

## 基于CiteSpace的重金属污染土壤修复研究文献计量分析

吴永红, 靳少非

引用本文:

吴永红, 靳少非. 基于CiteSpace的重金属污染土壤修复研究文献计量分析[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(3): 454-461.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0943>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 稻田重金属污染修复治理技术及效果文献计量分析

杜志鹏, 苏德纯

*农业环境科学学报*. 2018, 37(11): 2409-2417 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1128>

### 基于文献计量的我国农地重金属研究热点分析

帅鸿, 欧阳迪庆, 陈玉成

*农业环境科学学报*. 2018, 37(4): 688-695 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1477>

### 基于CiteSpace重金属生物可给性的文献计量分析

罗杨, 吴永贵, 段志斌, 谢荣

*农业环境科学学报*. 2020, 39(1): 17-27 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0713>

### 基于文献计量学分析2016年环境土壤学研究热点

吴同亮, 王玉军, 陈怀满, 周东美

*农业环境科学学报*. 2017, 36(2): 205-215 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0128>

### 基于Web of Science数据库的土壤污染修复领域发展态势分析

申丽敏, 郑怀国, 赵同科, 赵静娟, 颜志辉, 张晓静, 谭翠萍

*农业环境科学学报*. 2016, 35(1): 12-20 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吴永红, 靳少非. 基于CiteSpace的重金属污染土壤修复研究文献计量分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 454–461.

WU Yong-hong, JIN Shao-fei. Bibliometric analysis of the repair of heavy metal-contaminated soil based on CiteSpace[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(3): 454–461.

# 基于CiteSpace的重金属污染土壤修复研究文献计量分析

吴永红, 靳少非

(闽江学院地理科学系, 福州 350108)

**摘要:**以 Web of Science 数据库及中国知网的文献资料为数据源, 利用 CiteSpace 文献计量工具, 对 1998—2018 年重金属污染土壤修复研究领域的相关文献从发文量、发文国家、发文机构、关键词、作者群体、载文期刊及论文被引频次方面进行分析, 以此探讨国内外该领域研究现状及未来发展态势。结果表明, 土壤重金属修复研究文献数量呈快速增长态势, 中国、美国、西班牙、意大利、韩国等是外文文献发文量较多的国家; 外文文献主要载文期刊有 *Chemosphere*、*Journal of Hazardous Materials*、*Environmental Science and Pollution Research* 等, 中文文献主要载文期刊有《农业环境科学学报》《生态环境学报》等; 在外文文献发文数量、论文被引频次方面, 中国科研机构都占据重要地位, 表明我国在该研究领域有着较强的国际学术影响力; 从关键词出现频次及文献被引频次分析可知, 土壤镉、铅、锌、铜的累积特征及修复是当前该领域主要研究内容, 而植物修复及生物炭在土壤重金属修复研究中的应用是当前该领域研究热点; 修复机理研究、新型修复技术的研发、综合修复体系研究以及土壤重金属修复大田实践示范工作是未来该领域研究的重要方向。

**关键词:**土壤修复; 重金属; 文献计量分析

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)03-0454-08 doi:10.11654/jaes.2019-0943

## Bibliometric analysis of the repair of heavy metal-contaminated soil based on CiteSpace

WU Yong-hong, JIN Shao-fei

(Department of Geography Science, Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** To investigate the current status in the field of heavy metal-contaminated soil remediation, this study analyzed the development of relevant literatures from 1998 to 2018 using CiteSpace as a bibliometric tool. The results showed that the number of publications on soil heavy metal remediation has grown rapidly over the study period. The five countries with the most published papers included China, Spain, Italy, South Korea, and the United States of America. The main journals in foreign language literature included *Chemosphere*, *Journal of Hazardous Materials*, and *Environmental Science and Pollution Research*. The main Chinese-language journals included *Journal of Agro-Environment Science* and *Ecology and Environment Sciences*. In terms of the number of articles published in foreign languages and the frequency of citation of papers, Chinese scientific research institutions occupied an important position, indicating that China had strong international academic influence in this research field. The frequency of keywords occurrence and citation of literature indicated that accumulation characteristics and remediation of cadmium, lead, zinc, and copper in soil were the main focuses of research in this field. In addition, research in phytoremediation and the application of biochar in repair of heavy metal-contaminated soil were currently popular research topics in this field. Research of new repair technology, comprehensive repair systems, and repair mechanisms and demonstration of practical heavy metal repair in actual farmland soil are important future directions in this field.

