



移动扫码阅读

杨倩,王方园,申艳冰.砷、汞对植物毒性影响及其迁移富集效应探讨[J].能源环境保护,2020,34(2):87-91.

YANG Qian,WANG Fangyuan,SHEN Yanbing.Study on the effects of arsenic and mercury on phytotoxicity and their migration and enrichment effects[J].Energy Environmental Protection,2020,34(2):87-91.

砷、汞对植物毒性影响及其迁移富集效应探讨

杨倩,王方园*,申艳冰

(浙江师范大学地理与环境科学学院,浙江金华321000)

摘要:介绍了自然环境中砷、汞的污染来源与污染现状,探讨了砷、汞对植物生长发育、光合作用和抗氧化能力的影响;为了缓解砷、汞对植物的毒害作用,可以添加新一代植物激素、营养元素和改良剂。分析发现,植物对不同浓度砷和汞的敏感程度并不相同,可利用特定植物的富集作用进行环境修复。当前研究主要集中于植物对砷、汞的吸收和转运生理机制,今后还需要加强对超积累植物分子基础的探索。

关键词:砷;汞;植物;毒害;迁移富集

中图分类号:X503.23

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2020)02-0087-05

Study on the effects of arsenic and mercury on phytotoxicity and their migration and enrichment effects

YANG Qian,WANG Fangyuan*,SHEN Yanbing

(College of Geography and Environmental Science,Zhejiang Normal University,Jinhua 321000,China)

Abstract:The sources and status of arsenic and mercury pollution in natural environment were introduced.The effects of arsenic and mercury on plant growth,photosynthesis and antioxidant capacity were discussed.In order to alleviate the toxic effects of arsenic and mercury on plants,a new generation of plant hormones,nutrients and amendments can be added.It is concluded that different plants have different sensitivities to mercury and arsenic,and the enrichment of specific plants can be used for environmental restoration.The current research mainly focuses on the physiological mechanisms of plant absorption and transport of arsenic and mercury.It is necessary to further explore the molecular basis of hyperaccumulated plants.

Key Words:Mercury;Arsenic;Plant;Poison;Migration and enrichment

0 引言

随着工农业生产的快速发展,人为活动干预的加强导致湖泊、河流、土壤和地下水中有毒有害污染物日益增多,在诸多污染元素中砷、汞的危害尤为严重,不仅剧毒还难降解,易移动,毒性持久,而且比其他重金属更容易在植物中积累^[1],当在植物中积累到一定程度,就可以通过干扰细胞正常的代谢途径及物质在细胞中的运输过程,致使

植物生理功能紊乱,营养失调,抑制其生长发育,并通过食物链威胁人类健康。目前,已有很多有关植物受砷、汞危害和对砷、汞富集的研究,主要包括对植物的光合作用、抗氧化酶活性、细胞膜透性以及筛选砷汞超富集植物等方面研究。本文综述了砷、汞对植物的生长发育毒性影响及植物在生态修复中的运用研究进展,不仅为科学评估砷汞胁迫下植物生长状况提供理论依据,而且对整治修复砷、汞污染的土壤及水体有着重要的现实

收稿日期:2019-12-18

第一作者简介:杨倩(1994-),女,甘肃庆阳人,硕士研究生在读,主要从事水污染控制与生态修复研究。E-mail:847614631@qq.com

通讯作者简介:王方园(1966-),女,浙江东阳人,教授,硕士研究生导师,主要研究方向为环境污染分析,水污染控制与生态修复。E-mail:1280741186@qq.com。

意义。

1 砷、汞污染的来源及现状

1.1 砷和汞的污染来源

环境中的砷汞污染主要是由人类活动引起的。工业生产及汽车排放的大量含砷、汞有害气体、粉尘等通过自然沉降和雨水沉降的途径进入土壤或水体;含砷汞的农药、化肥、杀虫剂、除草剂等被广泛运用于农业生产中;污灌也会导致农田中砷、汞等有害物质严重超标,且有逐年加重的趋势;以采矿、选矿、冶炼为主的工矿企业所产生的大量酸性废水(AMD)及尾矿被水冲刷淋滤、风化而流失的大量砷、汞会造成矿区及其周边生态环境污染尤为突出^[2];未经处理的生活垃圾被运到郊区农业用地堆放或填埋,垃圾渗滤液中砷、汞对环境的潜在生态风险贡献比达到37%^[3]。

