

DOI: 10.11766/trxb202005060098

刘杏梅, 赵健, 徐建明. 污染农田土壤的重金属钝化技术研究——基于 Web of Science 数据库的计量分析[J]. 土壤学报, 2021, 58 (2): 445–455.

LIU Xingmei, ZHAO Jian, XU Jianming. Research on Immobilization of Heavy Metals in Contaminated Agricultural Soils—Bibliometric Analysis Based on Web of Science Database[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (2): 445–455.

## 污染农田土壤的重金属钝化技术研究 ——基于 Web of Science 数据库的计量分析\*

刘杏梅<sup>1,2</sup>, 赵 健<sup>1,2</sup>, 徐建明<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2. 浙江省农业资源与环境重点实验室, 杭州 310058)

**摘 要:** 为全面直观了解全球农田土壤重金属污染钝化修复研究进展和发展趋势, 本文基于 Web of Science (简称 WoS) 核心合集数据库利用 WoS 数据库自带分析工具、HistCite 引文图谱分析软件和 VOSviewer 可视化分析软件, 从发文量或被引频次 TOP10 的国家、研究机构、作者、期刊、研究热点等方面对 1990—2019 年发表的农田土壤重金属污染钝化修复文献进行计量分析。结果表明, 世界范围内农田土壤重金属钝化修复领域年度发文量呈逐渐增长的趋势, 发文量前三的国家是中国、美国和西班牙, 中国的发文量远超其他国家, 占比 28.79%; 发文机构主要是中国科学院、西班牙高等科学研究委员会、中国科学院大学、佛罗里达大学和浙江大学等, 其中中国科学院发文量和被引频次均为最高, 在该领域具有显著的科研水平和影响力; 主要期刊有 *Environmental Science and Pollution Research*、*Chemosphere*、*Science of the Total Environment* 和 *Journal of Hazardous Materials* 等; 目前应用较多的钝化剂主要是污泥、生物质炭、赤泥、堆肥、磷酸盐、石灰、废弃物等, 关注的重金属主要是镉、铅、铜、锌、砷等, 主要侧重于重金属的生物有效性。

**关键词:** 土壤; 重金属; 钝化; 文献计量; Web of Science

中图分类号: X53 文献标志码: A

## Research on Immobilization of Heavy Metals in Contaminated Agricultural Soils—Bibliometric Analysis Based on Web of Science Database

LIU Xingmei<sup>1,2</sup>, ZHAO Jian<sup>1,2</sup>, XU Jianming<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Resources and Environmental Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** 【Objective】 This work was performed to understand the research status, hot spot and development trend on remediation of heavy metals in agricultural soils all over the world. Meanwhile, it could objectively reflect the academic level and international influence of relevant countries, institutions and scholars, etc. in this field. 【Method】 We employed the Web of Science core collection database (WoS), together with the analysis tools self-provided by WoS, HistCite citation analysis software

\* 国家自然科学基金优秀青年基金 (41722111) 和面上项目 (41977143) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41722111, 41977143)

作者简介: 刘杏梅 (1977—), 女, 河南济源人, 博士, 教授, 研究方向产地土壤环境质量与农产品安全。E-mail: xmliu@zju.edu.cn

收稿日期: 2020-05-06; 收到修改稿日期: 2020-06-28; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-08-18

and VOSviewer software to conduct bibliometric analysis of the literatures on immobilization of heavy metals in agricultural soil. The data were retrieved from the literatures published during the period of 1990-2019. 【Result】 Results showed that a total of 3376 articles related to immobilization/stabilization of heavy metal pollution in farmland soil were retrieved, and the quantity of publications increased steadily year by year worldwide. The top three countries in number of publications are China, the United States and Spain, and China ranks first in volume of publications, accounting for 28.79%. The Chinese Academy of Sciences, Consejo Superior de Investigaciones Cientificas, University of Florida and Zhejiang University are the major paper-publishing institutions, which have remarkable scientific research level and influence in this field. Particularly, Chinese Academy of Sciences has the highest number of publications and citation frequency, publishing 224 articles with total local citation score 1276 times. Major publishers include *Environmental Science and Pollution Research*, *Chemosphere*, *Science of the Total Environment*, *Journal of Hazardous Materials*, etc. The passivants include mainly sludge, biochar, red mud, compost, phosphate, lime, and etc. And the research on metal immobilization/stabilization in agricultural soils mainly focuses on the bioavailability of heavy metals. Cadmium, lead, copper, zinc and arsenic are the main concerned heavy metals. 【Conclusion】 This study would help researchers in this field to grasp the development trend and hotspots accurately, and provide important insights and references for future research. **Key words:** Soil; Heavy metals; Immobilization; Bibliometrics; Web of Science

土壤是人类赖以生存和发展的物质基础。近年随着工业化和城市化进程加快,人类在快速发展经济的同时忽略了环境保护,使得土壤重金属污染问题日益凸显,不仅制约着农业经济可持续发展,而且严重威胁到生态环境安全和人类自身健康<sup>[1-3]</sup>。目前,农田土壤重金属污染已成为世界上大多数地区的一个严重问题,尤其是发展中国家<sup>[4-5]</sup>。2014年环境保护部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国土壤环境状况总体严峻,耕地土壤质量堪忧,点位超标率为19.4%;污染类型以无机型为主,无机污染物超标点位占全部超标点位数的82.8%<sup>[6]</sup>。因此,迫切需要开展农田土壤重金属污染修复工作,这对于我国农产品安全和生态文明建设具有至关重要意义。对于大面积的农田土壤重金属污染修复,目前主要运用化学钝化修复技术,通过向土壤中添加钝化剂调节pH、Eh等理化性质来改变土壤中重金属的化学形态,从而降低重金属在土壤中的溶解性、迁移能力和生物有效性,使重金属固定/稳定化,减少生物体富集量,最终减轻重金属的危害作用<sup>[7-8]</sup>。