**Keywords:** soil remediation; heavy metal; bibliometric analysis

收稿日期: 2019-08-27 录用日期: 2019-11-07

作者简介: 吴永红(1980—), 男, 山西大同人, 博士, 副教授, 主要从事第四纪地质与环境地球化学研究。E-mail: shuangyun2626@163.com

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41701099); 福建省自然科学基金项目(2019J01765); 闽江学院科技重点项目(MYK18019)

Project supported: The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(41701099); The Natural Science Foundation of Fujian Province, China(2019J01765); Minjiang University Science and Technology Key Project of Fujian Province, China(MYK18019)

随着工业化和农业生产现代化的快速发展,我国土壤受到不同程度的重金属污染,其不仅会降低农作物产量,农产品质量也会下降,进而通过食物链累积危害人类健康<sup>[1]</sup>。因此,土壤重金属污染已经成为当今面临的主要环境问题之一,重金属污染土壤的修复技术研究也越来越得到国内外学术界的关注。20世纪90年代以前,土壤重金属修复多采用客土修复<sup>[2]</sup>,但该方法只是环境问题在空间上的转移,并未真正达到去除土壤重金属的目的。目前广泛采用的修复方法有物理化学修复和生物修复<sup>[3]</sup>,前者包括化学固化、土壤淋洗、动电修复等,后者包括植物修复、微生物修复等。

国内外学者在土壤重金属修复领域已经做了大量研究,如杨洋等<sup>[4]</sup>对油菜-玉米和油菜-油葵两种种植模式对土壤重金属的修复潜力进行对比研究,认为后者种植模式要优于前者;张金婷等<sup>[5]</sup>利用植物修复技术,对典型棕地修复前后土壤重金属生态风险变化进行研究,认为修复后区域生态风险大幅降低;王佳佳等<sup>[6]</sup>对污染土壤的重金属形态分布进行研究,为制定精准修复方案提供依据。同时,也有不少对土壤重金属修复研究的总结和综述性文献<sup>[7-8]</sup>,但大多局限于对某一研究方向进展情况的总结,没有从宏观尺度上对该领域研究进行全面分析。

本文通过文献计量的方法,采用CiteSpace文献计量工具,对1998—2018年土壤重金属修复领域相关文献进行量化分析,从宏观上展示该领域的研究现状,揭示研究热点及未来发展态势,以期今后的相关研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究外文文献数据选取自美国科学信息研究所(Institute for Scientific Information, ISI) Web of Science(WOS)数据库中Web of Science™核心合集,检索“主题”=(heavy metal\*) AND (soil remediation) AND “文献类型”=“article”,检索时间设置为1998—2018年,共得检索结果4036条。中文文献数据取自中国学术期刊出版总库(CNKI总库),使用高级检索,检索“主题”或者“关键词”=“重金属”并含“土壤修复”,选择检索时间为1998—2018年,精确匹配检索,共得检索结果730条。730篇文献时间范围为2000—2018年,1998、1999年未检索到相关文献。

### 1.2 分析方法

本文运用CiteSpace(5.4.R4)软件,分析了1998—2018年中外文发表的有关重金属污染土壤修复研究工作的进展情况,包括发文时间、发文国家、发文机构、关键词、作者群体、载文期刊及高被引论文情况。CiteSpace是美国德雷塞尔大学(Drexel University)陈超美博士开发的文献计量分析软件,能够对数据进行深度挖掘,绘制知识图谱,实现分析结果的可视化,通过知识图谱的分析,可获取该领域研究现状、研究热点及未来发展态势。

## 2 结果与分析

### 2.1 发文量的时间分析

对1998—2018年土壤重金属修复研究的中外文文献发文量的逐年变化进行分析(图1),外文文献数量总体呈快速增加态势,个别年份有小幅波动。中文文献起步相对较晚,2000年开始有该领域研究论文出现,但发文量增加较为缓慢。

1998—2018年重金属污染土壤修复研究的外文文献发文量增加态势明显,特别是2014年以来,发文量快速增长,从2014年的274篇增加到2018年的523篇,表明土壤重金属修复研究越来越得到国际学术界重视。

中文文献起步相对较晚,2000年开始有该领域研究文献出现,在此之后10余年时间(2000—2011年),发文量没有表现出明显增加,从2012年开始,发文量逐步提高,特别是2015年以来,增加态势较为明显,从2015年的71篇增加到2018年的126篇。

### 2.2 外文文献发文国家分析

重金属污染土壤修复研究外文文献发文量排名前10的国家如表1,中国发文量1166篇,占总发文量4036篇的28.89%,是排名第二美国的2.59倍,排名第三西班牙的3.77倍,表明我国在土壤重金属修复研究方面十分重视,并做了大量的研究工作。发文量排名前10的国家多为农业大国,且科技水平居世界前列,表明科研能力和社会需求对该研究领域的发展具有重大推动作用。使用CiteSpace软件对重金属污染土壤修复研究外文文献发文国家进行分析,结果显示我国作为发文量最大的国家,在网络图谱中的中心性最高,其次为西班牙、美国、法国、韩国、德国。

