物质质量分别降低22.8%、29%、15%^[41]。这些结果说明当钼含量超过一定水平时植物无法正常生长和繁殖^[42]。

钼污染会抑制植物光合作用和蒸腾作用。研究表明,重金属污染易造成植物叶绿体结构破坏,进而影响其光合作用,且降低幅度与胁迫程度相关^[43]。过量钼($1 000 \sim 2 000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)会使冬小麦叶绿素a、b及总量显著增加,a/b显著下降,气孔限制因素使其净光合速率显著下降^[44]; $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的钼使菱角叶绿体上

类囊体排列紊乱,并影响PS II^[38];过量钼导致植物对铁的吸收量下降,进而阻碍叶绿素合成,导致叶绿体变小或解体^[44]。此外,高浓度的钼会导致冬小麦、芦苇和香蒲等植物蒸腾速率的下降,推测可能是由于高浓度的钼抑制植物对水分的吸收及在体内的疏导,也可能是高浓度钼下叶片ABA水平增加而导致气孔关闭^[44-46]。这些结果表明,同大部分重金属一样,过量钼在一定程度上通过影响植物光合作用和蒸腾作用进而影响植物的生长及发育。

钼污染影响植物活性氧代谢和氧化胁迫。植物受高温、重金属污染等环境胁迫时,其活性氧代谢失衡,从而导致自由基的积累和膜透性失常^[47]。高浓度的钼使植物出现膜脂过氧化,造成MDA和二酪氨酸的积累,细胞透性增强,加快细胞、组织的衰老进程,最终影响植物正常生长^[48]。但也有研究指出,随钼含量水平的提高,小麦叶片中的SOD、POD、CAT、APX活性基本稳定,表明其体内活性氧的产生和清除能够大致持平,进而减轻钼污染条件下诱发的大量自由基对植物细胞的伤害^[49],抗氧化酶系统同样在大豆、*Achilla tenuifolia*抵抗过量钼造成的氧化损伤过程中扮演重要角色^[48,50]。这些结果上的分歧可能与钼污染浓度、植物种类、土壤钼的有效性等因素不同有关。

3 钼对植物的毒害阈值及其影响因素

植物体内钼含量比较低,一般情况下不超过 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且植物对钼具有相当强的耐受能力,在体内钼含量大于 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,大多植物并没有表现出相应的中毒症状,而部分植物能够忍受的钼含量高达 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[35]。目前关于钼对植物的毒害阈值尚无明确定义,有研究者建议以植物体出现相应症状时的土壤钼水平或此时的植物钼水平来定义,也有科学家认为以土壤溶液钼含量获得的阈值更加实用^[35,51-52]。

植物不同物种对钼的毒害阈值呈现显著性差异,如表2所示。通常认为相对于单子叶植物,双子叶植物对钼污染的反应更敏感,而芸苔属植物可以耐受更多的钼^[35,58-59]。有学者研究了钼污染条件下4种植物在不同土壤上对钼的耐受能力,发现其耐钼能力由强到弱的顺序为:油菜>黑麦草和西红柿>红花苜蓿,再次验证了芸苔属植物对钼的超强耐性;同一作物在不同土壤上的毒害阈值也有较大差异,这表明土壤特性也会影响植物钼的毒害阈值^[35,60]。一般认为,能够对土壤钼的生物有效性产生影响的各种因子均会影响其毒害阈值,如土壤pH、湿度、有机质含量和钼的

