

doi: 10.12029/gc20230320001

任宇, 曹文庚, 肖舜禹, 李祥志, 潘登, 王帅. 2024. 重金属在土壤中的分布、危害与治理技术研究进展[J]. 中国地质, 51(1): 118–142.

Ren Yu, Cao Wengeng, Xiao Shunyu, Li Xiangzhi, Pan Deng, Wang Shuai. 2024. Research progress on distribution, harm and control technology of heavy metals in soil[J]. Geology in China, 51(1): 118–142(in Chinese with English abstract).

## 重金属在土壤中的分布、危害与治理技术研究进展

任宇<sup>1,2</sup>, 曹文庚<sup>1,2</sup>, 肖舜禹<sup>3</sup>, 李祥志<sup>1,2</sup>, 潘登<sup>4</sup>, 王帅<sup>4</sup>

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 自然资源部地下水科学与工程重点实验室, 河北 石家庄 050061; 3. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046; 4. 河南省自然资源监测和国土整治院, 河南 郑州 450061)

**摘要:**【研究目的】镉、铬、铅、铜和锌等重金属是土壤中的典型有害元素。过量摄入会抑制生物体的生长发育。其在土壤中的分布受到原生地质背景成因和矿山开采、大气沉降、农药化肥施用等人类活动的共同影响。然而不同土地利用类型下的土壤重金属分布特征需要进一步识别, 对于典型重金属的危害作用需要进行全面的梳理揭示。【研究方法】通过查阅国内外的相关研究内容, 整理典型重金属在土壤中的空间分布特征, 总结土壤重金属对生物的影响作用, 综述人体暴露在高重金属的土壤与地下水环境下的毒性作用及针对性修复方式。【研究结果】受到原生地质背景和人类活动下土地利用类型的共同影响, 造成土壤中重金属含量具有显著的空间变异性。重金属在土壤中的含量不同, 会对土壤微生物与植物的生长发育产生不同效应的影响, 并通过食物链进入人体累积。当重金属在人体中累积含量过高, 会对人体的不同器官和系统产生破坏, 威胁人体健康。【结论】应该综合考虑污染方式、污染水平和暴露途径等因素进行针对性的重金属治理。

**关键词:** 重金属; 含量分布; 微生物; 植物; 人体危害; 环境地质调查工程

**创新点:** 本文依据重金属在自然界中的迁移过程, 对重金属在土壤中的分布、对土壤系统生物的危害、对人体健康影响和针对性的治理方式进行总结, 较为完整地阐述了土壤重金属的来源和在食物链中对各生物产生的影响。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0118-25

### Research progress on distribution, harm and control technology of heavy metals in soil

REN Yu<sup>1,2</sup>, CAO Wengeng<sup>1,2</sup>, XIAO Shunyu<sup>3</sup>, LI Xiangzhi<sup>1,2</sup>, PAN Deng<sup>4</sup>, WANG Shuai<sup>4</sup>

(1. The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 3. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, Henan, China; 4. Henan Institute of Natural Resources Monitoring and Land Management, Zhengzhou 450061, Henan, China)

**Abstract:** This paper is the result of environmental geological survey engineering.

**[Objective]** Heavy metals such as cadmium, chromium, lead, copper and zinc are typical harmful elements in soil. Excessive intake

收稿日期: 2023-03-20; 改回日期: 2023-05-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3703701)、国家自然科学基金(41972262)和河北自然科学基金优秀青年科学基金项目(D2020504032)联合资助。

作者简介: 任宇, 男, 1995 年生, 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事污染水文地质方面工作; E-mail: 925666311@qq.com。

通讯作者: 曹文庚, 男, 1985 年生, 博士, 副研究员, 主要从事水文地质、水文地球化学方面研究; E-mail: 281084632@qq.com。

can inhibit the growth and development of the organism. Its distribution in soil is influenced by the origin of primary geological background and human activities such as mining, atmospheric subsidence, pesticide and fertilizer application. However, the distribution characteristics of soil heavy metals under different land use types need to be further identified. Besides, the harmful effects of typical heavy metals need to be comprehensively sorted out and revealed. **[Methods]** By referring to the relevant research content at home and abroad, the spatial distribution characteristics of typical heavy metals in soil were sorted out, the effects of heavy metals on organisms in soil were summarized, and the toxic effects and targeted remediation methods of human exposure to high heavy metals in soil and groundwater were summarized. **[Results]** The results showed that the heavy metal content in soil had significant spatial variability due to the combined effects of primary geological background and land use type under human activities. The different content of heavy metals in soil will have different effects on the growth and development of soil microorganisms and plants, and enter the human body through the food chain and accumulate. When the accumulation of heavy metals in the human body is too high, it will destroy different organs and systems of the human body and threaten human health. **[Conclusions]** Pollution mode, pollution level and exposure route should be taken into account in the targeted treatment of heavy metals.

**Key words:** heavy metals; concentration distribution; microorganisms; plants; human hazards; environmental geological survey engineering

**Highlights:** Based on the migration process of heavy metals in nature, this paper summarizes the distribution of heavy metals in soil, the harm to soil organisms, the impact on human health and the targeted treatment methods, and also explains the source of soil heavy metals and the impact on organisms in the food chain in a relatively complete way.

**About the first author:** REN Yu, male, born in 1995, master, assistant researcher, engaged in research on contaminant hydrogeology research; E-mail: [925666311@qq.com](mailto:925666311@qq.com).

**About the corresponding author:** CAO Wengeng, male, born in 1985, doctor, engaged in research on hydrogeology, hydrogeochemistry research; E-mail: [281084632@qq.com](mailto:281084632@qq.com).

**Fund support:** Supported by National Key R&D Program of China (No.2022YFC3703701), National Natural Science Foundation of China (No.41972262), Hebei Natural Science Foundation for Excellent Young Scholars (No.D2020504032).

## 1 引 言

“山水林田湖草沙综合治理”是生态文明建设的重要着力点。土壤作为其中重要的联系介质,不仅与大气接触,还与地下介质相连。重金属是指密度大于  $5 \text{ g/cm}^3$  的金属元素,砷的化学性质与重金属相似,在较高浓度下均会对土壤产生污染风险,因此学者们通常将其与重金属共同研究。由于土壤在自然环境中的特殊地位,土壤中的重金属与砷等元素的时空分布特征一方面受到人类活动的直接或间接影响,另一方面地质成因造成的原生高背景值也是土壤劣质组分含量增加的重要原因(表 1)。

在自然成因中,火山活动引起的成土母质岩性差异、母岩的风化程度及水流的冲刷方式、强度等是造成土壤有害元素出现高背景值的主要影响因素(黄勇等, 2023)。孙斌等(2021)发现在广西岩溶区农田中,岩溶的不同发育阶段和母质类型影响当地土壤重金属的含量,同时来自碳酸盐系石灰岩发育的土壤中镉含量高于在第四纪中河流沉积物发

育而来的。在四川凉山州土壤重金属元素的高背景值主要源自于成土母岩的岩性差异,碳酸盐岩分布区中 As、Cr 和 Pb 含量高,峨眉山玄武岩区域中 Cd、Cu、Hg、Ni 和 Zn 的含量高(郑喜坤等, 2002)。

随着人类活动的日益增强,人为污染对于土壤有害元素的富集影响作用愈加强烈,甚至在部分地区已经成为土壤重金属超标的主要影响因素。其中矿山开采、污水灌溉、大气沉降和农药化肥等是人类活动加剧土壤污染的重要来源(刘娟等, 2021)。在农业种植过程中,农药和化肥中会含有较多的砷和铜,过量的施用会造成在土壤中富集。在蔬菜种植过程中,所使用的大棚和地膜等塑料制品中含有镉和铅会造成土壤污染(郑喜坤等, 2002)。同时电子、化工和染料等工厂排放的污水中会含有镉、铬和铅等重金属,在污水灌溉下进入土壤中(陈怀满等, 1999)。矿产开发过程产生的废渣中含有的铬、砷和铅,位于矿产开采地附近的农田,会在降雨作

表 1 中国土壤重金属的主要来源

Table 1 Main source of heavy metals in Chinese soil

来源	途径	主要重金属污染物
自然源	成土壤母质	与地层条件有关
工业源	采矿、冶炼、燃煤	镉、铜和铅等
	电镀、电子等工业废水排放	镉、铬、镍、铅、铜和汞等
	染料、化工制革工业排放的废水	镉和铬等
生活源	大气沉降	铜、铅和锌等
	生活垃圾和废水	镉、铅和汞等
	车辆尾气排放	铅
农业源	污水灌溉、畜禽粪便堆弃	镉、铜、汞、锌和砷等
	施加肥料和农药	镉、铜和砷等

注：表中数据来源于文献（陈怀满等，1999；彭皓，2019；Qin et al., 2021）。

用下使得堆放在地表矿渣中的危害组分迁移进入土壤中。在城市中随着汽车的普及使用，汽车轮胎磨损后的粉尘和汽车尾气所产生的重金属对环境造成的污染愈加引起人们重视。虽然国家对于机动车排放标准的严格化使得尾气中的铅含量大幅减少，但是轮胎磨损后的粉尘中的铅排放进入空气后，再通过大气沉降进入土壤造成污染。此外，近年来随着新能源汽车数量的快速增加，其电池中 Cd 和 Ni 若处理不当造成的重金属泄露也会对土壤环境产生潜在威胁（宋伟等，2013）。

受到原生环境与经济社会发展方式的差异化影响，重金属与砷在中国的不同地区存在区域性分布特征。同时随着重金属等元素在土壤和人体中的累积，土壤生物和人体的不同器官会受到多种侵害。本文综述整理了全球和我国不同土地利用类型土壤中重金属的分布现状，分析了重金属与砷在不同机制作用下对土壤生物产生的胁迫作用，总结了各元素在人体中的累计情况与潜在致病性。本文阐述了重金属与砷在我国土壤与人体的分布特征和潜在危害，介绍了去除土壤和地下水中重金属

和砷的主要修复手段，为后续我国土壤重金属的重点监测及针对性防治工作提供科学参考。

## 2 重金属在土壤中的分布和对土壤系统的影响

### 2.1 全球土壤中的分布

随着工业化、城市化的迅速发展以及对农用化学品的日益依赖，重金属等有毒元素对土壤的污染已经造成严重的环境问题。许多国家都发现了被重金属污染的土壤（表 2）。在美国发现超过 1 万个场地因重金属污染而使土壤变质，其中 Cu 含量分布为 48~95 mg/kg（Su et al., 2014）。英国多个城市土壤中重金属浓度偏高，土壤的总铅含量可达 182.6 mg/kg，这可能与英国过去和现在的大量工业活动有关，如采矿、冶炼、电镀和金属加工等操作过程中的生物质和化石燃料燃烧都是 Cu、Cd、Ni、Pb 和 Zn 排放的主要来源（Crispo et al., 2021）。澳大利亚的波特兰、沃尔科特港等多个区域均发现土壤中 As、Ni 含量异常，调查发现在该区域内存在纸浆厂、铝冶炼厂以及铁矿石运输通道等工业活动

表 2 部分国家/地区土壤重金属含量 (mg/kg)

Table 2 Heavy metal content of soil in some countries (mg/kg)

国家/元素	Cd	Cr	Pb	Cu	Zn	As	Ni
美国	0.78~13.5	48.5	23~55	48~95	88.5	/	29~57
英国	0.67	28.33	182.6	56.85	251	15.14	25.23
法国	0.53	42.08	43.14	20.06	43.14	/	14.47
西班牙	1.42~3.76	63.48	213.93~1505.45	57.01~107.65	427.8~596.09	/	34.75
澳大利亚	0.01~7.52	0.5~39.7	4.16~789	5.42~150	13.4~330	1.1~79	4.6~18.5
叙利亚	/	57	17	34	103	/	39
伊朗	0.34~1.53	10.36~63.79	5.17~46.59	9.62~60.15	11.56~94.09	/	11.28~37.53
印度	0.05~0.82	1.23~2.19	0.95~2.82	1.2~2.62	4.65~28.24	/	0.14~4.34
日本	/	65	23	31	118	9	/

注：“/”表明未查到相关数据；其他数据来源于文献（Su et al., 2014; Reimann and Caritat, 2017; Crispo et al., 2021; Nakagawa et al., 2021）。

(Reimann and Caritat, 2017)。同时农田土壤中重金属含量升高与农业活动密切相关, Nakagawa et al. (2021)在日本长崎县进行土壤重金属调查发现, 高浓度 Cu 和 Zn 的分布与农业畜牧所产生的大量废弃物有关。

## 2.2 在中国土壤中的分布特征

在中国土壤中, 重金属含量超标始终是影响土壤质量的重要问题。研究中普遍调查分析距地表 0~20 cm 的表层土与亚表层土中的重金属含量。2014 年公布的《全国土壤污染调查公报》表明, 中国土壤的污染类型以镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌和镍等无机型为主, 其中镉的超标率最高达到 7.0%。整体来看, 中国土壤重金属的主要研究工作区多分布于南方, 但土壤中重金属含量更多受到地质背景和土地利用类型等因素的影响, 因此不同土地利用类型下的土壤重金属分布具有差异化特征(表 3)。

### 2.2.1 矿山

中国矿产开采主要在西部和北部地区等河流上游的山区。在四川、重庆、云南等长江上游地区, 原生土壤中的重金属 Cd 含量背景值较高(周萍等, 2017)。同时该地区的矿产资源丰富, 矿产开发利用强度较高, 开采过程中含 Cd、Pb 的废渣和废气是该地区土壤重金属超标的主要人为污染源(姜宇等, 2022)。黄河流域上游的内蒙古是中国的产煤大省, 包头作为其中的代表以煤炭等工业开发为主, 工业排放较为严重。土壤中存在 Cu、Zn、Mn、Ni、Pb 和 Cd 等多种类型重金属的复合污染(李玉梅等, 2016; 张连科等, 2016a)。在海河-滦河流域的山区, 由于历史原因存在着矿产开发等工业活动。因此矿区内由于矿石开采和岩石风化等因素影响造成土壤中 Cu、Cd 和 Zn 等重金属污染(陈小敏等, 2015)。珠江上游流经的云南和贵州等地同样为中国重要的矿产基地, 该地区土壤由于叠加了原生高背景和矿产开发所排放的三废共同导致其中 Cd 污

染较为严重, 同时也存在轻微 As 和 Cr 的污染(姚波等, 2020)。

### 2.2.2 农业畜牧种植区

华北平原和长江中下游平原等地是我国主要的粮食主产地, 而农田中的化肥农药会导致农业重金属污染。同时在村镇中存在的畜牧养殖、塑料生产小型工厂等场地附近的污染程度更高(谢小进等, 2010; 刘亚纳等, 2016)。新乡封丘县农田中 Cd、Cr、Pb 和 Zn 超过背景值, Cd 的超标倍数相对更高, 其中有机质含量与人口密度是影响重金属分布的主要自然和人为因子(戴倩倩等, 2022)。中部平原与滨海平原以农业和中小型工业为主。在雄安新区的废渣堆放造成土壤 As 加重, 污水灌溉和化肥农药的使用对农田土壤中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 元素增加有较高的贡献(董燕等, 2021)。在珠江三角洲的农业种植区, 农业生产造成耕地农田土壤中镉、砷和镍超标率相对较高, 养殖场周边土壤镉、砷、铜、锌和镍超标率相对较高, 表明畜禽养殖和含镉农药或肥料的施用是造成其土壤污染的重要原因(罗小玲等, 2014; 顾涛等, 2018)。

### 2.2.3 城市和工业区

城市的污水和废气排放也会进入土壤中。在长江中游地区的汽车和化工等产业发达, 包括武汉在内的多个城市均为中国重要的工业城市。长江中游城市群内的诸多大城市所排放的城市污水也会进入管道或河流, 在农业灌溉活动下造成重金属在土壤中的富集。中心城区水源地的土壤重金属含量高于远郊, 其中 Cd 的潜在生态风险最高, 而工业区附近的饮用水源地附近 Cd 含量明显高于其他地区, 表明工业污染和农业污染等人为污染是该地区土壤重金属 Cd 超标的重要因素(张磊等, 2004)。包括张家港、南京和上海等大中型城市在内的长江下游流域, 特别是长江三角洲是长江流域经济最为发达的地区, 该地区内重金属污染的程度和分布特

表 3 我国不同土地利用类型土壤中典型重金属含量分布 (mg/kg)

Table 3 Content distribution of typical heavy metals in different soil of land-use type in China (mg/kg)

不同土地类型	Zn	Cu	Pb	Mn	Cr	Cd	As
矿山	23~19142	4.86~794	0.82~41253	263~>1200	8.1~192	0.05~311	0.34~2794
农业畜牧	33.7~288	11.61~122	6.65~70.4	271~796	14~93.16	0.047~1.638	3.89~27.96
城市或污灌区	22.9~1882	4.7~306	4.9~>500	141~614	8.4~192.8	0.043~640	2.9~15