### 2.3 发文机构分析

#### 2.3.1 外文文献发文机构分析

重金属污染土壤修复研究外文文献发文量排名前10的机构分别为中国科学院(304篇)、西班牙高等



图1 1998—2018年重金属污染土壤修复研究中外文文献发文数量

Figure 1 Number of published literatures on the repair of heavy metal contaminated soil during 1998—2018

表1 重金属污染土壤修复研究领域外文文献  
发文量前10位国家排名

Table 1 The top 10 most productive countries of foreign language literatures in the research field of the repair of heavy metal contaminated soil

排序 Rank	发文国家 Country	发文量/篇 Articles	排序 Rank	发文国家 Country	发文量/篇 Articles
1	中国	1166	6	印度	191
2	美国	451	7	澳大利亚	154
3	西班牙	309	8	法国	140
4	意大利	251	9	加拿大	136
5	韩国	242	10	德国	131

科学研究理事会(110篇)、中国科学院大学(98篇)、中国科学院南京土壤研究所(97篇)、丹麦技术大学(67篇)、法国国家科学研究中心(56篇)、中山大学(54篇)、法国农业科学研究院(52篇)、浙江大学(52篇)、伊利诺伊大学(44篇)。中国科研机构占其中5个,表明我国作为一个农业大国,对该研究领域极其重视,同时,快速的经济增长造成我国土壤受到不同程度的重金属污染,在该方面的社会需求也是推动其发展的重要动力。

利用CiteSpace对重金属污染土壤修复研究外文文献发文机构进行分析,中国科学院在网络图谱中的中心性最高,表明其与国内外相关科研机构之间共被引关系较多,亦即与国内外科研机构的学术交流合作较为紧密。而图谱网络密度并不高,仅为0.0075,表明总体来说,世界各大科研机构之间的交流合作相对较为欠缺。

### 2.3.2 中文文献发文机构分析

重金属污染土壤修复研究领域中文文献发文量排名前10的机构有中国科学院南京土壤研究所(16篇)、中国科学院地理科学与资源研究所(10篇)、中国科学院沈阳应用生态研究所(10篇)、沈阳环境科学研究所(10篇)、桂林理工大学(9篇)、同济大学(9

篇)、兰州交通大学(8篇)、中国科学院生态环境研究中心(8篇)、湖南农业大学(8篇)、浙江农林大学(8篇)。中文文献发文机构分析结果显示,各科研机构在网络图谱中分布较为离散,表明国内科研机构之间的交流合作相对匮乏,今后有待进一步加强。

### 2.4 关键词分析

关键词是文献研究内容的高度提炼,也是研究主题的突出表现,通过对关键词出现频次的分析,可以挖掘近年相关研究领域的热点问题。

#### 2.4.1 外文文献关键词分析

利用CiteSpace对重金属污染土壤修复研究领域外文文献关键词进行分析,“heavy metal”为出现频次最高关键词,与之紧密度较高的其他关键词包括“remediation”“contaminated soil”“soil”“cadmium”“removal”“phytoremediation”“lead”“copper”“zinc”“accumulation”等,可见在外文文献中,重金属镉、铅、锌、铜的累积特征及修复是近年研究热点,而在修复手段方面,植物修复是研究的重要方向。

#### 2.4.2 中文文献关键词分析

在中文文献关键词出现频次分析中,“土壤修复”和“重金属”成为出现频次最高的两个关键词,其他出现频次较高的关键词有“重金属污染”“土壤”“土壤污染”“修复技术”“修复”“植物修复”“污染土壤”“无机污染物”“土壤修复技术”“土地污染”“生物炭”等,可见在中文文献中,植物修复同样是该领域研究热点,而与此同时,生物炭作为吸附剂在重金属污染土壤修复中的应用也成为近年研究热点。

### 2.5 作者群体分析

#### 2.5.1 外文文献作者群体分析

利用CiteSpace对重金属污染土壤修复研究外文文献作者群体进行分析, Daniel C W Tsang、Yong Sik O K、Kitea Baek、Lisbeth M Ottosen等是发文较多的作

者。分析结果表明,大多作者群体分布较为离散,团队内部网络连线较为紧密,而团队与团队之间仅有少数连线链接,表明科研团队之间的学术交流相对较少,故图谱网络密度并不高,仅为0.003 8。

### 2.5.2 中文文献作者群体分析

重金属污染土壤修复研究中文文献作者群体分析结果表明,中文文献作者群体总体呈大分散小集中态势,各个科研团队内部交流合作较为紧密,而团队与团队之间合作相对匮乏。

## 2.6 载文期刊分析

### 2.6.1 外文文献载文期刊分析

重金属污染土壤修复研究外文文献载文期刊发文章量排名前10的出版物如表2。可见该领域研究外文文献发表期刊主要集中于环境污染、植物修复等方面,也进一步证明,植物修复是当前重金属污染土壤修复的主要研究方向。*International Journal of Phytoremediation*为该领域研究论文同期发文章量占比最高刊物(8.17%),其次为*Soil Sediment Contamination*(7.68%),*Science of the Total Environment*所刊文献该领域研究论文占比最低(0.6%)。