表2 植物中钼的毒害水平

Table 2 Toxic concentrations of Mo in plants

植物物种 Plant species	部位 Plant tissue	钼含量 Mo content/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	文献来源 Literature
马铃薯(<i>Solanum tuberosum</i>)	地上部	100~200	[53]
糖用甜菜(<i>Beta vulgaris</i> L.)	成熟叶片	100~200	[53]
豆类(<i>Phaseolus vulgaris</i>)	生长8周,顶端 部位	500~900	[53]
冬小麦(<i>Triticum aestivum</i> L.)	抽穗期地上部	600~1 000	[53]
花椰菜(<i>Brassica oleracea</i> var. <i>botrytis</i> L.)	花球出现前,整株	640 ^a	[54]
	表现鞭尾症的新叶	390 ^a	[55]
黄瓜(<i>Cucumis sativus</i> L.)	成熟叶片	1 000	[56]
甜瓜(<i>Cucumis melo</i> var. <i>Reticulatus</i>)	成熟叶片	1 000	[56]
生菜(<i>Lactuca saliva</i> L.)	叶球形成期,叶片	277 ^a	[54]
	叶片	100~200	[53]
洋葱(<i>Allium cepa</i> L.)	叶片	640 ^a	[54]
红花苜蓿 (<i>Trifolium pratense</i> L.)	萌芽期,整株	192 ^a	[54]
棉花	叶片	1 585 ^a	[51]
萝卜	叶片	1 800 ^a	[51]
番茄	叶片	1 000~2 000	[47]
矮菜豆	根	710	[52]
	茎	1054	[52]
	叶片	5 920	[52]
春大麦	幼嫩组织	135	[57]
油菜	萌芽后21 d, 地上部	105~4 165 ^b	[35]
		525~6 815 ^c	[35]
红花苜蓿	萌芽后21 d, 地上部	52~974 ^b	[35]
		499~2 058 ^c	[35]
黑麦草	萌芽后21 d, 地上部	60~1 575 ^b	[35]
		863~4 270 ^c	[35]
<i>Achilla tenuifolia</i>	叶片	1 024	[48]
	茎	745	[48]
	根	210	[48]
<i>Erodium ciconium</i> (Jusl) L.	叶片	725	[48]
	茎	411	[48]
	根	72	[48]
<i>Axonopus compressus</i> (Sw.) Beauv	叶片	6 000	[42]

注:a.含量高但对产量无毒害作用;b.地上部产量降低10%;c.地上部产量降低50%。

Note: a. High concentration but not toxic to crop yield; b. The concentration that caused a 10% reduction in shoot yield; c. The concentration that caused a 50% reduction in shoot yield.

赋存形态等^[61];另外,土壤组分中无定型铁和铝氧化物等正价离子、有机无机配体、 SO_4^{2-} 等其他竞争性阴离子均有可能通过影响钼的生物有效性而改变其毒害阈值^[38,60,62-63]。探明不同作物类型钼的毒害阈值

变化规律,不仅可为钼肥的合理施用提供数据支撑,也可作为土壤及农产品中钼的限量标准制定提供理论依据。

4 植物对过量钼的耐性机制

植物对重金属的耐性一般通过两条基本途径实现,一是外部排斥机制,主要通过根系分泌物或根际微生物的螯合、沉淀等作用将重金属滞留在根外,以降低植物对重金属的吸收^[64-66];二是植物体内部的解毒机制,使重金属在植物体内以不具生物活性的解毒形式存在,即通过液泡等细胞器区隔化作用、细胞壁及其组分的吸附固定作用、蛋白质及有机化合物的螯合作用增强植物对重金属的耐性^[67-72]。目前对植物耐钼机制的研究尚处起步阶段。HALE等^[58]研究发现,钼可能是作为一种蓝色化合物(钼-花青素络合物)被隔离在芸苔属植物印度芥菜表皮细胞的液泡中,进一步的研究发现较高的钼水平会导致植物体内花青素积累以应对重金属胁迫^[40]。钼污染条件下植物叶片畸形、茎色变金黄,推测是过量的钼以钼儿茶酚复合体的形式被隔离在液泡中^[50]。钼高积累植物 *Achilla tenuifolia* 和 *Erodium ciconium* (Jusl) L. 在受到钼胁迫时,体内 GSH、Cys 含量大幅升高,推测其可能形成了植物螯合肽等亲和性较高的多肽,并通过与钼的螯合作用减弱过量钼对植物造成的伤害^[48];钼污染条件下,黄豆地下部的 2-oxoarginine、L-nicotine 等代谢物及冬小麦叶片中苹果酸含量均大幅提升,推测其可能与过量钼形成复合物以降低毒害作用^[44,74]。另外,钼的亚细胞分布分析结果表明,冬小麦的可溶性部分和细胞壁是其贮存过量钼的重要部位,且细胞壁在该过程中起主导作用^[49];而大豆中过量钼主要存储在根系及叶片细胞的可溶性部分^[50]。这些研究多集中在植物自身对钼的解毒机制上,然而,植物通过何种外排机制来阻止或限制过量钼进入植物体内目前尚未见文献报道。随着宏基因组、代谢组及基于 X 射线荧光光谱的微区分析等技术的发展,未来在植物耐钼机制的广度和深度上都有望获得新突破。