1.2 砷和汞的污染现状

有报道显示,全球每年因人类活动排入水环境中的砷量约为 1.2×10^9 kg,向土壤中输入的砷总量达 0.94×10^8 kg^[4-5]。地方性砷中毒现象已成为了全球亟待解决的棘手问题,在孟加拉三角洲地区,大量的饮用水及土壤受到了砷污染,成人和儿童每天从稻谷和蔬菜中摄取的无机砷(IAS)均超标^[6]。中国也是受砷中毒最为严重的国家之一,包括内蒙、新疆、陕西、湖南、云南、贵州等省份受到砷污染的影响均比较严重。我国湖泊水质为IV类及劣于IV类的比例为5.5%,水库比例为1.6%,污染已较为严峻。虽然经过多年治理,一些湖泊砷污染得到了有效控制,但砷不易被微生物降解或分解,进入水体后基本都沉积在底泥中^[7]。朱晓龙等^[8]发现根据土壤环境质量标准二级标准,稻田土壤砷超标率为80%,菜园土壤超标率为94%。

汞污染现象在我国的贵州、吉林、陕西、湖北、辽宁和重庆等地尤为严重。据统计,我国每年产生的汞排放约占世界汞排放量的25%。台湾的大部分河流、灌溉渠、水库和湿地地表水和表层沉积物中汞和甲基汞含量均超标^[9]。万山汞矿区重污染区地表水总汞含量可达4462 ng/L,远高于当地水体汞含量背景值为15.3~33.0 ng/L,此外矿区周边土壤总汞含量高达222 mg/kg,远超国家土壤二级标准规定的0.5 mg/kg^[10-11]。毕华等^[12]研究发现广州市农村菜地均存在不同程度的重金属污染,其中汞达到重度污染程度。

2 砷、汞对植物的毒性影响

一般而言,砷、汞是植物生长发育的非必需元素,植物对砷汞毒害的反应因品种、生长条件和砷汞暴露时间的不同而不同。砷、汞胁迫对植物的生长作用通常表现为“低促高抑”,当砷和汞浓度累积到一定值时,会直接影响植物的细胞膜透性,抑制植物对水分和养分的吸收运输,降低蒸腾作用和光合呼吸作用,干扰植物体内的酶促反应,使植物体内的代谢过程发生紊乱,导致植物的植株矮小、叶片坏死和枯萎、叶面积明显减少、生物量降低甚至死亡。

2.1 砷和汞对植物的生长发育影响

由于根是与土壤或水体直接接触,且对砷、汞毒害最为敏感的部位,所以砷、汞对植物根部生长的抑制作用强于对芽、茎生长的抑制作用,根部高浓度的砷汞会影响主根的长度及直径、侧根的发生时间及数目等,根系特征的改变影响根系吸收水和养分的效率,致使地上部同样出现叶黄和植株矮小等重金属中毒症状^[13]。西瓜和哈密瓜^[14]、桔梗^[15]等种子萌发生长的研究均表明低浓度砷、汞胁迫下的种子萌发效率较好,但随着砷、汞浓度的加大,种子萌发效率不同程度地受到抑制,直至完全阻止萌芽。任伟等^[16]认为砷、汞胁迫不仅会对植物生长有毒害作用,还可以加快植物个体的生育进程,减短了营养生长和生殖生长时期,从而加快了植物的成熟。Aurélie等^[17]研究发现亚砷酸钠作为杀真菌剂用于治疗葡萄干病时,会使植物整体生长下降,如绿芽的数量变少,长度和直径降低,特别是在浆果成熟时,显著影响植物的生长。

2.2 砷、汞对植物光合作用的影响

叶绿素是植物进行光合作用的主要细胞器,砷汞会损伤其超微结构,郝玉波等^[18]研究发现高浓度砷会破坏叶肉细胞叶绿体结构,细胞内脂类小滴增多增大,叶绿体膜系统被破坏。许响等^[19]研究发现汞使叶肉细胞中细胞核核仁分散,核膜破损,叶绿体膨胀至解体,线粒体变形,嵴突膨胀、减少。目前,砷汞对植物光合色素的影响大多涉及到对叶绿素的影响,而对类胡萝卜素的影响报道较少。砷、汞能取代叶绿素分子中的镁离子并干扰有关叶绿素合成酶的活性,使叶绿素合成受阻,同时增加了叶绿素分解酶的活性,使叶绿素分解^[20]。有研究表明^[21-22],随着砷汞浓度的增加,

