

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.

CHUAN Li-min, ZHENG Huai-guo, ZHAO Tong-ke, 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.

基于 Web of Science 数据库的土壤污染修复领域发展态势分析

串丽敏¹, 郑怀国^{1*}, 赵同科^{2*}, 赵静娟¹, 颜志辉¹, 张晓静¹, 谭翠萍¹

(1.北京市农林科学院农业科技信息研究所, 北京市农村远程信息服务工程技术研究中心, 北京 100097; 2.北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097)

摘要: 土壤污染修复是当今农业、生态和环境科学领域的研究热点。为明确该领域在世界范围的研究布局, 基于 Web of Science 平台科学引文索引扩展版(Science Citation Index Expanded, SCIE)数据库对 2005—2013 年土壤污染修复领域的 SCI 论文进行计量学统计, 探讨该领域的研究现状、研究重点及发展趋势。结果显示, 在世界范围内土壤污染修复领域的发文量逐年稳步增长, 其中以中国、美国和印度发文量较多, 技术成熟度和重视程度也较强。美国、中国、英国和印度的论文质量和影响力较高, 表征发展中国家中国和印度在土壤污染修复领域的研究实力也跻身世界前列, 是土壤污染修复领域重要的参与者和引领者。中国科学院、浙江大学和西班牙高等科学研究委员会是其主要发文机构, 中国国家自然科学基金、973 国家重点基础研究发展计划、欧盟、美国能源部、863 国家高技术研究发展计划是其主要的项目资金来源。土壤污染修复研究涉及的学科领域分布广泛, 其中以环境科学与生态学领域发文量最多, 并向其他学科渗透, 交叉研究将会更为普遍。今后土壤污染修复技术发展也将继续呈现多样化、友好化和高效化, 更加注重土壤污染修复效果评价和经济效益评估。该研究结果可为土壤环境学科的发展、研究布局的规划以及我国土壤污染修复技术的创新提供思考与借鉴。

关键词: 土壤污染; 土壤修复; SCI 论文; 文献计量; 发展态势

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)01-0012-09 doi:10.11654/jaes.2016.01.002

Trends in research on contaminated soil remediation based on web of science database

CHUAN Li-min¹, ZHENG Huai-guo^{1*}, ZHAO Tong-ke^{2*}, ZHAO Jing-juan¹, YAN Zhi-hui¹, ZHANG Xiao-jing¹, TAN Cui-ping¹

(1. Institute of Information on Science and Technology of Agriculture, The Research Center of Beijing Engineering Technology for Rural Remote Information Services, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. Institute of Plant Nutrition and Natural Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Remediation of contaminated soil is a hot research topic in the field of agricultural, ecological and environmental sciences. In order to understand the current status of world-wide research on contaminated soil remediation, research literature during the period of 2005~2013 was retrieved from the Science Citation Index Expanded(SCIE) database and analyzed using bibliometrics. Results showed that the quantity of publications in the field of contaminated soil remediation increased steadily year by year. China, United States and India were the top three countries in the number of publications, and showed better performance in technical maturity and research emphasis. The quality and the impact of publications from the United States, China, Britain and India were higher than those from other countries, indicating that the developing countries, such as China and India, have enhanced research capacities in the field of contaminated soil remediation. The Chinese Academy of Sciences, Zhejiang University, and Spanish National Research Council were the major paper-publishing institutions.

收稿日期: 2015-07-23

基金项目: 北京市农林科学院科技创新能力建设专项“科技情报研究促进农业科技能力提升”(KJ CX20140207)、“北京农业结构调整重点区域节水生态补偿机制研究”(KJ CX20150501); 北京市农委农业科技项目“北京涉农专利遴选与推广”(20140114); 国家科技支撑计划“农业面源污染动态监测全程阻控减排技术研究与示范”(2012BAD15B01); 北京市农林科学院农业科技信息研究所基金(2015xxs002)

作者简介: 串丽敏(1984—), 女, 河北人, 博士, 助理研究员, 主要从事农业环境与学科发展态势研究。E-mail: xiaochuan200506@126.com

* 通信作者: 郑怀国 E-mail: guanzhangxx@163.com; 赵同科 E-mail: tkzhao@126.com

The National Natural Science Foundation of China, National Basic Research Program of China(973), European Union, U.S. Department of Energy, and National High Technology Research and Development Program of China(863) were the main funding sources. The scientific research activities spanned across a wide range of disciplines, with the most publications appeared in the environmental science and ecology. The interdisciplinary research became a trend. Remediation technologies of contaminated soils would be diverse, user-friendly and highly efficient in the future. More attention should be also paid to evaluation of performance efficiency and economic benefits of remediation techniques. These results provide important insights to the development of soil science and research planning for contaminated soil remediation in our country.

Keywords: soil contamination; soil remediation; SCI paper; bibliometrics; developing tendency

土壤作为陆地生态系统重要组成部分,是人类和动物居住不可替代的环境因子,也是食品安全与人体健康的基本保障,在保护环境和维持生态平衡中具有重要作用。土壤是一个有生命的活的自然体,具有自身的净化能力和对污染物的缓冲能力,但是也受其负载容量的限制^[1]。近年来,由于工业、农业生产等一系列人为活动的影响造成土壤负荷加大,土壤污染日益严重,主要包括铬(Cr)、镉(Cd)、铅(Pb)、汞(Hg)、砷(As)、铜(Cu)、锌(Zn)和镍(Ni)等重金属含量超标以及持久性有机污染物、病原微生物和放射性物质,致使粮食和蔬菜等必需品品质下降,直接危害人类健康^[2]。土壤重金属污染通常被称作“隐身杀手”,潜伏期长,迁移性差,修复难度大,其危害程度不亚于空气和水污染。2013年底,国土资源部就我国第二次土地调查主要数据成果举行发布会。结果显示,我国耕地总面积为 $1.3533 \times 10^8 \text{ hm}^2$,但由于生态承载问题日益突出,全国受到中重度污染导致不宜耕种的耕地面积约为 $3.33 \times 10^6 \text{ hm}^2$,适宜稳定利用的耕地约为 $1.20 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ^[3]。面对土壤污染的严峻形势,如何治理已成为当今农业、生态和环境科学领域研究的热点。为了实现农田的可持续利用,保障人类获得充足且安全的食品,迫切需要研究并提出经济、高效、可行的土壤污染修复技术。