文献计量学(Bibliometrics)是以文献体系和文献计量特征为研究对象,被用于文献定量分析,进而评价某领域发展现状和水平,预测未来的发展趋势<sup>[9-10]</sup>。目前,文献计量已被广泛用于农业、林业、环境工程与科学、生态学、食品安全等领域,研究方法较为成熟<sup>[11-15]</sup>。为明确农田土壤重金属污染钝

化修复领域研究布局和进展,本文通过评价Web of Science(WoS)核心合集数据库1990—2019年农田土壤重金属污染钝化修复领域相关文献,利用WoS自带分析工具、HistCite引文图谱分析软件和VOSviewer可视化分析软件,从发文量及变化趋势、重要期刊和作者、主要发文国家和机构、高被引论文、研究热点等不同角度进行计量分析,对主要作者、研究机构和发文国家之间的合作关系进行了可视化分析,对TOP30高被引论文之间的相互引用关系绘制引文编年图,以期为我国重金属受污染农田的安全利用提供理论依据,同时为未来该领域的研究人员提供参考方向。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

研究数据来源于科睿唯安(Clarivate Analytics)的WoS核心合集数据库,该数据库是获取全球学术信息的重要数据库,收录了12000多种世界权威的、高影响力的学术期刊,内容涵盖自然科学、工程技术、生物医学、社会科学、艺术与人文等领域<sup>[16]</sup>。利用主题词(TS),TS=((soil or agricultural or farmland or cropland) and (heavy metal\*) and (amendment or immobilization or stabilization) not (phytoremediation or phytoextraction or bioremediation)),时间跨度为1990—2019年(文献类型为

Article 和 Review, 检索时间为 2019 年 9 月 12 日), 共检索出 3 376 篇相关研究文献, 导入 HistCite 软件的文献共 3 348 篇, 涉及 9 393 位作者, 596 种期刊, 82 568 篇参考文献。

## 1.2 研究方法

利用 Web of Science 数据库自带的分析工具、HistCite 引文分析软件、VOSviewer 可视化分析软件、Excel 2016 以及 Origin2019 绘图软件, 对农田土壤重金属污染钝化修复领域的发文总量及趋势、主要发文期刊、国家、机构、作者, 合作关系(作者、国家、机构)、研究热点及变化趋势等进行计量分析。运用 HistCite 软件分析时重要参数有本地被引频次(Local Citation Score, LCS), 表示这篇文章在当前数据集中被引用的次数或理解为这篇文章在其所属研究领域内的被引次数; 全文被引频次(Global Citation Score, GCS), 表示这篇文章被整个 WoS 数据库中所有文献引用的次数; 本地总被引频次(Total Local Citation Score, TLCS), 是指在当前数据集中文献的被引频次之和; 总被引频次(Total Global Citation Score, TGCS), 是指在 WoS 数据库中所有文献被引频次之和。其中, 一篇文章的 LCS 越高代表该文献在该研究领域内的影响力越高, GCS 越高表示这篇文章被世界许多学者关注。VOSviewer 是由荷兰莱顿大学的 Nees Jan van Eck 和 Ludo Waltman 共同开发的一款用来构建和查看

文献计量图谱的免费的文献计量分析软件, 可以用于生成多种基于文献计量关系的图谱: 如作者或期刊的共引关系图, 关键词共现关系图。其主要特点是图形化展现的方式较为丰富, 显示清晰, 使得文献计量学的分析结果易于解释, 能够定量地分析某个领域或某个主题的研究现状和研究进展<sup>[17]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 发文量及年度变化趋势

发文数量可以反映科研人员对本领域的重视程度, 某种程度上表示土壤重金属钝化修复领域的发展速度和发展程度。通过对土壤污染钝化修复领域 1990—2019 年间 SCI 论文进行计量分析发现(图 1), 发文量随时间整体上呈增加趋势, 2018 年达到 405 篇。特别注意的是从 2015 年开始发文量呈快速增长态势, 主要原因可能在于全球对于生态环境质量的高度重视。例如中国: 2013 年党的十八大将生态文明建设列入“五位一体”总体战略布局, 2014 年 4 月 17 日环境保护部和国土资源部联合发布《全国土壤污染状况调查公报》及 4 月 24 日新环保法颁布, 2016 年 5 月国务院发布《土壤污染防治行动计划》, 2018 年《土壤污染防治法》出台等, 国家颁布的一系列利好政策, 有效推动了该领域科研人员研究的积极性, 加快了该领域的快速发展。

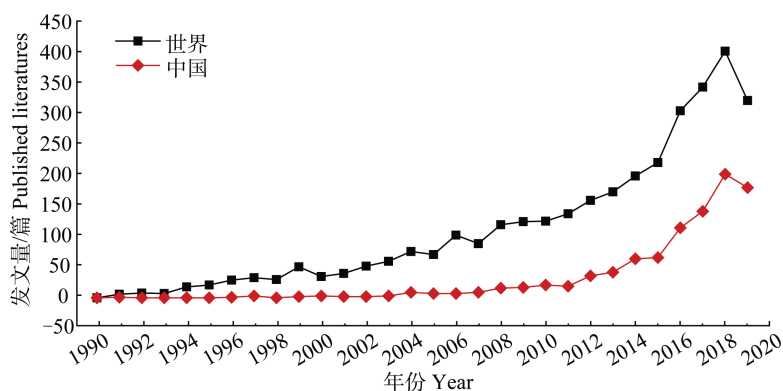


图 1 1990—2019 年土壤重金属污染钝化修复领域年度发文量

Fig. 1 Quantity of publications on immobilized remediation of heavy metals contaminated soil from 1990-2019