注: 数据来源: 黄河(李玉梅等, 2016; 张连科等, 2016a, b; 黄哲等, 2017)、长江(于枫等, 2021)、海河(陈岩等, 2014; 李苹等, 2018; 熊秋林等, 2021; 张沁瑞等, 2022; 郑飞等, 2022)、珠江(罗小玲等, 2014; 顾涛等, 2018)。

征与主要的污染行业相关。上海城区土壤中 Cu 和 Pb 含量受到机动车污染影响表现较高,工业园区附近农田土壤中的 Cd 和 Zn 较高。土壤中 Cr、Zn、Pb、Mn 与 Cu 之间的极显著相关性表明重金属之间表现为复合污染或者具有同源性(柳云龙等, 2012)。在黄河上游流域内的银川和兰州城市绿地主要受到工业生产和城市交通活动的影响,土壤受到 Hg、Cd 和 Pb 等重金属的污染(孙变变等, 2020; 李军等, 2022)。北京市是中国的政治中心,是海河流域内最大的城市,城市化发展规模大,速度快。北京市重金属在近年来整体含量有所上升,表明受到人为影响的污染加重。表层土壤中以 Cd 超标为主,平均含量达到 0.5 mg/kg,其次 Cu、Zn 和 Pb 也均在轻微污染状态,其中城市化导致尾气中的重金属会排放进入大气并沉降进入土壤中(李婧等, 2019; 熊秋林等, 2021)。熊秋林等(2021)发现降尘中的重金属 Cd、Cu、Ni、Zn 和 Pb 与表层土壤中的对应物质之间具有良好的线性正相关关系,大气沉降对表层土壤重金属富集的贡献在 12%~20%。珠江流域内电子仪器制造工业技术先进,电子厂数量众多。在工业场地附近,垃圾点周围土壤中镉、铜和锌超标(罗小玲等, 2014)。因此在珠江三角洲地区人为活动是导致重金属升高的主要原因(朱永官等, 2005)。

#### 2.2.4 河流滩区

在河流两岸或入海口附近的海陆作用或水沙作用也会加重土壤重金属的污染。在长江中下游船舶运输会加重土壤重金属污染(方明等, 2013)。其中陆海作用造成的粉砂含量高、高有机质含量沉积物中重金属累积量更高(姜宇等, 2022)。而在黄河下游的沿岸滩区土壤中 Cr 均值最大, Pb、Cr、Hg、As 和 Cd 等重金属的空间变异性较低,表明滩区的重金属含量分布主要与原生土壤形成和水沙作用下的堆积过程有关,但是人为排放也会导致空间差异性(张鹏岩等, 2013; 王洪涛等, 2016)。

### 2.3 对土壤微生物发育的影响

土壤中的微生物是土壤中最具有活性的成分,主要以真菌、细菌和放线菌 3 种菌类为主。一方面,学者们通过测定不同类型微生物的数量,或利用高通量测序技术对土壤中所有微生物菌类进行测定分类,识别微生物群落的结构及多样性,以此

判断不同菌株对重金属的响应关系。另一方面,微生物会通过呼吸作用并利用酶进行代谢,因此土壤呼吸强度和土壤酶活性均可代表土壤微生物活性,可在此基础上反映各元素对土壤微生物活性的影响(沈秋悦等, 2016)。

重金属含量过高会使得土壤微生物物种的丰度与多样性发生降低(江玉梅等, 2016)。在重金属与砷等污染因子的胁迫下,微生物对于其含量的响应并不相同。在尾矿重金属的胁迫下,土壤中 *Luteibacter*、*Effusibacillus* 等菌种数量随重金属含量增加显著降低,呈现明显的敏感性;而 *Paraburkholderia*、*Ramlibacter* 等菌种则对重金属的响应不明显(蒋永荣等, 2019)。*Pseudomonas*(假单胞菌属)会在砷胁迫下体现出稳定结构特征(赵立君等, 2019)。铜矿重金属污染的土壤中,细菌和真菌群落的多样性均随着综合污染强度上升发生下降(张雪晴等, 2016)。随着土壤镉含量的逐渐增加,微生物中真菌、细菌和放线菌数量均发现减少,同时脲酶、酸性磷酸酶等土壤酶活性也出现显著下降(廖洁等, 2017)。在高背景值的农田土壤中,土壤中砷、镉、铅和有效态砷会减少微生物对胺类、氨基酸类和酚酸类等碳源的利用强度(孙斌等, 2021)。李磊等(2019)认为高镉胁迫使得根际土壤的 pH、总氮等变化从而影响细菌群落分布。对于微生物群落的碳源代谢研究表明重金属污染会影响微生物的糖类代谢过程,造成微生物生物量碳、微生物熵和碳源代谢速率的降低(房君佳等, 2018)。

但是微生物本身对有害元素具有一定的耐受性和防御机制(图 1),因此在低污染浓度下部分微生物活性未表现出显著降低(文雅等, 2020)。低 Cd 含量下土壤微生物活性有所增强,而高浓度对微生物活性有明显的抑制作用(沈秋悦等, 2016)。稻田土壤中的微生物酶活性也会随着铬浓度的增加而先增加后降低,可能是由于低浓度的铬有利于酶保持专性结构,提高酶活性;高浓度则改变酶结构使得其中活性部位关闭(汪杏等, 2016)。低砷环境会刺激 *Desulfovibrio* 和 *Allobaculum* 等砷敏感菌属生长,高砷则会表现出显著抑制的作用(赵立君等, 2019)。由于不同类型微生物的耐受性不同,其面对不同种类元素的胁迫下响应特征会出现差异。砖红壤土壤中低铝浓度会促进细菌和放线菌的生

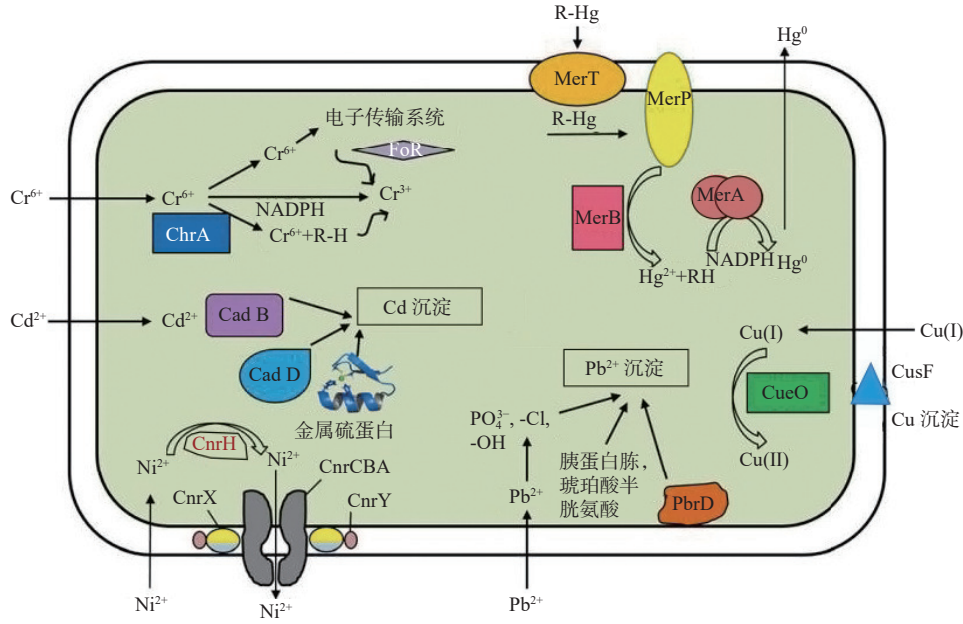


图 1 细菌对于毒性金属的防御机制(据 Das et al., 2016 修改)

Fig.1 Bacterial defense mechanisms against toxic metals (modified from Das et al., 2016)

长,抑制真菌生长;低镉含量则会促进真菌生长,抑制放线菌的数量增加(王松林等, 2015)。

2.4 对土壤中植物发育的影响

在植物特别是农作物生长过程中,土壤中的有害元素会在植物体中产生富集,对粮食安全产生威胁(图 2)。根据近年来媒体报道,在广东、江西、湖南和四川等多地由于受到化工企业生产的影响,市场上又出现了镉大米的出售。因此对于毒害元素

在植物和农作物发育过程中的影响机制需要进行体系化研究。

重金属被植物的根系器官吸收后,通过主动运输与被动运输两种方式进入木质部和韧皮部组织,并转运至植物体全部(李相楹等, 2021)。为了探究重金属对植物生长过程的影响作用,学者们通过植物的外在形态和体内所分泌生物化学物质的含量变化来揭示内在机制。植株的外在形态包括株高、根长、叶宽和根冠比等;分泌的生物物质含量包括地上和地下生物量、叶绿素含量、光合色素总量、抗氧化酶(过氧化物酶、过氧化物歧化酶)活性、膜脂过氧化产物(丙二醛)、渗透调节物质(脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖)等(张茂等, 2021; 穆海婷等, 2022)。从植物的发育部位来说,根部对于重金属的富集能力明显高于叶片等靠上部位(图 3),这是由于植物体内重金属含量过高后,根部会阻碍其向上转移,降低重金属的迁移能力(戴学斌等, 2021)。由于重金属在根部的高积累量和长胁迫时间,高含量的镉、锌等对根部发育的胁迫影响明显超过芽(陈丽雨等, 2019)。在高砷培养环境下水稻不同器官中砷的富集程度从高到低依次为根>茎>叶>稻谷。在微观层面上,王爱云等(2012)发现铬主要存在于草本植物的细胞壁,其次在细胞质中,最后

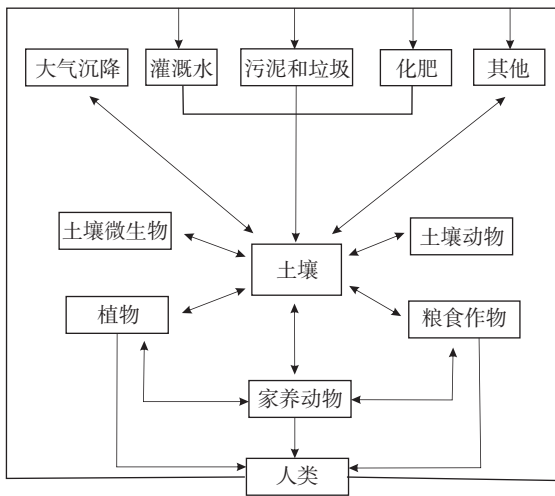


图 2 土壤重金属的生态循环模式(据陈怀满等, 1999)

Fig.2 Ecological cycle model of heavy metals in the soil (after Chen Huaiman et al., 1999)

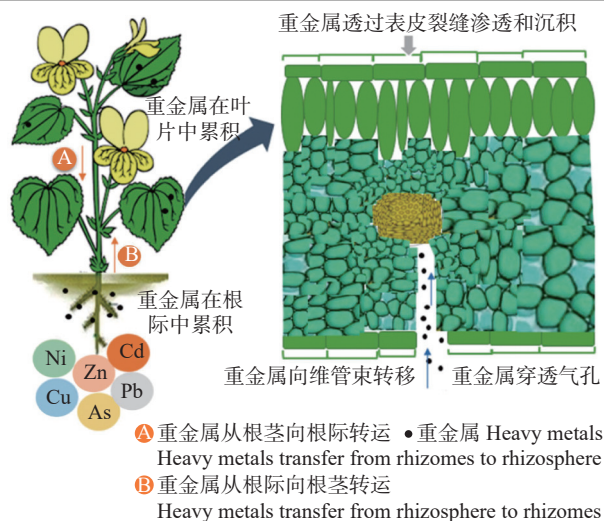


图3 植物中重金属的累积方式及转移机制(据 Hasan et al., 2019 修改)

Fig.3 Accumulation mode and transfer mechanism of heavy metals in plants (modified from Hasan et al., 2019)

在叶绿体和线粒体中含量较低。镉在小麦中会先被根系吸收进入根系细胞,在蒸腾作用等影响下通过导管向上运输至籽粒中(杨玉敏等, 2018)。因此可以看出,在重金属与砷等元素的暴露环境下,主要通过以下几种方式对植物造成危害。(1)影响植物的酶活性,减少细胞所需要的营养物质或养分的生产,抑制细胞生长;(2)破坏植物叶绿体,降低植物光合作用能力;(3)产生过量活性氧自由基,增加了膜脂的过氧化作用强度,从而破坏生物膜。

在不同重金属含量胁迫的环境下,植物生长存在“低促高抑”和“低稳高抑”两种生长状态,这同样是由于不同植物对于有害元素的耐受性不同所产生的差异化表现。“低促高抑”表明低浓度的重金属含量会促进植物的生长,而高浓度显著抑制生物体的生长发育。As 添加浓度较低时(<0.1 mg/L),海链藻细胞浓度增加,生长得到促进,在 As 为 0.5~10.0 mg/L 浓度时,藻类生长受到轻微抑制作用(魏辉煌等, 2022)。草本植物滇白前的叶绿素含量随着土壤中铅浓度增加呈现先升高后降低的变化趋势,这可能由于低浓度铅胁迫未破坏叶绿体结构,反而提高了酶活性和根系活力,促进叶绿素、蒸腾速率、净光合速率等的增加,高浓度铅对叶绿体的结构产生破坏同时造成根系活力降低,植物的生长明显被抑制(王建秋等, 2021)。另一方面 Cd 对青葙等草本植物在低浓度的促进作用可能是在少量

活性氧的存在下,抗氧化酶活性在低胁迫浓度下得到提高(胡佳瑶等, 2022)。在小麦发芽阶段,低锌会提高胚活性促进种子萌发,过高浓度则会抑制淀粉酶、蛋白酶活性,从而使得小麦缺少种子必要的生长物质而被抑制萌发(陈丽丽等, 2019)。植物在低浓度重金属存在的环境中生长未被抑制而是得到促进主要由于植物存在抗逆机制:(1)提高抗氧化酶活性去除多余活性氧;(2)通过渗透作用促进体内合成渗透调节物质来提供生长所需的营养物质,缓解污染因子对细胞生长的毒害作用(熊敏先等, 2021);(3)将污染元素固定在根部,通过固定化作用从而减少这些元素对植物体上部生长发育的影响(周晓声等, 2022)。

“低稳高抑”是指在低重金属含量胁迫下,植物体由于具有一定耐受性,少量重金属进入植物体内对其生长发育影响作用不明显,当重金属含量过高超过作物本身可承受的阈值后,重金属的富集会抑制生长甚至造成植物体死亡。在 Cd 浓度为 0.1~1.0 mg/L 下海链藻细胞浓度随时间变化较小,表明在 ≤1.0 mg/L 的 Cd 对于海链藻的生长没有明显影响,但 Cd 含量在 5~10 mg/L 下生长受到抑制(魏辉煌等, 2022)。草本植物菖蒲株高与根长在 5~20 mg/L 的 Cr(VI) 胁迫下没有明显变化,但当 Cr(VI) 浓度大于 40 mg/L 后则出现下降(朱四喜等, 2014)。

## 2.5 复合污染对土壤系统的综合影响

在实际环境中,污染源中排放进入土壤的污染物类型往往是复杂的,土壤中多种污染因子叠加下,对动植物的生长发育会产生不同方向的复合影响过程。黑麦草在铅、锌、镉共存条件下的耐受性低于暴露在单独污染物的环境下(石慧芳等, 2021)。Pb<sup>2+</sup>/Zn<sup>2+</sup>的比例高于 400/800 mg/L 后会抑制过氧化氢酶的合成(易嘉欣等, 2022)。Cu 和 Cd 共存时的复合胁迫虽然未对小麦的生长产生明显影响,但是会影响小麦根部亚细胞中 Fe、Mn 等矿质元素的分布(李悦等, 2013)。10 μM 的硒含量处理可以提高特定过氧化物酶和植物络合素等含量,在高砷对水稻细胞膜的过氧化作用中起到拮抗作用,减轻高砷对水稻生长的负面作用(刘锦嫦等, 2018)。V 和 Cr 在低浓度条件共存时会对植物的损害产生拮抗作用,缓解重金属对细胞膜的伤害,而在高浓度下则会发生协同作用,加剧对细胞膜的破坏(侯明等,

2012)。可见重金属在不同植物环境之间的相互作用,使得多种重金属复合胁迫对植物的影响会向着不同方向进行,因此复合污染对土壤和植物的综合影响机制仍需要深入的研究。

### 3 土壤或地下水中重金属对人体健康的影响

#### 3.1 人体不同器官中的累计浓度分布

重金属和砷等组分广泛存在于空气、土壤、水、灰尘、家用产品、塑料、玩具和油漆材料等非生物环境成分中,因此人体在日常生活中会长期暴露在重金属的环境下(Guney et al., 2020; Fang et al., 2021),重金属被人体吸收后在各器官中累计浓度分布有较大的区别(表 4)。

##### 3.1.1 镉

在金属冶炼、核工业、陶瓷和农业等多个行业中均有镉参与,大量含镉的废水、废气排放后,污染空气、农用地或水源地,进而通过皮肤接触和食物摄入等途径进入人体(Ghosh et al., 2018)。除此之外,玩具或者饰品中也存在大量的镉,使儿童和成人更易暴露在镉环境中而受到危害(Larson-Casey et al., 2020)。长期暴露在镉环境中会引发肾损伤、肝损伤、认知功能受损、甲状腺和性腺功能紊乱等慢性疾病(蔡嘉旖和张文丽, 2019; Hossein-Khannazer et al., 2020)。

