

# 近十年国内外土壤重金属钝化改性材料研究的文献计量分析

王颖南, 王 平, 绳琳琳, 黄占斌

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 为了解土壤重金属钝化改性材料的研发状况并促进其发展, 通过 CNKI 和 Web of Science 数据库, 对 2011~2020 年国内外土壤重金属钝化改性材料的文献进行检索, 从年度发文量、主要发文国家、发文类型、Top10 高被引论文和发文量 Top10 期刊等方面进行计量分析。结果表明, 国内外土壤重金属钝化改性材料的相关文献年发文量自 2017 年开始快速增加, 我国在该领域发文量最高, 但均篇被引频次较低; 我国研究较多的改性材料主要为生物炭、纳米零价铁和壳聚糖等, 改性方法主要为铁基改性、巯基改性、羟基改性等; 研究论文主要发表在 *Environmental Science and Pollution Research*, *Journal of Hazardous Materials*, *Chemical Engineering Journal* 等国外期刊以及《农业环境科学学报》、《环境科学》和《环境污染与防治》等国内期刊; 土壤重金属主要钝化对象是镉、铅、铬等; 国内发文量前 10 的基金中, 国家基金占比超 90%。据此, 提出我国土壤重金属钝化改性材料存在问题及今后发展方向。

**关键词:** 重金属钝化; 改性材料; 改性方法; 文献计量; 土壤

**中图分类号:** S156      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-3962(2023)07-0582-09

**引用格式:** 王颖南, 王平, 绳琳琳, 等. 近十年国内外土壤重金属钝化改性材料研究的文献计量分析[J]. 中国材料进展, 2023, 42(7): 582-590.

WANG Y N, WANG P, SHENG L L, *et al.* Bibliometric Analysis of Studies on Soil Heavy Metal Passivation Modified Materials in Recent Ten Years over the World[J]. *Materials China*, 2023, 42(7): 582-590.

## Bibliometric Analysis of Studies on Soil Heavy Metal Passivation Modified Materials in Recent Ten Years over the World

WANG Yingnan, WANG Ping, SHENG Linlin, HUANG Zhanbin

(School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to understand the research and development status of soil heavy metal passivation modified materials and promote its development, the literature on soil heavy metal passivation modified materials at home and abroad from 2011 to 2020 was searched through CNKI and Web of Science databases. The econometric analysis was conducted from the aspects of annual publication, major publication countries, publication types, Top10 most cited papers and Top10 journals in terms of publication volume. The results showed that the annual publication amount of soil heavy metal passivation modified materials increased rapidly from 2017. China has the highest publication amount in this field, but the average citation frequency is low. In China, many modified materials are mainly biochar, nano zero-valent iron and chitosan, and the modification

methods are mainly iron base modification, mercapto modification, hydroxyl modification and other modification methods. The papers are mainly published in *Environmental Science and Pollution Research*, *Journal of Hazardous Materials*, *Chemical Engineering Journal* and other foreign journals. It's also published in *Journal of Agro-Environment Science*, *Environmental Science*, *Environmental Pollution & Control* and other domestic journals. The main objects of soil heavy metal passivation are cadmium, lead and chromium. Among the top 10 funds in China, national funds ac-

收稿日期: 2021-10-27      修回日期: 2022-01-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1806504); 中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项项目(2020-2-CXY001); 北京嘉博文生物科技有限公司科研项目

第一作者: 王颖南, 男, 1994 年生, 博士研究生

通讯作者: 黄占斌, 男, 1961 年生, 教授, 博士生导师,

Email: zbhuan2003@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202110036

count for more than 90%. Based on this, the problems and future development of soil heavy metal passivation modified materials in China are put forward.

**Key words:** heavy metal passivation; modified material; modified method; bibliometrics; soil

## 1 前言

近年来,城市化、工业化、矿山开采的快速发展,导致每年有大量重金属通过“三废”排放等途径进入土壤与水体<sup>[1]</sup>,并通过食物链对人体健康造成损害。土壤重金属污染治理的技术途径,一是削减土壤重金属总量,二是削减有效态重金属的含量。目前土壤重金属污染的处理方法有物理、化学和生物法等<sup>[2]</sup>,其中向土壤中添加重金属钝化材料因具有操作简单、成本低等特点而成为工程应用的主要技术选择<sup>[3]</sup>。为了提高土壤重金属钝化材料的吸附性能,常对材料进行改性处理<sup>[4]</sup>。目前,改性方法主要有对材料表面进行物理改性、添加功能官能团的化学改性等<sup>[5]</sup>,为了较全面了解土壤重金属钝化改性材料的研发和应用进展,本文对该领域的国内外文献进行计量分析。

