

DOI: 10.11766/trxb202002280030

严康, 楼骏, 汪海珍, 滕应, 骆永明, 徐建明. 污染场地研究现状与发展趋势: 基于知识图谱的分析[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1234–1245.
YAN Kang, LOU Jun, WANG Haizhen, TENG Ying, LUO Yongming, XU Jianming. Research of Contaminated Sites Based on Knowledge Graph Analysis and Its Development Trend[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1234–1245.

污染场地研究现状与发展趋势: 基于知识图谱的分析*

严康¹, 楼骏², 汪海珍^{1†}, 滕应³, 骆永明³, 徐建明¹

(1. 浙江大学土水资源与环境研究所, 浙江省农业资源与环境重点实验室, 杭州 310058; 2. 湖州师范学院生命科学学院, 浙江省媒介生物学与病原控制重点实验室, 浙江湖州 313000; 3. 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要: 为了解国内外污染场地相关研究状况, 利用知识图谱工具 VOSviewer、CiteSpace 与 HistCite 对 Web of Science 核心合集数据库中发文的主要国家(地区)与机构、主要发文期刊、主要研究学者、重要文献和研究热点及其变化趋势等进行了计量分析。结果表明:(1) 污染场地的研究涉及多个国家之间相互合作, 发文机构中中国科学院、橡树岭国家实验室、滑铁卢大学、中国科学院大学与亥姆霍兹环境研究中心在该研究领域合作广泛。中国于近五年发文量超过美国, 成为该领域发文最多的国家。(2) 污染场地研究的主要发文期刊有 *Science of the Total Environment*、*Chemosphere*、*Environmental Science & Technology*、*Environmental Science and Pollution Research* 等, Naidu Ravi、Huang Guohe、Megharaj Mallavarapu 等是该领域发文较多的研究学者。污染场地前十(TOP 10)的重要文献中, 生物修复相关内容中占据了较高比例。(3) 关键词聚类网络主要可分为污染场地生物毒理研究、土壤重金属及修复技术、污染物环境行为及水体修复、有机污染物生物修复等 4 类。(4) 文献计量的结果分析表明土壤与地下水均为污染场地有害物质重要载体, 污染场地中土壤和地下水具有一体性, 如果忽视了对地下水中污染的修复, 则可能会导致场地的二次污染。重金属与多环芳烃是污染场地重点关注的污染物, 我国目前重金属污染防治工作依然不容乐观, 需要进一步加强和落实相应工作。寻求高效绿色的修复技术仍是解决污染场地问题的一个重点, 提升微生物修复技术在有机污染场地修复中的应用价值, 具有重要意义。

关键词: 污染场地; 计量分析; 土壤与地下水; 重金属污染; 多环芳烃污染; 生物修复

中图分类号: X53 **文献标志码:** A

Research of Contaminated Sites Based on Knowledge Graph Analysis and Its Development Trend

YAN Kang¹, LOU Jun², WANG Haizhen^{1†}, TENG Ying³, LUO Yongming³, XU Jianming¹

(1. Institute of Soil and Water Resources and Environmental Science, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Key Laboratory of Vector Biology and Pathogen Control of Zhejiang Province, College of Life Sciences, Huzhou University, Huzhou, Zhejiang 313000, China; 3. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

* 国家重点研发计划专项课题(2019YFC1803704)和国家自然科学基金项目(41771344)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2019YFC1803704) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41771344)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wanghz@zju.edu.cn

作者简介: 严康(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为有机污染物生物修复。E-mail: my_kangyan@163.com

收稿日期: 2020-02-28; 收到修改稿日期: 2020-06-12; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-08-04