文献计量学(Bibliometrics)是用数学和统计学方法,定量分析一切知识载体的交叉科学。文献计量学可以客观、定量地反映某一学科的宏观发展态势,并已被不少学科所采用^[4]。在农业、林业、环境科学、新能源利用等方面,学者已经做过大量的文献计量分析,研究方法也较为成熟^[5-14]。有专家指出,科学文献的数量和质量是对科学技术水平的一种重要量度^[15-18]。从文献计量角度探讨科学研究布局和发展态势是一种有效的途径和方法^[19-24]。

为明确土壤污染修复领域在世界范围的研究布局和发展态势,本研究基于 Web of Science 平台科学

引文索引扩展版(Science Citation Index Expanded, SCIE)数据库对土壤污染修复领域的 SCI 论文进行计量学统计,探讨该领域的研究现状、研究重点及发展趋势,为土壤环境学科的发展、研究布局的规划以及为我国土壤污染修复技术的创新、农业环境保护和政府管理部门决策的制定提供参考与借鉴。

1 数据来源与统计方法

本文数据来源是美国汤森路透公司出版的 Web of Science 中 SCIE 数据库,该数据库收录的文献覆盖了全世界最重要和最有影响力的研究成果,是世界公认的自然科学领域最为重要的检索平台。利用主题词(TS),设计与土壤污染修复相关文献的检索式如下,TS=(soil or field or farmland or cropland)AND(pollut* or contaminat*) AND (removal or remedi* or decontaminat* or stabilizat* or phytoremediat* or bioremediat* or co-remedi* or phytoextract* or phytostabilizat* or phytoinfiltrat* or phytovolatilizat* or localizat* or accumulat* or hyperaccumulat*),检索 2005—2013 年间发表的土壤污染修复相关论文(文献类型为 Article 和 Review,检索时间为 2014 年 5 月 4 日)。以这些文献作为分析的数据集,并运用 Thomson Data Analyzer(TDA)分析工具,结合 Excel 和 Web of Science 中自带的分析软件,对土壤污染修复领域发文量的变化趋势、主要发文国家和机构,以及研究领域和研究主题等进行分析。

2 结果与分析

2.1 发文量及年度变化分析

发文量表征科学界对本领域的关注程度,一定程度上反映该领域的发展速度和发展程度。通过对 2005—2013 年 SCIE 引文数据库检索,土壤污染修复领域共发表论文 17 305 篇。年度发文分布结果(图 1)显示,从 2005 年开始(1304 篇),土壤污染修复领域

的发文量稳步增长,到2013年达2619篇,与2005年相比,发文数量翻了一番。2005—2013年该领域发文量的年均增长率分别为8.7%、10.2%、13.3%、13.1%、0.5%、10.0%、9.1%和8.6%,平均增长率为9.2%。2008年和2009年土壤污染修复领域的年度发文量增加迅速,2010年之后(包括2010年)每年的发文量处于平稳上升状态,2010—2013年近4年累计的发文量(9252篇)占统计年限(9年)总发文量的53.5%,说明近几年土壤污染修复问题开始受到研究人员的高度重视,在该领域的研究热度也逐渐提高。

2.2 主要国家总发文量分析

一国的发文量一定程度上代表了该国在某个领域研究的活跃程度。在现有数据基础上,以第一作者或通信作者发文的国家进行统计,2005—2013年间在土壤污染修复领域共有142个国家或地区发表了相关研究论文,排名前25位的国家具体发文情况如图2所示。结果显示,中国和美国的发文量居于前两位,分别为3164篇和2439篇,且其在该领域的发文

量遥遥领先于其他国家,分别是排名第三的印度发文量的3.22倍和2.48倍,分别占检索结果总统计量的18.3%和14.1%。可见,中国和美国在该领域的研究占有主导地位。西班牙、意大利、英国、加拿大、法国、德国和日本几个国家其发文量也保持在500篇以上,分别位于世界的第4至10位。前10个国家总发文量10888篇,占世界2005—2013年期间总发文量的62.9%;前25个国家的总发文量为14937篇,占世界2005—2013年度土壤修复领域总发文量的86.3%。另有分析结果显示,英语语种的发文量占总发文量的97.7%。

2.3 主要国家年度发文量分析

总发文量居于前六位国家的年度发文量(以第一作者或通信作者计)变化趋势如图3所示。2005—2013年间,美国在土壤污染修复领域的发文量整体呈现平稳状态,每年的发文量在247~294篇之间,年际间变化幅度较小,并且在2008年之前的发文量远高于中国和其他国家。中国在土壤修复领域的发文量