### 2.6.2 中文文献载文期刊分析

重金属污染土壤修复研究中文文献载文期刊中,《农业环境科学学报》《生态环境学报》等核心刊物所

刊载文献在一定程度上可反映该领域研究前沿,故在此只列出《中国科学引文数据库》收录刊物(表3)。从载文期刊可以看出,中文文献主要侧重于农业环境方面研究,《农业环境科学学报》为该领域研究论文载文量最多刊物,共载文19篇,也是同期发文章量占比最高刊物,为0.27%,其次为《生态环境学报》,载文16篇,占同期发文章量比重为0.26%。而另一方面,我国目前尚缺乏针对土壤修复领域的专门性期刊,也是我国相关领域机构当前以及今后努力的重要任务。

## 2.7 高被引论文分析

### 2.7.1 外文文献高被引论文分析

重金属污染土壤修复研究外文文献高被引排名前10的论文如表4所列,10篇论文中有7篇关于生物炭在重金属污染土壤修复研究中的应用,可见其已经成为当前该领域的热点问题。10篇论文的载文期刊中,*Environmental Pollution*、*Journal of Hazardous Materials*、*Environmental Science and Pollution Research*位列外文文献发文章量排名前10的期刊,其中*Journal of Hazardous Materials*刊载10篇论文中的5篇,*Environmental Pollution*、*Environmental Science and Pollution Research*各刊载1篇。10篇论文的发文机构中,中国科学院占其中6个,且仅中国科学院南京土壤研究所位列外文文献发文章量排名前10机构,表明我国在重金属污

表2 重金属污染土壤修复研究外文文献发文章量前10位期刊排名

Table 2 The top 10 journals of foreign language literatures in the research field of the repair of heavy metal contaminated soil

排序 Rank	期刊 Journal	发文章量/篇 Articles	期刊同期发文章量占比 Proportion/%	排序 Rank	期刊 Journal	发文章量/篇 Articles	期刊同期发文章量占比 Proportion/%
1	<i>Chemosphere</i>	266	1.3	6	<i>Environmental Pollution</i>	126	1.21
2	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	263	1.63	7	<i>International Journal of Phytoremediation</i>	111	8.17
3	<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	240	1.73	8	<i>Journal of Soils and Sediments</i>	105	4.88
4	<i>Water Air and Soil Pollution</i>	141	2	9	<i>Journal of Environmental Management</i>	94	1.22
5	<i>Science of the Total Environment</i>	134	0.6	10	<i>Soil Sediment Contamination</i>	72	7.68

表3 重金属污染土壤修复研究中文文献发文章量前10位核心期刊排名

Table 3 The top 10 core journals of Chinese literature in the research field of the repair of heavy metal contaminated soil

排序 Rank	期刊 Journal	发文章量/篇 Articles	期刊同期发文章量占比 Proportion/%	排序 Rank	期刊 Journal	发文章量/篇 Articles	期刊同期发文章量占比 Proportion/%
1	农业环境科学学报	19	0.27	6	环境科学	7	0.07
2	生态环境学报	16	0.26	7	应用生态学报	6	0.07
3	环境工程	11	0.16	8	土壤	6	0.2
4	环境工程学报	10	0.1	9	环境污染与防治	6	0.1
5	环境科学与技术	8	0.08	10	土壤通报	5	0.11

染土壤修复研究领域有着较强的国际学术影响力。

### 2.7.2 中文文献被引频次分析

中文文献被引频次排名前10的论文如表5所列,植物修复位列其中,结合关键词出现频次分析,可见植物修复研究亦为该领域研究热点。10篇论文载文期刊中,《农业环境科学学报》《应用生态学报》《环境科学》《环境科学与技术》位列发文量排名前10的核心刊物。10篇论文的发文机构中,中国科学院生态环境研究中心、中国科学院南京土壤研究所、中国科学院沈阳应用生态研究所、中国科学院地理科学与资源研究所

位列中文文献发文量排名前10机构。10篇论文中的6篇来自于中国科学院下属研究机构,可见中国科学院作为中国自然科学研究的最高学术机构,在重金属污染土壤修复研究领域有着较强的影响力。

## 3 研究展望

### 3.1 重金属污染土壤修复研究发展态势

1998—2018年重金属污染土壤修复研究发文量呈快速增长态势,特别是2015年以来,增加态势更为明显,表明土壤重金属修复研究已经越来越得到

表4 重金属污染土壤修复研究外文文献高被引论文排名

Table 4 The rank of citation frequency of foreign language literature in the research field of the repair of heavy metal contaminated soil