Abstract: 【 Objective 】Contaminated sites have become a serious environmental problem in China. It is particularly important to safely reclaim and utilize the contaminated sites. In order to make clear status of the current researches on contaminated sites, bibliometric analysis was performed. 【 Method 】 Knowledge graph analysis tools, like VOSviewer, CiteSpace and HistCite, were used in the bibliometric analysis of countries, institutions, journals, first authors and hot spots of the publications and important papers contained in the core collection database of the Web of Science. 【 Result 】 Results show: (1) The research on contaminated sites involves cooperations between multiple countries. In the past five years, China has come out to be the country with the largest number of papers in this field, and in close cooperation with many countries. Paper contributing institutions in this field, like the Chinese Academy of Sciences, the Oak Ridge National Laboratory, the University of Waterloo, the University of Chinese Academy of Sciences and the Helmholtz Environmental Research Center, have been cooperating extensively; (2) The *Science of the Total Environment*, *Chemosphere*, *Environmental Science & Technology*, *Environment Science and Pollution Research*, etc. are the main journals publishing papers in this field, and Naidu Ravi, Huang Guohe, and Megharaj Mallavarapu are on top of the list of highly productive scholars. Among the top 10 important papers on contaminated sites, bioremediation-related content occupies a quite high proportion; (3) In the keyword clustering network, key words of papers were sorted into four clusters: biological toxicology research on the contaminated sites, soil heavy-metals contamination and remediation technologies, pollutants environmental behavior and water remediation, and bioremediation of organic pollutants contaminated sites; (4) The bibliometric analysis shows that soil and groundwater are important pollutants carriers in the contaminated site. Remediation of the soil and groundwater in the contaminated site should deem the two as one. The neglect of either one in remediation may cause secondary pollution in the contaminated site. Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons are the pollutants of great concerns. Searching of efficient and green remediation technologies are still the focus of future work in the contaminated site research field. 【 Conclusion 】 It is still not optimistic for China to address the issue of remedying heavy metals contaminated sites, which calls for further efforts to intensify and implement corresponding works. Therefor it remains to be a focus in solving the problem of contaminated sites to explore high-efficiency green remediation technologies and it will be of great application value to improve the application of bioremediation technology to remedying contaminated sites.

Key words: Contaminated site; Bibliometric analysis; Soil and groundwater; Heavy-metal pollution; Polycyclic aromatic hydrocarbon pollution; Bioremediation

污染场地是指因为储存、堆积、处置或者其他方式负载有害物质，以至于对环境和人体健康产生危害，或具有潜在危害风险的区域^[1]。我国污染场地类型多且复杂，按污染物种类可分为无机类、有机类以及有机无机混合污染等。场地重金属污染已成为全球的环境热点问题，重金属污染事件频发，给生态安全、人们身体健康造成很大的安全隐患^[2]。重金属进入土壤环境后，不容易随水淋溶，不易被生物降解，并且生物富集作用十分显著，通过食物链影响人体健康^[3]。多年来，针对场地重金属污染原位或者异位的研究已有很多，包括物理、化学以及生物修复等，这些方法均具有各自优势以及一些局限性，并且在实际应用过程中，修复有效性和成本差异很大^[4]。场地有机污染问题同样十分严峻，企业在生产及运输过程中易导致有机污染物进入土壤，典型的有机污染物有农药（如六六六、滴滴涕

等）、持久性有机污染物（多氯联苯、多环芳烃等）以及一些挥发性有机污染物（如苯系物、三氯乙烯等）等^[5]。土壤中残留的有机污染物，不仅会改变土壤正常结构和功能，还会通过食物链进入人体，对人体健康造成不可估量的损失^[6]。有机污染场地修复方式也越来越多，其中生物修复技术具有安全、经济、非破坏性等优点，已成为最具有前途的污染修复技术之一^[6]。

在科学计量学理论及数据可视化技术的推动下，科学知识图谱的理论和方法近十年来取得了飞速发展，为大数据可视化研究提供了可靠的途径，弥补了传统文献综述的不足^[7-10]。其中，凡·艾克开发的软件 VOSviewer 已被广泛运用到文献计量中，VOSviewer 可根据总联系强度（Total link strength, TLS）分析科研合作的密切程度，关键词共现的网络分析可得到研究领域热点的聚类^[7]；基

于 Java 环境的分析工具 CiteSpace 也已被广泛运用到经济学、医学、教育等多个领域,通过中心度 (centrality)、关键词突现指标 (strength) 可揭示研究领域重要文献及研究热点的变迁^[9]; HistCite 软件中重要参数本地总引用次数 (total local citation score, TLCS) 与总引用次数 (total global citation score, TGCS) 可定位重要作者与发期刊等^[11]。

目前,仅有少量污染场地及其修复相关内容的计量分析文章,且这些文章主要关注点是国内重金属、有机污染场地技术的发展趋势和进展^[12-13],尚缺乏对国内外污染场地相关研究状况的计量整合分析。因此,本文基于 Web of Science (WOS) 数据库,结合 VOSviewer、CiteSpace 与 HistCite 工具,对国际上近 30 年内污染场地研究领域发文数量、学科门类、主要国家及研究机构合作关系、主要研究学者、重要文献、关键词聚类及其变化趋势等内容进行了计量分析和讨论,并重点关注污染场地领域的研究热点及其发展趋势,旨在为未来污染场地相关研究提供一些借鉴与参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据来源于美国汤森路透公司 (Thomson Reuters) WOS 核心合集数据库,检索的主题词设置为 ("contaminated site*") OR ("polluted site*") OR ("site* contamination") OR ("site* pollution"), 设置检索时间限定为 1990 年至 2019 年,所有文献的检索日期为 2019 年 12 月 24 日,选定文献类型为 Article 和 Review。检索主题词中英文的双引号 ("")