文献计量学是探讨科学技术某些特征和规律、用以确定专题文献研究热点、发展方向等全局性的方法<sup>[6]</sup>。目前,文献计量学以其显著的客观性、量化、模型化的宏观研究优势,已广泛应用于环境工程、土壤学和新能源等领域<sup>[7]</sup>,如刘志慧等<sup>[8]</sup>基于中国知网(CNKI)对1994~2019年发表的“3S”(remote sensing, global position system, geographic information system)技术文献进行分析,得出目前“3S”技术主要服务于土地、林业、生态等领域,并提出了该领域存在的问题;李昂等<sup>[9]</sup>基于CNKI对我国镉污染土壤钝化技术文献进行分析,发现近年来发表相关文献的数量呈指数增长趋势,高等院校和科研院所对生物炭、石灰和海泡石的研究较多。因此,将文献计量分析应用在重金属钝化改性材料方向,可对该领域材料的研发进行精准地描述、评价与预测,以期对相关领域的研究人员提供参考。

## 2 材料与方法

为了保证数据的代表性与权威性,国际和国内文献检索分别选择 Web of Science 核心合集数据库(WOS)和 CNKI 数据库。WOS 数据库全称“Web of Science”是全球最大、国际公认的反映科学研究水准、覆盖学科最多的综合性学术信息资源库。CNKI 数据库包括中国学术期刊网络出版总库、中国博士学位论文和中国优秀硕士学位论文全文数据库、中国重要会议论文和国际会议论文全文数据库。WOS 数据库中高级搜索以公式  $TS = ((\text{heavy metal AND soil}) \text{ AND modified})$ , 获得文献 3054 篇。CNKI 数据库中以“重金属”、“改性”和“土壤”为主题词

进行检索,获文献 638 篇。

文献发表时间选定为 2011 年 1 月 1 日~2020 年 12 月 31 日,对检索的文献从年度发文量、主要发文国家、发文类型、Top10 高被引论文、发文量 Top10 期刊、Top10 研究机构、改性方法、基金资助和研究机构分布进行分析,将符合要求的文献导入 NoteExpress 数据库中,利用 EXCEL2010 软件处理数据,同时利用 VOSviewer 软件对 WOS、CNKI 数据库进行热点分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 年度发文量

发文量在一定程度上反映出该研究领域的受关注程度和发展趋势<sup>[10]</sup>。图 1 表明 2011~2018 年英文发文量呈上升趋势,尤其是 2017 年开始,发文量呈倍数增长。中文发文量 2011~2017 年呈稳定增长,2018 年出现最大发文量,这和 2016 年“土十条”颁布、土壤污染及其修复逐渐受到民众的关注有关;2019~2020 年 CNKI 发文量减少可能是由于检索时间较早(2021 年 8 月),部分最新期刊尚未录入数据库导致的。发文量变化趋势从侧面反映出国内外对于土壤重金属钝化材料的关注与需求。

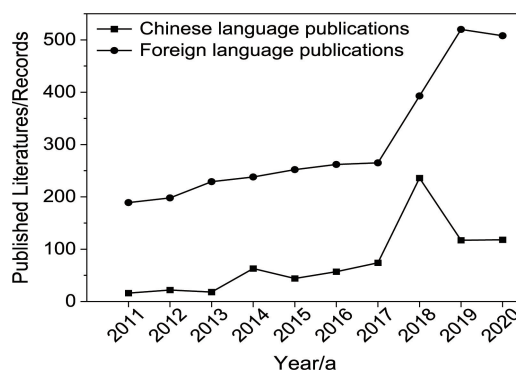


图 1 2011~2020 年土壤重金属钝化改性材料年度发文量

Fig. 1 Annual published papers on soil heavy metal passivated modified materials from 2011 to 2020

### 3.2 主要发文国家

发文量反映出一个国家/地区的基础研究水平、科研实力和国际学术地位等<sup>[11]</sup>。2011~2020 年土壤重金属钝化改性材料发文量 Top10 国家/地区如表 1 所示。可以看出,中国的发文数量远高于其它国家与地区,侧面印证了我国土壤修复行业的快速发展。另一方面,澳大利亚均篇被引频次最高,主要原因是其国土 75% 属于干旱半干旱地区,土壤酸化、盐碱化问题严重,同时矿产资源

表 1 2011~2020 年土壤重金属钝化改性材料发文量 Top10 的国家/地区

Table 1 Countries/regions for Top10 published quantities on soil heavy metal passivation modified materials from 2011 to 2020

Countries /regions	Records	Percentage/%	Total global citation score	Total global citation score	H-factor
China	1145	37.49	35 966	31.41	85
The United States	275	9.01	9538	34.68	46
India	238	7.79	8579	36.05	48
Iran	210	6.88	5406	25.74	38
Australian	115	3.77	4783	41.59	35
France	104	3.41	2245	21.59	27
Poland	104	3.41	1792	17.23	20
South Korea	103	3.37	3992	38.76	32
Spanish	103	3.37	2475	24.03	22
Turkey	95	3.11	1874	19.73	23