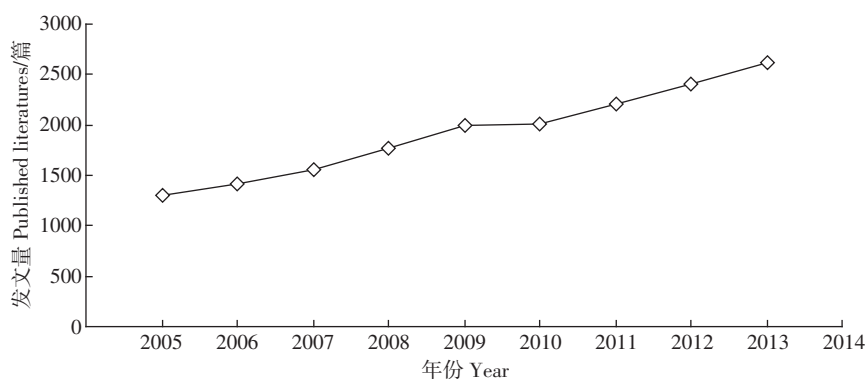


图1 2005—2013年土壤污染修复领域年度发文量

Figure 1 Quantity of publications on contaminated soil remediation from 2005 to 2013

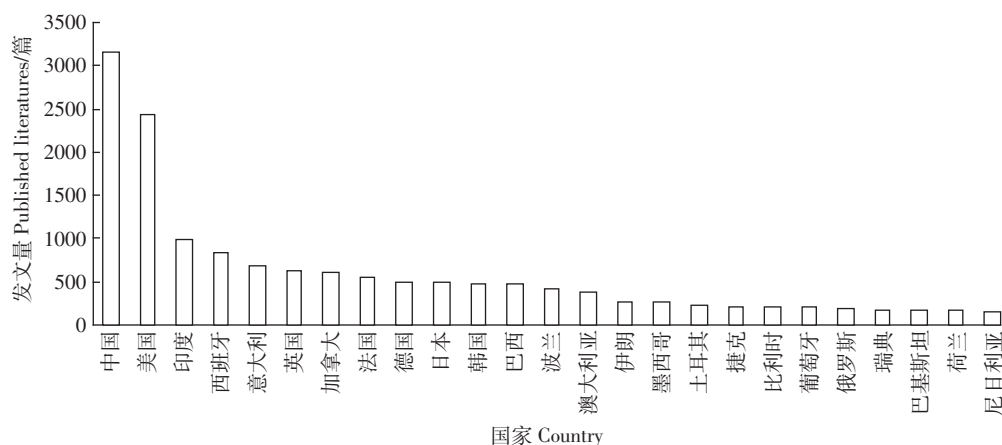


图2 2005—2013年土壤污染修复领域排名前25位国家发文量

Figure 2 Quantity of publications by top 25 countries on contaminated soil remediation from 2005 to 2013

从 2005 年开始呈现逐年增长趋势,增长率保持在 4.7%(2007 年)~48.0%(2009 年)之间,年均增长率为 19.2%,2009 年的增长速度最快,且当年发文量已超过美国,之后发文量继续上升,成为该领域年度发文量最多的国家,至 2013 年年度发文量达到 615 篇,表明中国在土壤污染修复领域的研究逐渐变得活跃。印度、西班牙、意大利和英国在土壤污染修复领域的发文量远远低于美国和中国,基本保持在每年发文 200 篇以内,但是印度和西班牙的年度发文量呈现逐年上升趋势,意大利和英国在土壤污染修复领域的发文量变化较为平缓。

2.4 来源期刊分析

对某一研究领域发文量的来源期刊进行分析,可以帮助研究人员准确把握研究领域的核心期刊,为其文献查询、资料收集、论文撰写与投稿提供专业指导。对 2005—2013 年土壤污染修复领域的文献检索结果

进行分析可知,在 SCIE 数据库中,收录与土壤污染修复相关的研究论文前十种期刊主要有 Journal of Hazardous Materials、Chemosphere、Environmental Pollution、Environmental Science & Technology 等(表 1),并且主要来自 Elsevier 和 Springer 两大出版商。在这十种期刊中近五年平均影响因子最高的期刊是 Journal of Hazardous Materials,影响因子达 5.123,发文量为 884 篇,排名第一,占总发文量的 5.11%。发文量排在第二和第三位的期刊分别是 Chemosphere 和 Environmental Pollution,发文量分别为 821 篇和 550 篇,占总发文量的 4.74%和 3.18%,其近五年平均影响因子分别为 3.867 和 4.306。排在第四和第五位的是 Environmental Science & Technology 和 Science of the Total Environment,发文量分别为 502 篇和 458 篇,占总发文量的 2.90%和 2.65%,其中 Environmental Science & Technology 期刊近五年平均影响因子为

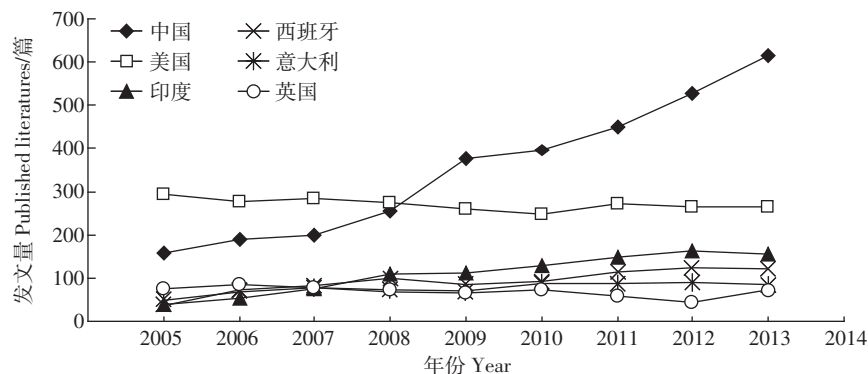


图 3 2005—2013 年土壤污染修复领域发文量前六位国家年度发文量变化

Figure 3 Changes in publication quantity of top 6 countries in contaminated soil remediation from 2005 to 2013