60 kg 的成年人体内含镉量为 30~40 mg(张文丽等, 2013)。肝脏与肾脏是人体中镉含量最多的两处器官。肾脏作为身体的过滤器是镉元素蓄积的主要器官,浓度为 4.5~1220  $\mu\text{g/g}$ , 占总量的 33%,肾脏中镉浓度范围较大可能与居民所处环境或日常饮食习惯差异有关。肝脏中 Cd 含量约占总量的 14%,其含量范围为 0.7~117  $\mu\text{g/g}$ (Katoh et al., 2002; 韩致超等, 2021)。镉经过呼吸道或消化道进入机体后,在体内形成镉硫蛋白,通过血液到达全身并有选择性地蓄积在肾、肝脏处,肾脏可蓄积当次吸收量的 50%。而经呼吸道进入人体的镉大约有 2% 驻留在肺内(<4~11.7  $\mu\text{g/g}$ ),胰腺同样作为人体消化系统的一部分大约有 0.7~91.1  $\mu\text{g/g}$  的镉残存在内。除此外,在心脏和脑中也含有极少量镉,浓度分布范围分别为 0.4~7  $\mu\text{g/g}$  和 <0.24~0.4  $\mu\text{g/g}$ (Silva et al., 2020; 魏源, 2021)。

##### 3.1.2 铬

人体中总铬量(Cr)大约为 4~7 mg,成人平均每天可以通过饮食、呼吸和皮肤接触等方式摄入 50~600  $\mu\text{g}$  的铬(李争显等, 2020)。儿童摄入适量的 Cr 有助于生长发育、控制体重和保护心血管(王彩霞等, 2021)。当 Cr 被人体吸收后经过血液循环会运输至肝脏、肾脏和内分泌腺等器官组织中(Rahman and Singh, 2019)。

在人体中三价铬可以参与血糖调节,对糖尿病预防及其治疗方面有重要作用。 $\text{Cr}^{3+}$ 和  $\text{Cr}^{6+}$ 的形态最为稳定,由细胞外  $\text{Cr}^{6+}$ 还原产生的  $\text{Cr}^{3+}$ 不能进入细胞,并且产生很少或没有毒性,使细胞外还原过程成为解毒机制(Dayan and Paine, 2016)。肝脏中 Cr 的累积含量为 0.53~0.65  $\mu\text{g/g}$ ,可以显著促进其合成胆固醇及脂肪酸(林建和等, 2022),在脾脏中 Cr 含量一般为 0.52  $\mu\text{g/g}$ ,其主要功能是参与糖代谢,维持器官功能的正常运转。对于心脏来说,铬也是重要的微量元素之一。在心脏处 Cr 含量大约为 0.73  $\mu\text{g/g}$ ,它具有保护心血管,控制血液中胆固醇浓度等作用(Teraoka, 1981; Sgolastra et al., 2018)。

暴露在六价铬环境下会对人体器官组织造成损伤,其毒性大约是三价铬的 100 倍,一般可以表现为急性中毒或慢性疾病(Hossini et al., 2022)。研究表明细胞外大部分  $\text{Cr}^{6+}$ 会在胃肠系统中发生还原反应而被解毒,但极少部分  $\text{Cr}^{6+}$ 通过阴离子转运体进入细胞后,经过一系列代谢还原形成  $\text{Cr}^{5+}$ 、 $\text{Cr}^{4+}$ 和  $\text{Cr}^{3+}$ 产物,最终会在各器官组织中累积(Sun et al., 2015)。Cr 通过呼吸道进入体内易富集在肺部,侵害上呼吸道或引起咽炎、支气管炎等疾病,长期摄入还会致癌,在肺部 Cr 含量范围通常为 1.4~5.98  $\mu\text{g/g}$ (Sankhla, 2019)。肾脏对体内的  $\text{Cr}^{6+}$ 不会进行重吸收,大多数 Cr 会随尿液及粪便一起排出体外,少部分 Cr 可由胆汁排出,其累积含量一般为 0.45~0.5  $\mu\text{g/g}$ 。Ward and Mason(1987)利用中子活化分析技术对阿尔茨海默病患者与正常人脑组织(海马体和大脑皮层)进行元素含量对比发现,正常人脑组织中铬含量范围为 0.75~0.8  $\mu\text{g/g}$ ,而阿兹海默症患者铬含量比正常人偏高,说明脑组织中的 Cr 可能会引发某些神经系统紊乱的疾病。

##### 3.1.3 铅

铅元素(Pb)很容易被空气中的氧气氧化,其化



合物被机体吸收后会对神经、造血、消化和分泌等多个系统造成严重危害,因此理论上人体中含铅量越低越好(Fu and Xi, 2020)。人体可通过摄取食物、饮水等方式将铅带入体内。进入人体的铅中大约有 90% 会蓄积在骨骼,仍有 10% 左右会随血液循环遍布全身各个器官组织。经过食物或饮水等直接方式摄入的铅会被消化系统中多个器官吸收,肝脏作为消化腺之一,铅浓度一般为 $<0.5\sim 0.65\ \mu\text{g/g}$ (Zaksas et al., 2019)。吸入铅污染的空气后,铅在经过血液循环后会残留在肺中,通常人体肺中所含铅含量为 $<0.3\sim 0.4\ \mu\text{g/g}$ ,心脏处为 $<0.5\ \mu\text{g/g}$ 。脾脏在免疫系统中的地位不可替代,在铅转运过程中,脾脏中铅含量仅次于肾脏与肝脏中含量相近大约为 $<0.5\sim 0.66\ \mu\text{g/g}$ (Zaksas et al., 2019; 夏栋林等, 2021)。

成人与儿童对于铅的吸收能力与累积程度同样存在差异。婴幼儿摄入铅后有约 30% 会储存在体内,比成人更容易受到铅中毒的危害。例如成人血铅阈值为  $20\sim 40\ \mu\text{g/dL}$ ,而儿童仅为  $5\sim 10\ \mu\text{g/dL}$ (Marsh and Dragich, 2019)。人体各器官铅含量普遍不超过  $1\ \mu\text{g/g}$ ,其中肾脏和脑中的铅含量相对较高,一般为 $<0.5\sim 1.7\ \mu\text{g/g}$ 和 $<1.9\ \mu\text{g/g}$ (Iyengar, 1987)。由于铅中毒是蓄积性中毒,当肾脏和脑等器官中铅含量达到某一阈值后会影响到相关部位的正常工作,对婴幼儿的生长以及智力发育均会造成不可逆转的伤害(王永芳, 2000; Araujo et al., 2020)。

### 3.1.4 铜

铜在维护人体健康起到重要作用,每日摄入适量的铜可以促进细胞生长、加速新陈代谢、增强机体免疫力等,参与机体的造血过程,而过量则会出现铜中毒,导致人体肝脏、胃肠等器官出现代谢异常,严重还会威胁人的生命(王阳刚等, 2022)。正常成人体内总含铜量为  $100\sim 200\ \text{mg}$ ,肌肉和骨骼中的铜含量占总体的 50% 以上。肝脏是铜代谢的主要器官,在被人体摄入后通常在数小时内即有 60%~90% 会被肝脏吸收,之后以铜蓝蛋白的形式参与血液循环,因此其铜含量在各组织器官中最高达到  $12.2\sim 52.2\ \mu\text{g/g}$ (冯丽等, 2016)。儿童血液中铜含量一般较高为  $0.9\sim 1.9\ \text{mg/L}$ 。在成人体内女性血液中铜的浓度比男性更高,在男性血液中通常为  $0.7\sim 0.8\ \text{mg/L}$ ,在女性血液中可达到  $0.5\sim 1.1\ \text{mg/L}$ (Marsh and Dragich, 2019)。人体大脑中也含有少

量铜参与,铜含量摄入不足或过量均会导致大脑功能障碍,正常情况下大脑中铜含量水平为  $13.1\sim 35.1\ \mu\text{g/g}$ (余利民等, 2020)。铜元素参与体内多种酶的合成,其中的氧化酶是心脏血管的基质胶原和弹性蛋白合成的重要组成,缺铜会减少该类酶合成,破坏心血管原有形态和功能,影响心脏正常活动,心脏铜含量略低为  $12.5\sim 23.5\ \mu\text{g/g}$ (Isiozor et al., 2023)。人体肺部铜含量为 $<2.0\sim 38\ \mu\text{g/g}$ ,而由慢性铜中毒引发的呼吸系统症状最常见的有咳嗽、胸痛等,严重患者还会造成金属烟雾热。肾脏、脾脏等器官正常运转同样离不开铜元素的参与,铜浓度范围一般为  $<2.3\sim 45\ \mu\text{g/g}$ 和  $1.5\sim 11.2\ \mu\text{g/g}$ (Leung et al., 2010)。

### 3.1.5 锌

锌元素(Zn)在动物性和植物性食物中均存在,其中动物内脏、海生产品含量较为丰富,人体吸收利用率也更高。在稻米、小麦和大白菜等植物性食物中也存在少量锌,但是吸收率相对较低(秦立强等, 2022)。人体对锌元素的摄入除了通过食物获取外,在高锌的重金属环境中还能通过皮肤接触的方式摄入。

正常成年人体内的总锌为  $2\sim 3\ \text{g}$ ,通常以酶的形式分布于人体各个组织、器官和体液中(Chasapis et al., 2022)。与铜在人体中的分布相似,肌肉中 Zn 含量为  $182\sim 292\ \mu\text{g/g}$ ,大约占总量的 60%,骨骼中次之约占 30%。在人体各个器官中,肝脏、肾脏和甲状腺 3 处的浓度较高分别为  $146\sim 310\ \mu\text{g/g}$ 、 $165\sim 305\ \mu\text{g/g}$ 和  $46\sim 362\ \mu\text{g/g}$ (Leung et al., 2010; Zaksas et al., 2019)。这是由于 Zn 在肝脏处可诱导生化酶类及热休克蛋白表达,进而对肝脏起到明显的保护作用。同时 Zn 是肾上腺皮质的固有成分并富集在垂体、性腺等器官,可参与调节垂体肾上腺和甲状腺系统的功能,通过影响系统活动、激素分泌等方式来促进动物的性器官发育和保证性机能的正常发挥(Jeng and Chen, 2022)。

锌经人体消化系统摄入后,首先被胰脏吸收,因此该器官中锌含量也较高约为  $138\ \mu\text{g/g}$ 。锌与胰脏所分泌的一种小分子量配体结合后,在小肠黏膜实现最终吸收后参与血液循环(Morgan et al., 2017)。锌是对人体免疫功能影响较大的微量元素之一,可以促进伤口愈合,也能参与免疫器官的正

常运转如 T 细胞的分化等, 脾脏作为人体重要的免疫器官锌含量一般为 62~104  $\mu\text{g/g}$ (Silva et al., 2020)。锌作为金属酶和金属蛋白的辅助因子, 在人体肺部和心脏处的锌含量分别为 43~81  $\mu\text{g/g}$  和 98~154  $\mu\text{g/g}$ (Leung et al., 2010; Zaksas et al., 2019)。缺锌或者锌中毒均会危害人体的脑部健康, 对于儿童而言缺锌会影响智力发育, 影响孩童的模仿学习能力, 成年人则会损害记忆力, 增加患阿尔茨海默病的几率, 通常人体大脑中锌含量为 36~66  $\mu\text{g/g}$ (Morris and Levenson, 2017; Abdelsattar et al., 2022)。

### 3.1.6 砷

砷(As)是一种类金属元素, 其化合物对人体有很强的致癌性, 2011 年食品添加剂联合专家委员会(JECFA)基于总膳食暴露评估的无机砷的最大日耐受摄入量为每天 2.0~7.0  $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{bw})$ (许玉艳, 2014)。世界卫生组织(WHO)规定生活饮用水的砷限值为 10  $\mu\text{g/L}$ (WHO, 2011)。

人体主要通过饮食、呼吸等途径摄入少部分砷, 经肺脏和肠胃吸收后, 随血液循环遍布人体各处。少量的砷会贮存在呼吸、消化、免疫等多个系统中(Arcella et al., 2021)。砷中毒在临床上通常是与心肌损害有关, 正常情况下心脏处砷含量为 0.25  $\text{mg/kg}$ , 而患有动脉粥样硬化、雷诺氏综合征的患者体内砷含量更高(Ali et al., 2021; Su et al., 2022)。肝脏和胰脏作为消化系统中的重要器官, 容易暴露在高砷环境中, 砷蓄积量分别为 0.3  $\text{mg/kg}$  和 0.2  $\text{mg/kg}$ (Leung et al., 2010; 孙贵范, 2014)。人体可通过粪便、尿液和皮肤等方式排泄砷, 其中通过泌尿系统排泄砷离不开肾脏的过滤功能, 在肾脏中一般会残留部分砷而无法全部排出, 肾脏中砷的浓度大约为 0.4  $\text{mg/kg}$ (张维等, 2021; Mitra et al., 2022)。大脑长期处于砷环境中还会造成脑组织损伤, 引发头痛、惊厥甚至昏迷等症状, 但由于脑部与砷关联性不强, 砷浓度通常低于肝脏、肾脏等多数器官, 平均含量为 0.22  $\text{mg/kg}$ (关怀和朴丰源, 2015; Griggs et al., 2022)。由于砷对人体免疫系统功能的正常运转能起到抑制作用, 脾脏作为免疫系统一个重要的淋巴器官也含有部分砷, 一般为 0.38  $\text{mg/kg}$ (丁思等, 2020)。

### 3.2 对人体不同系统的毒性作用

地下水中的重金属可以在洗浴、农耕活动及饮食的期间通过直接或间接的方式转移至人体中积

表 4 重金属在不同器官的浓度分布及影响

Table 4 Concentration distribution and effect of heavy metals in different organs

重金属类型	器官/系统	含量/ ( $\mu\text{g/g}$ )	毒性作用
镉 (Cd)	心脏	<0.4~7	心肌病、心律问题增加 肝脏充血、肿大 胰腺分泌功能受损 咽喉干痛、肺气肿、肺纤维化 肾小管功能障碍
	肝脏	0.7~117	
	胰脏	<0.7~91.1	
	脾脏	<0.6~26.5	
	肺脏	<4.0~11.7	
	肾脏	4.5~1220	
铬 (Cr)	肌肉	<0.3~4.8	急性: 鼻溃疡和流鼻涕; 咳嗽、哮喘; 肠胃炎等 慢性: 慢性咽炎或支气管炎、铬性皮肤溃疡、接触性皮炎和湿疹
	大脑	0.75~0.8	
	心脏	0.73	
	肝脏	0.53~0.65	
	脾脏	0.52	
	肺脏	1.4~5.98	
铅 (Pb)	肾脏	0.45~0.50	儿童: 困倦、失眠、头晕、乏力、情绪不稳、听觉障碍、智商下降 成人: 男性生殖功能降低、增加高血压和肾损伤的风险; 女性出现流产、早产, 引发婴儿发育问题 血铅水平升高, 血红素合成受损
	大脑	<1.9	
	心脏	<0.5	
	肝脏	<0.5~0.65	
	脾脏	<0.5~0.66	
	肺脏	<0.3~0.4	
铜 (Cu)	肾脏	<0.5~1.7	脑损伤造成认知障碍, 影响记忆力 慢性肝炎、肝硬化, 甚至肝衰竭 慢性贫血; 肠胃受损
	肌肉	<0.5~0.64	
	血管系统	(儿童)5~10 $\mu\text{g/dL}$ (成人)20~40 $\mu\text{g/dL}$	
	大脑	13.1~35.1	
	心脏	12.5~23.5	
	肝脏	12.2~52.2	
锌 (Zn)	脾脏	1.5~11.2	影响儿童智力发育、损害记忆力, 增加成人患阿尔茨海默病的几率 上腹痛、呕吐、恶心和疲劳、增加心脏病和糖尿病等其他疾病的风险
	肺脏	<2.0~38	
	肾脏	<2.3~45	
	肌肉	<12.5~23.5	
	生殖系统	4.0	
	大脑	36~66	
砷 (As)	心脏	98~154	低水平暴露: 恶心和呕吐、心律异常、血管损伤、肌肉损伤等 长期低水平暴露: 皮肤病变、损伤内脏器官、致癌
	肝脏	146~310	
	脾脏	62~104	
	肺脏	43~81	
	肾脏	165~305	
	肌肉	182~292	
镉 (Cd)	生殖系统	40	低水平暴露: 恶心和呕吐、心律异常、血管损伤、肌肉损伤等 长期低水平暴露: 皮肤病变、损伤内脏器官、致癌
	大脑	0.22	
	心脏	0.25	
	肝脏	0.30	
	脾脏	0.38	
	肺脏	0.56	
砷 (As)	肾脏	0.40	低水平暴露: 恶心和呕吐、心律异常、血管损伤、肌肉损伤等 长期低水平暴露: 皮肤病变、损伤内脏器官、致癌
	肌肉	0.31	