5 展望

随着钼矿资源的开采,土壤钼污染问题日益显现,其带来的生态风险不容忽视,但目前有关土壤钼污染的生态风险及应对策略研究上存在明显不足,为提高对土壤钼污染的应对能力,未来需加强以下几方面的研究:一是土壤钼污染的风险评估研究,与其他

重金属元素相比,我国土壤钼污染,尤其是钼矿区周围农田土壤钼污染现状不明,钼对不同作物的毒害阈值及其变化规律不清,钼污染生态风险评价的方法、模型尚未建立,土壤及农产品中钼含量无标准可循,因此有必要在全面厘清我国土壤钼污染现状及风险的基础上,制定土壤及农产品中钼的限量标准,强化对土壤钼污染的管控;二是土壤钼污染的修复措施研究,目前场地土壤钼污染修复技术有限,农田土壤钼污染修复技术尚属空白,一旦发生钼污染,如何进行应急处置与修复等问题均不清楚,因此有必要加强土壤钼污染修复理论与技术研究,以应对土壤钼污染;三是钼超积累植物筛选及其耐钼机制研究,目前研究已经证实植物对钼的耐性很强,有些植物可超积累钼并具有修复土壤钼污染的潜力,然而钼超积累植物筛选及其耐钼机制研究也尚处于起步阶段,如何应用高效的筛选方法快速筛选出具有应用价值的钼超积累植物,同时深入分析其耐高钼的生理分子机制,可为土壤钼污染修复的发展提供理论与技术支撑。

参考文献:

- [1] 孙学成. 钼提高冬小麦抗寒力的生理基础及分子机制[D]. 武汉:华中农业大学, 2006: 18-39. SUN X C. Study on physiological basis and molecular mechanism of cold resistance enhanced by molybdenum application in winter wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006: 18-39.
- [2] KAISER B N, GRIDLEY K L, BRADY J N, et al. The role of molybdenum in agricultural plant production[J]. *Annals of Botany*, 2005, 96(5): 745-754.
- [3] YIN K, SHI Z, ZHANG M, et al. Effects of mining on the molybdenum absorption and translocation of plants in the Luanchuan molybdenum mine[J]. *PeerJ*, 2020, 8(5): e9183.
- [4] ZUIDERSMA E I, AUSMA T, STUIVER C, et al. Molybdate toxicity in Chinese cabbage is not the direct consequence of changes in sulphur metabolism[J]. *Plant Biology*, 2020, 22: 331-336.
- [5] 肖振林, 丛俏, 曲蛟. 钼矿区周边果园土壤重金属污染评价及对水果品质的影响[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(23): 5831-5834. XIAO Z L, CONG Q, QU J. Assessment of heavy metal pollution in orchard soil and its effects to fruit quality around molybdenum mining area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(23): 5831-5834.
- [6] 胡国良, 张彩英. 重金属对畜禽的危害及其防控[J]. 生物灾害科学, 2012, 35(1): 93-96. HU G L, ZHANG C Y. Heavy metal toxicity and their prevention and control of livestock and poultry[J]. *Biological Disaster Science*, 2012, 35(1): 93-96.
- [7] 黄佩丽. 微量元素明星——钼[J]. 化学教学, 1998, 2: 13. HUANG P L. The star of trace element: Molybdenum[J]. *Education in Chemistry*, 1998, 2: 13.