丰富, 大片地面经过长期风化淋滤, 部分地区土壤重金属污染问题严重; 其次, 澳大利亚对土壤污染问题较为重视, 早在 20 世纪 70 年代就颁布了诸如《土地委员会法》和《土地和环境法院法》等法律, 因此在土壤重金属钝化改性材料领域的研究较为领先。H 指数 (h-factor) 代表高被引次数, 表明论文的影响力<sup>[12]</sup>。我国 H 指数为 85, 位列首位, 而均篇被引频次我国仅排第五, 说明我国虽然发文量多, 但文章质量整体有待提高。

3.3 热点分析

通过关键词分析可直观反映该领域热点与前沿, 关键词出现频率表明其受关注程度<sup>[13, 14]</sup>。热点图谱中圆圈越大, 表示其活跃程度越高, 距离越近则表示两者间关系越密切。基于 WOS 数据库对关键词热点分析 (图 2) 表明, 近年来国外对重金属  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$  研究较集中, 土壤重金属与植物关系密切, 说明重金属污染土壤的生物有效性是研究重点。

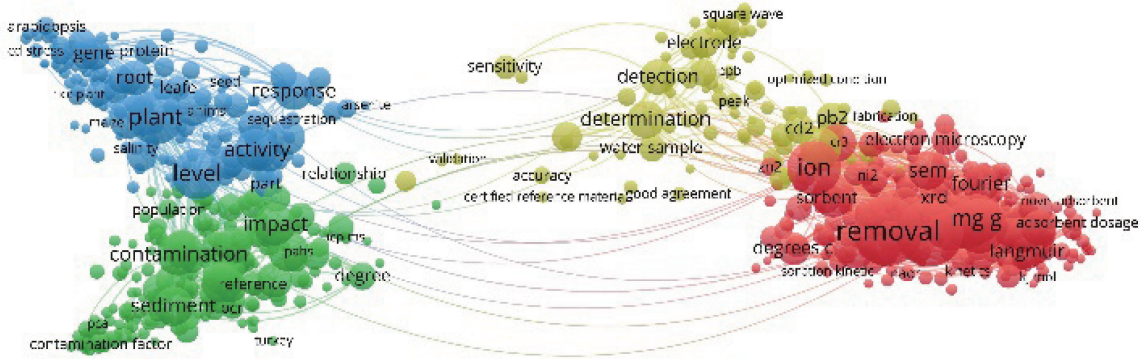


图 2 2011~2020 年 Web of Science 数据库中土壤重金属钝化改性材料研究热点知识图谱

Fig. 2 Hotspot knowledge map of soil heavy metal passivated modified materials in Web of Science database from 2011 to 2020

3.4 文献类型

文献类型分析如图 3 和图 4 所示, 英文文献主要以研究性论文 (artical) 为主, 占比达到 74.04%, 相比学位论文, 研究性论文具有严谨、数量大等特点<sup>[15]</sup>。国内文献主要以学位论文为主, 优秀硕、博士学位论文占比达到 64.82%, 学术期刊论文仅占 30.62%, 不足英文研究性论文的 1/2。以上研究表明, 国内外对于土壤重金属钝化改性材料的关注点并不相同。

3.5 Top10 高被引论文

高被引论文可系统、清晰地反映不同国家/地区科研实力、学术水平和学科发展动态。表 2 和表 3 分别列出了国内外被引频次排名前 10 的文献及其平均引用次数、第一作者、所在国家/地区、文献来源。英文 Top10 高被引论文中, 中国作者 Zhao 等的论文“Few-layered graphene oxide nanosheets as superior sorbents for heavy metal ion pollution management”被引频次最高<sup>[16]</sup>。高被引的主要原因

是该文以石墨为原材料改性并制备生成石墨烯，并对重金属 Cd 和 Co 进行吸附研究<sup>[16]</sup>，介绍试验方法并对试验结果进行系统性总结分析，具有较高科学探索和实用价值。Top10 高被引论文中，中国作者达 5 位，说明我国在该领域部分研究已处于国际领先。国内而言，王林发表

的论文“Effect and mechanism of immobilization of paddy soil contaminated by cadmium and lead using sepiolite and phosphate”被引频次最高<sup>[17]</sup>。Top10 高被引论文中，关于生物炭文章达 5 篇，可见生物炭在土壤重金属钝化改性材料方面占据着较为重要的地位。