表 1 2005—2013 年土壤污染修复领域发文前 10 种期刊来源分析

Table 1 Top 10 journals of publications on contaminated soil remediation from 2005 to 2013

期刊名称 Journal name	发文量统计/篇 Total publication	占总发文量 比例/% Percentage	近五年 平均影响因子 Impact factor(5 year)	期刊分区 Journal ranking	出版 国家 Country	出版商 Publisher
Journal of Hazardous Materials	884	5.11	5.123	Q1	荷兰	Elsevier
Chemosphere	821	4.74	3.867	Q1	英国	Elsevier
Environmental Pollution	550	3.18	4.306	Q1	英国	Elsevier
Environmental Science & Technology	502	2.90	5.084	Q1	美国	American Chemical Society
Science of the Total Environment	458	2.65	3.906	Q1	荷兰	Elsevier
Water, Air & Soil Pollution	434	2.49	1.700	Q2	荷兰	Springer
International Journal of Phytoremediation	293	1.69	1.440	Q3	美国	Taylor & Francis Inc
Environmental Science and Pollution Research	225	1.30	2.661	Q2	德国	Springer
Environmental Monitoring and Assessment	219	1.26	1.493	Q2	荷兰	Springer
International Biodeterioration & Biodegradation	194	1.12	2.444	Q2	英国	Elsevier

注:期刊分区是该期刊在 2013 年 Journal Citation Reports 中环境科学类别中的分区。

Note: Journal ranking is a quartile ranking cited from the environmental science category in 2013 Journal Citation Reports.

5.084, 在这十种期刊中居第二位, Science of the Total Environment 期刊近五年平均影响因子为 3.906, 在这十种期刊中居第四位。

在 2013 年期刊引证报告 (Journal Citation Reports, JCR) 环境科学类中, 上述排名前五的期刊均属 Q1 类。其余五种期刊近五年平均影响因子分布在 1.440~2.661 之间, 在引证报告环境科学类中属 Q2 和 Q3 类。

2.5 重要研究机构分析

发表论文的机构以第一作者和通信作者为准。通过采用 TDA 软件对论文的第一作者和通信作者的机构进行梳理, 2005—2013 年间在世界范围内土壤污染修复技术领域发文量排名在前 25 位的机构如表 2 所示。2005—2013 年中国科学院在土壤污染修复技术领域的发文量高达 663 篇, 远远高于排在第二位的浙江大学 (245 篇) 和西班牙高等科学研究委员会 (Consejo Superior de Investigaciones Cientificas, CSIC, 175 篇), 分别是浙江大学和西班牙高等科学研究委员会发文量的 2.71 倍和 3.79 倍。

排在世界范围内前 25 位的机构来自中国的有中国科学院、浙江大学、南京农业大学、中山大学、北京师范大学、清华大学、南开大学、北京大学和国立台湾大学共 9 家, 占前 25 位机构的 36%。排名在前 10 位的机构中就有 5 家来自中国, 排名在前 5 位的机构有 3 家来自中国, 可见中国在该领域的活跃程度较高, 在土壤污染修复技术的研发和应用上发挥了重要作用。

排在世界范围内前 25 位的机构中, 美国占 4 家, 分别是 Univ Florida (佛罗里达大学)、Univ Illinois (伊利诺斯大学)、US EPA (美国环保局) 和 USDA ARS (美国农业部农业研究局)。其余的机构分别来自德国、俄罗斯、澳大利亚、印度、丹麦、斯洛文尼亚、伊朗、比利时、韩国和加拿大, 各有一个机构。

2.6 项目资助来源分析

土壤污染修复领域的研究是在大量项目和资金资助下完成的。主要资助来源包括中国国家自然科学基金、973 国家重点基础研究发展计划、欧盟、美国能源部、863 国家高技术研究发展计划、中国科学院、美

表 2 2005—2013 年世界范围内在土壤污染修复技术领域发文量排名前 25 位的研究机构
Table 2 Top 25 research institutes publishing contaminated soil remediation from 2005 to 2013

排名 Rank	机构 Institution	机构中文名 Chinese name	国家和地区 Countries and regions	发文量/篇 Publication
1	Chinese Academy of Science	中国科学院	中国	663
2	Zhejiang University	浙江大学	中国	245
3	CSIC	西班牙高等科学研究委员会	西班牙	175
4	Nanjing Agricultural University	南京农业大学	中国	128
5	UFZ Helmholtz Ctr Environm Res	亥姆霍兹环境研究中心	德国	90
6	Sun YatSen University	中山大学	中国	90
7	Russian Academy Science	俄罗斯科学院	俄罗斯	82
8	Univ Florida	佛罗里达大学	美国	81
9	Univ Vigo	维戈大学	西班牙	74
10	Beijing Normal University	北京师范大学	中国	70
11	Univ S Australia	南澳大学	澳大利亚	69
12	Indian Inst Technology	印度技术研究院	印度	66
13	Tech University of Denmark	丹麦技术大学	丹麦	66
14	Tsinghua University	清华大学	中国	63
15	Nankai University	南开大学	中国	62
16	University of Ljubljana	卢布尔雅那大学	斯洛文尼亚	59
17	Islamic Azad University	伊斯兰自由大学	伊朗	56
18	Univ Illinois	伊利诺斯大学	美国	56
19	US EPA	美国环保局	美国	56
20	USDA ARS	美国农业部农业研究局	美国	56
21	Peking University	北京大学	中国	53
22	Univ Ghent	根特大学	比利时	53
23	National Taiwan University	国立台湾大学	中国台湾	52
24	Seoul National University	首尔大学	韩国	52
25	Univ Waterloo	滑铁卢大学	加拿大	52