- [8] NAMASIVAYAM C. Removal and recovery of molybdenum from aqueous solutions by adsorption onto surfactant-modified coir pith, a lignocellulosic polymer[J]. *Clean - Soil, Air, Water*, 2009, 37(1):60-66.
- [9] 于常武, 许士国, 陈国伟, 等. 水体中钼污染物的迁移转化研究进展[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(9):70-74. YU C W, XU S G, CHEN G W, et al. Literature review of aqueous phase migration and transformation of Mo pollutants[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2008, 30(9):70-74.
- [10] 于常武, 周立岱, 陈国伟. 钼污染物的产生及在环境中的迁移[J]. 化工环保, 2008, 28(5):413-417. YU C W, ZHOU L D, CHEN G W. Generation of molybdenum pollution and its transportation in environment[J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2008, 28(5):413-417.
- [11] 邬光海, 王晨昇, 陈鸿汉. 内蒙古废弃钨钼矿区周围土壤重金属污染生态环境评价及成因分析[J]. 中国地质, 2020, 47(6):1838-1852. WU G H, WANG C S, CHEN H H. Eco-environmental assessment and genetic analysis of heavy metal pollution in the soil around the abandoned tungsten-molybdenum mine area in Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 2020, 47(6):1838-1852.
- [12] 陈忠新. 黑龙江省钼矿发展战略研究[J]. 世界有色金属, 2019(9):103-105. CHEN Z X. Research on development strategy of molybdenum mine in Heilongjiang Province[J]. *World Nonferrous Metals*, 2019(9):103-105.
- [13] 徐乐, 王建平, 余德彪, 等. 我国钼资源产业现状及可持续发展建议[J]. 资源与产业, 2015, 17(3):32-38. XU L, WANG J P, YU D B, et al. Industrial situation and suggestions for sustainable development of China's molybdenum resource[J]. *Resources & Industries*, 2015, 17(3):32-38.
- [14] 张文征, 徐秋生. 我国钼资源开发现状与发展趋势[J]. 矿业快报, 2006(9):1-4. ZHANG W Z, XU Q S. Present situation of molybdenum resource development of our country and development trend[J]. *Express Information of Mining Industry*, 2006(9):1-4.
- [15] 林强, 徐彬. 钼及伴生矿开采洗选项目环境辐射污染防治分析[J]. 资源节约与环保, 2014(10):174-175. LIN Q, XU B. Molybdenum and associated ore mining washing and environmental radiation pollution prevention project analysis[J]. *Energy-saving and Environmental Protection*, 2014(10):174-175.
- [16] 陈远. 遵义钼镍矿下游水体污染及生物毒性研究[J]. 科技创新与应用, 2012(17):121-122. CHEN Y. Study on water pollution and biological toxicity in the downstream of molybdenum and nickel mine in Zunyi[J]. *Technology Innovation and Application*, 2012(17):121-122.
- [17] 曲蛟, 袁星, 王莉莉, 等. 钼矿区土壤中重金属污染状况的分析与评价[J]. 环境保护科学, 2007, 33(2):36-38, 48. QU J, YUAN X, WANG L L, et al. Analysis and assessment on the pollution condition of heavy metals in the soil of molybdenum mine[J]. *Environmental Protection Science*, 2007, 33(2):36-38, 48.
- [18] 冯婧. 钼矿区农业土壤重金属污染调查与评价[J]. 内蒙古环境科学, 2009, 21(4):45-47. FENG J. The heavy metal pollution investigation and evaluation of agricultural soil in molybdenum mining area[J]. *Inner Mongolia Environmental Science*, 2009, 21(4):45-47.