植物的净光合速率 (P_n)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、气孔导度 (G_s) 和蒸腾速率 (T_r) 呈持续下降,蒸腾速率下降可能是砷和汞胁迫阻碍了根部系统对水分的吸收和运输,导致植物缺水出现发蔫症状。

2.3 砷、汞对植物的抗氧化损伤

植物在受砷、汞毒害时,体内会产生大量的超氧阴离子 (O_2^-)、羟自由基 (OH^\cdot)、过氧化氢 (H_2O_2) 等含氧自由基,这些自由基对植物会造成一定的氧化胁迫。在低浓度砷、汞胁迫时,植物体内抗氧化系统会响应,如 SOD (超氧化物歧化酶)、POD (过氧化物酶)、CAT (过氧化氢酶) 等多种抗氧化酶,它们在活性氧引起的抗氧化胁迫中能有效的清除活性氧自由基,从而提高了植物对重金属的耐受性,维持细胞代谢的稳定。但植物持续受到高浓度砷、汞胁迫时,植物体内活性氧自由基的产生速率大于抗氧化酶的清除速率,导致植物细胞内过氧化物大量积累,使细胞内的多糖、蛋白质和核酸等大分子受到损害而引起膜脂过氧化,丙二醛 (MDA) 含量增加,导致膜结构破坏,使植物受到过氧化损伤^[23]。曹萌等^[24] 研究得出随着汞胁迫浓度的增加,豌豆幼苗的超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 活性大致呈先升后降趋势,MDA 含量大致呈增加趋势,可溶性蛋白含量呈先升后降趋势。另外,砷汞胁迫产生的 H_2O_2 若未能及时清除, H_2O_2 可通过 Haber-Weiss 反应产生毒性和破坏力更强的 $\cdot OH$,导致 DNA 链断裂、碱基突变和蛋白质的损伤。

2.4 缓解砷、汞污染对植物毒害的措施

为了改善砷、汞对植物生长和生化指标的毒害影响,我们可以使用新一代植物激素 (如芸苔素内酯) 来作为防治砷汞中毒的农艺措施^[25]。适当施用络合型含铁材料、氮、锌、硒等物质,均可降低植物对砷汞的吸收和毒性,而且还可以增加植物中铁、锌和硒等营养元素的含量^[26-27]。此外,还可以在土壤中添加几种无机 (石灰和硅) 和有机 (堆肥和生物炭) 改良剂^[28]。有研究发现,接种棘孢木霉菌可以有效缓解砷对小油菜生长的胁迫^[29]。添加适宜浓度的褪黑素可提高植物抗氧化系统酶活性,降低膜脂过氧化,提高植物抵抗砷胁迫的能力^[30]。超富集植物与农作物套作模式改变植物根系形态,促进植物根系有机酸的分泌,并显著降低了植物根际土壤中砷汞的生物有效性,缓解了砷汞胁迫带来的活性氧损伤^[31]。富氢

水 (HRW) 能缓解汞对植物的氧化胁迫、根部生长的抑制以及汞的积累^[32]。不过要想得出最佳的解决方法,还需要进行长期的实地试验,包括各种管理策略的风险和效益分析。

3 砷汞污染植物修复进展

3.1 植物对砷、汞的富集迁移与分布规律

由于受到植物基因型、生长特性、生长环境的影响,不同植物或同种植物的不同品种对砷、汞的富集能力存在很大差异。各种蔬菜的重金属富集能力为:叶菜类>根茎类>球茎类>果菜类^[33]。李富荣等^[34] 研究发现番茄对砷的富集能力明显强于辣椒和茄子。不同品种双孢蘑菇对重金属砷、汞的富集特性及抵抗性有显著差异^[35]。张骞等^[36] 研究发现各品种生菜砷吸收能力的大小排列顺序为耐抽蔓生菜>绿萝>美国大速生>罗沙绿>紫罗马。大量研究表明,大部分植物中吸收的汞砷含量与其所生长土壤中的含量呈线性正相关^[37]。沉水植物的富集能力要优于浮水植物和挺水植物,根系发达植物的富集能力优于根系不发达的植物。何海成等^[38] 研究发现不同水生植物对生活污水中砷的富集能力:菖蒲>千屈菜>水生黄鸢尾>美人蕉。