注: 数据来源: Teraoka, 1981; Wang et al., 1991; Katoh et al., 2002; Leung et al., 2010; 孙贵范, 2014; Zhou et al., 2015; 张吟等, 2016; Morris and Levenson, 2017; Planchart et al., 2018; Zaksas et al., 2019; 李争显等, 2020; Araujo et al., 2020; 高温婷等, 2021; 韩致超等, 2021; Griggs et al., 2022; Hossini et al., 2022; Mitra et al., 2022。

累, 土壤中的重金属则主要是通过食物摄入被机体吸收(Fu and Xi, 2020)。各个系统中重金属的含量

分布有所差异,而对不同器官的毒性作用主要与系统的承受能力有关。同时由于生长发育阶段的差别,成年人与儿童对各元素的承受能力也有所区别。当两者暴露在同一剂量下时,通常成人损伤较小,而儿童的健康更易遭受威胁(Balali-Mood et al., 2021)。总体来说,人体所表现的疾病症状与重金属元素的种类、暴露水平、摄入途径、接触时长以及作用部位和作用方式有关(图 4)。

### 3.2.1 神经系统

神经系统是人体结构和功能最复杂的系统,由脑和脊髓构成的中枢神经系统以及由脑神经、脊髓神经和内脏神经构成的周围神经系统组成。重金属中毒容易引发人体某些中枢神经系统(CNS)疾病及儿童智力发育障碍等(Araujo et al., 2020; 王永芳, 2000)。

慢性染镉可导致血-脑屏障通透性增加,随着镉在脉络丛中蓄积会逐步损害脉络丛细胞进而破坏脑屏障,进入中枢神经系统,通过诱导细胞凋亡或坏死引起大脑的形态学改变。镉还会通过下丘脑作用来影响单胺类神经递质的含量变化,或通过慢性染镉的方式改变脑组织中酶的活性(Branca et al., 2020)。脑细胞中铜浓度超过代谢需要同样会出

现毒性效应(Rihel, 2018)。Zhou et al. (2015)提出高浓度的铜会通过损害注意力来影响工作记忆。锌中毒还会引起创伤性脑损伤、中风、癫痫和神经退行性疾病相关的神经元损伤和死亡,在“Zincergic”神经元的正常放电过程中,泡状游离态的锌会被释放到突触间隙中去调节多个突触后神经元受体。

长期处于神暴露环境下的儿童心智发育更加迟缓,患有癫痫等脑部病症的概率更高(刘军霞等, 2020)。已有研究表明中等层次的神中毒会对感觉神经产生毒性效应,疼痛感和反应明显变迟钝,更为严重的神中毒会影响运动神经,导致肌无力和瘫痪(关怀和朴丰源, 2015)。而对于神慢性中毒所导致的神经病变还可能会造成永久性损伤(孙贵范, 2014)。当多种重金属同时中毒时还有可能导致代谢综合征,增加心脏病和糖尿病等其他疾病的风险(Planchart et al., 2018)。

### 3.2.2 消化系统

消化系统包括消化道(食道、肠胃等)和消化腺(肝脏、胰腺等),重金属中毒后会造胃肠黏膜脱落、浅表性坏死以及抑制胰腺的分泌功能,影响肠道对营养物质的消化、吸收和利用,进而导致体重

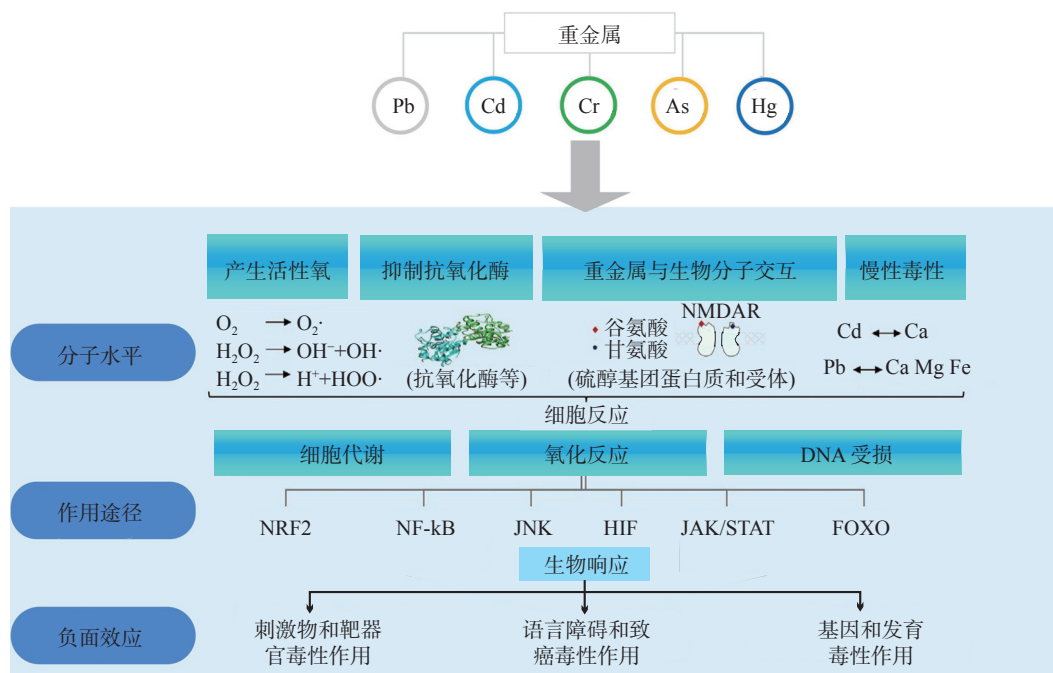


图 4 重金属对人体的损伤机制(据 Deng et al., 2022 修改)

Fig. 4 Injury mechanism of heavy metals to human body (modified from Deng et al., 2022)

下降(Liu et al., 2022)。当机体铜中毒时通常会引发胃肠道的负反馈,如胃痛、消化不良、黑便、黄疸、厌食和呕吐,并伴有胃部糜烂等症状(Gamakranage et al., 2011)。由于误食砷或以其他方式吸收大量的砷会导致肠胃消化道血管的通透性增加进而引发体液流失或造成低血压,黏膜还可能会进一步发炎、坏死形成胃穿孔(Griggs et al., 2022)。

镉离子通过消化道进入人体后蓄积在肝脏处会引起肝脏病变,如肝脏脂质过氧化及自由基大量产生后抑制抗氧化酶的活力,造成肝脏细胞损害,可表现为肝脏充血、肿大等症状(高温婷等, 2021)。还有研究表明当铜在肝脏中过度富集时会导致威尔森病(WD),这是一种 P1B-ATP 酶功能障碍导致肝细胞无法正常代谢 Cu 的遗传性疾病(冯丽等, 2016)。该病患者在早期主要是出现腹痛、肝肿大和黄胆等与肝脏有关的症状,可能会演变成慢性肝炎、肝硬化,甚至肝衰竭等重症,通常情况下肝脏中铜含量范围是 15~55  $\mu\text{g/g}$ ,而在威尔森病患者的肝脏中含铜量可达 300  $\mu\text{g/g}$ (Oe et al., 2016)。

### 3.2.3 生殖系统

生殖系统分为外生殖器和内生殖器,而重金属导致的毒理特征主要体现在内生殖器。中、小剂量所导致的损害是可逆的,一般作用在精母细胞和精子细胞(Gossai et al., 2015)。但男性暴露在镉、铅和砷等高水平重金属环境下,睾丸中部分酶的活性会被抑制,使曲细精管细胞大部分不可逆变性、坏死。Xu et al. (2012)分析发现二甲基砷浓度升高可能会使精子质量和浓度下降,  $\text{As}^{3+}$ 可能通过 NF- $\kappa\text{B}$  信号通路损害雄性生殖系统,说明长期暴露在高砷环境可能导致男性不育。

重金属暴露对雌性哺乳动物的生殖系统毒性作用更加明显,女性长期食用高镉食物易诱发妊娠、授乳和内分泌失调等症状(蔡嘉旖和张文丽, 2019; 李争显等, 2020),已有研究表明 As 易穿过胎盘,特别是在妊娠早期,会导致自然流产、死产、早产和低出生体重。Remy et al. (2014)对 183 名暴露在砷环境下婴儿的脐带血进行分析,发现砷含量与婴儿体重呈负相关,砷剂量越高,新生儿体重越轻。Fei et al. (2013)对孕妇尿砷含量和新生儿体重的关系研究进一步证实了砷会抑制新生儿的体重增长。

### 3.2.4 其他系统

泌尿系统包括肾脏、膀胱和输尿管等,排出人体新陈代谢产生的废物,保持机体内环境的平衡和稳定是其主要功能。其中肾脏是重金属镉的主要蓄积部位和靶器官,当肾皮质中 Cd 浓度达到 200  $\mu\text{g/g}$  则会出现肾损伤,而当浓度大于 200  $\mu\text{g/g}$  时造成的肾损伤通常是不可逆的,并且肾损伤还会引起肾近曲小管吸收功能的下降,导致低分子量蛋白质、钙、葡萄糖、尿酸和磷酸盐等在尿中大量排出(吴小胜等, 2011)。若短期内大量摄入砷还可能会造成急性肾小管和肾丝球坏死发生蛋白尿(于云江等, 2007)。

心血管系统包括心脏和血管两部分,承担人体血液、氧气、营养物质和激素转运的重要任务。血管内皮是重金属毒性的重要靶点,重金属暴露主要是通过氧化应激、促炎作用和内分泌干扰等机制损伤血管内皮细胞(张逸和顾爱华, 2020)。镉中毒引发的心血管系统障碍会导致心肌内高能磷酸盐贮存量下降,降低心肌细胞收缩性和心血管系统的兴奋性。长期暴露在铅环境下会削弱血管张力,影响血管的自愈能力。通常重金属中毒的患者有高血压、动脉粥样硬化、心肌病或血管内皮细胞损伤等心血管疾病的概率更高(Borne et al., 2015; Ali et al., 2021)。

在重金属环境下引发的皮肤性症状较为明显,直接暴露在铬化合物下会引发铬性皮肤溃疡、接触性皮炎和湿疹(Dayan and Paine, 2016)。高砷环境下的患者皮肤颜色加深,表面出现块状的色素沉积斑,部分角质层增厚(毛广运等, 2010)。大部分砷中毒的患者皮肤过度角质化情况不会出现癌化,但少部分人会转变为癌症前期病灶,类似于原位性皮肤癌(张维等, 2021)。

综合所述,根据重金属在自然界中的多种循环过程及进入人体方式,结合重金属在人体中的富集程度,重金属与砷在土壤和人体中的富集模式图(图 5)展示了重金属和砷在自然和人体中的迁移方式。岩石风化、火山活动等自然成因与交通排放、工农业活动等人为活动因素具有叠加作用,促进重金属进入土壤环境,并显著影响土壤生物的生长代谢。最终重金属进入人体的不同方式会导致其在人体各器官和系统中累积程度的差异化。

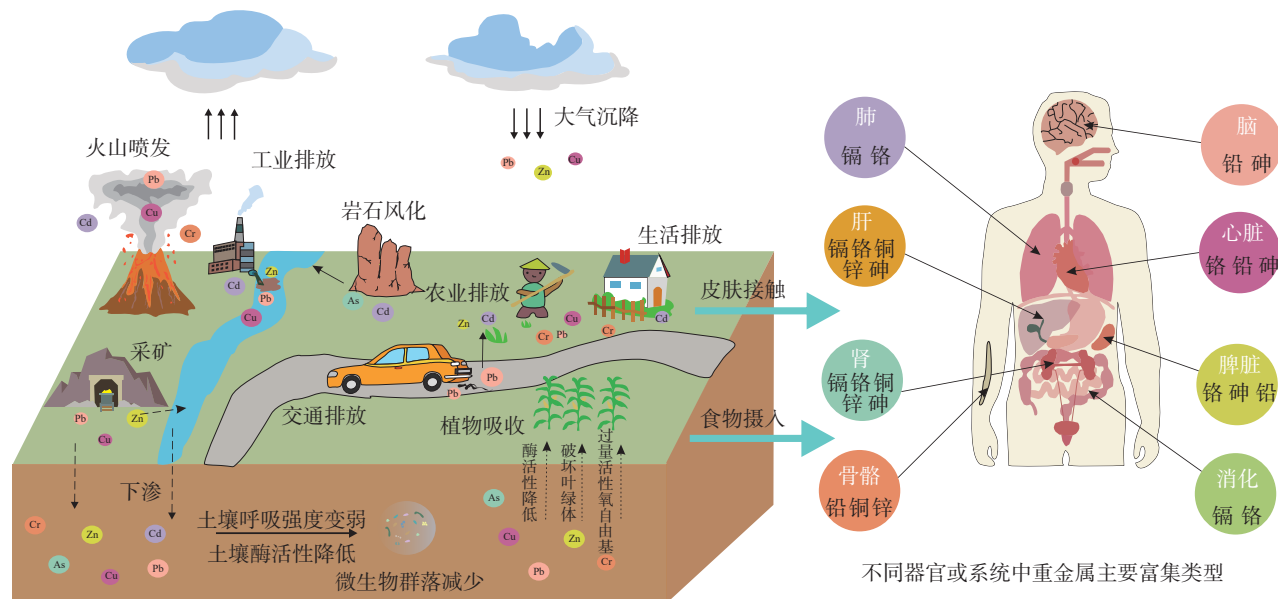


图5 重金属与砷在土壤和人体中的富集模式图

Fig.5 Concentration enriching patterns of heavy metals and arsenic in soil and human body

## 4 土壤与地下水修复技术方法简介

### 4.1 土壤重金属主要修复技术

目前针对土壤重金属的修复主要基于三种修复思路:第一种是通过吸附等方式直接将重金属从土壤中去;第二种是改变重金属在土壤中的存在形态,抑制其在土壤中的迁移能力或生物有效性;第三种是通过人为阻隔技术限制重金属的迁移。在三种修复思路的基础上,修复技术主要划分为物理修复技术、化学修复技术、生物修复技术3类(赵鑫娜等, 2023; 李强等, 2023)。

物理修复技术包括工程措施、电动修复、玻璃化和热处理等方法。工程措施的方式一般工程量较大、成本较高并且容易对原土壤的结构造成破坏,降低土壤肥力,如客土法、换土法和翻土法(曲磊和石琛, 2019)。电动修复法是将阴极和阳极插入土壤中再通加低功率电流,使土壤重金属向电极区域定向移动并富集,通过沉淀或移除进行集中处理(Wu et al., 2021)。该方法成本较低且较为环保,但是仅适用于小面积黏质土壤,且技术层面还不够成熟,容易造成资源浪费(图6)。热处理法主要针对汞等挥发性重金属污染土壤进行修复,通过将土壤加热至600~800℃使汞从土壤中解吸出来(Yao et al., 2012)。该方法能源消耗较大,对处理设备要

求较高,在加热和蒸汽收集时需严格设计和操作,以防造成二次污染。

化学修复技术主要包括化学淋洗技术和固化/稳定化技术。化学淋洗技术是将特定的淋洗剂注入土壤中,提高重金属在土壤中的迁移或溶解能力,再将重金属从固相土壤中提取至液相后进一步集中处理。目前常用的淋洗剂包括表面活性剂、螯合剂、无机淋洗剂、盐溶液和酸性溶液等(赵鑫娜等, 2023)。该方法易于操作,治理范围较广,但是淋洗剂的成本较高,产生的淋洗废液需要二次处理,并且在淋洗出目标重金属的同时还会带有其他营养元素,从而导致土壤肥力降低。固化/稳定化技术是指向被污染的土壤中添加固化/稳定剂,降低重金属在土壤中的迁移能力或改变其形态,该方法在重金属修复中应用较为广泛。学者们针对不同重金属的特性研究出不同类型的固化/稳定剂,最为常见的有磷酸盐类、铁盐类、黏土矿物类、钙基类和生物炭类等(Derakhshan et al., 2018)。为提高修复效果,在固化/稳定剂材料方面不断创新,施用方式也更加科学,是一种具有很好前景的技术手段。

生物修复技术包括动物修复技术、微生物修复和植物修复技术。动物修复技术是利用蚯蚓、鼠类等动物的排泄物可以对Pb、Cd等重金属进行吸附这一特性来达到修复目的(Singh et al., 2020)。在