- [19] 丛孚奇, 曲蛟, 丛俏. 磷酸二氢钾-磷酸氢二钠缓冲溶液调控下白菜对钼矿区重金属污染土壤的修复[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(6):24-26. CONG F Q, QU J, CONG Q. Remediation of heavy metals in the soil of molybdenum mine by cabbage under the adjustment of the potassium dihydrogen phosphate-sodium dihydrogen phosphate buffer solution[J]. *Environmental Science and Management*, 2008, 33(6):24-26.
- [20] 石平, 张广新, 付艳华, 等. 葫芦岛市工业废弃地中植物对重金属的利用程度研究[J]. 北方园艺, 2013(9):196-200. SHI P, ZHANG G X, FU Y H, et al. Research on effects of plants on the heavy metal bioavailability in urban derelict land of Huludao City[J]. *Northern Horticulture*, 2013(9):196-200.
- [21] 丛俏, 袁星, 曲蛟, 等. 钼矿区周边农田土壤中重金属污染状况的分析与评价[J]. 中国环境监测, 2009, 25(1):47-51. CONG Q, YUAN X, QU J, et al. The analysis and assessment on the pollution condition of heavy metals in the soil in the farmland around the molybdenum ore areas[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, 25(1):47-51.
- [22] 徐金鸿, 徐瑞松, 夏斌. 广东鼎湖山斑岩钼矿区生物地球化学特征[J]. 地球与环境, 2006, 1:23-28. XU J H, XU R S, XIA B. Biogeochemical characteristics of Mo deposit in Dinghushan, Guangdong[J]. *Earth and Environment*, 2006, 1:23-28.
- [23] 刘颖. 鼎湖钼矿区芒萁的生态变化与光谱特性初探[J]. 地质地球化学, 1989, 6:14. LIU Y. Preliminary study on the ecological change and spectral characteristics of mangoides in Dinghu molybdenum ore area[J]. *Geology-Geochemistry*, 1989, 6:14.
- [24] 贾婷, 贾洋洋, 余淑娟, 等. 闽东某钼矿周边农田土壤钼和重金属的污染状况[J]. 中国环境监测, 2015, 31(1):45-49. JIA T, JIA Y Y, YU S J, et al. Pollution of molybdenum and heavy metals of the soils and rice near a molybdenum mining site in eastern Fujian[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, 31(1):45-49.
- [25] 杨自军. 豫西地区钼的生态分布与绵羊钼中毒防治研究[D]. 南京:南京农业大学, 2007:48-56. YANG Z J. Studies on ecological distribution of molybdenum and control of molybdenum poisoning in sheep in western Henan[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007:48-56.
- [26] 王小庆, 曲洋, 王国峰, 等. 两种有机废弃物对钼矿区农田污染土壤的修复效果研究[J]. 地学前缘, 2019, 26(6):89-94. WANG X Q, QU Y, WANG G F, et al. Molybdenum immobilization efficiency of two kinds of organic waste materials for molybdenum contaminated agricultural soils[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(6):89-94.
- [27] 陈春乐, 王果, 田甜. 基于 TCLP 法的钼矿区周边农田土壤重金属风险评价[J]. 福建农业学报, 2019, 34(4):458-464. CHEN C L, WANG G, TIAN T. Risk assessment based on TCLP extrated heavy metals in soil at farmlands near molybdenum mining area[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 34(4):458-464.
- [28] FERGUSON W S, LEWIS A H, WATSON S J. The teart pastures of Somerset: I. The cause and cure of teartness[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1943, 33(1):44-51.
- [29] 刘鹏, 杨玉爱. 土壤中的钼及其植物效应的研究进展[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4):280-282. LIU P, YANG Y A. Research devel-