### 2.2 重要期刊来源

对某一领域发文量和被引频次的期刊分析, 可以帮助研究人员把握该研究领域核心期刊。影响因子是衡量期刊质量和影响力的重要指标, 通常而言

影响因子越高, 期刊的影响力越大。其计算方法是期刊前两年发表的论文在统计年的被引用总次数与该期刊前两年内发表的论文总数之比<sup>[18]</sup>。该领域共有 596 种期刊, 根据期刊的发文量从高到低进行排

序, 发文量 TOP10 期刊如表 1 所示。发文量前四的期刊依次为 *Environmental Science and Pollution Research*、*Chemosphere*、*Science of the Total Environment*、*Journal of Hazardous Materials*, 分别占所检索文献总数的 5.95%、4.59%、4.35%、4.27%, 表明这些期刊是研究人员的潜在投稿期刊。*Environmental Science and Pollution Research* 期刊的发文量虽然最高但其被引频次较低, 而 *Chemosphere*、*Journal of Hazardous Materials* 和 *Environmental Pollution* 期刊的本地被引频次位居前

三名, 表明这些期刊在重金属污染土壤钝化修复领域影响力相对较大。在发文量排名前十的期刊中, 2018 年影响因子最高的是 *Journal of Hazardous Materials*, 影响因子为 7.650, TCLS 位居第二 (1406 次)。然而, 同样认可度和影响力相对较高的期刊 *Environment International*、*Soil Biology & Biochemistry*、*Environmental Science & Technology* 发文量和本地被引频次均未进入前十, 处于 11~30 之间的位次, 一定程度上表明这些期刊在土壤重金属污染钝化修复研究领域的关注程度相对有限, 可能更加偏向其他侧重点。

表 1 土壤重金属污染钝化修复领域发文量排名前 10 的期刊

Table 1 Top 10 journals of publications on immobilization of heavy metal contaminated soils

期刊名称 Journals	发文量 Records/篇	占比 Proportion/%	TLCS <sup>1)</sup>	TGCS <sup>2)</sup>	IF (5Year)	IF (2018)	出版国 Country
<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	201	5.95	741	2 342	3.208	2.914	德国
<i>Chemosphere</i>	155	4.59	2 177	7 673	5.089	5.108	英国
<i>Science of the Total Environment</i>	147	4.35	522	4 000	5.727	5.589	荷兰
<i>Journal of Hazardous Materials</i>	144	4.27	1 406	6 329	7.336	7.650	荷兰
<i>Water, Air, &amp; Soil Pollution</i>	106	3.14	315	1 870	1.963	1.774	荷兰
<i>Environmental Pollution</i>	90	2.67	1 371	6 343	6.152	5.714	英国
<i>Journal of Soils and Sediments</i>	86	2.55	337	1 014	3.011	2.669	德国
<i>Ecotoxicology and Environmental Safety</i>	77	2.28	497	1 561	4.640	4.527	英国
<i>Journal of Environmental Management</i>	71	2.10	355	1 550	4.962	4.865	英国
<i>Journal of Environmental Quality</i>	69	2.04	646	2 817	2.875	2.579	美国

注: 1) TLCS: 本地总被引频次; 2) TGCS: 总被引频次。下同。Note: 1) TLCS: Total Local Citation Score; 2) TGCS: Total Global Citation Score. The same below.

## 2.3 主要研究力量

### 2.3.1 发文国家分析

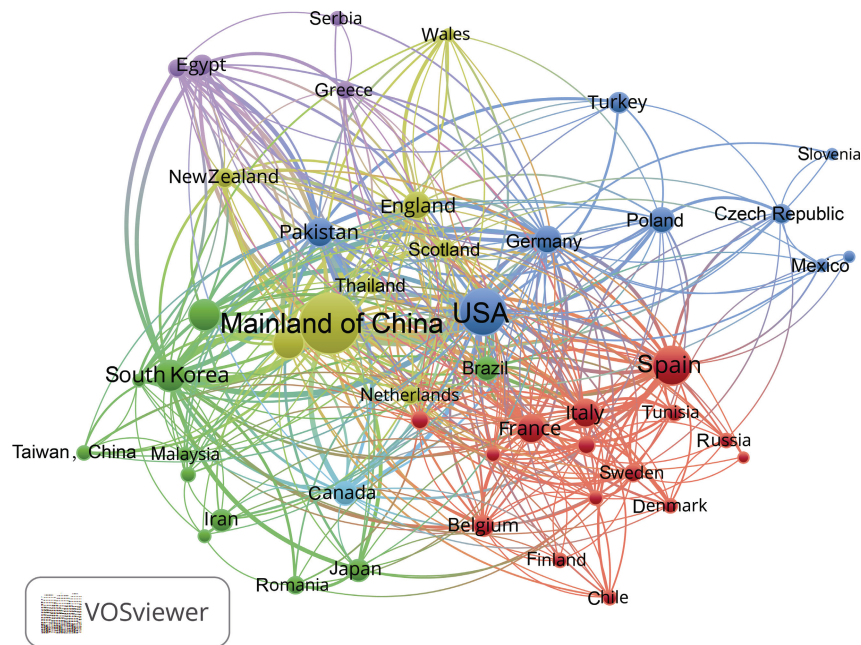
SCI 收录论文的数量和被引频次可在一定程度上映射出一个国家的整体科研水平和影响力<sup>[19-20]</sup>。中国、美国、西班牙、澳大利亚等 101 个国家发表了有关农田土壤重金属钝化修复的研究论文。论文发表数量前十位的国家是中国、美国、西班牙、澳大利亚、韩国、英国、印度、意大利、巴基斯坦、法国, 这十个国家的发文量之和为 2890 篇, 占总量的 86.32%。其中中国的发文量排名第一, 共 964 篇, 远远领先于其他国家, 占发文量的 28.79% (表 2), 突出了我国在农田土壤重金属污染钝化修复领域的重要地位, 同时也暴露出我国农田土壤重金属污染问题的严峻。总体来看,