作用是将词组看为一个整体来进行检索,可提高检索的准确性;星号 (*) 表示任何字符组,包括空字符,如本文为 site 和 sites。通过检索,得到的文献数量为 9 940 篇。

1.2 研究方法

在 WOS 核心合集数据库中下载这 9 940 篇文章的全纪录与引用参考文献,每次下载 500 篇,分次下载相应全纪录与引用的参考文献。利用 VOSviewer 软件的合作 (co-authorship) 网络来分析污染场地研究领域国家/地区 (countries)、机构 (institution) 之间的合作。利用 VOSviewer 软件的共现 (co-occurrence) 分析选定所有关键词 (all keywords), 分析污染场地研究领域重要关键词及其之间的共现关系。利用 CiteSpace 的关键词突现来分析近 10 年污染场地研究领域的热点演变。

2 结果与讨论

2.1 发文数量与学科分布

发文数量可反映一个研究领域被人们重视的程度及发展水平,根据 WOS 核心合集数据库,污染场地的研究发文量逐年增加,也即表明污染场地问题引起了世界各国的广泛关注。根据 WOS 核心合集数据库污染场地相关研究发文数量较高的国家有:美国 (2 328 篇)、中国 (1 166 篇)、加拿大 (766 篇)、印度 (700 篇) 以及德国 (680 篇) 等。中国对污染场地的研究起步慢于美国,但近些年来发文数量逐年增加,且于近五年 (2015—2019) 超过美国,成为在该领域发文数量最大的国家 (图 1a)。另由图 1b 可见,污染场地相关研究涉及学科门类

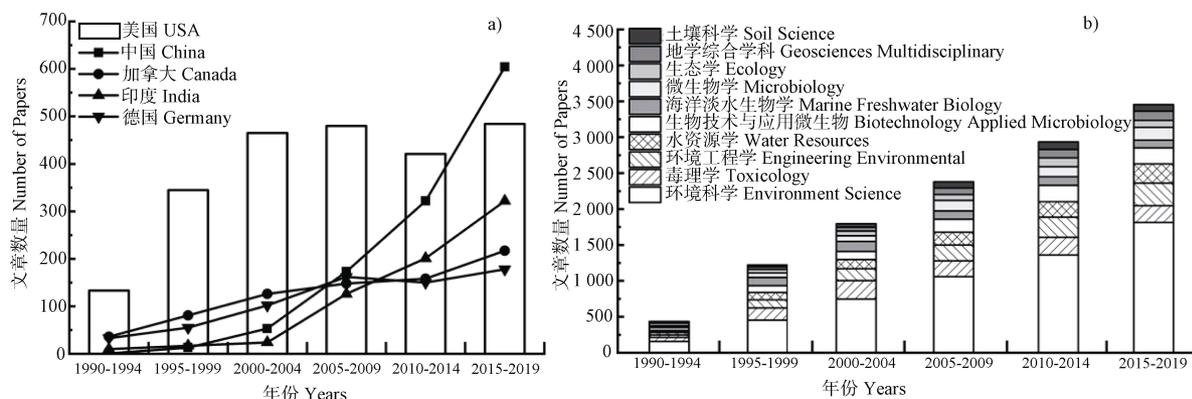


图 1 1990—2019 年文献产出量 (a) 及前十发文学科的占比 (b)

Fig. 1 Document output (a) and proportions of the top 10 paper contributing disciplines (b) during 1990—2019

齐全，发文量排名前十位的学科有环境科学（56.28%）、毒理学（11.89%）、环境工程学（11.29%）、水资源学（9.31%）、生物技术与应用微生物学（8.68%）、海洋淡水生物学（6.54%）、微生物学（6.29%）、生态学（4.59%）、地学综合学科（4.40%）与土壤科学（3.67%）。也即表明，不同学科从不同角度开展了污染场地研究，并取得了一定的成绩。其中，环境科学在近 30 年一直是发文量占比最高的学科（图 1b），表明污染场地问题一直是环境科学所重点关注的。土壤作为污染场地重要的环境介质，关于污染场地问题，亦是土壤科学所关注的，但是其发文数量占比有限。