第一作者发文机构 Affiliation of first author	载文期刊 Journal	被引频次 Total cited times	论文题目 Title of paper
贾瓦哈拉尔·尼赫鲁大学	<i>Bioresource Technology</i>	687	Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent - A critical review
利物浦约翰摩尔斯大学	<i>Environmental Pollution</i>	508	Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil
中国科学院沈阳应用生态研究所	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	313	Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China
香港理工大学	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	288	Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, south China
上海交通大学	<i>Environmental Science &amp; Technology</i>	254	Simultaneous immobilization of lead and atrazine in contaminated soils using dairy-manure biochar
浙江农林大学	<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	245	Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants
利物浦约翰摩尔斯大学	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	241	Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass
欧洲共同体委员会环境与可持续发展研究所	<i>Environmental International</i>	202	Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety
中国科学院南京土壤研究所	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	192	Immobilization of Cu(II), Pb(II) and Cd(II) by the addition of rice straw derived biochar to a simulated polluted ultisol
南京农业大学	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	189	A three-year experiment confirms continuous immobilization of cadmium and lead in contaminated paddy field with biochar amendment

表5 重金属污染土壤修复研究中文文献被引频次排名

Table 5 The rank of citation frequency of Chinese literatures in the research field of the repair of heavy metal contaminated soil

第一作者发文机构 Affiliation of first author	载文期刊 Journal	被引频次 Total cited times	论文题目 Title of paper
中国科学院生态环境研究中心	农业环境科学学报	621	重金属污染土壤修复技术及其修复实践
浙江大学环境与资源学院资源科学系	应用生态学报	585	重金属污染土壤修复技术研究的现状与展望
中山大学环境科学系	环境保护	415	重金属污染土壤的修复技术
中国科学院南京土壤研究所	生态环境	302	污染土壤的修复技术研究进展
中国科学院科技促进发展局	中国科学院院刊	294	我国土壤重金属污染现状及治理战略
中国科学院沈阳应用生态研究所	应用生态学报	212	根际圈在污染土壤修复中的作用与机理分析
中国科学院沈阳应用生态研究所	生态学杂志	199	重金属污染土壤修复技术中有关淋洗剂的研究进展
中国科学院地理科学与资源研究所	环境科学	182	城市工业污染场地:中国环境修复领域的新课题
北京市农林科学院农业科技信息研究所	环境科学与技术	181	土壤重金属污染修复技术研究进展
清华大学化工系	环境污染治理技术与设备	167	铬污染土壤修复技术研究进展

国内外学术界的关注。相对而言,外文文献较中文文献增加态势更加明显,其中我国科研工作者做出巨大贡献。

我国作为世界农业大国对土壤重金属修复研究十分重视,并做出了较好的研究成果,在发文量、文献被引方面都表现出较强的国际学术影响力。但从作者群体、发文机构图谱可以看出,国际该领域相关科研机构及科研团队之间的交流合作较为欠缺,特别是国内科研机构及团队的交流合作有待加强。

### 3.2 当前重金属污染土壤修复研究热点问题

通过关键词出现频次分析,结合高被引论文分析,得到当前国际土壤重金属污染修复研究领域的热点问题,按照属性可以将其归结为以下几个方面。

#### 3.2.1 土壤重金属污染修复技术——植物修复

Brooks等<sup>[9]</sup>于1977年提出超富集植物概念之后,Chaney<sup>[10]</sup>于1983年首次提出利用植物去除土壤中重金属的思想,自此,土壤重金属的植物修复技术成为相关领域科研工作者关注的热点。近年来,各国学者做了大量研究,包括重金属超富集植物种类的研究<sup>[11-12]</sup>、不同种植条件对超富集植物修复潜力的影响<sup>[4,13-17]</sup>、植物基因工程改造研究<sup>[18]</sup>等。但多数超富集植物生长缓慢、生物量少,其对生长环境、重金属类型有较强的选择性,且只能处理少数几种重金属,故仍需大量研究探索,寻找更多种类超富集植物,并通过基因工程、农艺、微生物等强化技术提升植物修复效率。

#### 3.2.2 土壤重金属污染修复材料——生物炭

自1963年Hilton等<sup>[19]</sup>发现生物炭对土壤中非草隆等有机农药具有良好的吸附作用之后,生物炭即作为一种土壤改良剂在污染土壤修复领域得到应用。国内外学者在土壤重金属的生物炭修复利用方面已做了大量研究,研究内容主要集中于生物炭对土壤重金属的修复效果及其对土壤的改良作用。然而,不同温度、不同原料制备的生物炭,以及不同生物炭施加量都会对修复效果产生重要影响,土壤类型、重金属种类及污染程度亦对修复作用产生影响。鉴于此,生物炭作为吸附剂在土壤重金属修复领域的应用仍有非常大的研究空间,不失为当前乃至今后该领域研究的热点。