中国的文献在数量、TLCS 排序中均居于首位且远超其他国家, 其在农田土壤重金属的钝化修复领域研究较为活跃且处于优势地位。有研究发现, 我国土壤重金属污染修复研究发文量最高, 但总被引频次远低于美国且均篇被引频次低于该领域全球平均水平<sup>[21]</sup>。这说明我国的科研人员近几年来不仅重视发文数量, 同时更加注重论文的质量。图 2 是土壤重金属污染钝化修复领域重要发文国家及相互间合作关系图, 图中圆圈大小表示某个国家发文量, 连线距离表示国家间的合作密切程度, 距离越小, 表示合作越密切。从图看出 48 个国家间合作密切共同致力于该领域研究发展, 其中中国与世界上 36 个国家间有密切合作。

表 2 土壤重金属污染钝化修复研究发文量排名 TOP10 的国家

Table 2 Top10 countries in volume of publications on immobilization of heavy metal contaminated soils

国家 Country	发文量 Records/篇	占比 Proportion%	TLCS	TGCS
中国 China	964	28.79	4 457	18 590
美国 USA	502	14.99	3 181	16 118
西班牙 Spain	322	9.62	1 427	9 084
澳大利亚 Australia	184	5.50	1 516	7 245
韩国 South Korea	175	5.23	1 615	5 621
英国 UK	168	5.02	1 719	8 235
印度 India	165	4.93	1 035	5 279
意大利 Italy	140	4.18	969	4 171
巴基斯坦 Pakistan	138	4.12	919	3 702
法国 France	132	3.94	617	3 125



注：Weights=Documents；圆圈大小表示国家发文量；不同颜色代表不同聚类，共 6 个聚类；共有 1 624 条连线，此图仅显示 408 条连线。Note: Weights = Documents; The size of the circle indicates the number of publications sent by the country; Different colors represent different clusters, and there are 6 clusters in total. The figure shows only 408 lines out of a total of 1 624.

图 2 1990—2019 年土壤重金属污染钝化修复领域重要发文国家及相互间合作关系图谱

Fig. 2 Collaborative relationships between important countries in the field of immobilization of heavy metal contaminated soils from 1990 to 2019

**2.3.2 重要研究机构分析** 通过 Histcite 引文分析，该领域研究论文共涉及 2 653 个研究机构，发文量 TOP10 的研究机构如表 3 所示。我国有中国科学院、浙江大学、中国科学院大学、农业农村部（原农业部）四所单位进入 TOP10 研究机构，其中中国

科学院以绝对优势位居第一，本地总被引频次 1 276 次，发文量 224 篇，占总发文量的 6.69%，远远高于排名第二的西班牙高等科学研究委员会（84 篇），可见中国科学院在土壤重金属污染钝化修复领域做出的突出贡献。图 3 表示该领域 1990—2019 年间重

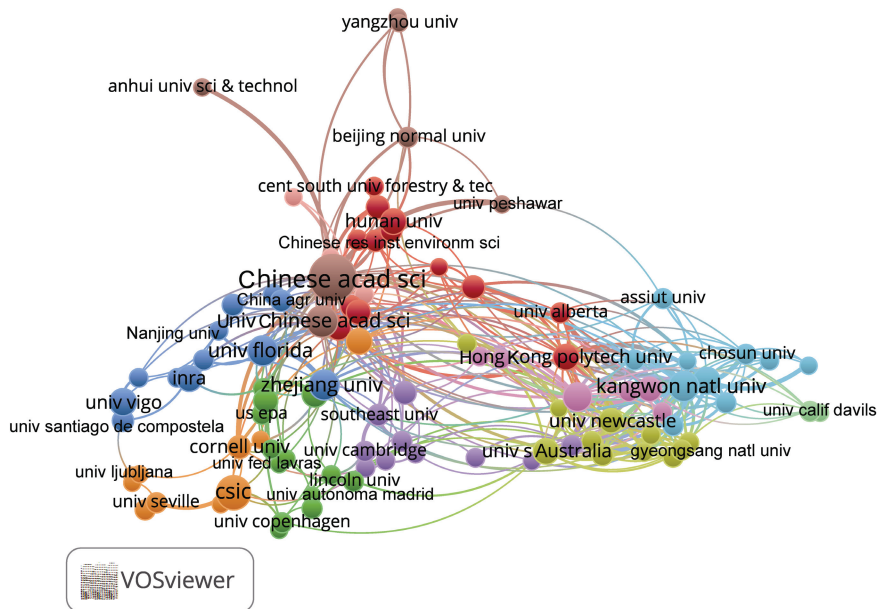
要研究机构的合作关系图,中国科学院与浙江大学、佛罗里达大学、香港理工大学、江原国立大学、西北农林科技大学、华中农业大学、维戈大学等国内外 49 个研究机构均有合作,表明中国科学院在土壤

重金属钝化修复领域具有举足轻重的地位和影响力,而国内其他高校和科研院所特别是目前国内外合作交流偏少的应该主动参加相关领域的学术会议和活动,提高活跃程度和影响力。

表 3 土壤重金属污染钝化修复领域发文量排名 TOP10 的研究机构

Table 3 Top10 institutes in volume of publications on immobilization of heavy metal contaminated soils