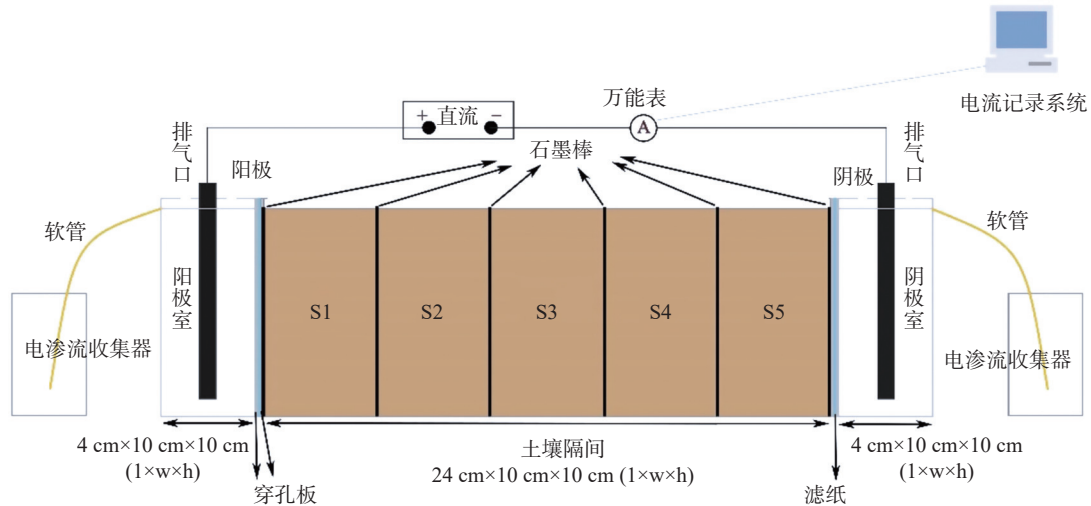


图 6 电动修复技术修复铬污染土壤(据 Wu et al., 2021 修改)

Fig.6 Electric remediation technology remediates chromium-contaminated soil (modified from Wu et al., 2021)

矿区生活的蚁种在进行生态系统工程活动时还可以改善土壤质量,降低重金属含量(Khan et al., 2017)。微生物修复技术是通过微生物的呼吸、沉淀和氧化还原等方式参与重金属形态的转化,从而降低重金属在土壤中的活性及对植物的毒性。该方法对环境影响较小,能很好地维持土壤肥力,但是由于微生物的生长条件限制以及该技术修复周期相对较长,导致其应用推广受到限制。植物修复技术是通过在被污染的土壤中种植合适的植物,利用植物自身对重金属的富集特性,实现改善土壤环境、降低土壤重金属浓度的目标(Shah and Daverey, 2020)。该技术对植物种类有要求,需要筛选出对重金属表现超富集的植物。世界上暂已发现 400 多种超富集植物,但通常单种植物仅针对某一种或两种金属表现出超富集能力,如蜈蚣草就是典型的砷超富集植物,在砷污染土壤的修复过程中占据重要的地位(Chen et al., 2002)。

#### 4.2 地下水修复技术方法简介

地下水资源是中国北方大多数城市用水的主要来源,对于用水紧缺的地区更是唯一的供水源。而随着工业的迅猛发展、城市化进程的加快以及矿产资源的大量开采,地下水重金属污染问题日益突显(曹文庚等, 2022)。因此,对地下水重金属污染进行修复迫在眉睫。地下水中重金属污染治理技术按照修复处理位置的差异可分为异位修复技术、原位修复技术和监测修复技术(费宇红等, 2022)。

异位修复技术是将污染水体转移至地面上进行处理后再加以利用。对于地下水重金属污染的异位修复主要是抽出-处理技术。抽出-处理技术是指在污染场地布置合适数量的井,通过水泵将被污染的地下水抽出后经过相应设备进行处理,使其达到相应用水标准后再进行排放(贺亚雪等, 2016)。该方法的优势是修复周期短,见效快,但是实际应用时运行成本较高并且需要定期监测和维护。

原位修复技术是指在不破坏地下水自然环境的前提下,对重金属污染的水体进行原地修复。该技术一般包括可渗透反应墙(PRB)、原位电动修复、原位化学修复以及原位生物修复技术(Wilson et al., 1986; 费宇红等, 2022)。PRB 技术主要是通过地下水流方向上建立一道由活性材料填充的墙体,当被重金属污染的水体通过反应墙时,活性材料会对重金属进行吸附、降解等,从而降低地下水中重金属的浓度。该技术是目前较为流行的修复方式,可以结合多种修复方法对重金属污染的水体进行联合修复。但是该技术工程量较大,修复成本较高,还存在一定的局限性,如长期处理过程中容易出现堵塞或活性材料老化情况,因此需要定期更新反应介质(Faisal et al., 2018)。原位电动修复是通过向水体中施加直流电形成电场,使重金属离子在电场的作用下定向迁移出地下水(曹文庚等, 2023)。该方法不会引入新的污染物并且修复目标性较强,但是电阻极化或活化极化可能会使电流降低。

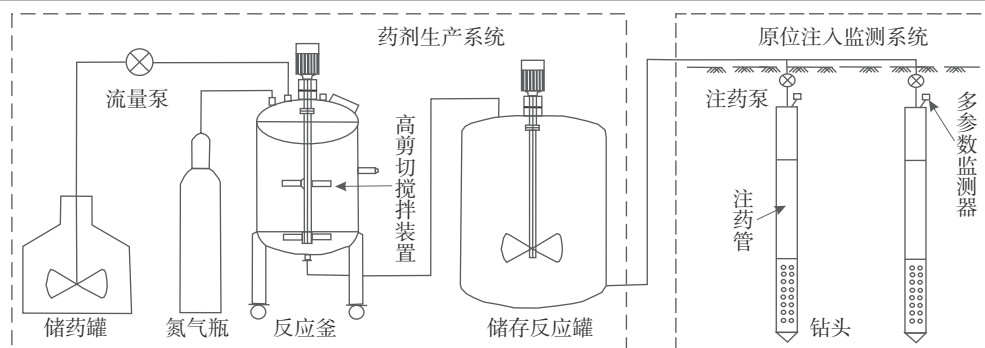


图7 一种纳米铁药剂制备与原位注入设备(据王棣等, 2018 修改)  
Fig.7 Equipments for nZVI preparation and in-situ injection (modified from Wang Di et al., 2018)

原位化学技术是利用氧化剂或还原剂通过泵注入地下含水层中(图7),与地下水中污染物发生氧化或者还原反应转化为无害物质,从而达到修复地下水的目的(王棣等, 2018)。该方法具有去除重金属效率高,修复周期短,投入成本低等优势。但是在多种重金属污染的地下水中,会出现去除一种污染物时导致另外一种重金属被释放出来重新造成污染。原位生物修复技术包括微生物修复和植物修复,微生物修复通常是指在不破坏地下水自然环境的前提下,利用本土或人工培育的微生物群原位降解地下水中的重金属(Aghababai and Akbar, 2020)。该方法较为环保,基本不会产生二次污染,但是其修复周期较长,在选取和培养目标菌群时较为繁琐。植物修复是利用植物对某种重金属的超富集特性,通过固定化、去除或降解的机制来改善地下水环境(曹文庚等, 2023)。该方法同样具有环保的优势,并且成本效益高,对生物多样性有促进作用。植物修复在实际应用中的局限性主要体现在对修复植物种类选取较为苛刻,需要考虑植物在污染水体环境中的存活率、对目标污染物的去除率以及它的可持续利用性等。因此两种生物修复技术难以实现大面积推广,容易受到修复环境的限制。

实际上,上文阐述的地下水修复技术在实际应用中均难以达到完美修复。尤其在人类活动的参与下使地下水环境更加复杂,通常存在两种或多种重金属含量超标的情况,因此在对重金属污染的地下水进行修复时可以考虑选用多种方式联合修复的方法治理。

## 5 结论

重金属与砷在自然成因与人类活动的影响下

在土壤中产生富集,高浓度的重金属胁迫环境不仅会抑制土壤微生物的生长发育,同时还会进入植物体内,通过食物链进入人体中,从而破坏人体的器官和组织,威胁人体健康。

全球范围内的土壤中均广泛存在重金属与砷。在我国的不同流域中土壤重金属的空间富集规律具有差异性。南方土壤中重金属具有较高的背景值,同时城市发展速度快,工业发达,会造成长江流域、珠江流域等地区土壤重金属含量超标;在海河—滦河流域、黄河流域等北方地区在矿产开采地区土壤重金属的赋存会受到开矿影响,城市和乡村地区土壤重金属的累积则分别受到城市交通、污水排放和农业活动的影响。

土壤中的重金属在高浓度胁迫下会通过抑制酶活性、破坏细胞结构、产生活性氧等方式抑制土壤生物的生长发育。重金属等元素通过食物摄入、皮肤接触的方式进入人体后,长期的累计会阻碍大脑发育、抑制细胞代谢、造成呼吸困难、诱发肿瘤生成,因此对于重金属对人类健康产生的负面效应需要引起我们的进一步重视。

针对土壤与地下水中高浓度重金属和砷的问题,主要通过物理、化学、生物等方式进行阻隔、吸附或降解,但是探索出更加低廉、无二次污染的修复手段仍需要长期持续研究。

## References

- Abdelsattar M M, Vargas-Bello-Perez E, Zhuang Y, Fu Y, Zhang N. 2022. Impact of dietary supplementation of beta-hydroxybutyric acid on performance, nutrient digestibility, organ development and serum stress indicators in early-weaned goat kids[J]. *Animal Nutrition*, 9: 16–22.

- Aghababai B A, Akbar E. 2020. Biosorption, an efficient method for removing heavy metals from industrial effluents: A review[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 17: 100503.
- Ali M M, Hossain D, Al-Imran, Khan M S, Osman M H. 2021. Environmental Pollution with Heavy Metals: A Public Health Concern[M]. UK: IntechOpen.
- Araujo M, Figueiredo N D, Camara V M, Asmus C I R F. 2020. Maternal-child exposure to metals during pregnancy in rio de janeiro city, brazil: The rio birth cohort study of environmental exposure and childhood development (PIPA project)[J]. *Environmental Research*, 183: 109155.
- Arcella D, Cascio C, Ruiz J A G. 2021. Chronic dietary exposure to inorganic arsenic[J]. *European Food Safety Authority*, 19(1): 6380.
- Balali-Mood M, Naseri K, Tahergorabi Z, Khazdair M R, Sadeghi M. 2021. Toxic mechanisms of five heavy metals: Mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 12: 643972.
- Borne Y, Barregard L, Persson M, Hedblad B, Fagerberg B, Engstrom G. 2015. Cadmium exposure and incidence of heart failure and atrial fibrillation: A population-based prospective cohort study[J]. *BMJ Open*, 5(6): e007366.
- Branca J, Fiorillo C, Carrino D, Paternostro F, Taddei N, Gulisano M, Pacini A, Becatti M. 2020. Cadmium induced oxidative stress: Focus on the central nervous system[J]. *Antioxidants (Basel)*, 9(6): E492.
- Cai Jiayi, Zhang Wenli. 2019. Advances of epidemiological study on hazard of environmental population exposure and health cadmium pollution[J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 9(6): 621-627 (in Chinese with English abstract).
- Cao Wengeng, Wang Yanyan, Ren Yu, Fei Yuhong, Li Jincheng, Li Zeyan, Zhang Dong, Shuai Guanyin. 2022. Status and progress of treatment technologies for arsenic-containing groundwater[J]. *Geology in China*, 49(5): 1408-1426 (in Chinese with English abstract).
- Cao Wengeng, Wang Yanyan, Zhang Dong, Sun Xiaoyue, Wen Aixin, Na Jing. 2023. Research status and new development on heavy metals removal from industrial wastewater[J]. *Geology in China*, 50(3): 756-776 (in Chinese with English abstract).
- Chasapis C T, Ntoupa P A, Spiliopoulou C A, Stefanidou M E. 2022. Recent aspects of the effects of zinc on human health[J]. *Archives of Toxicology*, 94(5): 1443-1460.
- Chen Huaiman, Zheng Chunrong, Tu Cong, Zhu Yongguan. 1999. Heavy metal pollution in soils in China: Status and countermeasures[J]. *AMBIO — A Journal of the Human Environment*, 28(2): 130-134, 207 (in Chinese with English abstract).
- Chen Lili, Fu Yuanyuan, Wang Yanping, Zhang Jiayang, Lin Fang, Mao Xuefei. 2019. Effects of Cd<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> on seed germination and seedling growth of triticum aestivum and 2 weed species[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 39(1): 50-57 (in Chinese with English abstract).
- Chen T, Wei C, Huang Z, Huang Q, Lu Q, Fan Z. 2002. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(11): 902-905.
- Chen Xiaomin, Zhu Baohu, Yang Wen, Ji Hongbing. 2015. Sources, spatial distribution and contamination assessments of heavy metals in gold mine area soils of Miyun reservoir upstream, Beijing, China[J]. *Environmental Chemistry*, 34(12): 2248-2256 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yan, Zhu Xianfang, Ji Hongbing, Qiao Mingming. 2014. Particle size distribution of heavy metals in soils around the gold mine of Detiangou-Qifengcha, Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 34(1): 219-228 (in Chinese with English abstract).
- Crispo M, Dobson M, Blevins R, Meredith W, Lake J, Edmondson J. 2021. Heavy metals and metalloids concentrations across UK urban horticultural soils and the factors influencing their bioavailability to food crops[J]. *Environmental Pollution*, 288: 117960.
- Dai Qianqian, Xu Mengjie, Zhuang Shunyao, Chen Dongfeng. 2022. Study on factors influencing heavy metal of farmland soils based on geographical detector in Fengqiu County [J]. *Soils*, 54(3): 564-571 (in Chinese with English abstract).
- Dai Xuebin, Xu Yuxing, Deng Yi, Ma Jiazhu, Cheney Lili, Mu Xingmin. 2021. Effects of soil acid stress on growth physiology and cadmium enrichment characteristics of *lolium perenne*[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 28(6): 389-396 (in Chinese with English abstract).
- Das S, Dash H, Chakraborty J. 2016. Genetic basis and importance of metal resistant genes in bacteria for bioremediation of contaminated environments with toxic metal pollutants[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100: 2967-2984.
- Dayan A D, Paine A J. 2016. Mechanisms of chromium toxicity, carcinogenicity and allergenicity: Review of the literature from 1985 to 2000[J]. *Human & Experimental Toxicology*, 20(9): 439-451.
- Deng H Y, Tu Y L, Wang H, Wang Z Y, Li Y Y, Chai L Y, Zhang W C, Lin Z. 2022. Environmental behavior, human health effect, and pollution control of heavy metal(loid)s toward full life cycle processes[J]. *Eco-Environment & Health*, 1(4): 229-243.
- Derakhshan N Z, Jung M C, Kim K H. 2018. Remediation of soils contaminated with heavy metals with an emphasis on immobilization technology[J]. *Environmental Geochemistry Health*, 40(7): 927-953.
- Ding Si, Xu Mengrou, Mei Chenghao, Yang Qianlei, Wu Jing, An Yan. 2020. Progress in arsenic-induced programmed cell death[J]. *Chinese Journal of Endemiology*, 39(7): 542-546 (in Chinese with English abstract).
- Dong Yan, Sun Lu, Li Haitao, Zhang Zuochen, Zhang Yuan, Li Gang, Guo Xiaobiao. 2021. Sources and spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils from Xiongan New Area, China[J]. *Hydrogeology Engineering Geology*, 48(3): 172-181 (in Chinese with English abstract).