国国家自然科学基金、西班牙科技与创新部、加拿大自然科学与工程研究理事会、中央高校自由探索基金等(表 3)。来自中国国家自然科学基金资助的论文发表量最多, 达 2600 篇, 占该领域总发文量的 14.9%, 远远高于其他资助机构的发文量。排名前 15 位的机构中, 有 6 个来自中国, 2 个来自美国和西班牙, 欧盟、加拿大、巴西、波兰、捷克各有一个主要资助机构。该结果从一个侧面反映中国对土壤污染修复领域研究的资助力度很大, 中国在该领域的研究较为活跃, 体现了国家对土壤环境保护工作越来越重视。

2.7 研究论文被引分析

本研究检索到的土壤污染修复相关论文 17 305 篇的总被引频次达 180 199 次, 篇均被引频次为 10.4 次。分析总被引频次最多的前 15 个重要国家和地区的发文章量、篇均被引频次和各国单篇最高被引频次(表 4), 结果显示: 美国发文章量虽然比中国少 403 篇, 排名第二, 但是总被引频次高达 32 968 次, 排名第一, 远高于总被引频次排名第二的中国(26 023 次); 总被引频次排名第三的是英国, 为 11 470 次, 但是其总发文章量为 627 篇, 反映英国文章的整体质量和影响力较高; 排名第四为印度, 总被引频次为 10 185 次, 其余国家的总被引频次远远低于这四个国家。美国、西班牙、意大利、英国、加拿大、法国、德国的篇均被引频次高于世界平均水平(10.4 次), 以英国的篇均被引频次最高, 为 18.29 次, 再次证明了英国文章的广泛影响力; 其次是德国和美国, 篇均被引频次分别为 14.75 次和 13.45 次。单篇最高被引频次是来自德国的文章, 为 432 次,

表 3 2005—2013 年土壤污染修复领域发文章项目资助来源分析

Table 3 Fund agencies supporting research on contaminated soil remediation from 2005 to 2013

排名 Rank	基金名称 Funding agency	发文章量 Number of publication/篇	基金中文名 Chinese name
1	National Natural Science Foundation of China	2600	中国国家自然科学基金
2	National Basic Research Program of China	848	973 国家重点基础研究发展计划
3	European Union	533	欧盟
4	US Department of Energy	472	美国能源部
5	National High Technology Research and Development Program of China	417	863 国家高技术研究发展计划
6	Chinese Academy of Sciences	416	中国科学院
7	Natural Science Foundation	387	美国国家科学基金会
8	Spanish Ministry of Science and Innovation	232	西班牙科技与创新部
9	Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada	232	加拿大自然科学与工程研究理事会
10	Fundamental Research Funds for the Central Universities	188	中央高校自由探索基金
11	CNPQ(Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico)	137	巴西国家科学技术发展委员会
12	Polish Ministry of Science and Higher Education	125	波兰科学和高等教育
13	China Postdoctoral Science Foundation	111	中国博士后基金
14	Czech Science Foundation	94	捷克科学基金会
15	Spanish Ministry of Education and Science	39	西班牙教育和科学部

表 4 各主要国家土壤污染修复领域发文章被引频次分析

Table 4 Citation frequencies of publications by major countries on contaminated soil remediation

序号 Number	国家和地区 Countries and regions	发文章量/篇 Publication	总被引频次/次 Total cited times	篇均被引频次/次 Average cited times	单篇最高被引频次/次 Highest cited times of single paper
1	美国	2452	32968	13.45	268
2	中国	2855	26023	9.11	201
3	英国	627	11470	18.29	253
4	印度	992	10185	10.27	372
5	西班牙	836	9961	11.92	274
6	加拿大	615	8408	13.67	379
7	意大利	688	7798	11.33	264
8	德国	505	7447	14.75	432
9	法国	560	6879	12.28	135
10	日本	501	4385	8.75	205
11	韩国	485	3917	8.08	176
12	澳大利亚	391	3813	9.75	148
13	巴西	477	2705	5.67	265
14	中国台湾	316	2500	7.91	91
15	波兰	433	2175	5.02	56

其次是加拿大和印度, 分别为 379 次和 372 次。

2.8 研究学科领域分析

根据 TDA 软件对土壤污染修复领域 2005—2013 年间发表文章所涉及的研究领域进行归类, 结果(图 4)显示, 近几年土壤污染修复发表文章共涉及 113 个研究领域, 前六个主要分布在 Environmental Science & Ecology(环境科学与生态学)、Engineering(工程