机构 Institution	中文名 Chinese name	发文量 Records/篇	占比 Proportion%	TLCS	TGCS
Chinese Academy of Sciences	中国科学院	224	6.69	1 276	4 706
Consejo Superior de Investigaciones Científicas	西班牙高等科学研究委员会	84	2.51	446	3 071
University of Chinese Academy of Sciences	中国科学院大学	63	1.88	120	507
University of Florida	佛罗里达大学	59	1.76	554	2 156
Zhejiang University	浙江大学	58	1.73	181	1 055
Kangwon National University	江原国立大学	54	1.61	990	3 175
University of Agriculture, Faisalabad	费萨拉巴德农业大学	50	1.49	258	959
Korea University	高丽大学	39	1.16	291	773
University of Vigo	维戈大学	39	1.16	93	566
Ministry of Agriculture	中国农业农村部(原农业部)	37	1.11	185	564



注: Weights=Documents; 圆圈大小表示机构发文量,不同颜色代表不同聚类,共 11 个聚类;共有 412 条连线。Note: Weights = Documents; The size of the circle represents the number of publications sent by the institution; Different colors represent different clusters, with a total of 11 clusters. There are 412 connections.

图 3 1990—2019 年土壤重金属污染钝化修复领域重要研究机构及相互间合作关系图谱

Fig. 3 Collaborative relationships between important institutions in the field of immobilization of heavy metal contaminated soils from 1990 to 2019

2.3.3 重要作者分析 作者在一领域论文的 TLCS 和发文量能够在某种程度上反映对其领域的

影响程度。重金属污染土壤钝化修复领域共涉及 9 393 位作者,结合发文量和 TLCS 两项指标,可以

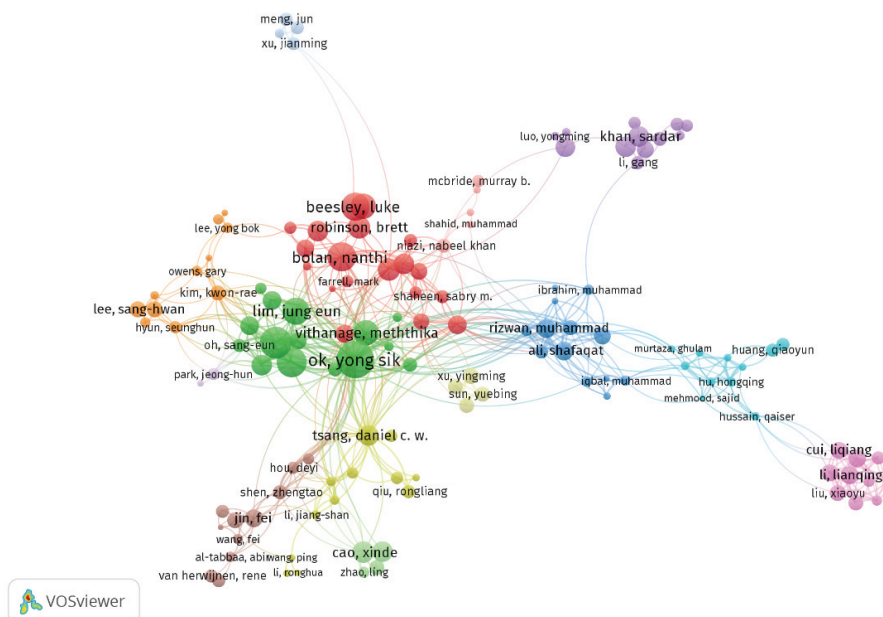
确定重金属污染土壤钝化修复领域的重要作者(表 4)。韩国高丽大学环境科学与生态工程学院 Ok Yong Sik 教授的发文量(65 篇)和 TLCS 次数(1 022 次)均为最高,是该领域的引领人物。在 TLCS 排名前十的作者中,中国有两位学者(曹心德和王海龙),分别位于第五位和第七位。H 指数于 2005 年

由 Hirsch 提出,它综合考虑了作者发文量和文章被引量两个要素,是衡量学术影响力的重要指标<sup>[22]</sup>。按 H 指数排序,澳大利亚学者 Bolan N 和韩国学者 Ok YS 位于前两名,其 H 值分别为 57 和 54。图 4 可以清楚看出各个学者之间的合作关系,不同颜色代表不同群组,共有 14 个群组。从图中来看,韩国

表 4 土壤重金属污染钝化修复领域 TLCS 排名前 10 的作者

Table 4 Top10 authors of total local citation score on immobilization of heavy metal contaminated soils

作者 Author	国家 Country	H 指数 H-index	发文量 Records/篇	TLCS	TGCS
Ok YS	韩国	54	65	1 022	3 300
Bolan N	澳大利亚	57	44	920	3 318
Lee SS	韩国	30	19	628	2 075
Ahmad M	沙特阿拉伯	28	17	533	1 861
Cao XD	中国	41	15	367	990
Moon DH	韩国	26	15	338	679
Wang HL	中国	32	21	322	888
Mench M	法国	45	22	296	996
Park JH	澳大利亚	13	20	293	865
Singh RP	印度	18	17	289	1 174



注: Weights=Citations; 节点表示作者; 节点大小表示文章被引频次; 参数阈值设置为 5 和 30, 即作者至少有 5 篇文章, 文章被引频次至少 30 次; 不同颜色代表不同聚类, 共有 1 620 条连线, 此图仅显示 524 条连线。Note: Weights = Citations; The node represents the author; The node size represents the cited frequency of the article. The parameter threshold is set as 5 and 30, that is, the author has at least 5 articles and the articles are cited at least 30 times. Different colors represent different clusters, and there are 1 620 lines. This figure only shows 524 lines.