- with English abstract).
- Faisal A A H, Sulaymon A H, Khaliefa Q M. 2018. A review of permeable reactive barrier as passive sustainable technology for groundwater remediation[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(5): 1123–1138.
- Fang Junjia, Li Qiang, Liu Chang, Jin Zhen Jiang, Liang Yueming, Huang Binghui, Lu Xiaoxuan, Peng Wenjie. 2018. Carbon metabolism characteristics of the karst soil microbial community for Pb–Zn mine tailings[J]. *Environmental Science*, 39(5): 2420–2430 (in Chinese with English abstract).
- Fang Ming, Wu Youjun, Liu Hong, Jia Ying, Zhang Yuan, Wang Xuotong, Wu Minghong, Zhang Chunlei. 2013. Distribution, sources and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Yangtze River estuary[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 33(2): 563–569 (in Chinese with English abstract).
- Fang Y, Lu L, Liang Y, Peng D, Aschner M, Jiang Y. 2021. Signal transduction associated with lead-induced neurological disorders: A review[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 150: 112063.
- Fei D L, Koestler D C, Li Z, Giambelli C, Sanchez–Mejias A, Gosse J A, Marsit C J, Karagas M R, Robbins D J. 2013. Association between in utero arsenic exposure, placental gene expression, and infant birth weight: A US birth cohort study[J]. *Environmental Health*, 12(1): 58.
- Fei Yuhong, Liu Yaci, Li Yasong, Bao Xilin, Zhang Pengwei. 2022. Prospect of groundwater pollution remediation methods and technologies in China[J]. *Geology in China*, 49(2): 420–434 (in Chinese with English abstract).
- Feng Li, Wen Maoyao, Wang Wanqin, Fan Xiaoli, Yang Li. 2016. Clinical characteristics of wilson's disease: A retrospective analysis of admission data among 126 patients[J]. *Journal of Sichuan University Medical Science Edition*, 47(1): 128–130 (in Chinese with English abstract).
- Fu Z S, Xi S H. 2020. The effects of heavy metals on human metabolism[J]. *Toxicology Mechanisms and Methods*, 30(3): 167–176.
- Gamakaranage C S S K, Rodrigo C, Weerasinghe S, Gnanathanan A, Puvanaraj V, Fernando H. 2011. Complications and management of acute copper sulphate poisoning: A case discussion[J]. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 6(1): 34.
- Gao Wengting, Wang Jinrong, Tang Guifeng, Su Lanli, Qiao Hanzheng, Zhang Yakun, Li Linru. 2021. Establishment of a model of cadmium-induced oxidative damage in rat liver[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 57(12): 213–216, 222 (in Chinese).
- Ghosh K N I. 2018. Cadmium treatment induces echinocytosis, DNA damage, inflammation, and apoptosis in cardiac tissue of albino Wistar rats[J]. *Environmental Toxicology & Pharmacology*, 59: 43–52.
- Gossai A, Lesseur C, Farzan S, Marsit C, Karagas M R, Gilbert–Diamond D. 2015. Association between maternal urinary arsenic species and infant cord blood leptin levels in a New Hampshire Pregnancy Cohort[J]. *Environmental Research*, 136: 180–186.
- Griggs J L, Chi L, Hanley N M, Kohan M, Herbin–Davis K, Thomas D J, Lu K, Fry R C, Bradham K D. 2022. Bioaccessibility of arsenic from contaminated soils and alteration of the gut microbiome in an in vitro gastrointestinal model[J]. *Environmental Pollution*, 309: 119753.
- Gu Tao, Zhao Xinwen, Hu Xueyuan, Hu Xueyuan, Yu Wang, Zeng Ming. 2018. Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in soil from an agricultural park of Xinmadun Village, Zhuhai City[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 37(4): 419–430 (in Chinese with English abstract).
- Guan Huai, Pu Fengyuan. 2015. Research progress on arsenic neurodevelopmental toxicity and mechanism[J]. *Chinese Journal of Public Health*, 31(4): 538–540 (in Chinese).
- Guney M, Kismelyeva S, Akimzhanova Z, Beisova K. 2020. Potentially toxic elements in toys and children's jewelry: A critical review of recent advances in legislation and in scientific research[J]. *Environmental Pollution*, 264: 114627.
- Han Zhichao, Kang Hui, Zhang Zhen, Gao Yuanyuan, Yang Qian, Zhang Yifan, Liu Rujie, Li Yuxing. 2021. Relationships of environmental cadmium exposure with changes of renal function and urinary transforming growth factor- $\beta$ 1[J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 38(3): 210–216 (in Chinese with English abstract).
- Hasan M M, Uddin M N, Ara–Sharmeen I F, Alharby H, Alzahrani Y, Hakeem K R, Zhang L. 2019. Assisting Phytoremediation of Heavy metals using chemical amendments[J]. *Plants*, 8(9): e295.
- He Yaxue, Dai Chaomeng, Su Yiming, Zhang Yalei. 2016. Research progress of remediation technologies on heavy metal pollution in groundwater[J]. *Technology of Water Treatment*, 42(2): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Hosseini–Khannazer N, Azizi G, Eslami S, Alhassan M H, Fayyaz F, Hosseinzadeh R, Usman A B, Kamali A N, Mohammadi H, Jadidi–Niaragh F, Dehghanifard E, Noorisepehr M. 2020. The effects of cadmium exposure in the induction of inflammation[J]. *Immunopharmacol Immunotoxicol*, 42(1): 1–8.
- Hossini H, Shafie B, Niri A D, Nazari M, Esfahlan A J, Ahmadpour M, Nazmara Z, Ahmadimaneh M, Makhdomi P, Mirzaei N, Hoseinzadeh E. 2022. A comprehensive review on human health effects of chromium: Insights on induced toxicity[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(47): 70686–70705.
- Hou Ming, Zhang Xinglong, Lu Chang, Chen Ru. 2012. Effects of V, Cr single and combined stress on the growth and physiological characteristics of wheat seedling[J]. *Environment Chemistry*, 31(7): 1016–1022 (in Chinese with English abstract).
- Hu Jiayao, Wang Wumin, Kuang Xueshao, Liu Wensheng. 2022. Seed germination and seedling physiological characteristics of *Celosia argentea* under cadmium stress[J]. *Pratacultural Science*, 39(7): 1391–1398 (in Chinese with English abstract).

- Huang Yong, Ouyang Yuan, Liu Hong, Zhang Tengjiao, Zhang Jinghua, Li Tong, Wu Junyi, Shao Lu, Gao Wenlong. 2023. Restriction of geological formation on soil properties and its ecological environmental effects: Example from red soil in the Xichang Area[J]. *Northwestern Geology*, 56(4): 196-212.
- Huang Zhe, Qu Shihua, Bai Lan, Shang Shaopeng, Li Yumei, Zhang Lianke. 2017. Spatial distribution characteristics and pollution assessment of heavy metal soils in urban areas Baotou[J]. *Environmental Engineering*, 35(5): 149-153 (in Chinese with English abstract).
- Isiozor N M, Kunutsor S K, Vogelsang D, Isiozor I, Kauhanen J, Laukkanen J A. 2023. Serum copper and the risk of cardiovascular disease death in Finnish men[J]. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 33(1): 151-157.
- Iyengar G V. 1987. Reference values for the concentrations of As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, I, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se and Zn in selected human tissues and body fluids[J]. *Biological Trace Element Research*, 12(1): 263-295.
- Jeng S S, Chen Y H. 2022. Association of Zinc with Anemia[J]. *Nutrients*, 14(22): 4918.
- Jiang Yongrong, Liang Ying, Zhang Xuehong, Qin Yongli, Wu Changcui, Li Xuejun. 2019. Vertical microbial community structure of heavy metal contaminated soils from mine tailings of different degrees in lead-zinc mining areas[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 28(10): 2079-2088 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yu, Guo Qingjun, Deng Yinan. 2022. Research progress in the distribution of heavy metals in sediments and soils in the Yangtze River Basin[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 41(4): 804-812 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yumei, Zhang Chen, Huang Xiaolan, Ni Caiying, Wang Jinfeng, Song Pengfei, Zhang Zhibin. 2016. Effect of heavy metals in the sediment of Poyang Lake estuary on microbial communities structure base on Mi-seq sequencing[J]. *China Environmental Science*, 36(11): 3475-3486 (in Chinese with English abstract).
- Katoh Y, Sato T, Yamamoto Y. 2002. Determination of multielement concentrations in normal human organs from the Japanese[J]. *Biological Trace Element Research*, 90(1): 57-70.
- Khan S R, Singh S K, Rastogi N. 2017. Heavy metal accumulation and ecosystem engineering by two common mine site-nesting ant species: implications for pollution-level assessment and bioremediation of coal mine soil[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 189(4): 1-19.
- Larson-Casey J L, Gu L, Fiehn O, Carter A B. 2020. Cadmium-mediated lung injury is exacerbated by the persistence of classically activated macrophages[J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 295(46): 15754-15766.
- Leung S W, Siddhanti S, Williams B, Chan A W K, Minski M J, Daniels C K, Lai J C K. 2010. Effects of diet intakes on metal and electrolyte distributions in vital organs[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2: 92-97.
- Li Jing, Li Suyan, Sun Xiangyang, Hu Nuo, Yang Shaobin, Lin Mao, Fu Zhen, Cui Meng. 2019. Characteristics of distribution of soil heavy metals in Wuhuan, Chaoyang District, Beijing[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 26(3): 311-317 (in Chinese with English abstract).
- Li Jun, Li Kaiming, Wang Xiaohuai, Jiao Liang, Zang Fei, Mao Xiaoxuan, Yang Yunqin, Tai Xisheng. 2022. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in surface dusts and its surrounding green land soils from Yellow River custom tourist line in Lanzhou[J]. *Environmental Science*, 44(6): 3475-3487 (in Chinese with English abstract).
- Li Lei, Han Cheng, Wang Xiaoxiao, Hong Xin, Liu Biao, Zhong Wenhui. 2019. Effects of transgenic rice on rhizosphere soil microorganisms under cadmium stress[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 47(14): 282-287 (in Chinese).
- Li Ping, Huang Yong, Lin Yun, Hua Peixue, Yuan Guoli. 2018. Distribution, source identification and risk assessment of heavy metals in topsoil of Huairou District in Beijing[J]. *Geoscience*, 32(1): 86-94 (in Chinese with English abstract).
- Li Qiang, Ai Feng, Wang Xi, Ma Yongbo, Liu Lang, Zhu Zhanrong, Zhang Kaiyu. 2023. Theoretical analysis and practical exploration on ecological restoration of mines with multi-source solid wastes: Example from Yulin City, Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 56(3): 70-77.
- Li Xiangying, He Tengbing, Fu Tianling, Cheng Jianbo. 2021. Review of migration, bioaccumulation and toxicity of heavy metals in soil-vegetables system[J]. *Applied Chemical Industry*, 50(7): 1932-1937 (in Chinese with English abstract).
- Li Yue, Xie Shi, Chen Zhonglin, Xu Sunan, Zhang Lihong. 2013. Impacts of zinc, benzo[a]pyrene, and their combination on the growth and antioxidant enzymes activities of wheat seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 32(2): 358-362 (in Chinese with English abstract).
- Li Yumei, Li Haipeng, Zhang Lianke, Fan Jian, Jiao Kunling, Sun Peng. 2016. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in soil around a copper plant in Baotou, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 35(7): 1321-1328 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhengxian, Li Wei, Lei jiajun, Li Qianyu, Liu Lintao, Zhou Lian. 2020. Effect and hazard of common metal elements on human body[J]. *Materials China*, 39(12): 934-944 (in Chinese with English abstract).
- Liao Jie, Wang Tianshun, Fan Yegeng, He Jie, Huang Fang, Mo Leixing. 2017. Effects of cadmium contamination on sugarcane growth, soil microorganism and soil enzyme activity[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 30(9): 2048-2052 (in Chinese with English abstract).
- Lin Jianhe, Zhang Juan. 2022. Effects of supplementation of organic chromium on growth performance, blood biochemical indices and muscle fatty acid of beef cattle[J]. *China Feed*, (6): 9-12 (in Chinese).

- Chinese with English abstract).
- Liu Jinchang, Xiong Shuanglian, Ma Shuo, Gao Fei, Tu Shuxin. 2018. Interactive effects of selenite and arsenite on physiological characteristics and accumulation of arsenic and selenium in rice seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 37(3): 423–430 (in Chinese with English abstract).
- Liu Juan, Zhang Naiming, Yu Hong, Zhang Jingyu, Li Fangyan, Yu Chang, Du Hongdie. 2021. Effects of heavy metal pollution on microorganism and enzyme activity in paddy soil: A review[J]. *Soils*, 53(6): 1152–1159 (in Chinese with English abstract).
- Liu Junxia, Wang Susu, Dong chenyin, Fu Qihua, Yan Conghuai. 2020. Research progress on sources, health risks of children's arsenic exposure[J]. *Journal of Environment and Health*, 37(3): 265–269 (in Chinese with English abstract).
- Liu X, Wang J, Deng H, Zhong X, Li C, Luo Y, Chen L, Zhang B, Wang D, Huang Y. 2022. In situ analysis of variations of arsenicals, microbiome and transcriptome profiles along murine intestinal tract[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 427: 127899.
- Liu Yana, Zhu Shufa, Wei Xuefeng, Miao Juan, Zhou Ming, Guan Fengjie. 2016. Assessment and pollution characteristics of heavy metals in soil of different functional areas in Luoyang[J]. *Environment Science*, 37(6): 2322–2328 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yunlong, Zhang Lijia, Han Xiaofei, Zhuang Tengfei, Shi Zhenxiang, Lu Xiaozhe. 2012. Spatial variability and evaluation of soil heavy metal contamination in the Urban-transect of Shanghai[J]. *Environmental Science*, 33(2): 599–605 (in Chinese with English abstract).
- Luo Xiaoling, Guo Qingrong, Xie Zhiyi, Yang Jianjun, Chai Ziwei, Liu Xuan, Wu Shifeng. 2014. Study on heavy metal pollution in typical rural soils in Pearl River Delta area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 23(3): 485–489 (in Chinese with English abstract).
- Mao Guangyun, Yang Zuopeng, Ren Chunsheng, Ye Xiaolei, Wang Yi, Guo Xiaojuan. 2010. Association between skin lesions and 8-OHdG among a chronic arsenic exposure population[J]. *China Environmental Science*, 30(1): 99–103 (in Chinese with English abstract).
- Marsh D, Dragich J M. 2019. Autophagy in mammalian neurodevelopment and implications for childhood neurological disorders[J]. *Neurosci Lett*, 697: 29–33.
- Mitra S, Chakraborty A J, Tareq A M, Emran B T, Nainu F, Khusro A, Abubakr M I, Khandaker M U, Osman H, Alhumaydhi F A, Simal-Gandara J. 2022. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity[J]. *Journal of King Saud University-Science*, 34(3): 101865.
- Morgan N K, Scholey D V, Burton E J. 2017. Use of Zn concentration in the gastrointestinal tract as a measure of phytate susceptibility to the effect of phytase supplementation in broilers[J]. *Poultry Science*, 96(5): 1298–1305.
- Morris D R, Levenson C W. 2017. Neurotoxicity of zinc[J]. *Advances in Neurobiology*, 18: 303–312.
- Mu Haiting, Wang Yingzhe, Miao Yifan, Yu Weijie, Xu Bo. 2022. Effects of heavy metal Cu and Pb stress on the growth and physiological characteristics of *Galega orientalis* seedlings[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 31(11): 139–146 (in Chinese with English abstract).
- Nakagawa K, Imura T, Berndtsson R. 2021. Distribution of heavy metals and related health risks through soil ingestion in rural areas of western Japan[J]. *Chemosphere*, 290: 133316.
- Oe S, Miyagawa K, Honma Y, Harada, M. 2016. Copper induces hepatocyte injury due to the endoplasmic reticulum stress in cultured cells and patients with Wilson disease[J]. *Experimental Cell Research*, 347(1): 192–200.
- Peng Hao. 2019. Research on Heavy Metal and its Main Pollution Sources in the Whole Country and Typical Northern Agricultural Soils in China[D]. Changchun: Jilin Agricultural University (in Chinese with English abstract).
- Planchart A, Green A, Hoyo C, Mattingly C J. 2018. Heavy metal exposure and metabolic syndrome: Evidence from human and model system studies[J]. *Current Environmental Health Reports*, 5(1): 110–124.
- Qin G W, Niu Z D, Yu J D, Li Z H, Ma J Y, Xiang P. 2021. Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology[J]. *Chemosphere*, 267: 129205.
- Qing Liqiang, Li Deming, Yang Xiaoguang. 2022. Research progress on dietary reference intake of zinc[J]. *Journal of Hygiene Research*, 51(4): 523–525 (in Chinese).
- Qu Lei, Shi Chen. 2019. Research progress in remediation of soil heavy metals[J]. *China Metal Bulletin*, (9): 178–179 (in Chinese).
- Rahman Z, Singh V P. 2019. The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment: An overview[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191 (7): 419–439.
- Reimann C, Caritat P D. 2017. Establishing geochemical background variation and threshold values for 59 elements in Australian surface soil[J]. *Science of the Total Environment*, 578: 633–648.
- Remy S, Govarts E, Bruckers L, Paulussen M, Wens B, Hond E D, Nelen V, Baeyens W, Larebeke N, Loots I, Sioen I, Schoeters G. 2014. Expression of the sFLT1 gene in cord blood cells is associated to maternal arsenic exposure and decreased birth weight[J]. *PLoS One*, 9(3): e92677.
- Rihel J. 2018. Copper on the brain[J]. *Nature Chemical Biology*, 14: 638–639.
- Sankhla M S. 2019. Contaminant of heavy metals in groundwater & its toxic effects on human health & environment[J]. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 18(5): 555996.
- Sgolastra F, Blasioli S, Renzi T, Tosi S, Medrzycki P, Molowny-Horas R, Porrini C, Braschi I. 2018. Lethal effects of Cr(III) alone and in