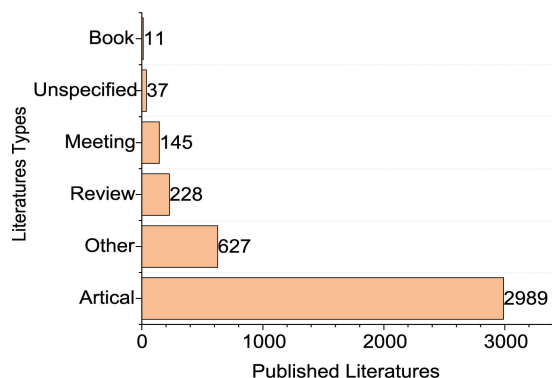


图 3 2011~2020 年 Web of Science 数据库土壤重金属钝化改性材料的发文类型

Fig. 3 Literatures types of soil heavy metal passivated modified materials in Web of Science database from 2011 to 2020

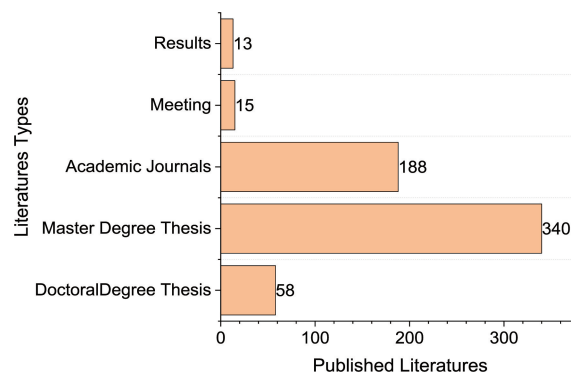


图 4 2011~2020 年 CNKI 数据库土壤重金属钝化改性材料的发文类型

Fig. 4 Distribution types of soil heavy metal passivated modified materials in CNKI database from 2011 to 2020

表 2 2011~2020 年 Web of Science 数据库中土壤重金属钝化改性材料的 Top10 高被引论文

Table 2 Top10 highly cited papers of soil heavy metal passivation modified materials in Web of Science database from 2011 to 2020

Titles	First author	Journal name	Countries /region	Global citation score	Reference
Few-layered graphene oxide nanosheets as superior sorbents for heavy metal ion pollution management	Zhao G X	<i>Environmental Science &amp; Technology</i>	China	1237	[ 16 ]
A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade	Uddin M K	<i>Chemical Engineering Journal</i>	Saudi Arabia	744	[ 18 ]
Cadmium removal and recovery from aqueous solutions by novel adsorbents prepared from orange peel and Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanoparticles	Gupta V K	<i>Chemical Engineering Journal</i>	India	705	[ 19 ]
Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals	Park J H	<i>Plant and Soil</i>	Australia	693	[ 20 ]
Environmental remediation and application of nanoscale zero-valent iron and its composites for the removal of heavy metal ions: a review	Zou Y D	<i>Environmental Science &amp; Technology</i>	China	634	[ 21 ]
Mechanisms of metal sorption by biochars; biochar characteristics and modifications	Li H B	<i>Chemosphere</i>	China	565	[ 22 ]
Magnetic nanoparticles: essential factors for sustainable environmental applications	Tang S C N	<i>Water Research</i>	China	530	[ 23 ]
Effective removal of heavy metal ions Cd <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Pb <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> from aqueous solution by polymer-modified magnetic nanoparticles	Ge F	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	China	524	[ 24 ]
A review on modification methods to cellulose-based adsorbents to improve adsorption capacity	Hokkanen S	<i>Water Research</i>	Finland	472	[ 25 ]
Postsynthetically modified covalent organic frameworks for efficient and effective mercury removal	Sun Q	<i>Journal of the American Chemical Society</i>	The United States	432	[ 26 ]



表 3 2011~2020 年 CNKI 数据库中土壤重金属钝化改性材料的 Top10 高被引论文  
Table 3 Top10 highly cited papers of soil heavy metal passivation modified materials in CNKI database from 2011 to 2020