图 4 1990—2019 年土壤重金属污染钝化修复研究重要作者及其之间合作关系图谱

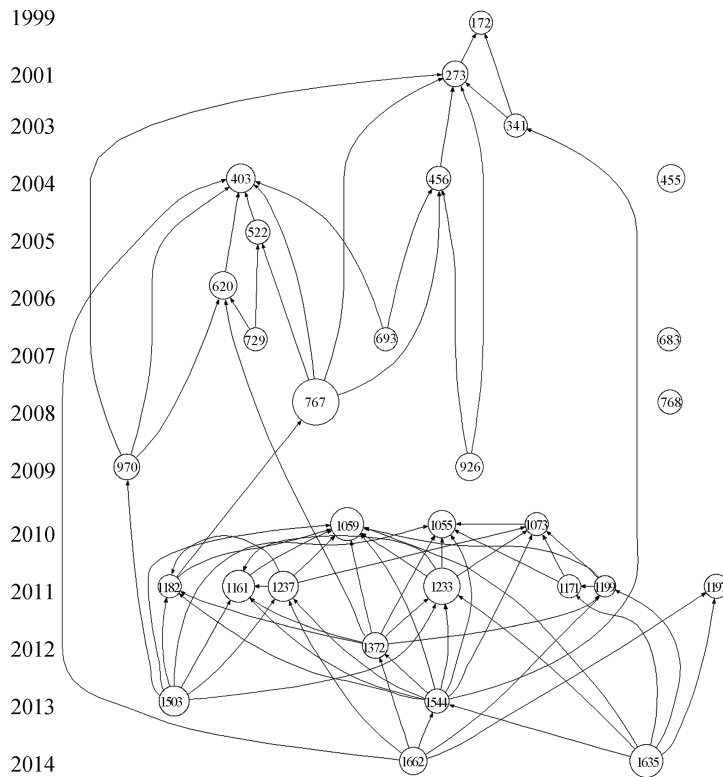
Fig. 4 Collaborative relationships between important authors in the field of immobilization of heavy metal contaminated soils from 1990 to 2019

学者 OkYong Sik 与国内外其他众多学者的相互合作最为密切，而中国学者与国外研究者合作关系有限，未来可以加强国际交流与合作，进一步增强中国的影响力。

### 2.4 经典文献分析

文章的被引频次在一定程度上作为衡量论文质量和重要性的关键指标，通过对文章被引频次的分析可以确定该领域的经典论文。以 LCS 为标准对文献进行排序，该领域前 10 篇经典文献见表 5。被引频次 TOP10 的文献发表年份集中在 2004—2014 年，Beesley L 作者有三篇文章位列前十。被引频次较高的原因之一在于综述性文献，综述为高度凝练总结前期大量研究成果的文献，文章不仅总结全面而且质量较高，通常给之后的研究人员提供理论支撑和研究思路。如瑞典作者 Kumpiene J 发表的“Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using

amendments - A review”（被引频次最高），总结分析了固定/稳定化修复技术中不同钝化剂对土壤 As、Cr、Cu、Pb 和 Zn 污染的应用、机制与原理，对前人的研究成果进行了高度的概括和总结。这 10 篇高被引论文有 5 篇来自 *Environmental Pollution* 期刊，可见该期刊在该学术领域具有非常重要地位和影响力。文献引文编年图是 HistCite 的特色功能。利用软件中 Graph Maker 功能，可通过图示展示某一领域文献之间的关系，绘制出一个领域的发展历史（引文编年图），定位出该领域的关键文献。以 LCS count 为条件，设置节点数为 30，可绘制出土壤重金属污染钝化修复研究文献的引文编年图，从而探寻该领域的发展历程和演进路径。图 5 显示该领域影响力最高的 30 篇文献的发表时间、发展历程和互引关系。编号 767 的文献被引次数最高，其次是编号 1233、编号 1635 和编号 1059。



注：图中左侧一列是文献发表年份，与年份平行的圆圈代表当年发表的文献，其中圆圈中的数字为文献编号，圆圈大小可分析文献被引频次（圆圈越大表示被引次数越多），它与 LCS 值成正比，通过圆圈之间的箭头分析文献间的引用关系。Note: The first column of figures represents the published year, parallel to the year of the circle represents the published literature, and the circle number is the number of LCS in 3 348 references, size of the circle can be used to analyze the citation frequency (the larger the circle indicates the higher the citation frequency), it is proportional to the values of the LCS, through the arrows between circles analysis the relationship between references.

图 5 1990—2019 年土壤重金属污染钝化修复研究领域 TOP30 高被引论文之间的关系图谱  
Fig. 5 Top30 highly cited papers in the field of immobilization of heavy metal contaminated soils from 1990 to 2019