- combination with propiconazole and clothianidin in honey bees[J]. *Chemosphere*, 191: 365–372.
- Shah V, Daverey A. 2020. Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 18: 100774.
- Shen Qiuyue, Cao Zhiqiang, Zhu Yuefang, Shi Guanyu, Shi Weilin. 2016. Experiment and analysis on microbial activity in contaminated soil of cadmium[J]. *Environmental Pollution & Control*, 38(7): 11–14, 24 (in Chinese with English abstract).
- Shi Huifang, Xi Yi, Zhang Mao, Pei Yingjie, Huang Benyong, Li Jinmeng, Yang Kechao. 2021. Effects of single and combined stresses of lead, zinc and cadmium on growth and physiological characteristics of perennial ryegrass[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 52 (4): 1030–1039 (in Chinese with English abstract).
- Silva J, Lourdes Â M, Cuin A, Delbem I, Campos N, Sousa R, Ciminelli V. 2020. Chemical characterization and human health risk assessment analysis of Cd, Cr, Fe, Mn and Zn contents in street dust from different urban sites in Minas Gerais State, Southeastern Brazil[J]. *Brazilian Journal of Analytical Chemistry*, 7(26): 36–55.
- Singh A, Karmegam N, Singh G S, Bhadauria T, Chang S W, Awasthi M K, Sudhakar S, Arunachalam K D, Biruntha M, Ravindran B. 2020. Earthworms and vermicompost: An eco-friendly approach for repaying nature's debt[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(6): 1617–1642.
- Song Wei, Chen Baiming, Liu Lin. 2013. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 20(2): 293–298 (in Chinese with English abstract).
- Su C, Jiang L, Zhang W. 2014. A review on heavy metal contamination in the soil worldwide: Situation, impact and remediation techniques[J]. *Environmental Skeptics and Critics*, 3(2): 24–38.
- Su H, Yuan P, Lei H, Zhang L, Deng D, Zhang L, Chen X. 2022. Long-term chronic exposure to di-(2-ethylhexyl)-phthalate induces obesity via disruption of host lipid metabolism and gut microbiota in mice[J]. *Chemosphere*, 287: 132414.
- Sun Bianbian, Zhao Yinxin, Chang Dan, Wu Wenzhong, Zhang Yong, Tian Shuo. 2020. Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in green spaces of Yinchuan City[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 27(6): 262–268 (in Chinese with English abstract).
- Sun Bin, Wei Zhimin, Zhang Lihao, Dai Ziwen, Fang Cheng, Hu Feng, Li Huixin, Xu Li. 2021. Distribution of heavy metals and microbial community structure in soils high in geological background value[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 58(5): 1246–1255 (in Chinese with English abstract).
- Sun Guifan. 2014. Research progress on health hazards of chronic arsenic exposure is concerned[J]. *Chinese Journal of Endemiology*, 33(1): 1–2 (in Chinese).
- Sun H, Brocato J, Costa M. 2015. Oral chromium exposure and toxicity[J]. *Current Environmental Health Reports*, 2(3): 295–303.
- Teraoka H. 1981. Distribution of 24 elements in the internal organs of normal males and the metallic workers in Japan[J]. *Arch Environ Health*, 36(4): 155–165.
- Wang Aiyun, Huang Shanshan, Zhong Guofeng, Xu Gangbiao, Liu Zhixiang, Shen Xiangbao. 2012. Effect of Cr(VI) stress on growth of three herbaceous plants and their Cr uptake[J]. *Environmental Science*, 33(6): 2028–2037 (in Chinese with English abstract).
- Wang Caixia, Liu Yu, Yuan Wenting, Cheng Guoxia, Liang Xiaocong. 2021. Investigation and evaluation of total chromium content in main crops in Shaanxi Province in 2020[J]. *Modern Preventive Medicine*, 48(12): 2184–2188 (in Chinese).
- Wang Di, Wei Wenxia, Wang Linling, Wang Haijian, Li Jiabin. 2018. Remediation of chromium (VI) contaminated groundwater by insitu injection of nanoscale zero valent iron[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 12(2): 521–526 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hongtao, Zhang Junhua, Ding Shaofeng, Guo Tingzhong, Fu Xianzhi. 2016. Distribution characteristics, sources identification and risk assessment of heavy metals in surface sediments of urban rivers in Kaifeng[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 36(12): 4520–4530 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianqiu, Cao Zilin, Wang Xiaoli, Zhang Jilong, Peng Chenyin. 2021. Effects of lead stress on growth, photosynthetic physiology and chlorophyll fluorescence of silene viscidula[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 29(11): 2422–2427 (in Chinese with English abstract).
- Wang Songlin, Huang Dongfen, Huan Hengfu, Liu Guodao, Bai Changjun. 2015. Impacts of aluminum and cadmium pollution on latosol soil microbial and soil respiration[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 36(3): 597–602 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xing, Shen Genxiang, Hu Shuangqing, Gu Hairong, Cui Chunyan, Zhu Mingyuan, Zhao Xiaoxiang. 2016. Effects of single and joint pollution of chromium(VI) and phenanthrene on microbiological enzyme activities in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 35(7): 1300–1307 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Zhuang G, Tan M, Zhi M, Cheng Y. 1991. Distribution of some elements in human hair and internal organs, determined by neutron activation analysis[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 151(2): 301–311.
- Wang Yanggang, Li Haoyang, Yuan Xiaoyan, Jiang Yanbin, Xiao Zian, Li Zhou. 2022. Review of copper and copper alloys as immune and antibacterial element[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 32(10): 3163–3181 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yongfang. 2000. Lead and children's health (review)[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 12(1): 33–36 (in Chinese).
- Ward N I, Mason J A. 1987. Neutron activation analysis techniques for identifying elemental status in Alzheimer's disease[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 113(2): 515–526.
- Wei Huihuang, Liu Dong, Yuan Peng, Tian Qian, Zhou Jieyu, Wang Shun, Li Mengyuan, Zhou Junming. 2022. Effects of different

- concentrations of cadmium and arsenic on biological behaviors of *Thalassiosira weissflogii*[J]. *GeoChimica*, 51(5): 540–548 (in Chinese with English abstract).
- Wei Yuan. 2021. Association of Cadmium and Mercury Exposure with Chronic Kidney Disease among Adults Aged 65 and Older in 9 Longevity Areas in China[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Wen Ya, Leng Yan, Li Shiweng. 2020. Research progress on microbial tolerance to heavy metals and its mechanisms[J]. *Environmental Science & Technology*, 43(9): 79–86 (in Chinese with English abstract).
- WHO (World Health Organization). 2011. Guidelines for drinking-water quality, 4th edn[S]. Geneva: World Health Organization.
- Wilson J T, Leach L E, Henson M, Jones J N. 1986. In situ bioremediation as a groundwater remediation technique[J]. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 6(4): 56–64.
- Wu J, Wei B, Lü Z, Fu Y. 2021. To improve the performance of focusing phenomenon related to energy consumption and removal efficiency in electrokinetic remediation of Cr-contaminated soil[J]. *Separation and Purification Technology*, 272: 118882.
- Wu Xiaosheng, Wei Suai, Wei Yimin, Guo Boli, Zhao Duoyong, Yang Mingqi. 2011. Progress in research on biomarkers of cadmium induced renal toxicity[J]. *Journal of Environment and Health*, 28(8): 739–742 (in Chinese with English abstract).
- Xia Donglin, Qiu Yun, Wang Xianger, Chen Chao, Zhang Xiaoxin, Yuan Shanmei, Gu Haiying, Hu Yong. 2021. The biological transport of low concentrations Pb-containing fine particulate matter in rats[J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 11(3): 12–17 (in Chinese with English abstract).
- Xie Xiaojin, Kang Jiancheng, Yan Guodong, Zhang Jianping, Zhu Wenwu. 2010. Heavy metal concentration in agricultural soils around the upper-middle reaches of Huangpu River[J]. *China Environmental Science*, 30(8): 1110–1117 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Minxian, Wu Di, Xu Xiangning, Zheng Mingyang, Xing Tao. 2021. Advances in toxic effects of soil heavy metal cadmium on higher plants[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 16(6): 133–149 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Qiulin, Xiao Hongwei, Cheng Penggen, Zhao Wenji. 2021. A pollution distribution of topsoil heavy metals in Beijing and its atmospheric deposition contribution[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 30(4): 816–824 (in Chinese with English abstract).
- Xu W, Bao H, Liu F, Liu L, Zhu YG, She J, Dong S, Cai M, Li L, Li C, Shen H. 2012. Environmental exposure to arsenic may reduce human semen quality: Associations derived from a Chinese cross-sectional study[J]. *Environmental Health*, 11(1): 46.
- Xu Yuyan, Wang Qun, Fu Xiaopin, Song Yi, Mu Yingchun, Meng Di. 2014. Research progress of the arsenic exposure in food[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 30(34): 187–192 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yumin, Chen Chunxiu, Lei Jianrong, Xiao Chun, Yu Hua, Qin Yusheng, Yang Lufang, Deng Guangmin, Chen Yibing. 2018. Cadmium accumulation and growth of different sichuan wheat varieties under cadmium stress[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 31(9): 1796–1801 (in Chinese with English abstract).
- Yao Bo, Yang Aiping, Chen Huayi, Gao Jianpeng, Zhang Yulong, Wang Jinjin, Li Yongtao, Ren Zongling. 2020. Soil heavy metal pollution and risk assessment of agricultural soils in the Yunnan-Guizhou area, Upper Pearl River Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 39(10): 2259–2266 (in Chinese with English abstract).
- Yao Z, Li J, Xie H, Yu C. 2012. Review on remediation technologies of soil contaminated by heavy metals[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 16: 722–729.
- Yi Jiaxin, Ma Xiaoyu, Sun Guoyu, Pang Zhongyi, Su Weibin, Zhang Fangping, Zhang Chunhua, Li Kailong. 2022. Characteristics of Lead-Zinc composite stress on the growth and physiological response of *populus simonii*×*P.nigra* and *P.euramericana* 'N3016'×*P.ussuriensis*[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 50 (4): 15–20 (in Chinese with English abstract).
- Yu Feng, Wang Wei, Yu Yang, Wang Denghong, Liu Shanbao, Gao Juanqin, Lu Bingting, Liu Lijun. 2021. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soils from Jiulong Li-Be Mining Area, Western Sichuan Province, China[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 40(3): 408–424 (in Chinese with English abstract).
- Yu Limin, Hu Changheng, Luo Zuming, Zhang Dazhong, Wang Nengming, Chen Suqing, Chen Jianxuan. 2020. Determination of zinc, copper, iron, selenium content of hair in patients with acute cerebrovascular disease[J]. *Chinese Journal of Internal Medicine*, 26(12): 685–687 (in Chinese).
- Yu Yunjiang, Wang Feifei, Fang Jidun, Sun Peng. 2007. Advance in research on environmental arsenic pollution to human health[J]. *Journal of Environment and Health*, 24(3): 181–183 (in Chinese with English abstract).
- Zaksas N P, Soboleva S E, Nevinsky G A. 2019. Twenty element concentrations in human organs determined by two-jet plasma atomic emission spectrometry[J]. *Scientific World Journal*, 2019: 9782635.
- Zhang Lei, Song Fengbin, Wang Xiaobo. 2004. Heavy metal contamination of urban soils in China: Status and countermeasures[J]. *Ecology and Environment*, (2): 258–260 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lianke, Li Haipeng, Huang Xueming, Li Yumei, Jiao Kunling, Sun Peng, Wang Weida. 2016a. Soil heavy metal spatial distribution and source analysis around an aluminum plant in Baotou[J]. *Environmental Science*, 37(3): 1139–1146 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Lianke, Li Yanwei, Li Yumei, Jiao Kunling, Sun Peng, Wang Weida. 2016b. Vertical distribution characteristics and speciation analysis of heavy metals in topsoils around a copper plant of Baotou[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 23(5): 354–358 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Mao, Xu Yanhong, Xi Yi, Pei Yingjie, Huang Benyong, Yang Kechao, Li Jinneng. 2021. Effects of  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  and  $Cd^{2+}$  on growth, physiological and biochemical characteristics of perennial ryegrass[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 23(3): 41–50 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Pengyan, Qin Mingzho, Yan Jianghong, Yang Lin, Li Jin, Sun Chao, Chen Long. 2013. Spatial variation of soil heavy metals in the beach of Lower Yellow River: A case study in Kaifeng Section[J]. *Geographical Research*, 32(3): 421–430 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qinrui, Li Huan, Deng Yufei, Huang Yong, Zhang Bo, Xu Yibo. 2022. Distribution of heavy metal elements in soil of the southeastern suburbs of Beijing and their enrichment characteristics in surface soil[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 46(2): 490–501 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Qi Lijuan, Ning Junyu, Gao Shan, Li Guojun. 2021. Health hazard assessment of arsenic[J]. *Journal of Toxicology*, 35(5): 367–372, 378 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenli, Han Jinxiu, Sun Jialong, Yao Dancheng, Shang Qi. 2013. Estimation of cadmium exposure level for the residents in metal contaminative area[J]. *Journal of Hygiene Research*, 42(4): 625–632 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xueqing, Zhang Qin, Cheng Yuanyuan, Jia Rong. 2016. The impact of heavy metal contamination on soil microbial diversity and enzyme activities in a copper mine[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 25(3): 517–522 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yi, Gu Aihua. 2020. Advances on damage and mechanisms of Cd, Pb, and Hg to blood vessels[J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 37(7): 727–733 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yin, Zhang Danmei, Wu Huizhong, Qi Ai, Liu Fenglian. 2016. Health hazards of hexavalent chromium in drinking water[J]. *Chinese Journal of Endemiology*, 35(4): 264–268 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Lijun, Ren Wei, Zhen Yi, Zhao Rong, Wang Yan, Li Jiaxuan Qi Danhui. 2019. Characteristics of soil microbial diversity and community structure in arsenic polluted wetland habitats[J]. *Research of Environmental Sciences*, 32(1): 150–158 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xinna, Yang Zhongfang, Yu Tao. 2023. Heavy metal pollution and research progress of remediation technology in mining area soil: A review[J]. *Geology in China*, 50(1): 84–101 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Fei, Guo Xin, Tang Mingyang, Zhu Dong, Dong Sijun, Kang Le, Chen Bing. 2022. Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in Baiyangdian Lake[J]. *Environmental Science*, 43(10): 4556–4565 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Xishen, Lu Anhuai, Gao Xiang, Zhao Jin, Zheng Desheng. 2002. Contamination of heavy metals in soil present situation and method[J]. *Soil and Environmental Sciences*, (1): 79–84 (in Chinese with English abstract).
- Zhou G, Ji X, Cui N, Cao S, Liu C, Liu J. 2015. Association between serum copper status and working memory in schoolchildren[J]. *Nutrients*, 7(9): 7185–7196.
- Zhou Ping, Wen Anbang, Shi Zhonglin, Yan Dongchun, Long Yi. 2017. Distribution characteristics and pollution evaluation of soil heavy metals of different land use types in Three Gorges reservoir region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 48(7): 207–213 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiaosheng, Lou Sha, Radnaeva L D, Elena Nikitina, Wang Hao. 2022. Advances in heavy metal accumulation characteristics of plants in soil[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 17(3): 400–410 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Sixi, Wang Fengyou, Liu Dong, Yang Xiuqing, Zhang Jianmin, Shu Chunhua, Wu Yunjie. 2014. Effects of Cr(VI) stress on the growth and Cr uptake of *Acorus calamus*[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 28(5): 942–947 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongguan, Chen Baodong, Lin Aijun, Ye Zhihong, Huang Minghong. 2005. Heavy metal contamination in Pearl River Delta – Status and research priorities[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25(12): 1575–1579 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 蔡嘉旖, 张文丽. 2019. 人群暴露环境镉污染与健康危害的流行病学研究进展[J]. *环境卫生学杂志*, 9(6): 621–627.
- 曹文庚, 王妍妍, 任宇, 费宇红, 李谨丞, 李泽岩, 张栋, 帅官印. 2022. 含砷地下水的治理技术现状与进展[J]. *中国地质*, 49(5): 1408–1426.
- 曹文庚, 王妍妍, 张栋, 孙晓悦, 文爱欣, 那静. 2023. 工业废水去除重金属技术的研究现状与进展[J]. *中国地质*, 50(3): 756–776.
- 陈怀满, 郑春荣, 涂从, 朱永官. 1999. 中国土壤重金属污染现状与防治对策[J]. *AMBIO—人类环境杂志*, 28(2): 130–134, 207.
- 陈丽丽, 付媛媛, 王艳萍, 张家洋, 蔺芳, 毛雪飞. 2019. 镉胁迫对小麦和 2 种杂草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *西南林业大学学报 (自然科学)*, 39(1): 50–57.
- 陈小敏, 朱保虎, 杨文, 季宏兵. 2015. 密云水库上游金矿区土壤重金属空间分布、来源及污染评价[J]. *环境化学*, 34(12): 2248–2256.
- 陈岩, 朱先芳, 季宏兵, 乔敏敏. 2014. 北京市得田沟和崎峰茶金矿周边土壤中重金属的粒径分布特征[J]. *环境科学学报*, 34(1): 219–228.
- 戴倩倩, 徐梦洁, 庄舜尧, 陈冬峰. 2022. 基于地理探测器的封丘县农田土壤重金属分布影响因素研究[J]. *土壤*, 54(3): 564–571.
- 戴学斌, 许喻兴, 邓义, 马佳珠, 陈莉莉, 穆兴民. 2021. 土壤酸胁迫对