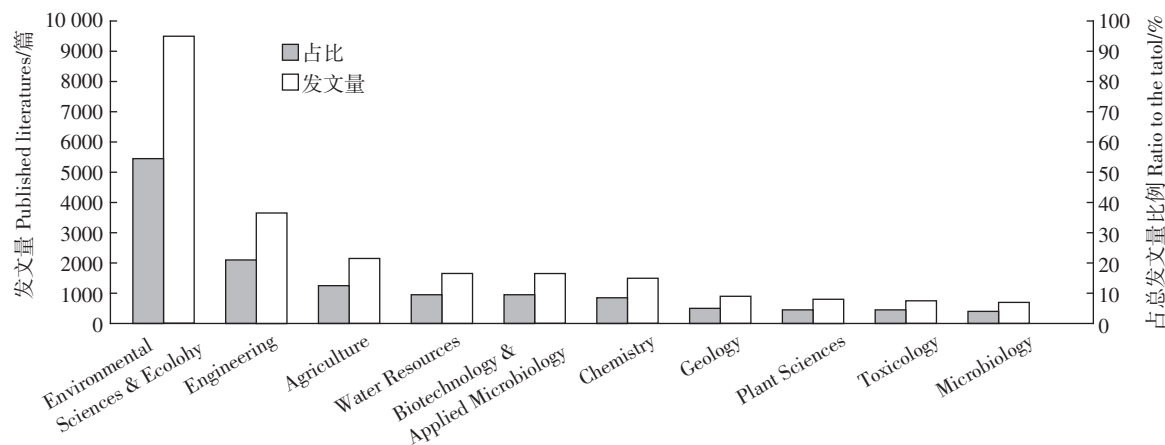


图4 2005—2013年土壤污染修复领域发文所涉及的研究领域分析

Figure 4 Discipline distribution of publications on contaminated soil remediation from 2005 to 2013

学)、Agriculture(农学)、Water Resources(水资源学)、Biotechnology & Applied Microbiology(生物技术与应用微生物学)、Chemistry(化学)领域。其中:以环境科学与生态学领域发文量最多,达9525篇,占近9年总发文量的54.7%,远远高于其他领域;其次是工程学,发文量达3635篇,占总发文量的20.9%;排在第三位的是农学(2152篇),占近9年总发文量的12.4%;水资源学、生物技术与应用微生物以及化学研究领域的发文量也在1500篇以上,分别占总发文量的9.6%、9.6%和8.7%。除以上6个研究领域外,还涉及地质学、植物科学、毒理学、微生物学等研究领域,分别占总发文量的5.1%、4.7%、4.3%和4.1%。结果表明,土壤污染修复涉及学科领域分布广泛,以环境科学与生态学领域研究为主,并且逐渐向其他学科领域渗透,学科之间的交叉研究将会更为普遍。

2.9 基于作者关键词的研究主题分析

关键词能够清楚地表达论文研究的主题,通过对关键词的统计与分析,有助于把握领域研究热点和未

来研究方向。运用TDA软件对出现频次最高的前100个关键词(Authors' keywords)进行合并、归类统计(表5),发现近几年在土壤污染修复领域的研究主题主要集中在以下几个方面:

(1)污染种类主要有无机物污染、有机物污染和重金属污染。无机物污染主要是硝酸盐以及重金属,包括镉、铅、砷、铜、锌、汞、铬、镍污染等;有机物污染主要是多环芳烃类、多氯联苯、菲、石油烃、芘、农药、柴油、除草剂阿特拉津和原油中的有机成分等污染。最受关注的污染物是重金属,其次是有机污染物,放射性物质铀和铯等污染物也有报道。

(2)土壤污染的修复主要是生物修复,包括植物修复、动物修复和微生物修复,另外电动化、淋洗、固定化等技术同时发展。主要辅助手段有添加表面活性剂,种植超富集植物,添加螯合剂、蚯蚓或丛枝菌根,或借助变性梯度凝胶电泳等方法以便更有效地对污染土壤进行原位修复。

(3)除土壤污染修复技术研究外,对修复的风险评

表5 土壤污染修复领域相关研究论文出现频次最高的前100个作者关键词

Table 5 Top 100 authors' keywords in contaminated soil remediation

类别 Category	关键词(括号内数字表示出现频次) Keywords
污染物种类 Pollutants	重金属(1969)、多环芳烃类(738)、镉(812)、铅(659)、砷(558)、锌(385)、沉积物(318)、铜(310)、多氯联苯(186)、石油烃(185)、碳氢化合物(175)、污水污泥(170)、汞(158)、铬(154)、菲(148)、堆肥(143)、磷(127)、农药(118)、镍(111)、有机污染物(101)、废水(100)、硝酸盐(98)、芘(97)、原油(93)、磷酸盐(70)、粉煤灰(69)、阿特拉津(67)、矿山尾矿(65)、肥料(63)、滴滴涕(56)、柴油(56)、苯酚(56)、灌溉(55)、假单胞菌(55)、铜绿假单胞菌(50)、除草剂(48)、铁(46)
修复技术 Remediation technology	植物修复(1284)、生物修复(1256)、生物降解(894)、富集(501)、植物提取(392)、电动化(327)、表面活性剂(300)、淋洗(252)、吸附(231)、超富集(219)、乙二胺四乙酸(181)、生物强化技术(176)、根际(160)、人工湿地(135)、蚯蚓(134)、植物稳定化(128)、连续提取(128)、固定化(125)、丛枝菌根(117)、螯合剂(109)、生物刺激(96)、解吸(98)、自然衰减(73)、pH(72)、臭氧(70)、变性梯度凝胶电泳(63)、原位修复(69)、丛枝菌根(67)、纳米粒子(57)、鼠李糖脂(57)、沸石(57)、分馏(53)、氧化(51)、活性炭(50)、温度(50)、腐植酸(46)、有机酸(46)
风险评估 Risk assessment	生物有效性(401)、地下水(294)、毒性(187)、水稻(155)、玉米(152)、模型(142)、风险评估(137)、蚯蚓(134)、蔬菜(119)、真菌(85)、生物监测(82)、微生物群落(77)、氧化应激(73)、迁移(66)、微生物(66)、环境污染(66)、流动性(64)、指示生物(59)、小麦(59)、芥菜型油菜(56)、迁移影响因子(53)、酶活性(51)、抗氧化酶(50)、代谢产物(50)、生物标记(48)、水稻土(48)