表 5 农田土壤重金属污染钝化修复经典文献按 LCS 排序前 10 篇

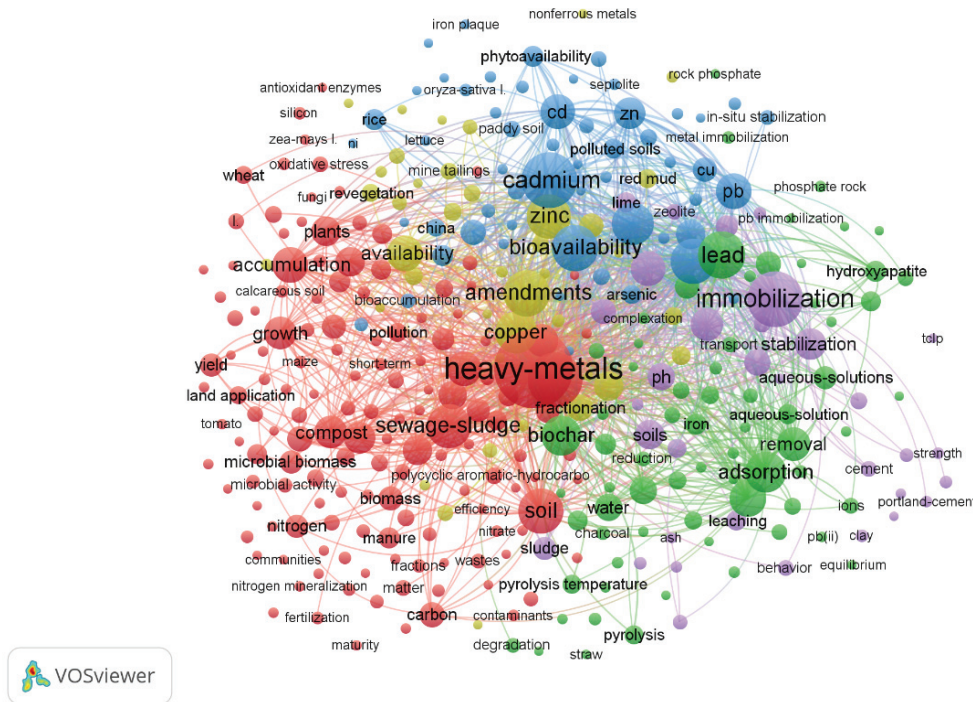
Table 5 Top10 highly cited papers in the field of immobilization of heavy metal contaminated soils

编号 Number	论文题目 Thesis topic	年份 Year	期刊 Journal	作者 Author	本地被引频次 LCS	全文被引频次 GCS
767	Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments - A review	2008	<i>Waste Management</i>	Kumpiene J	296	792
1233	Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals	2011	<i>Plant and Soil</i>	Park JH	180	419
1635	Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review	2014	<i>Chemosphere</i>	Ahmad M	159	1 076
1059	Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil	2010	<i>Environmental Pollution</i>	Beesley L	152	513
1161	The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar	2011	<i>Environmental Pollution</i>	Beesley L	139	345
1503	Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar	2013	<i>Chemosphere</i>	Houben D	131	267
1237	A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils	2011	<i>Environmental Pollution</i>	Beesley L	129	622
403	Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smelter-contaminated soil	2004	<i>Environmental Pollution</i>	Basta NT	111	237
620	Field evaluation of in situ remediation of a heavy metal contaminated soil using lime and red-mud	2006	<i>Environmental Pollution</i>	Gray CW	108	233
926	Immobilization of Zn, Cu, and Pb in contaminated soils using phosphate rock and phosphoric acid	2009	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	Cao XD	104	177

## 2.5 关键词共现网络

对关键词的分析可以反映该领域的研究热点和方向。关键词共现网络表明, 关键词出现的频次和网络之间的联系强度具有一致性。圆圈大小表示该关键词所占的权重, 即关键词出现次数的直观表现, 颜色表示该关键词所属的聚类。从图 6 可以看出, 重金属作为本研究的主题词, 在关键词共现网络中占有非常重要地位。除了重金属 (Heavy-metals or heavy metals) 外, 排名前 10 位的关键词依次是 immobilization、Cadmium、lead、bioavailability、amendments、soil、remediation、swage-sludge、zinc、contaminated soils, 形成了“heavy-metals”、

“immobilization”、“biochar”、“lead”、remediation、zinc、cadmium 等交互作用、紧密关联的 5 大聚类。近年来国内外科科研人员普遍关注重金属 Cd (cadmium)、Pb (lead)、Cu (copper)、Zn (zinc)、As (arsenic)。同时土壤重金属污染固化/稳定化修复 (stabilization/immobilization) 常用的钝化剂有堆肥、生物质炭、污泥、有机质、赤泥、粉煤灰等, 值得注意的是 (生物/植物) 有效性、移动性、溶解性、吸附/解吸、植物吸收/累积/生长等词高频出现, 表明近 30 年来在重金属污染土壤钝化修复领域科研人员会重点关注重金属的有效性和植物体内吸收累积情况, 这与钝化修复的机理完全吻合。



注: Weights=Occurrences; 节点表示关键词; 节点大小表示关键词出现的次数; 关键词参数阈值设置为 5, 即关键词至少出现 5 次; 不同颜色代表不同聚类, 共有 108 177 条连线, 此图仅显示 23 807 条连线。Note: Weights = Occurrences; Nodes represent keywords; The node size represents the number of occurrences of keywords; The threshold value of keyword parameters is set to 5, that is, keywords appear at least 5 times; Different colors represent different clusters, and there are 108 177 lines. This figure only shows 23 807 lines.