Titles	First author	Journal/institution name	Countries /region	Global citation score	Reference
Effect and mechanism of immobilization of paddy soil contaminated by cadmium and lead using sepiolite and phosphate	Wang L	<i>Ecology and Environmental Sciences</i>	China	197	[ 17 ]
Advances in preparation and applications of biochar and Its composites	Lv H H	<i>Journal of Agro-Environment Science</i>	China	136	[ 27 ]
Application of nanoscale zero-valent Iron to contaminated soil remediation;a review	Gao Y Y	<i>Journal of Agro-Environment Science</i>	China	84	[ 28 ]
Preparation of adsorbents from water treatment plant wastewater sludge and the removal efficiency for hexavalent chromium	Ren X	<i>Harbin Institute of Technology</i>	China	68	[ 29 ]
Chemical forms and risk assessment of heavy metals in soils around a typical coal-fired power plant located in the mountainous area	Fan M Y	<i>China Environmental Science</i>	China	67	[ 30 ]
Effect of modified biochars on soil cadmium stabilization in paddy soil suffered from original or exogenous contamination	Yang L	<i>Environmental Science</i>	China	65	[ 31 ]
Chemical modification of biochar and its adsorption toward Cu <sup>2+</sup>	Yang G X	<i>University of Science and Technology of China</i>	China	65	[ 32 ]
Pollution characteristics of heavy metal in soil from lead and zinc mine and is stabilization study	Fang Z Q	<i>Journal of China University of Mining &amp; Technology</i>	China	58	[ 33 ]
Iron-modified biochar can promote the transformation of arsenic form in soil and inhibit the absorption of arsenic in plants	Dong S K	<i>Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering</i>	China	56	[ 34 ]
Discussion on application of modified nano particle black carbon for the remediation of soil heavy metals pollution	Cheng J M	<i>Journal of Agro-Environment Science</i>	China	45	[ 35 ]

3.6 改性方法与土壤重金属污染类别

为提高材料对土壤重金属钝化能力，一般会对材料进行改性处理，主要改性方法有表面物理改性、表面化学改性和负载改性等<sup>[5]</sup>，而重金属类别一定程度上反映出土壤受重金属污染的现状。2011~2020 年中文文献改性方法与重金属污染类型统计结果如表 4 和图 5 所示。

由表 4 看出，针对土壤重金属钝化材料的改性，目前使用最多的是铁基改性方法。铁基改性主要包括零价铁改性、FeCl<sub>3</sub> 改性和 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 改性等。一般情况下，负载金属改性主要是利用材料的吸附性和氧化还原性，使得材料表面活性位点和酸性官能团数量增加，从而增强对重金属离子的吸附和氧化还原性能<sup>[36]</sup>。除铁基改性外，巯基、羟基与酸改性都是较为常见的改性方法。

由图 5 可以看出，我国目前针对土壤 Cd 污染的研究较多，占总文章数的 41.57%，这与我国土壤重金属污染类型有关。据国务院生态环境部发布的《2020 中国生态环境状况公报》<sup>[37]</sup>显示，影响农用地土壤质量的主要污染物是重金属，其中镉为首要污染物。此外，铅、铬、砷污染土壤发文量占总发文量的 17.34%，10.93%，9.50%，上述重金属可对人体神经和肾脏造成损伤且不易被排除体外。

表 4 2011~2020 年 CNKI 数据库中土壤重金属钝化改性材料的改性方法

Table 4 Modification methods of soil heavy metal passivation modified materials in CNKI database from 2011 to 2020

Modified type	Records	Percentage/%
Fe-based modified	80	21.56
Sulphydryl-based modified	50	13.48
Hydroxy-based modified	44	11.86
Acid modified	34	9.16
Amidogen-based modified	32	8.63
Phosphorus-based modified	27	7.28
Mn-based modified	24	6.47
Ca-based modified	15	4.04
Thermal modified	15	4.04
Microwave modified	14	3.78
Starch modified	7	1.89
Alkali modified	7	1.89
Ultrasound modified	7	1.89
Mg-based modified	6	1.62
Ultraviolet modified	5	1.35
SiO <sub>2</sub> modified	4	1.08

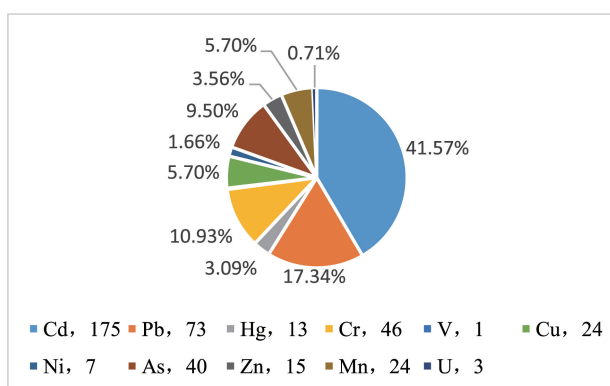


图 5 本研究检索的 CNKI 数据库中重金属文章中不同重金属种类占比与数量

Fig. 5 The proportion and quantity of different types of heavy metals in the heavy metal articles retrieved in CNKI database in this study

### 3.7 发文量 Top10 期刊及影响因子

期刊发文量与影响因子在一定程度上可以反映期刊在该研究领域的影响力及学术水平。影响因子是指该刊近 2 年所有文章被引用总次数与所发文章总数的比值，是我国评定期刊影响力的一个重要指标<sup>[38]</sup>。CNKI 和 Web of Science 发文量 Top10 期刊统计结果如表 5 和表 6 所示。中文发文量 Top10 期刊中，前 3 期刊分别为《农业环境科学学报》、《环境科学》和《环境污染与防治》，占总发文量 10.35%，其中《环境科学》影响因子最高，复合影响因子与综合影响因子分别为 3.58 和 2.42。