- 黑麦草生长生理及镉富集特征的影响[J]. 水土保持研究, 28(6): 389-396.
- 丁思, 徐梦柔, 梅成镐, 杨乾磊, 武婧, 安艳. 2020. 神诱导细胞程序性死亡的研究进展[J]. 中华地方病学杂志, 39(7): 542-546.
- 董燕, 孙璐, 李海涛, 张作辰, 张源, 李刚, 郭小彪. 2021. 雄安新区土壤重金属和砷元素空间分布特征及源解析[J]. 水文地质工程地质, 48(3): 172-181.
- 房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰. 2018. 铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征[J]. 环境科学, 39(5): 2420-2430.
- 方明, 吴友军, 刘红, 贾英, 张媛, 王学彤, 吴明红, 张春雷. 2013. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 33(2): 563-569.
- 费宇红, 刘雅慈, 李亚松, 包锡麟, 张鹏伟. 2022. 中国地下水污染修复方法和技术应用展望[J]. 中国地质, 49(2): 420-434.
- 冯丽, 文茂瑶, 王万琴, 凡小丽, 杨丽. 2016. 126 例 Wilson's 病患者临床特点分析[J]. 四川大学学报:医学版, 47(1): 128-130.
- 高温婷, 王金荣, 唐桂芬, 苏兰利, 乔汉楨, 张亚坤, 李林儒. 2021. 镉诱导大鼠肝脏氧化损伤模型的建立[J]. 中国畜牧杂志, 57(12): 213-21.
- 顾涛, 赵信文, 胡雪原, 喻望, 曾敏, 王节涛. 2018. 珠海市新马墩村农业园区土壤重金属分布特征及风险评价[J]. 岩矿测试, 37(4): 419-430.
- 关怀, 朴丰源. 2015. 神神经发育毒性及机制研究进展[J]. 中国公共卫生, 31(4): 538-540.
- 韩致超, 康辉, 张真, 高媛媛, 杨倩, 张祎凡, 刘如洁, 李宇星, 雷立健. 2021. 环境镉暴露与相关肾功能改变及尿转化生长因子- $\beta 1$  的关系[J]. 环境与职业医学, 38(3): 210-216.
- 贺亚雪, 代朝猛, 苏益明, 张亚雷. 2016. 地下水重金属污染修复技术研究进展[J]. 水处理技术, 42(2): 1-5.
- 侯明, 张兴龙, 路畅, 陈如. 2012. V(V)、Cr(VI) 单一和复合胁迫对小麦幼苗生长和生理特性的影响[J]. 环境化学, 31(7): 1016-1022.
- 胡佳瑶, 王梧敏, 匡雪韶, 刘文胜. 2022. 镉胁迫下青葙种子萌发及幼苗生理特性[J]. 草业科学, 39(7): 1391-1398.
- 黄勇, 欧阳渊, 刘洪, 张腾蛟, 张景华, 李槿, 吴君毅, 邵璐, 高文龙. 2023. 地质建造对土壤性质的制约及其生态环境效应以西昌地区红壤为例[J]. 西北地质, 56(4): 196-212.
- 黄哲, 曲世华, 白岚, 尚少鹏, 李玉梅, 张连科. 2017. 包头城区土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境工程, 35(5): 149-153.
- 姜宇, 郭庆军, 邓义楠. 2022. 长江流域沉积物和土壤重金属分布规律研究进展[J]. 生态学杂志, 41(4): 804-812.
- 蒋永荣, 梁英, 张学洪, 秦永丽, 伍婵翠, 李学军. 2019. 铅锌矿区不同程度尾矿砂重金属污染土壤的纵向微生物群落结构分析[J]. 生态环境学报, 28(10): 2079-2088.
- 江玉梅, 张晨, 黄小兰, 倪才英, 王金凤, 宋鹏飞, 张志斌. 2016. 重金属污染对鄱阳湖底泥微生物群落结构的影响[J]. 中国环境科学, 36(11): 3475-3486.
- 李婧, 李素艳, 孙向阳, 呼诺, 杨少斌, 林茂, 傅振, 崔萌. 2019. 北京市朝阳区(五环内)绿地土壤重金属分布特征及其影响因素[J]. 水土保持研究, 26(3): 311-317.
- 李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生. 2022. 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 环境科学, 44(6): 3475-3487.
- 李磊, 韩成, 王宵宵, 洪鑫, 刘标, 钟文辉. 2019. 镉胁迫下转基因水稻对根际土壤微生物的影响[J]. 江苏农业科学, 47(14): 282-287.
- 李苹, 黄勇, 林赞, 华培学, 袁国礼. 2018. 北京市怀柔区土壤重金属的分布特征、来源分析及风险评价[J]. 现代地质, 32(1): 86-94.
- 李强, 艾锋, 王玺, 马泳波, 刘浪, 朱占荣, 张凯煜. 2023. 煤基固废协同矿山土壤生态修复的理论解析与实践探索以陕西榆林市为例[J]. 西北地质, 56(3): 70-77.
- 李相榴, 何腾兵, 付天岭, 成剑波. 2021. 重金属元素在土壤-蔬菜系统中的迁移富集及其毒性机理研究进展[J]. 应用化工, 50(7): 1932-1937.
- 李悦, 谢诗, 陈忠林, 徐苏男, 张利红. 2013. 锌、苯并[a]芘及其复合胁迫对小麦幼苗生长及抗氧化酶的影响[J]. 生态学杂志, 32(2): 358-362.
- 李玉梅, 李海鹏, 张连科, 樊健, 焦坤灵, 孙鹏. 2016. 包头某铜厂周边土壤重金属分布特征及来源分析[J]. 农业环境科学学报, 35(7): 1321-1328.
- 李争显, 李伟, Jiajun L, Qianyu L, 刘林涛, 周廉. 2020. 常见金属元素对人体的作用及危害[J]. 中国材料进展, 39(12): 934-944.
- 廖洁, 王天顺, 范业赓, 何洁, 黄芳, 莫磊兴. 2017. 镉污染对甘蔗生长、土壤微生物及土壤酶活性的影响[J]. 西南农业学报, 30(9): 2048-2052.
- 林建和, 张娟. 2022. 有机铬对肉牛生长性能、血液生化指标及肌肉脂肪酸组成的影响[J]. 中国饲料, (6): 9-12.
- 刘锦嫦, 熊双莲, 马烁, 高菲, 涂书新. 2018. 硒砷交互作用对水稻幼苗生理特性及砷硒累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 37(3): 423-430.
- 刘娟, 张乃明, 于泓, 张靖宇, 李芳艳, 于畅, 杜红蝶. 2021. 重金属污染对水稻土微生物及酶活性影响研究进展[J]. 土壤, 53(6): 1152-1159.
- 刘军霞, 王苏苏, 董辰寅, 傅启华, 颜崇淮. 2020. 儿童神暴露来源及健康风险的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 37(3): 265-269.
- 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰. 2016. 河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 37(6): 2322-2328.
- 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮. 2012. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. 环境科学, 33(2): 599-605.
- 罗小玲, 郭庆荣, 谢志宜, 杨剑军, 柴子为, 刘漩, 伍世丰. 2014. 珠江三角洲地区典型农村土壤重金属污染现状分析[J]. 生态环境学报, 23(3): 485-489.
- 毛广运, 杨佐鹏, 任春生, 叶晓蕾, 王怡, 郭小娟. 2010. 环境中毒人群皮肤损害与 DNA 氧化损伤的关联性[J]. 中国环境科学, 30(1): 99-103.
- 穆海婷, 王英哲, 苗一凡, 郁伟杰, 徐博. 2022. 重金属铜和铅胁迫对东方山羊豆幼苗生长及生理特性的影响[J]. 草业学报, 31(11): 139-146.
- 彭皓. 2019. 我国及北方典型农田土壤重金属及其主要来源研究[D].

- 长春: 吉林农业大学.
- 秦立强, 李德明, 杨晓光. 2022. 锌的膳食参考摄入量研究进展[J]. 卫生研究, 51(4): 523-525.
- 曲磊, 石琛. 2019. 土壤重金属修复技术研究进展[J]. 中国金属通报, (9): 178-179.
- 沈秋悦, 曹志强, 朱月芳, 史广宇, 施维林. 2016. 重金属 Cd 污染对土壤微生物活性影响的研究[J]. 环境污染与防治, 38(7): 11-14, 24.
- 石慧芳, 席溢, 张茂, 裴应杰, 黄本用, 李金孟, 杨克超. 2021. 铅、锌、镉单一及复合胁迫对多年生黑麦草生长及生理特性的影响[J]. 南方农业学报, 52(4): 1030-1039.
- 宋伟, 陈百明, 刘琳. 2013. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 20(2): 293-298.
- 孙变变, 赵银鑫, 常丹, 吴文忠, 张勇, 田硕丰. 2020. 银川市城市绿地土壤重金属分布特征及其生态风险评估[J]. 水土保持研究, 27(6): 262-268, 277.
- 孙斌, 魏志敏, 张力浩, 代子雯, 方成, 胡锋, 李辉信, 徐莉. 2021. 地质高背景土壤重金属赋存特征及微生物群落结构差异[J]. 土壤学报, 58(5): 1246-1255.
- 孙贵范. 2014. 关注慢性砷暴露对健康危害的研究进展[J]. 中华地方病学杂志, 33(1): 1-2.
- 汪杏, 沈根祥, 胡双庆, 顾海蓉, 崔春燕, 朱明远, 赵晓祥. 2016. 铬(VI) 和非单一及复合污染对土壤微生物酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 35(7): 1300-1307.
- 王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 徐刚标, 刘志祥, 申响保. 2012. 铬胁迫对3种草本植物生长及铬积累的影响[J]. 环境科学, 33(6): 2028-2037.
- 王彩霞, 刘宇, 袁文婷, 程国霞, 梁晓聪. 2021. 2020年陕西省主产农作物中总铬含量调查及评价[J]. 现代预防医学, 48(12): 2184-2188.
- 王棣, 魏文侠, 王琳玲, 王海见, 李佳斌. 2018. 纳米铁原位注入技术对六价铬污染地下水的修复[J]. 环境工程学报, 12(2): 521-526.
- 王洪涛, 张俊华, 丁少峰, 郭廷忠, 付贤志. 2016. 开封城市河流表层沉积物重金属分布、污染来源及风险评估[J]. 环境科学学报, 36(12): 4520-4530.
- 王建秋, 曹子林, 王晓丽, 张晋龙, 彭辰吟. 2021. 铅胁迫对滇白前生长、光合作用及叶绿素荧光的影响[J]. 草地学报, 29(11): 2422-2427.
- 王松林, 黄冬芬, 郇恒福, 刘国道, 白昌军. 2015. 铝和镉污染对砖红壤土壤微生物及土壤呼吸的影响[J]. 热带作物学报, 36(3): 597-602.
- 王阳刚, 李灏阳, 袁晓艳, 姜雁斌, 肖自安, 李周. 2022. 铜及铜合金作为免疫和抗菌元素的综述[J]. 中国有色金属学报(英文版), 32(10): 3163-3181.
- 王永芳. 2000. 铅与儿童健康(综述)[J]. 中国食品卫生杂志, 12(1): 33-36.
- 魏辉煌, 刘冬, 袁鹏, 田倩, 周洁玉, 王顺, 李梦圆, 周军明. 2022. 不同浓度镉、砷对海链藻生长特征的影响研究[J]. 地球化学, 51(5): 540-548.
- 魏源. 2021. 中国9个长寿地区65岁及以上人群镉、汞暴露水平与慢性肾脏病的关联研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 文雅, 冷艳, 李师翁. 2020. 微生物重金属耐受性及其机制的研究进展[J]. 环境科学与技术, 43(9): 79-86.
- 吴小胜, 魏帅, 魏益民, 郭波莉, 赵多勇, 杨鸣琦. 2011. 镉肾脏毒性生物标志物的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 28(8): 739-742.
- 夏栋林, 仇哟, 王乡儿, 陈超, 张小鑫, 袁善美, 顾海鹰, 胡勇. 2021. 低浓度含铅细颗粒物暴露大鼠体内生物转运研究[J]. 中国无机分析化学, 11(3): 12-17.
- 谢小进, 康建成, 闫国东, 张建平, 朱文武. 2010. 黄浦江中上游地区农用土壤重金属含量特征分析[J]. 中国环境科学, 30(8): 1110-1117.
- 熊敏先, 吴迪, 许向宁, 郑明阳, 邢涛. 2021. 土壤重金属镉对高等植物的毒性效应研究进展[J]. 生态毒理学报, 16(6): 133-149.
- 熊秋林, 肖红伟, 程朋根, 赵文吉. 2021. 北京表层土壤重金属污染分布及大气沉降贡献[J]. 生态环境学报, 30(4): 816-824.
- 许玉艳, 王群, 付晓苹, 宋烽, 穆迎春, 孟娣. 2014. 食品中砷的暴露评估研究进展[J]. 中国农学通报, 30(34): 187-192.
- 杨玉敏, 陈春秀, 雷建容, 肖春, 喻华, 秦鱼生, 阳路芳, 邓光敏, 陈一兵. 2018. 四川推广小麦品种在镉胁迫下籽粒镉积累和生长响应[J]. 西南农业学报, 31(9): 1796-1801.
- 姚波, 杨爱萍, 陈华毅, 高健鹏, 张玉龙, 王进进, 李永涛, 任宗玲. 2020. 珠江流域上游云贵地区农田土壤重金属污染状况及其风险性分析[J]. 农业环境科学学报, 39(10): 2259-2266.
- 易嘉欣, 马晓雨, 孙国语, 庞忠义, 苏伟斌, 张芳平, 张春华, 李开隆. 2022. 铅锌复合胁迫对小黑杨、黑青杨生长及生理的影响[J]. 东北林业大学学报, 50(4): 15-20.
- 于泓, 王伟, 于扬, 王登红, 刘善宝, 高娟琴, 吕秉廷, 刘丽君. 2021. 川西九龙地区锂铍矿区土壤重金属分布特征及生态风险评估[J]. 岩矿测试, 40(3): 408-424.
- 于云江, 王菲菲, 房吉敦, 孙朋. 2007. 环境砷污染对人体健康影响的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 24(3): 181-183.
- 余利民, 胡昌恒, 罗祖明, 张大忠, 王能明, 陈素清, 陈剑璋. 2020. 急性脑血管病患者头发锌、铜、铁、硒含量测定[J]. 中华内科杂志, 26(12): 685-687.
- 张磊, 宋凤斌, 王晓波. 2004. 中国城市土壤重金属污染研究现状及对策[J]. 生态环境, (2): 258-260.
- 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大. 2016a. 包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 37(3): 1139-1146.
- 张连科, 李艳伟, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大. 2016b. 包头市铜厂周边土壤中重金属垂直分布特征与形态分析[J]. 水土保持研究, 23(5): 354-358.
- 张茂, 徐彦红, 席溢, 裴应杰, 黄本用, 杨克超, 李金孟. 2021. 铅、锌、镉胁迫对多年生黑麦草生长及生理生化特性的影响[J]. 中国农业科技导报, 23(3): 41-50.
- 张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 杨林, 李瑾, 孙超, 陈龙. 2013. 黄河下游滩区开封段土壤重金属空间分异规律[J]. 地理研究, 32(3): 421-430.
- 张沁瑞, 李欢, 邓宇飞, 黄勇, 张博, 许一波. 2022. 北京东南郊土壤重金属元素分布及其在表层土壤中的富集特征[J]. 物探与化探, 46(2): 490-501.



- 张维, 齐丽娟, 宁钧宇, 高珊, 李国君. 2021. 砷的健康危害评估[J]. 毒理学杂志, 35(5): 367-372.
- 张文丽, 韩京秀, 孙嘉龙, 姚丹成, 尚琪. 2013. 重金属污染区人群镉暴露水平的估算[J]. 卫生研究, 42(4): 625-632.
- 张雪晴, 张琴, 程园园, 荚荣. 2016. 铜矿重金属污染对土壤微生物群落多样性和酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 25(3): 517-522.
- 张逸, 顾爱华. 2020. 镉、铅、汞对血管的损伤及其机制研究进展[J]. 环境与职业医学, 37(7): 727-733.
- 张吟, 张丹梅, 吴惠忠, 齐爱, 刘凤莲. 2016. 饮水暴露六价铬对人群健康的危害分析[J]. 中华地方病学杂志, 35(4): 264-268.
- 赵立君, 任伟, 郑毅, 赵蓉, 王妍, 李佳璇, 齐丹丹. 2019. 砷污染湿地生境下土壤微生物多样性及群落结构特征[J]. 环境科学研究, 32(1): 150-158.
- 赵鑫娜, 杨忠芳, 余涛. 2023. 矿区土壤重金属污染及修复技术研究进展[J]. 中国地质, 50(1): 84-101.
- 郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵. 2022. 白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估[J]. 环境科学, 43(10): 4556-4565.
- 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 赵谨, 郑德圣. 2002. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, (1): 79-84.
- 周萍, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 龙翼. 2017. 三峡库区不同土地利用土壤重金属分布特征与污染评价[J]. 农业机械学报, 48(7): 207-213.
- 周晓声, 娄厦, Radnaeva L D, Nikitina E, 汪豪. 2022. 植物对土壤重金属富集特性研究进展[J]. 生态毒理学报, 17(3): 400-410.
- 朱四喜, 王凤友, 刘冬, 杨秀琴, 张建民, 苏春花, 吴云杰. 2014. Cr(VI) 胁迫对菖蒲生长与铬积累的影响[J]. 核农学报, 28(5): 942-947.
- 朱永官, 陈保冬, 林爱军, 叶志鸿, 黄铭洪. 2005. 珠江三角洲地区土壤重金属污染控制与修复研究的若干思考[J]. 环境科学学报, 25(12): 1575-1579.