图 6 1990—2019 年土壤重金属污染钝化修复研究热点分布

Fig. 6 Distribution of hot spots in the field of immobilization of heavy mental contaminated soil from 1990 to 2019

### 3 结 论

全球范围内对土壤重金属污染重视程度日益增高, 1990—2019 年在农田土壤重金属污染钝化修复领域的发文量呈现稳步增长趋势, 中国、美国、西班牙、澳大利亚、韩国、英国、印度等在土壤重金属污染钝化修复领域发文量较多。中国的发文量和本地被引频次均为第一, 美国紧随在后。土壤重金属污染钝化修复领域的论文主要发表在 *Environmental Science and Pollution Research*、*Chemosphere*、*Science of the Total Environment*、*Journal of Hazardous Materials* 和 *Environmental Pollution* 期刊上, 其中被引频次 TOP10 文章中有 5 篇均来源于 *Environmental Pollution* 期刊, 充分说明该期刊在该领域内具有广泛的认可度。重要的研究机构有中国科学院、西班牙高等科学研究委员会、佛罗里达大学和浙江大学等, 其中中国科学院的发文量和被引频次均为最高, 远远领先其他研究机构, 在该领域具有极高的学术水平和国际影响力。TLCS

排名前十的作者中, 国内学者有两位 (曹心德和王海龙), 韩国 Ok Yong Sik 学者的发文量和 TLCS 次数均为最高。根据研究热点分布图可知, 应用较多的钝化剂主要是污泥、生物质炭、赤泥、堆肥、磷酸盐、石灰、废弃物等, 修复的重点集中在钝化剂对重金属的生物有效性和植物吸收累积的影响这一主题上。研究的重金属以镉 (Cd)、铅 (Pb)、铜 (Cu)、锌 (Zn) 和类重金属砷 (As) 等为主, 其中镉 (Cd) 的研究最为普遍, 是科研人员重点关注的对象。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Hu H X, Zou C M. Environmental soil science[M]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2013. [胡宏祥, 邹长明. 环境土壤学[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2013.]
- [ 2 ] Chen YY, Tang M Y, Wang S T, et al. Heavy metal pollution assessment of farmland soil in China based on bibliometrics[J]. China Journal Soil Science, 2016, 47 (1): 219—225. [陈奕云, 唐名阳, 王淑桃, 等. 基于文献计量的中国农田土壤重金属污染评价[J]. 土壤通报, 2016, 47 (1): 219—225.]

- [ 3 ] Qu C, Shi W, Guo J, et al. China's soil pollution control: Choices and challenges[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50 ( 24 ): 13181—13183.
- [ 4 ] Yang Q, Li Z, Lu X, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 690—700.
- [ 5 ] Toth G, Hermann T, Da Silva M R, et al. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety[J]. *Environment International*, 2016, 88: 299—309.
- [ 6 ] Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. National soil pollution survey bulletin [R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, 2014. [环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 环境保护部, 2014.]
- [ 7 ] He L, Zhong H, Liu G, et al. Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: Mechanisms, potential risks and applications in China[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 252: 846—855.
- [ 8 ] Sharma A, Nagpal A K. Soil amendments: A tool to reduce heavy metal uptake in crops for production of safe food[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2018, 17 ( 1 ): 187—203.
- [ 9 ] Qiu J P, Duan Y F, Chen J Q, et al. Retrospect and prospect on the development of bibliometrics in China[J]. *Research on Science of Science*, 2003, 21( 2 ): 143—148. [邱均平, 段宇锋, 陈敬全, 等. 我国文献计量学发展的回顾与展望[J]. *科学学研究*, 2003, 21( 2 ): 143—148.]
- [ 10 ] Noyons E C M, Moed H F, Luwel M. Combining mapping and citation analysis for evaluative bibliometric purposes: A bibliometric study[J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 1999, 50 ( 2 ): 115—132.
- [ 11 ] Zhang S, Mao G Z, John C, et al. Groundwater remediation from the past to the future: A bibliometric analysis[J]. *Water Research*, 2017, 119: 114—125.
- [ 12 ] Borrett S R, Sheble L, Moody J, et al. Bibliometric review of ecological network analysis: 2010-2016[J]. *Ecological Modelling*, 2018, 382: 63—82.
- [ 13 ] Du H, Li B, Brown M A, et al. Expanding and shifting trends in carbon market research: A quantitative bibliometric study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 104—111.
- [ 14 ] Li R, Lee H, Lin Y, et al. Consumers' willingness to pay for organic foods in China: Bibliometric review for an emerging literature[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16 ( 10 ): 1713.
- [ 15 ] Zhao L, Deng J, Sun P, et al. Nanomaterials for treating emerging contaminants in water by adsorption and photocatalysis: Systematic review and bibliometric analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 1253—1263.
- [ 16 ] Falagas M E, Pitsouni E I, Malietzis G A, et al. Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: Strengths and weaknesses[J]. *The FASEB Journal*, 2008, 22 ( 2 ): 338—342.
- [ 17 ] Eck van N J, Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping[J]. *Scientometrics*, 2010, 84: 523—538.
- [ 18 ] Moreira L F P. The archives and the publication of its first impact factor[J]. *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, 2010, 95 ( 1 ): 1—2.
- [ 19 ] Li Y Q, Li J, Xie S D. Bibliometric analysis: Global research trends in biogenic volatile organic compounds during 1991-2014[J]. *Environmental Earth Science*, 2017, 76 ( 11 ): 1—13.
- [ 20 ] Hu Y M, Zhou J, Liu H L, et al. Bibliometric analysis of studies on remediation of heavy metals contaminated soils based on Web of Science[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 ( 3 ): 707—720. [胡远妹, 周俊, 刘海龙, 等. 基于 Web of Science 对土壤重金属污染修复研究的计量分析[J]. *土壤学报*, 2018, 55 ( 3 ): 707—720.]
- [ 21 ] Chuan L M, Zheng H G, Zhao T K, et al. Trends in research on contaminated soil remediation based on Web of Science database[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35 ( 1 ): 12—20. [串丽敏, 郑怀国, 赵同科, 等. 基于 Web of Science 数据库的土壤污染修复领域发展态势分析[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35 ( 1 ): 12—20.]
- [ 22 ] Bar-Ilan J. Which h-index? - A comparison of WoS, Scopus and Google Scholar[J]. *Scientometrics*, 2008, 74 ( 2 ): 257—271.

(责任编辑: 陈德明)