#### 3.2.3 土壤重金属污染修复对象——镉、铅、锌、铜

在土壤重金属污染修复对象方面,土壤镉、铅、锌、铜为当前土壤重金属污染修复研究的主要内容。土壤镉、铅与汞、砷、铬并称“五毒元素”<sup>[20]</sup>,亦成为该领域相关学者关注的焦点。锌是动植物生长发育必

需的微量元素,但也是公认的有害重金属元素之一<sup>[21]</sup>,土壤锌超标会导致作物减产,并通过食物链累积、传递,最终威胁人类健康,亦成为当前该领域研究热点。铜也是动植物生长必需的微量元素,但当其在生物体内累积量超过生物承受限度就会产生毒害效应,进而影响人体健康和生态系统稳定,因此,土壤铜污染的修复研究成为该领域相关学者关注的热点和难点<sup>[22]</sup>。

### 3.3 重金属污染土壤修复领域未来重要研究方向

#### 3.3.1 修复机理研究

植物修复作为一种有效的土壤重金属修复手段已被学术界广泛认可,但鉴于多数超富集植物生长缓慢、生物量少、选择性强等特点,深入探讨植物超累积作用生理机制,利用强化技术联合植物修复提升其修复能力,是未来该领域研究的重要方向。例如利用基因工程技术提升其富集潜力,培育高效型修复植物;利用根际微生物强化技术增强植物对重金属的耐受性及提取能力;利用农艺措施促进植物生长,缩短生长周期,以提高其修复效率。因此,基因工程强化技术的作用机制、根际微生物作用效应、植物体对重金属的累积机制、农艺强化技术的作用机理等是今后植物修复土壤重金属的研究重点。

作为新型吸附剂的生物炭,其来源广泛成本低廉,是一种值得推广的有效修复手段。目前对其修复机理阐述还存在不同意见,主要包括:表面吸附、亲合力极弱的非静电物理吸附<sup>[23]</sup>、静电相互作用力<sup>[24]</sup>、表面配合吸附和共沉淀同时作用<sup>[25]</sup>等。随着研究的深入,生物炭对土壤重金属修复能力的局限性逐渐显现出来,为提高其修复潜力,生物炭改性技术应运而生<sup>[26]</sup>。有研究显示,利用表面氧化、氨基化等改性后的生物炭对镉的吸附能力显著提高<sup>[27]</sup>,利用氧化铁改性的葡萄秸秆生物炭有效促进其对镉的吸附<sup>[28]</sup>,针铁矿改性后的生物炭对三价砷的吸附量比未改性生物炭吸附量增大达62倍<sup>[29]</sup>。因此,通过对生物炭修复机理的研究,可以有针对性地改性生物炭,是今后研究的重要方向。

#### 3.3.2 联合修复技术的研发

虽然重金属污染土壤修复领域已有大量研究,并取得了长足的发展,但由于污染的严重性及环境条件的复杂性,重金属污染土壤多为多种重金属的复合污染,且通常伴有农药残留、有机物料等其他方面的污染,使得土壤修复的效果远未达到人们的期望值<sup>[30]</sup>。再加上各种修复手段在实际应用中本身都具有一定

的局限性,如植物修复耗时长、选择性强,生物炭吸附累积的重金属在环境条件发生变化时可能重新释放造成二次污染<sup>[31]</sup>,因此,经济、高效、实用的联合修复技术的研发,特别是要把这些技术在生产实践中得到应用,且兼顾当地环境条件及生产习惯,是今后需要继续努力的方向。如在土壤修复过程中联合运用物理、化学、生物、农艺等措施,建立一个动物-植物-微生物-农艺-改良剂多种修复手段联用的综合修复体系,探究它们之间的作用机理,以达到土壤重金属污染的有效防治。

### 3.3.3 研发技术及产品的农业应用研究

重金属污染土壤修复的大田生产实践研究已有相关实例报道,并取得了较好的研究成果,如在水稻田中施用硅钙肥和石灰,显著降低了糙米中镉含量,稻谷增产达50%~51%<sup>[30]</sup>,天然海泡石可显著降低水稻土中镉含量<sup>[32]</sup>,施用 $1.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $3.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 污泥生物炭可显著降低稻米中镉含量<sup>[33]</sup>。就目前来说,用于田间试验的修复材料多集中在堆肥、生物炭、石灰以及黏土矿物等<sup>[26]</sup>,多数其他修复手段的研究仍限于实验室规模,大田修复实践较为缺乏,但实验室环境条件难以代表大田实际情况,如基因工程植物修复的研究,转基因植物进入野生环境能否正常生长,以及是否会对当地物种带来风险还有待进一步验证<sup>[34]</sup>。因此,研发技术及产品在实际农田土壤重金属污染修复中的应用示范工作是未来该领域研究的一个重要方向。