由于外部形态及内部结构有异,吸收重金属元素的生理生化机制不同,植物的不同部位对砷汞的累积量差异显著。玉米植株对汞的富集大于砷,砷、汞在玉米植株中分布规律为根>秸秆>玉米棒>玉米粒^[39]。茭白和菱角对水体中砷和汞的富集系数远大于对土壤的富集系数,且对汞的富集能力都大于砷;茭白茎的富集能力大于叶;菱角根的富集能力大于叶 (秆)^[40]。黑麦草不同部位砷分配规律为根系>老叶>茎>功能叶>幼叶,且多年生黑麦草对砷的吸收能力优于一年生黑麦草^[41]。汞在完熟期的水稻植株中分布状况为:根>籽粒>茎>叶>穗壳;甲基汞的分布为:籽粒>根>茎>叶>穗壳,且甲基汞比汞更容易在水稻体内转移^[42]。大量研究已表明,植物不同部位砷汞含量大小大体为:根>茎>叶>子粒、果实,即呈现自下而上的递减规律。

3.2 植物在砷汞污染修复中的运用

植物对砷、汞有很强的富集作用,能有效地修复砷、汞污染的环境。田间大规模水培蕨类植物蜈蚣草可以修复砷污染地下水。施沁璇等^[43] 认为黑藻可作为养殖期间池塘砷汞复合污染底泥生

态修复的先锋植物,而菹草适宜于秋冬空闲期间砷汞污染底泥的修复。还有类似研究发现,刚毛藻可以在极端的砷条件下生存,对含砷废水具有良好的修复作用^[44]。挺水植物香蒲、菖蒲、黄菖蒲、花叶芦竹和千屈菜可作为砷、汞复合污染水体潜力净水植物^[45]。蜈蚣草、荇菜和野艾蒿可视为汞污染土壤植物修复的先锋植物^[46]。黄菖蒲、花叶芦竹和千屈菜可作为工厂化循环水养殖条件下生态浮床的潜力净水植物^[47]。在砷污染土壤复合施加亚氨基二琥珀酸和草酸(IDS-MA)或三聚磷酸钠和柠檬酸(ST-CA)等绿色螯合剂,可以提高植物萃取砷的效率^[48-49],使其植物修复效果达到更佳。添加了EDTA、DTPA、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 和 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ 四种外加化学促进剂有利于植物对汞的吸收,其中 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 是最有利于植物修复的^[50]。

4 结语与展望

水体和土壤中砷和汞等污染物超标,会对农产品质量安全、农作物生长或生态环境存在很大风险,这引起了国家和地方的高度重视,已制定发布了相关的标准以加强水体和土壤环境监测及农产品协同监测。植物修复技术作为重金属污染治理方面的新兴绿色技术,成本较传统工程修复技术低,并且可以在原位将重金属降解和消除,具有巨大的应用空间和市场潜力,值得大力推广和应用。

近年来,在了解植物对砷、汞的吸收和转运的生理机制方面取得了重要的科学进展,但对砷、汞超积累植物的分子基础知之甚少。因此,未来的研究应该集中在以下几点:(1)通过鉴定植物超富集特性所必需的基因,对植物耐污染和累积的分子机制进行更多的研究,尽可能增强植物对砷、汞的抗性和吸收。(2)植物修复技术的研究大多在实验室和温室进行,而现实条件往往比实验室更复杂,因此,如何将植物修复技术推广到实际工程中还需要进一步的研究。(3)在一定程度上,富集植物的安全有效处置限制了植物修复技术在工程上与商业上的应用,目前关于其处理技术研究较少,后续应更加系统、深入地开发富集植物的处理处置技术,做到资源化、安全化、合理化使用。

参考文献

[1] Zhang J, Li H, Zhou Y, et al. Bioavailability and soil-to-crop transfer of heavy metals in farmland soils: A case study in

the Pearl River Delta, South China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 710-719.