2.2 国家与机构的合作关系

利用 VOSviewer 合作（co-authorship）网络对污染场地研究领域国家/地区与机构之间的合作进行分析（图 2），国家、机构发文量阈值分别为 150、30 篇；图中圆圈大小表示该国家/地区文章发表数量，距离表示合作密切程度，距离越近则表示科研合作越密切^[14]。由图 2a、表 1 总联系强度（TLS）值可见，发文数量高于 150 篇且合作密切的国家有美国（TLS 为 851）、德国（TLS 为 664）、英国（TLS 为 513）、中国（TLS 为 476）与加拿大（TLS 为 438）等，与中国在该领域合作密切的国家有美国、加拿大、印度与澳大利亚等。另分析结果表明，发

文数量高于 30 篇且合作密切的机构有中国科学院（TLS 为 111）、橡树岭国家实验室（TLS 为 66）、滑铁卢大学（TLS 为 56）、中国科学院大学（TLS 为 50）与亥姆霍兹环境研究中心（TLS 为 47）等（表 1），与中国科学院合作密切的机构有中国科学院大学、清华大学、橡树岭国家实验室与美国环保署等（图 2b）。

2.3 发文的主要国际刊物

在污染场地研究领域发文数量排名前十的期刊如表 2 所示，发表论文章较多的学术期刊包括 *Science of the Total Environment*（407 篇）、*Chemosphere*（350 篇）、*Environmental Science & Technology*（318 篇）与 *Environmental Science and Pollution Research*（311 篇）等，2018 年影响因子大于 5 的学术期刊有 *Journal of Hazardous Materials*（7.650）、*Environmental Science & Technology*（7.149）、*Environmental Pollution*（5.714）、*Science of the Total Environment*（5.589）、*Chemosphere*（5.108）等 5 种期刊。本地引用次数可表征发文期刊在某一研究领域的影响力^[14]，本地引用次数 TLCS 排名较高的期刊有 *Environmental Science & Technology*（984 次）、*Environmental Pollution*（847 次）与 *Science of the Total Environment*（777 次）等，这些期刊上发表的文章在污染场地研究领域影响很大。

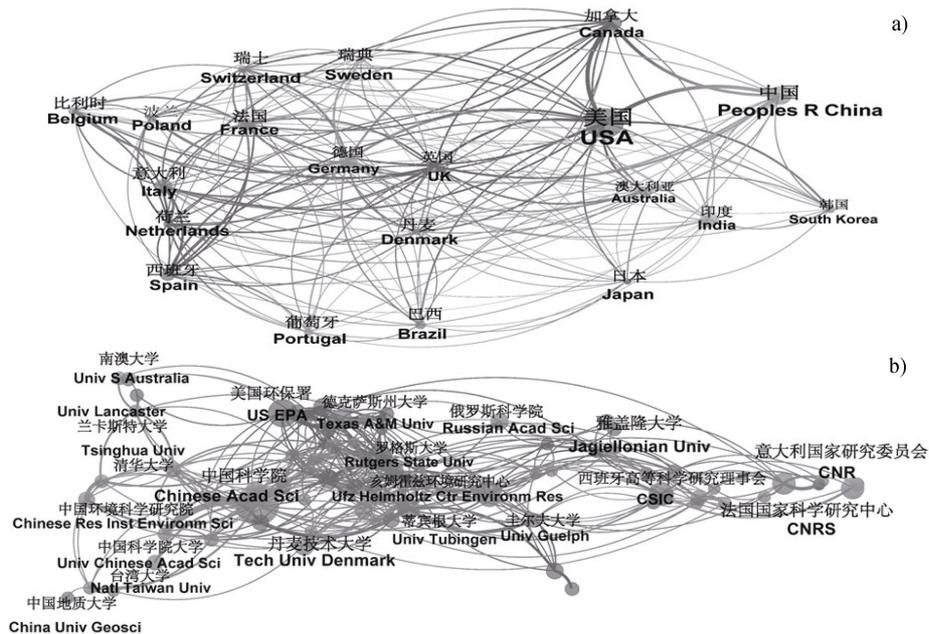


图 2 论文产出国（a）、机构（b）之间的合作

Fig. 2 Cooperations between paper contributing countries (a) and contributing institutions (b)