英文发文量前 10 期刊中，前 3 的期刊分别为 *Environmental Science and Pollution Research*, *Journal of Hazardous Materials* 和 *Chemical Engineering Journal*，占总发文量的 15.27%，影响因子分别为 4.31, 10.13 和 11.53。英文

表 5 2011~2020 年 CNKI 数据库中土壤重金属钝化改性材料的中文发文量 Top10 期刊

Table 5 Top10 selected Chinese journals for publications on soil heavy metal passivated modified materials in CNKI database from 2011 to 2020

Journal name	Percentage/%	Compound impact factor	Comprehensive impact factor
<i>Journal of Agro-Environment Science</i>	5.02	2.76	1.83
<i>Environmental Science</i>	2.82	3.58	2.42
<i>Environmental Pollution &amp; Control</i>	2.51	1.27	0.85
<i>Environmental Chemistry</i>	2.19	1.69	1.16
<i>Chinese Journal of Environmental Engineering</i>	2.19	1.51	0.92
<i>China High-Tech</i>	1.88	0.20	0.11
<i>Environmental Science &amp; Technology</i>	1.88	1.27	0.85
<i>Journal of Anhui Agricultural Sciences</i>	1.88	0.54	0.35
<i>China Environmental Science</i>	1.57	2.71	1.99
<i>Ecology and Environmental Sciences</i>	1.57	2.59	1.85

表 6 2011~2020 年 Web of Science 数据库中土壤重金属钝化改性材料的英文发文量 Top10 期刊

Table 6 Top10 selected English journals for publications on soil heavy metal passivated modified materials in Web of Science database from 2011 to 2020

Journal name	Percentage/%	Impact factor	Journal ranking
<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	5.71	4.31	Q2
<i>Journal of Hazardous Materials</i>	5.09	10.13	Q1
<i>Chemical Engineering Journal</i>	4.47	11.53	Q1
<i>Science of the Total Environment</i>	3.75	7.84	Q1
<i>Chemosphere</i>	3.34	6.96	Q1
<i>Water Air and Soil Pollution</i>	2.42	2.57	Q3
<i>Environmental Pollution</i>	1.83	8.35	Q1
<i>Environmental Monitoring and Assessment</i>	1.83	2.87	Q3
<i>Ecotoxicology and Environmental Safety</i>	1.73	6.39	Q1
<i>Journal of Environmental Management</i>	1.73	6.91	Q1

Top10 期刊中有 7 个期刊属 Q1 分类, 表明土壤重金属钝化改性材料研究受重视程度较高。

3.8 基金资助与研究机构

国内外发文量前 10 的机构如表 7 所示。英文文献发文量前 10 机构中, 有 6 个机构来自中国, 发文量最多机构为中国科学院, 占总发文量 5.50%。表明我国对土壤重金属钝化改性材料重视程度较大。中文文献发文量最

多的机构是西北农林科技大学, 占国内总发文量的 5.49%, 排名前 10 的机构均为高等院校, 表明我国科研院所所在该领域占据主导地位。

从支撑基金可看出国家对各研究领域重视程度。由表 8 可知, 发文量排名前 4 的基金均为国家基金项目, 综合占比超过 90%, 这也充分说明了土壤重金属污染的相关研究得到国家层面的关注。

表 7 2011~2020 年 Web of Science 与 CNKI 数据库中土壤重金属钝化改性材料发文量 Top10 机构

Table 7 Top 10 institutions with the most published on soil heavy metal passivated modified materials in Web of Science and CNKI databases from 2011 to 2020

Ranking	Web of Science		CNKI	
	Institution	Records	Institution	Records
1	Chinese Academy of Sciences	168	Northwest A&F University	35
2	Centre National De La Recherche Scientifique Cnrs	65	Shandong Normal University	26
3	Islamic Azad University	54	Hunan University	16
4	Hunan University	43	South China University of Technology	14
5	Zhejiang University	42	Hunan Agricultural University	13
6	Council of Scientific Industrial Research Csir India	37	Henan University	13
7	China Agricultural University	33	Chengdu University of Technology	13
8	Nanjing Agricultural University	33	Lanzhou University	12
9	Nanjing University	32	South China Agricultural University	12
10	Florida State University	32	Huazhong Agricultural University	12

表 8 2011~2020 年 CNKI 数据库中土壤重金属钝化改性材料发文量 Top10 基金

Table 8 Top 10 funds of soil heavy metal passivated modified materials published in CNKI database from 2011 to 2020