- opment of molybdenum in soil and its effects on vegetation[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(4):280-282.
- [30] 李三强, 龙晶. 家畜钼中毒研究简史浅述[J]. 西北农业学报, 1998(1):98-100. LI S Q, LONG J. Study history in animal molybdenum poisoning[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 1998(1):98-100.
- [31] 杨自军, 冉林武, 张才, 等. 绵羊钼中毒的诊治[J]. 中国兽医杂志, 2008, 44(12):37-38. YANG Z J, RAN L W, ZHANG C, et al. Diagnosis and treatment of molybdenum poisoning in sheep[J]. *Chinese Journal of Veterinary Medicine*, 2008, 44(12):37-38.
- [32] VYSKOCIL A. Assessment of molybdenum toxicity in humans[J]. *Journal of Applied Toxicology*, 1999, 19(3):185-192.
- [33] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量速查手册(2013版)[M]. 北京:中国标准出版社, 2014:1-36. Chinese Nutrition Society. Chinese DRIs handbook (2013)[M]. Beijing: Standards Press of China, 2014:1-36.
- [34] 肖振林, 曲蛟, 丛俏. 杨家杖子钼矿区周边果园土壤和水果中重金属污染评价[J]. 吉林农业科学, 2011, 36(3):58-60. XIAO Z L, QU J, CONG Q. Assessment of heavy metal pollution in orchard soil and fruits around molybdenum mining area of Yangjiazhangzi[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2011, 36(3):58-60.
- [35] MCGRATH S P, MICÓ C, ZHAO F J, et al. Predicting molybdenum toxicity to higher plants: Estimation of toxicity threshold values[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(10):3085-3094.
- [36] ROUT G R, DAS P. Rapid hydroponic screening for molybdenum tolerance in rice through morphological and biochemical analysis[J]. *Roslinna Vyroba*, 2002, 48(11):505-512.
- [37] BERGMANN W. Nutritional disorders of plants—development, visual and analytical diagnosis[M]. New York: G. Fischer, 1992.
- [38] GUPTA U C. Soil and plant factors affecting molybdenum uptake by plants[J]. *Molybdenum in Agriculture*, 1997:71-91.
- [39] DATTA J K, KUNDU A, HOSSEIN S D, et al. Studies on the impact of micronutrient (molybdenum) on germination, seedling growth and physiology of bengal grain (*Cicer arietinum*) under laboratory condition[J]. *Asian Journal of Crop Science*, 2011, 3(2):55-67.
- [40] KUMCHAI J, HUANG J Z, LEE C Y, et al. Proline partially overcomes excess molybdenum toxicity in cabbage seedlings grown *in vitro* [J]. *Genetics & Molecular Research Gmr*, 2013, 12(4):5589-5601.
- [41] 赵婷. 灯心草对土壤重金属钒、钛、钼、镍、锰污染的抗性研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2007:11-30. ZHAO T. Study on the resistance of *Juncus effuses* to heavy metal of V, Ti, Mo, Ni and Mn[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007:11-30.
- [42] TOW S W T, ENG Z X, WONG S P, et al. *Axonopus compressus* (Sw.) Beauv.: A potential biomonitor for molybdenum in soil pollution[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, 20(14):1363-1368.
- [43] 江行玉, 赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1):92-99. JIANG X Y, ZHAO K F. Mechanism of heavy metal injury and resistance of plants[J]. *Application and Environmental Science*, 2001, 7(1):92-99.
- [44] 李路, 胡承孝, 谭启玲, 等. 钼污染对冬小麦光合作用特性及产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4):620-626. LI L, HU C X, TAN Q L, et al. Effects of Mo pollution on photosynthesis characteristics and yields of winter wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4):620-626.
- [45] 练建军, 许士国, 韩成伟. 芦苇和香蒲对重金属钼的吸收特性研究[J]. 环境科学, 2011, 32(11):3335-3340. LIAN J J, XU S G, HAN C W. Absorption characteristics of molybdenum by reed and cattail[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(11):3335-3340.
- [46] 曲木子, 谢会成, 李际红. 窄冠黑青杨对重金属复合胁迫的生理响应[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5):8-12. QU M Z, XIE H C, LI J H. Physiological and ecological response of narrow crown black-cathay poplar to stress of mixed heavy metals[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(5):8-12.
- [47] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2003:103-104. LU J L. Plant nutrition[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003:103-104.
- [48] BOOJAR M M A, TAVAKKOLI Z. New molybdenum-hyperaccumulator among plant species growing on molybdenum mine: A biochemical study on tolerance mechanism against metal toxicity[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2011, 34(10):1532-1557.
- [49] 李路. 冬小麦对土壤钼污染的响应及其耐钼机制研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2016:39-50. LI L. The response characteristics of winter wheat to molybdenum pollution in soil and mechanisms for resistance[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016:39-50.
- [50] XU S, HU C, TAN Q, et al. Subcellular distribution of molybdenum, ultrastructural and antioxidative responses in soybean seedlings under excess molybdenum stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 123:75-80.
- [51] ADRIANO D C. Trace elements in the terrestrial environment[M]. New York:Spring-Verlag, 1986.
- [52] WALLACE A, ROMNEY E M, ALEXANDER G V, et al. Phytotoxicity and some interactions of the essential trace metals iron, manganese, molybdenum, zinc, copper, and boron[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1977, 8(9):741-750.
- [53] KLUGE R, ANKE M. Molybdenum toxicity in plants[C]//Proceedings Mengen-und Spurenelemente Arbeitstagung. Leipzig: Institut für Pflanzenernährung, 1983:10-17.
- [54] GUPTA U C, CHIPMAN E W, MACKAY D C. Effects of molybdenum and lime on the yield and molybdenum concentration of crops grown on acid sphagnum peat soil[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1978, 58(4):983-992.
- [55] MACKAY D C, CHIPMAN E W, GUPTA U C. Copper and molybdenum nutrition of crops grown on acid sphagnum peat soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1966, 30(6):755-759.
- [56] LOCASCIO S J. Cucurbits: Cucumber, muskmelon and watermelon [M]//BENNETT W. Nutrient deficiencies and toxicities in crops plants. Minnesota: APS Press, 1993:123-130.
- [57] DAVIS R D, BECKETT P H T, WOLLAN E. Critical levels of twenty potentially toxic elements in young spring barley[J]. *Plant & Soil*, 1978, 49(2):395-408.
- [58] HALE K L, MCGRATH S P, LOMBI E, et al. Molybdenum sequestration in *Brassica* species. A role for anthocyanins?[J]. *Plant Physiology*