### 参考文献:

- [1] 朱剑飞,李铭红,谢佩君,等. 紫花苜蓿、黑麦草和狼尾草对Cu、Pb复合污染土壤修复能力的研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2):303-313.  
ZHU Jian-fei, LI Ming-hong, XIE Pei-jun, et al. Phytoremediation of single and combined pollution of Cu and Pb by *Medicago sativa*, *Lolium perenne*, and *Pennisetum alopecuroides*[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(2):303-313.
- [2] 龙新宪,杨肖娥,倪吾钟. 重金属污染土壤修复技术研究的现状与展望[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6):757-762.  
LONG Xin-xian, YANG Xiao-e, NI Wu-zhong. Current situation and prospect on the remediation of soils contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(6):757-762.
- [3] 崔德杰,张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(3):366-370.  
CUI De-jie, ZHANG Yu-long. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the remediation techniques [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3):366-370.
- [4] 杨洋,陈志鹏,黎红亮,等. 两种农业种植模式对重金属土壤的修复潜力[J]. 生态学报, 2016, 36(3):688-695.  
YANG Yang, CHEN Zhi-peng, LI Hong-liang, et al. The potential of two agricultural cropping patterns for remediating heavy metals from soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3):688-695.
- [5] 张金婷,孙华,谢丽,等. 典型棕地修复前后土壤重金属生态风险变化:以江西贵溪冶炼厂为例[J]. 生态学报, 2017, 37(18):6128-6137.  
ZHANG Jin-ting, SUN Hua, XIE Li, et al. Changes in the ecological risk of heavy metals after soil remediation in a typical brownfield: A case study of Guixi smelter in Jiangxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(18):6128-6137.
- [6] 王佳佳,李翔,罗楠,等. 以设计精准修复方案为目标的土壤重金属形态分布研究[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(1):87-95.  
WANG Jia-jia, LI Xiang, LUO Nan, et al. Distribution of heavy metals by form for precise remediation of polluted farmland soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(1):87-95.
- [7] 王丙烁,黄益宗,王农,等. 镍污染土壤修复技术研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11):2392-2402.  
WANG Bing-shuo, HUANG Yi-zong, WANG Nong, et al. Advances in research on remediation technology of nickel-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11):2392-2402.
- [8] 吴志能,谢苗苗,王莹莹. 我国复合污染土壤修复研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12):2250-2259.  
WU Zhi-neng, XIE Miao-miao, WANG Ying-ying. Remediation of soils with combined pollution in China: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12):2250-2259.
- [9] Brooks R R, Lee J, Reeve R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1977, 7:49-57.
- [10] Chaney R L. Plant up take of inorganic waste constituents[M]//Parr J F, et al. Land treatment of hazardous wastes. New Jersey: Noyes Data Corporation, 1983:50-76.
- [11] Alahabadi A, Ehrampoush M H, Miri M, et al. A comparative study on capability of different tree species in accumulating heavy metals from soil and ambient air[J]. *Chemosphere*, 2017, 172:459-467.
- [12] 曾露苹,秦俊豪,董淑玉,等. 不同木薯品种对重金属Cu、Zn、Cd累积差异及健康风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6):1044-1052.  
ZENG Lu-ping, QIN Jun-hao, DONG Shu-yu, et al. Accumulation of heavy metals copper, zinc, and cadmium in cassava varieties and the associated human health risk[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6):1044-1052.
- [13] Li N Y, Guo B, Li H, et al. Effects of double harvesting on heavy metal uptake by six forage species and the potential for phytoextraction in field[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(5):717-724.
- [14] 杨刚,伍钧,唐亚,等. 不同形态氮肥施用对鱼腥草吸收转运Pb的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4):1380-1385.  
YANG Gang, WU Jun, TANG Ya, et al. Effects of nitrogenous fertilizers on accumulation and transfer of lead by *Houttuynia cordata* Thunb [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1380-1385.
- [15] Shakirova F M, Allagulova C R, Maslennikova D R, et al. Salicylic acid-induced protection against cadmium toxicity in wheat plants[J].