- [2] 杨伟光,王美娥,陈卫平. 新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响 [J]. *环境科学*, 2019, 40 (1): 445-452.
- [3] 吴红雨,黄红,吴敬波. 淮安市某垃圾填埋场重金属污染现状调查 [J]. *环境监控与预警*, 2014, 6 (3): 40-43.
- [4] 乔慧颖. 层状金属氧化物电极的制备及电容去离子脱砷技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018: 1.
- [5] 李仁英,张婧,谢晓金,等. 不同品种水稻对砷的吸收转运及其健康风险研究 [J]. *土壤通报*, 2019, 50 (2): 489-496.
- [6] Anirban B, Shresthashree S, Roy C N, et al. Arsenic contamination in Kolkata metropolitan city: perspective of transportation of agricultural products from arsenic-endemic areas [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26 (22): 22929-22944.
- [7] 陈国梁,冯涛,李志贤,等. 湘江排污口环境中砷的污染特征及潜在生态风险 [J]. *生态环境学报*, 2016 (8): 1356-1360.
- [8] 朱晓龙,刘妍,甘国娟,等. 湘中某工矿区土壤及作物砷污染特征及其健康风险评价 [J]. *环境化学*, 2014, 33 (9): 1462-1468.
- [9] Wang Y, Fang M, Chien L, et al. Distribution of mercury and methylmercury in surface water and surface sediment of river, irrigation canal, reservoir, and wetland in Taiwan [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26 (17): 17762-17773.
- [10] 仇广乐,冯新斌,王少锋. 贵州省万山汞矿区地表水中不同形态汞的空间分布特点 [J]. *地球与环境*, 2004, 32 (3): 77-82.
- [11] 包正铎,王建旭,冯新斌,等. 贵州万山汞矿区污染土壤中汞的形态分布特征 [J]. *生态学杂志*, 2011, 30 (5): 907-913.
- [12] 毕华,钟巍,程焰芳,等. 广州市农村菜地土壤重金属污染生态风险评价 [J]. *医学动物防制*, 2019, 35 (4): 366-369.
- [13] 陈杰,许长征,曹颖倩,等. 不同重金属对拟南芥根系特征的影响比较 [J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23 (6): 1122-1128.
- [14] 于波,臧淑艳,房志浩. 砷对西瓜和哈密瓜种子萌发及其幼苗生长的影响 [J]. *沈阳化工大学学报*, 2017, 31 (1): 9-13.
- [15] 尚宏芹,高昌勇. 镉、汞胁迫对桔梗种子萌发、幼苗生理生化特性及镉、汞含量的影响 [J]. *核农学报*, 2018, 32 (6): 1211-1219.
- [16] 任伟,倪大伟,刘云根,等. 砷污染生境下挺水植物香蒲对砷的积累与迁移特性 [J]. *环境科学研究*, 2019, 32 (5): 848-856.
- [17] Aurélie S, Julie V, Marie G, et al. Sodium arsenite effect on *vitis vinifera* L. physiology [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2019, 238: 72-79.
- [18] 郝玉波. 砷对玉米产量、品质及生理特性的影响 [D].