- gy, 2001, 126(4):1391-1402.
- [59] 战玉杰, 王修林, 杨茹君, 等. Cd(II)对8种海洋微藻生长的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(4):720-726. ZHAN Y J, WANG X L, YANG R J, et al. Effects of Cd(II) on the growth of 8 species of marine microalgae[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(4):720-726.
- [60] MCGRATH S P, MICO C, CURDY R, et al. Predicting molybdenum toxicity to higher plants: Influence of soil properties[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(10):3095-3102.
- [61] 聂兆君. 两个冬小麦品种吸收利用土壤钼的差异及其调控机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014: 15-24. NIE Z J. Differences in molybdenum uptake, utilization and its regulation mechanism between two winter wheat cultivars[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014: 15-24.
- [62] REDDY K J, GLOSS S P. Geochemical speciation as related to the mobility of F, Mo and Se in soil leachates[J]. *Applied Geochemistry*, 1993, 8:159-163.
- [63] BALASOIU C F, ZAGURY G J, DESCHÊNES L. Partitioning and speciation of chromium, copper, and arsenic in CCA-contaminated soils: Influence of soil composition[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, 280:239-255.
- [64] 娄来清, 沈振国. 金属硫蛋白和植物螯合肽在植物重金属耐性中的作用[J]. 生物学杂志, 2001, 18(3):1-4. LOU L Q, SHEN Z G. The role of metallothioneins and phytochelatins in heavy metal tolerance of plants[J]. *Journal of Biology*, 2001, 18(3):1-4.
- [65] 刘清泉, 陈亚华, 沈振国, 等. 细胞壁在植物重金属耐性中的作用[J]. 植物生理学报, 2014, 50(5):605-611. LIU Q Q, CHEN Y H, SHEN Z G, et al. Roles of cell wall in plant heavy metal tolerance[J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(5):605-611.
- [66] 傅晓萍, 豆长明, 胡少平, 等. 有机酸在植物对重金属耐性和解毒机制中的作用[J]. 植物生态学报, 2010, 34(11):1354-1358. FU X P, DOU C M, HU S P, et al. A review of progress in roles of organic acids on heavy metal resistance and detoxification in plants[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(11):1354-1358.
- [67] 谭万能, 李志安, 邹碧. 植物对重金属耐性的分子生态机理[J]. 植物生态学报, 2006, 30(4):703-712. TAN W N, LI Z A, ZOU B. Molecular mechanisms of plant tolerance to heavy metals[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(4):703-712.
- [68] 孙瑞莲, 周启星. 高等植物重金属耐性与超积累特性及其分子机理研究[J]. 植物生态学报, 2005, 29(3):497-504. SUN R L, ZHOU Q X. Heavy metal tolerance and hyperaccumulation of higher plants and their molecular mechanisms: A review[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(3):497-504.
- [69] CHOPPALA G, SAIFULLAH, BOLAN N, et al. Cellular mechanisms in higher plants governing tolerance to cadmium toxicity[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2014, 33(5):374-391.
- [70] 袁祖丽, 孙晓楠, 刘秀敏. 植物耐受和解除重金属毒性研究进展[J]. 生态环境, 2008, 17(6):2494-2502. YUAN Z L, SUN X N, LIU X M. Advance for heavy metal tolerance and detoxification research in plants[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6):2494-2502.
- [71] CHEN G, LIU Y, WANG R, et al. Cadmium adsorption by willow root: The role of cell walls and their subfractions[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(8):5665-5672.
- [72] KRZESŁOWSKA M. The cell wall in plant cell response to trace metals: Polysaccharide remodeling and its role in defense strategy[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2011, 33(1):35-51.
- [73] WARINGTON K. The influence of high concentrations of ammonium and sodium molybdates on flax, soybean and peas grown in nutrient solutions containing deficient or excess iron[J]. *Annals of Applied Biology*, 2010, 43(4):709-719.
- [74] XU S, HU C, HUSSAIN S, et al. Metabolomics analysis reveals potential mechanisms of tolerance to excess molybdenum in soybean seedlings[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 164:589-596.

(责任编辑:宋潇)