Ranking	Fund type	Records
1	National Natural Science Foundation of China	128
2	National Key Research and Development Program of China	28
3	National Science and Technology Support Program of China	14
4	National High-Tech Research and Development Program of China (“863” Program)	9
5	Natural Science Foundation of Shandong Province	5
6	Natural Science Foundation of Jiangsu Province	4
7	Natural Science Foundation of Tianjin Province	4
8	Special Research Fund for Doctoral Program of Higher Education	3
9	China Postdoctoral Science Foundation	3
10	Natural Science Foundation of Guangdong Province	3

4 结 论

本研究基于 Web of Science 和 CNKI 数据库, 对 2011~2020 年这 10 年有关土壤重金属钝化改性材料的中英文文献计量分析发现, 国内外年发文量自 2017 年开始快速增加, 我国在该领域发文量最高, 但均篇被引频次较低。我国研究的改性材料主要为生物炭、纳米零价铁和壳聚糖等, 改性方法主要为铁基改性、巯基改性、羟基改性等, 土壤重金属钝化种类主要为镉、铅、铬等。国际上发文量前 10 机构中, 我国占比超过一半, 国内排名前 10 的机构均为科研院所, 说明我国科研院所所在该领域占据主导地位。

总体来说, 我国在土壤重金属钝化改性材料领域占据优势地位, 但主要存在以下问题:

(1)我国关于土壤重金属钝化改性材料方向发文量较多, 但文章质量整体有待提高。

(2)实际土壤污染中存在多种重金属污染共存的情况, 材料钝化对阳离子、阴离子或者某种重金属的针对性较弱, 存在钝化某一种重金属的同时增加其它类型重金属迁移的风险。

(3)改性材料偏重钝化功能,却忽视了生产成本或材料的环保性等因素,产业化实际应用较少。

对此,建议加强土壤重金属钝化机理和改性方法的研究;加强对改性材料的功能性、经济性和环保性的综合评价,达到相关的应用标准;加强矿产等废弃物材料资源再生和改性研发,研发阳离子、阴离子或某种重金属钝化专用性的改性材料,提升我国在土壤重金属钝化改性材料研发方面的实际应用性;在发表文献方面,不断提升研究生论文质量的同时,加强期刊论文的发表数量和质量。