- 泰安: 山东农业大学, 2008: 42-45.
- [19] 许响, 谷巍, 陈娟, 等. 重金属 Hg 对黑三棱生长特性及超微结构影响研究 [J]. 南京中医药大学学报, 2015 (6): 579-582.
- [20] Singh S, Eapen S, D Souza S F. Cadmium accumulation and its influence on lipid peroxidation and antioxidative system in an aquatic plant, *Bacopa monnieri* L [J]. *Chemosphere*, 2006, 62 (2): 233-246.
- [21] 李仁英, 沈孝辉, 张耀鸿, 等. 无机砷对不同水稻品种种子萌发和幼苗光合生理的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2014 (6): 1067-1074.
- [22] 孙永娣, 巢建国, 谷巍, 等. 汞胁迫对茅苍术光合特性及生理指标的影响 [J]. 南方农业学报, 2018, 49 (3): 448-453.
- [23] 蒙敏, 黄雪芬, 李磊, 等. 砷胁迫对桉树抗氧化酶活性的影响 [J]. 基因组学与应用生物学, 2017 (12): 5289-5295.
- [24] 曹萌, 南冠君, 高玉琼, 等. 重金属对豌豆幼苗抗性生理指标的影响 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47 (7): 161-165.
- [25] Kaim A S, Kaur I, Bhatnagar A K. Impact of 24-epibrassinolide on tolerance, accumulation, growth, photosynthesis, and biochemical parameters in arsenic stressed *Cicer arietinum* L. [J]. *Agricultural Science Research Journal*, 2016, 6 (9): 201-212.
- [26] Yunyun L, Wenjun H, Jiating Z, et al. Selenium decreases methylmercury and increases nutritional elements in rice growing in mercury - contaminated farmland [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 182: 109-447.
- [27] 程艳, 陈璐, 米艳华, 等. 络合型含铁材料对砷胁迫下水稻生理生化特性及砷累积的影响 [J]. 生态学杂志, 2019, 38 (8): 2482-2489.
- [28] 董双快. 生物炭对土壤中砷的钝化及生物效应研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [29] 张宏祥, 李丽娟, 曾希柏, 等. 土壤接种棘孢木霉菌降低小油菜砷胁迫及其可能机理 [J]. 农业资源与环境学报. 2018, 35 (2): 139-146.
- [30] 黄益宗, 蒋航, 王农, 等. 外源褪黑素对砷胁迫下水稻幼苗生长的影响 [J]. 生态学杂志, 2018, 37 (6): 1738-1743.
- [31] 赵宁宁, 杜芮萍, 邱丹, 等. 蜈蚣草-玉米套作模式对玉米砷胁迫的缓解效应 [J]. 生态环境学报, 2019, 28 (5): 1021-1028.
- [32] 方鹏. 富氢水 (HRW) 对汞诱导的紫花苜蓿幼苗根部氧化伤害的缓解作用 [D]. 南京: 南京农业大学, 2015: 25-28.
- [33] 孙硕, 李菊梅, 马义兵, 等. 河北省蔬菜大棚土壤及蔬菜中重金属累积分析 [J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36 (2): 236-244.
- [34] 李富荣, 李敏, 杜应琼, 等. 茄果类蔬菜对其产地土壤重金属的吸收富集与安全阈值研究 [J]. 农产品质量与安全, 2018 (1): 52-58.
- [35] 周林, 郭尚, 刘晓刚, 等. 不同品种双孢蘑菇对重金属砷、汞、镉富集及抵抗性研究 [J]. 扬州大学学报 (农业与生命科学版), 2018, 39 (3): 95-99.
- [36] 张骞, 曾希柏, 白玲玉, 等. 应用水培方法筛选砷低吸收生菜的比较研究 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (4): 632-639.
- [37] 陈剑, 檀国印, 朱良其, 等. 不同品种单季茭对土壤重金属铅镉汞的吸收富集规律 [J]. 天津农业科学, 2018, 24 (10): 50-52.
- [38] 何海成, 李青青, 崔建平, 等. 水生植物对生活污水中铅、镉、砷富集能力的研究 [J]. 广东化工, 2016, 43 (24): 37-40.
- [39] 姜森, 高一娜, 徐晶, 等. 玉米植株及其耕地土壤中重金属的分布特征 [J]. 黑龙江农业科学, 2018 (5): 116-120.
- [40] 王方园, 谢晓君, 龙珠, 等. 砷和汞在水生蔬菜及其生长环境中的迁移富集 [J]. 浙江师范大学学报 (自然科学版), 2017, 40 (2): 214-220.
- [41] 李金波, 李诗刚, 宋桂龙, 等. 两种黑麦草砷吸收特征及其与茎叶营养元素积累的关系研究 [J]. 草业学报, 2018, 27 (2): 79-87.
- [42] 李雨琴, 孙涛, 邓晗, 等. 汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征 [J]. 环境科学, 2018, 39 (5): 2472-2479.
- [43] 施沁璇, 孙博悻, 胡晓波, 等. 水生植物对养殖池塘重金属污染底泥的修复作用 [J]. 安全与环境学报, 2018, 18 (5): 1956-1962.
- [44] Jasrotia S, Kansal A, Mehra A. Performance of aquatic plant species for phytoremediation of arsenic - contaminated water [J]. *Applied Water Science*, 2017, 7 (2): 889-896.
- [45] 张彧, 林海, 董颖博, 等. 几种水生植物对砷、汞复合污染水体的富集特征研究 [J]. 金属世界, 2018 (4): 15-19.
- [46] 钱晓莉. 尾矿废弃地上野生植物对汞和甲基汞的耐性: 关于汞污染植物修复先锋者的新视野 [C]. 中国土壤学会土壤环境专业委员会. 中国土壤学会土壤环境专业委员会第二十次会议暨农田土壤污染与修复研讨会摘要集. 中国土壤学会土壤环境专业委员会: 中国土壤学会土壤环境专业委员会, 2018: 113.
- [47] 贾成霞, 辛文明, 曲疆奇, 等. 16 种观赏植物对锦鲤工厂化循环水养殖水体污染物的净化作用研究 [J]. 渔业现代化, 2018 (3): 1-8.
- [48] 张会曦, 梁普兴, 李颖仪, 等. 单一及复合绿色螯合剂对苋菜镉、砷的富集影响 [J]. 中国农学通报, 2019, 35 (30): 112-118.
- [49] 向冬芳, 廖水蛟, 涂书新, 等. 三聚磷酸钠与柠檬酸复合强化蜈蚣草修复砷污染土壤 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38 (8): 1973-1981.
- [50] 刘忠闯. 几种草本植物体内汞富集转移及汞污染土壤修复应用 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016: 87-93.