- Environmental & Experimental Botany*, 2016, 122:19-28.
- [16] 邢维芹, 刘辉, 曾冰, 等. 光照和浸种5种具有修复重金属污染土壤潜力的植物种子萌发的影响[J]. 种子, 2017, 36(9):72-75.  
XING Wei-qin, LIU Hui, ZENG Bing, et al. Effect of light and seed soaking on the germination of five plant species which may be used for phytoextraction of heavy metals in contaminated soil[J]. *Seed*, 2017, 36(9):72-75.
- [17] 林钰珊, 范缙, 蔡邦平, 等. 解磷微生物在重金属污染原位修复中的作用及其机理研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2016, 55(5):697-706.  
LIN Yu-shan, FAN Jin, CAI Bang-ping, et al. Progress on roles and mechanisms of phosphate-solubilizing microorganisms in remediation of heavy metal contaminated soils[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2016, 55(5):697-706.
- [18] Bo R L, Hwang S. Over-expression of NtHb1, encoding a non-symbiotic class I hemoglobin of tobacco enhances a tolerance to cadmium by decreasing NO (nitric oxide) and Cd levels in *Nicotiana tabacum* [J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2015, 113:18-27.
- [19] Hilton H W, Yuen Q H. Soil adsorption of herbicides, adsorption of several pre-emergence herbicides by Hawaiian sugar cane soils[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1963, 11:230-234.
- [20] 陈志良, 莫大伦, 仇荣亮. 镉污染对生物有机体的危害及防治对策[J]. 环境保护科学, 2011, 27(4):37-39.  
CHEN Zhi-liang, MO Da-lun, QIU Rong-liang. Biological damage of soil cadmium (Cd) pollution and its control[J]. *Environmental Protection Science*, 2011, 27(4):37-39.
- [21] 陈玉真, 王峰, 王果, 等. 土壤锌污染及其修复技术研究进展[J]. 福建农业学报, 2012, 27(8):901-908.  
CHEN Yu-zhen, WANG Feng, WANG Guo, et al. Research advances on zinc pollution and remediation of soil system[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 27(8):901-908.
- [22] 胡鹏杰, 李柱, 钟道旭, 等. 我国土壤重金属污染植物吸取修复研究进展[J]. 植物生理学报, 2014, 50(5):577-584.  
HU Peng-jie, LI Zhu, ZHONG Dao-xu, et al. Research progress on the phytoextraction of heavy metal contaminated soils in China[J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(5):577-584.
- [23] 吴成, 张晓丽, 李关宾. 热解温度对黑碳阳离子交换量和铅镉吸附量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26:1169-1172.  
WU Cheng, ZHANG Xiao-li, LI Guan-bin. Effects of pyrolytic temperature on cation exchange capacity and Pb<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> sorption of black carbon[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26:1169-1172.
- [24] 朱庆祥. 生物炭对Pb、Cd污染土壤的修复试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.  
ZHU Qing-xiang. Experimental study on the repair of Pb and Cd contaminated soil by biochar[D]. Chongqing:Chongqing University, 2011.
- [25] Lu H L, Zhang W H, Yang Y X. Relative distribution of Pb<sup>2+</sup> sorption mechanisms by sludge derived biochar[J]. *Water Research*, 2012, 3:854-862.
- [26] 李英, 朱司航, 商建英, 等. 土壤镉和砷污染钝化修复材料及科学计量研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9):2011-2022.  
LI Ying, ZHU Si-hang, SHANG Jian-ying, et al. Immobilization materials for cadmium and arsenic contaminated soil remediation and their scientific metrology research[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(9):2011-2022.
- [27] 祝凌. 表面改性对生物炭性能的影响及其对2,4-D和镉的吸附特性研究[D]. 北京:中国农业大学, 2018.  
ZHU Ling. Effect of surface modification on biochar properties and its adsorption properties to 2,4-D and cadmium[D]. Beijing:China Agricultural University, 2018.
- [28] 郑瑞伦. 生物炭对污染和设施退化土壤的修复研究[D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心, 2012.  
ZHENG Rui-lun. Remediation research of biochar on contaminated and degraded facility soils[D]. Beijing:Center for Ecological Environment Research, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [29] 朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 等. 针铁矿改性生物炭对砷吸附性能[J]. 环境科学, 2019, 40(6):2773-2782.  
ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, et al. Application of goethite modified biochar for arsenic removal from aqueous solution [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(6):2773-2782.
- [30] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3):409-417.  
HUANG Yi-zong, HAO Xiao-wei, LEI Ming, et al. The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Sciences*, 2013, 32(3):409-417.
- [31] 陈玉鹏, 梁东丽, 刘中华, 等. 大棚蔬菜土壤重金属污染及其控制的研究进展与展望[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1):9-17.  
CHEN Yu-peng, LIANG Dong-li, LIU Zhong-hua, et al. Analysis of present situation and control of heavy metal pollution in vegetable greenhouse soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1):9-17.
- [32] Yin X, Xu Y, Huang R, et al. Remediation mechanisms for Cd-contaminated soil using natural sepiolite at the field scale[J]. *Environmental Science Processes & Impacts*, 2017, 19(12):1563-1570.
- [33] Zhang Y, Chen T, Liao Y, et al. Modest amendment of sewage sludge biochar to reduce the accumulation of cadmium into rice (*Oryza sativa* L.): A field study[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216:819-825.
- [34] 章绍康, 弓晓峰, 易佳璐, 等. 多种强化技术联合植物修复重金属污染土壤机制探讨[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(14):1-6.  
ZHANG Shao-kang, GONG Xiao-feng, YI Jia-lu, et al. Discussion on mechanism of multiple intensification techniques combined with phytoremediation of heavy metal contaminated soil[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2019, 47(14):1-6.