## 参考文献 References

- [1] 何洁,卢维宏,张乃明. 腐植酸[J], 2020(2): 38-42.  
HE J, LU W H, ZHANG N M. Humic Acid[J], 2020(2): 38-42.
- [2] 贺旭红. 科技创新与应用[J], 2018(23): 66-68.  
HE X H. Technology Innovation and Application[J], 2018(23): 66-68.
- [3] 王确,张今大,陈哲晗,等. 能源环境保护[J], 2019, 33(3): 5-9.  
WANG Q, ZHANG J D, CHEN Z H, *et al.* Energy Environmental Protection[J], 2019, 33(3): 5-9.
- [4] 黄占斌,李昉泽. 中国材料进展[J], 2017, 36(11): 840-850.  
HUANG Z B, LI F Z. Materials China [J], 2017, 36(11): 840-850.
- [5] 黄占斌. 环境材料学[M]. 北京:冶金工业出版社, 2017: 185.  
HUANG Z B. Environmental Materials Science[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2017: 185.
- [6] 李炜,向俊,易晶,等. 中国社会医学杂志[J], 2021, 38(3): 344-346.  
LI W, XIANG J, YI J, *et al.* Chinese Journal of Social Medicine [J], 2021, 38(3): 344-346.
- [7] 闫淑兰,赵秀红,罗启仕. 农业环境科学学报[J], 2020, 39(2): 229-238.  
YAN S L, ZHAO X H, LUO Q S. Journal of Agro-Environment Science[J], 2020, 39(2): 229-238.
- [8] 刘志慧,周卉. 农业与技术[J], 2021, 41(11): 176-180.  
LIU Z H, ZHOU H. Agriculture and Technology [J], 2021, 41(11): 176-180.
- [9] 李昂,侯红,苏本营,等. 农业环境科学学报[J], 2019, 38(8): 1677-1684.  
LI A, HOU H, SU B Y, *et al.* Journal of Agro-Environment Science [J], 2019, 38(8): 1677-1684.
- [10] 张彩丽,张志转,陈娟,等. 世界农业[J], 2016(1): 136-140.  
ZHANG C L, ZHANG Z Z, CHEN J, *et al.* World Agriculture[J], 2016(1): 136-140.
- [11] LI Y Q, LI J, XIE S D. Environmental Earth Sciences[J], 2017, 76(1): 11.
- [12] BAR-ILAN J. Scientometrics[J], 2008, 74(2): 257-271.
- [13] 王耕,常畅,于小茜,等. 生态学报[J], 2019, 39(3): 1114-1123.  
WANG G, CHANG C, YU X Q, *et al.* Acta Ecologica Sinica[J], 2019, 39(3): 1114-1123.
- [14] 曹洋,谢冬冬,徐娇. 安徽农学通报[J], 2020, 26(15): 23-27.  
CAO Y, XIE D D, XU J. Anhui Agriculture Science Bulletin[J], 2020, 26(15): 23-27.
- [15] 孙伟楠,恽雯斐,张淑娟. 环境科学与管理[J], 2019, 44(6): 29-32.  
SUN W N, YUN W F, ZHANG S J. Environmental Science and Management[J], 2019, 44(6): 29-32.
- [16] ZHAO G X, LI J X, REN X M, *et al.* Environmental Science & Technology[J], 2011, 45(24): 10454-10462.
- [17] 王林,徐应明,孙国红,等. 生态环境学报[J], 2012, 21(2): 314-320.  
WANG L, XU Y M, SUN G H, *et al.* Ecology and Environmental Sciences[J], 2012, 21(2): 314-320.
- [18] UDDIN M K. Chemical Engineering Journal[J], 2017, 308: 438-462.
- [19] GUPTA V K, NAYAK A. Chemical Engineering Journal[J], 2012, 180: 81-90.
- [20] PARK J H, CHOPPALA G K, BOLAN N S, *et al.* Plant and Soil [J], 2011, 348: 439-451.
- [21] ZOU Y D, WANG X X, KHAN A, *et al.* Environmental Science & Technology[J], 2016, 50(14): 7290-7304.
- [22] LI H B, DONG X L, DA S E B, *et al.* Chemosphere[J], 2017, 178: 466-478.
- [23] TANG S C N, LO I M C. Water Research[J], 2013, 47: 2613-2632.
- [24] GE F, LI M M, YE H, *et al.* Journal of Hazardous Materials[J], 2012, 212: 366-372.
- [25] HOKKANEN S, BHATNAGAR A, SILLANPAA M. Water Research [J], 2016, 91: 156-173.
- [26] SUN Q, AGUILA B, PERMAN J, *et al.* Journal of the American Chemical Society[J], 2017, 139: 2786-2793.
- [27] 吕宏虹,宫艳艳,唐景春,等. 农业环境科学学报[J], 2015, 34(8): 1429-1440.  
LV H H, GONG Y Y, TANG J C, *et al.* Journal of Agro-Environment Science[J], 2015, 34(8): 1429-1440.
- [28] 高园园,周启星. 农业环境科学学报[J], 2013, 32(3): 418-425.  
GAO Y Y, ZHOU Q X. Journal of Agro-Environment Science[J], 2013, 32(3): 418-425.
- [29] 任新. 净水厂工艺废水中污泥制备吸附剂及对水中铬的吸附特性[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.  
REN X. Preparation of Adsorbents from Water Treatment Plant Wastewater Sludge and the Removal Efficiency for Hexavalent Chromium[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [30] 范明毅,杨皓,黄先飞,等. 中国环境科学[J], 2016, 36(8): 2425-2436.  
FAN M Y, YANG H, HUANG X F, *et al.* China Environmental Science[J], 2016, 36(8): 2425-2436.
- [31] 杨兰,李冰,王昌全,等. 环境科学[J], 2016, 37(9): 3562-



3574.  
YANG L, LI B, WANG C Q, *et al.* Environmental Science [J], 2016, 37(9): 3562–3574.
- [32] 杨广西. 生物炭的化学改性及其对铜的吸附研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.  
YANG G X. Chemical Modification of Biochar and Its Adsorption toward Copper(II)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [33] 房增强. 铅锌矿区土壤重金属污染特征及稳定化研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.  
FANG Z Q. Pollution Characteristics of Heavy Metal in Soil from Lead and Zinc Mine and Its Stabilization Study[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2016.
- [34] 董双快, 徐万里, 吴福飞, 等. 农业工程学报[J], 2016, 32(15): 204–212.  
DONG S K, XU W L, WU F F, *et al.* Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering[J], 2016, 32(15): 204–212.
- [35] 成杰民. 农业环境科学学报[J], 2011, 30(1): 7–13.  
CHENG J M. Journal of Agro-Environment Science [J], 2011, 30(1): 7–13.
- [36] 王卫文. 能源环境保护[J], 2015, 29(6): 7–13.  
WANG W W. Energy Environmental Protection[J], 2015, 29(6): 7–13.
- [37] 中华人民共和国生态环境部. 2020 中国生态环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2020.  
Ministry of Ecology and Environmental of the People's Republic of China. China Ecological and Environmental Status Bulletin 2020 [R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environmental, People's Republic of China, 2020.
- [38] 周全. 现代交际[J], 2009(11): 135–136.  
ZHOU Q. Modern Communication[J], 2009(11): 135–136.
- (编辑 费蒙飞)