估和生物监测也是一个重要的研究方向。在生物监测中,多利用指示生物(包括植物和动物)的方法,如玉米、水稻、小麦和蔬菜等,指示动物主要是蚯蚓和微生物。

3 讨论

土壤污染与农产品质量安全息息相关,开展土壤污染的修复技术研究,对于促进农产品质量安全,进而保障广大人民群众的生命健康具有重大意义。通过对土壤污染修复领域2005—2013年间SCI论文进行计量分析,发现全世界在土壤污染修复领域的总发文量近9年呈现稳步增长态势,中国在2009年以后的发文年增长率遥遥领先,是土壤污染修复领域发文量最多的国家,表明中国在该领域的研发活动较为活跃。然而,中国在土壤污染领域虽然表现出强劲的发展势头,取得了重要进展,但与其他国家相比,在影响力上还有很大的差距,总发文量排名第一但总被引频次远低于美国,篇均被引频次低于该领域的世界平均水平,最高单篇被引频次也较低。因此,中国学者在注重发文量的同时,更应注重质量的提升,才能进一步提高研究成果的国际影响力。

在研究布局上,中国与发达国家和地区差别不是很大,均主要开展修复机理、技术研发和工程应用及风险评估和修复效果评估方面的研究;采用的修复技术主要集中在植物修复、微生物修复、化学修复和物理修复;针对的污染物也主要是重金属(包括镉、铬、锌、铅、砷和汞等)及持久性有机污染物,特别是多环芳烃。但是总体而言,发达国家(尤其是美国)研究布局更加全面。中国在借鉴国外技术发展的基础上,应筛选并发展能广泛应用、安全、低成本的原位农田生物修复技术和物化稳定技术,注重自身技术的改革与创新,进一步研发成本低、效益高、修复好的先进技术,加强污染土壤修复技术集成;开发基于环境功能修复材料(纳米)的修复技术,探索螯合诱导与其他生物工程结合的联合修复技术,运用分子生物学和基因工程技术,强化超富集植物材料的筛选,因地制宜地诱导、培育本地兼具高生物量和高富集能力的植物,同时,注重安全、针对性强的修复工程技术与成套设备的研发,加强科技创新。

4 结论

(1)世界范围内对土壤污染修复领域的重视程度越来越高。全世界在土壤污染修复领域的总发文量近9年呈现稳步增长趋势,中国、美国、印度、西班牙、意

大利、英国、加拿大、法国、德国和日本在土壤污染修复领域发文量较多,在土壤污染修复领域的技术成熟度和重视程度也表现较强,并且中国在2009年以后的发文年增长率遥遥领先于其他国家,研发活动较为活跃。

(2)发展中国家是土壤污染修复领域的重要参与者和引领者。土壤污染修复领域论文主要发表在Journal of Hazardous Materials、Chemosphere、Environmental Pollution、Environmental Science & Technology、Science of the Total Environment等期刊上,美国、中国、英国和印度的总被引频次较高,论文质量和影响力较高,发展中国家中国和印度在土壤污染修复领域的研究实力跻身世界前列,是该领域重要的参与者和引领者。中国科学院、浙江大学、南京农业大学、中山大学、北京师范大学、清华大学、南开大学、北京大学和国立台湾大学等中国的科研院所和高校研究水平和贡献突出。

(3)土壤污染修复研究涉及的学科分布较为广泛。共涉及113个研究领域,前六个主要分布在Environmental Science & Ecology(环境科学与生态学)、Engineering(工程学)、Agriculture(农学)、Water Resources(水资源学)、Biotechnology & Applied Microbiology(生物技术与应用微生物学)、Chemistry(化学)等领域。环境科学与生态学领域发文量最多,并且学科之间的交叉研究越来越普遍。

(4)土壤污染修复技术呈现多样化、友好化和高效化。该领域的研究主题主要分布在重金属、多环芳烃、农药、多氯联苯等污染物上,主要采取植物修复、生物修复、生物降解、植物提取、电动化、生物富集、土壤淋洗等方法,并且修复技术呈现从单一向联合修复、从异位向原位修复以及从粗放向绿色与环境友好的生物修复技术发展,更加注重污染修复效果评价和经济效益评估。

参考文献:

- [1] 张颖,伍钧. 土壤污染与防治[M]. 北京:中国林业出版社,2012. ZHANG Ying, WU Jun. Soil pollution and prevention[M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 2012.
- [2] 胡宏祥,邹长明. 环境土壤学[M]. 合肥:合肥工业大学出版社,2013. HU Hong-xiang, ZOU Chang-ming. Environmental soil science[M]. Hefei: Hefei Technology University Press, 2013.
- [3] 国土资源部,国家统计局,国务院第二次全国土地调查领导小组办公室. 关于第二次全国土地调查主要数据成果的公报[DB/OL]. [2013-12-30]. http://www.mlr.gov.cn/zwgk/zytz/201312/t20131230_1298865.htm.

- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, the Office of the Second National Land Survey Leading Group of the State Council. The second national land survey data results communique [DB/OL]. [2013-12-30]. http://www.mlr.gov.cn/zwgk/zytz/201312/t20131230_1298865.htm.
- [4] 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.
QIU Jun-ping, DUAN Yu-feng, CHEN Jing-quan, et al. Retrospect and prospect on the development of bibliometrics in China[J]. *Research on Science of Science*, 2003, 21(2): 143-148.
- [5] 贺 萍, 骆有庆, 路文如. 全球林业外来有害生物研究的文献计量分析[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(6): 77-85.
HE Ping, LUO You-qing, LU Wen-ru. A bibliometric analysis on global literatures of invasive alien species of forest[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(6): 77-85.
- [6] 王雪梅, 张志强, 熊永兰. 国际生态足迹研究态势的文献计量分析[J]. 地球科学进展, 2007, 22(8): 872-878.
WANG Xue-mei, ZHANG Zhi-qiang, XIONG Yong-lan. Bibliometrical analysis of status and trends of international ecological footprint research[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(8): 872-878.
- [7] 陈 静, 张保卫, 马克平, 等. 中国保护生物学研究现状的文献计量学分析[J]. 生物多样性, 2009, 17(4): 423-429.
CHEN Jing, ZHANG Bao-wei, MA Ke-ping, et al. Bibliometric analysis of status quo of conservation biology in China[J]. *Biodiversity Science*, 2009, 17(4): 423-429.
- [8] 王琳琳. 从文献角度分析林业经济学学科发展[J]. 林业调查规划, 2008, 33(2): 103-107.
WANG Lin-lin. Analysis on the development of forestry economic discipline from the view of literatures[J]. *Forest Inventory and Planning*, 2008, 33(2): 103-107.
- [9] 杨 青, 黄 艺. 基于 SCI 文献分析我国菌根学研究现状和发展方向[J]. 微生物学通报, 2009, 36(3): 439-445.
YANG Qing, HUANG Yi. Analyses of the mycorrhizal research state and development in China based on SCI database[J]. *Microbiology*, 2009, 36(3): 439-445.
- [10] 丁博锐, 李佛琳, 刘敏惠, 等. 中国烟草营养与施肥研究现状——基于 1998—2007 年文献计量分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(12): 133-139.
DING Bo-rui, LI Fo-lin, LIU Min-hui, et al. Research status of tobacco nutrition and fertilization: Based on bibliometric analysis from 1998 to 2007[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(12): 133-139.
- [11] 栾春娟, 赵呈刚. 基于 SCI 的基因操作技术国际前沿分析[J]. 技术与创新管理, 2009, 30(1): 11-13.
LUAN Chun-juan, ZHAO Cheng-gang. Analysis on international frontier of genetic operation based on SCI[J]. *Technology and Innovation Management*, 2009, 30(1): 11-13.
- [12] 赵颖文, 彭 迎. 基于文献计量分析的中国粮食安全问题热点研究[J]. 农业经济与管理, 2015(1): 46-55.
ZHAO Ying-wen, PENG Ying. Hot-issue study of food security in China based on bibliometric analysis[J]. *Agricultural Economics and Management*, 2015(1): 46-55.
- [13] 胡 波, 严 嘉. 地球科学领域学科发展水平分析——基于 ESI 数据库的地球科学领域文献计量分析[J]. 中国地质教育, 2015(1): 10-14.
HU Bo, YAN Jia. Geosciences discipline development level analysis: Bibliometric analysis of geosciences based on ESI database[J]. *Chinese Geological Education*, 2015(1): 10-14.
- [14] 刘爱原, 林荣澄, 郭玉清. 全球北极底栖生物研究的文献计量分析[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2789-2799.
LIU Ai-yuan, LIN Rong-cheng, GUO Yu-qing. A bibliometric study of the arctic benthos in world[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9): 2789-2799.
- [15] Hassan S U, Haddawy P. Analyzing knowledge flows of scientific literature through semantic links: A case study in the field of energy[J]. *Scientometrics*, 2015, 103(1): 33-46.
- [16] 邱均平. 信息计量学在科学学与科技管理中的应用[J]. 情报理论与实践, 2001(6): 474-476.
QIU Jun-ping. Application of informetrics in science of science and S&T management[J]. *Theory and Practice of Information*, 2001(6): 474-476.
- [17] Confraria H, Godinho M M. The impact of African science: A bibliometric analysis[J]. *Scientometrics*, 2015, 102(2): 1241-1268.
- [18] 闫惠红, 肖仙桃, 孙成权. 从文献计量分析看国际及中国农业科学发展态势[J]. 图书情报, 2004(2): 29-31.
YAN Hui-hong, XIAO Xian-tao, SUN Cheng-quan. Bibliometric analysis on the developmental situation of international and Chinese agricultural sciences[J]. *Library and Information*, 2004(2): 29-31.
- [19] 史 静, 肖仙桃, 王 鑫, 等. 国际地球科学研究热点与发展态势分析[J]. 地质学报, 2013, 87(12): 1931-1939.
SHI Jing, XIAO Xian-tao, WANG Xin, et al. Analysis on the hot topics and trend of researches on the international earth science[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(12): 1931-1939.
- [20] Zhou P, Bornmann L. An overview of academic publishing and collaboration between China and Germany[J]. *Scientometrics*, 2015, 102(2): 1781-1793.
- [21] 孙 颢, 原保忠. 基于 1998—2013 年 SCIE 棉花学术研究态势分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(5): 243-249.
SUN Jie, YUAN Bao-zhong. Analysis of academic research situation of cotton based on paper by SCIE from 1998 to 2013[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(5): 243-249.
- [22] 郭 宇, 王晰巍, 贺 伟, 等. 基于文献计量和知识图谱可视化方法的国内外低碳技术发展动态研究[J]. 情报科学, 2015, 33(4): 139-148.
GUO Yu, WANG Xi-wei, HE Wei, et al. Chinese and international dynamic research into low carbon technology based on bibliometrics and knowledge mapping[J]. *Information Science*, 2015, 33(4): 139-148.
- [23] 孙秀焕, 路文如. 基于 Web of Science 的水稻研究态势分析[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(5): 607-614.
SUN Xiu-huan, LU Wen-ru. Research trends of rice science based on Web of Science[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2012, 26(5): 607-614.
- [24] Zhu Q L, Kong X S, Hong S, et al. Global ontology research progress: A bibliometric analysis[J]. *Aslib Journal of information Management*, 2015, 67(1): 27-54.