表 1 国家与机构的总联系强度排名前十

Table 1 Top 10 Countries and institutions in total link strength

排名 Rank	国家 Country		机构 Institution	
	国别	总联系强度	机构名称	总联系强度
	Countries	Total Link Strength	Institutions	Total link strength
1	美国 USA	851	中国科学院 Chinese Acad Sci	111
2	德国 Germany	664	橡树岭国家实验室 Oak Ridge Natl Lab	66
3	英国 UK	513	滑铁卢大学 Univ Waterloo	56
4	中国 China	476	中国科学院大学 Univ Chinese Acad Sci	50
5	加拿大 Canada	438	亥姆霍兹环境研究中心 Ufz Helmholtz Ctr Environm Res	47
6	法国 France	414	美国环保署 United States Environmental Protection Agency (US EPA)	47
7	意大利 Italy	402	田纳西大学 Univ Tennessee	45
8	西班牙 Spain	343	密西根州立大学 Michigan State Univ	38
9	瑞士 Switzerland	270	意大利国家研究委员会 Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)	32
10	澳大利亚 Australia	254	加利福尼亚大学伯克利分校 Univ Calif Berkeley	31

表 2 1990—2019 年污染场地研究领域研究发文量排名前十期刊

Table 2 Top10 journals in number of papers published addressing contaminated sites during 1990—2019

期刊名称 Journal	发文量 Number of papers	影响因子 (2018) Impact factor (2018)	本地引用 Total local citation score (TLCS)	总引用 Total global citation score (TGCS)
<i>Science of the Total Environment</i>	407	5.589	777	11 172
<i>Chemosphere</i>	350	5.108	599	10 036
<i>Environmental Science & Technology</i>	318	7.149	984	13 992
<i>Environmental science and Pollution Research</i>	311	2.914	470	4 387
<i>Environmental Pollution</i>	290	5.714	847	10 422
<i>Environmental Toxicology and Chemistry</i>	243	3.421	695	7 360
<i>Journal of Hazardous Materials</i>	204	7.650	549	8 221
<i>Ecotoxicology and Environmental Safety</i>	179	4.527	295	4 611
<i>Water Air and Soil Pollution</i>	175	1.774	240	3 224
<i>Environmental Monitoring and Assessment</i>	138	1.959	109	2 131

2.4 发文的主要研究学者

污染场地研究共涉及 29 253 位作者，其中发文量排名前 5 的作者如表 3 所示。其中发文数量最多的学者是 Naidu Ravi，他与发文量排名第三的学者

Megharaj Mallavarapu 来自于同一个研究机构 (University of South Australia, 南澳大学, 澳大利亚)，他们研究关注于对污染场地的修复与风险评估，发表了许多优秀的文献^[15]。发文数量排名第二

表 3 1990—2019 年污染场地研究领域研究发文量排名前五学者

Table 3 Top 5 authors in number of papers published addressing contaminated sites during 1990—2019

作者	发文量	国家	本地引用	总引用
Author	Number of papers	Country	Total local citation score	Total global citation score
Naidu Ravi	60	澳大利亚 Australia	189	2 016
Huang Guohe	48	加拿大 Canada	194	1 105
Megharaj Mallavarapu	41	澳大利亚 Australia	153	1 482
Vangronsveld Jaco	33	比利时 Belgium	200	1 844
Bjerg Poul L	29	丹麦 Denmark	122	640

的学者 Huang Guohe (University of Regina, 里贾纳大学, 加拿大), 致力于污染场地的水文和环境系统模拟和优化^[16]。发文数量排名第四的学者 Vangronsveld Jaco (Hasselt University, 哈瑟尔特大学, 比利时), 具有最高的本地引用次数 (200 次), 其研究重点关注于污染场地土壤与水体污染的植物修复措施等方面^[17]。学者 Bjerg Poul L (Technical University of Denmark, 丹麦技术大学, 丹麦) 相关研究的重点则为污染场地地下水调查与评估^[18]。

2.5 重要文献分析

以 5 年为时间切片, 对污染场地研究领域文献共被引的结果进行分析, 得到污染场地研究领域中具有关键作用及重要转折的文献, 结果如图 3 和表 4 所示。由 CiteSpace 软件统计结果可见, 污染场地生物修复相关内容在 1990—2019 年的中心性值排名前十的文献中占据了近 1/2 比例, 维持着相当高的热度。包括有: 由 Glick B R 发表于 *Biotechnology Advances* 上的细菌辅助植物修复技术应用前景的文章, 指出土壤细菌与植物结合使用具有良好的应用前景^[19]; 重要发文学者 Vangronsveld J (表 3) 与学者 Pilon-Smits E 分别发表在 *Environmental Science and Pollution Research* 和 *Annual Review of Plant Biology* 上的文章对植物修复的优势、局限性及应用现状进行了系统综述^[17, 20]; 学者 Ma L Q (马奇英) 与 Verbruggen N 分别发表于 *Nature* 和 *New Phytologist* 上的文章介绍了超富集植物蜈蚣草 (*Pteris vittata*) 以及超积累植物的可能分子机制^[21-22]。其余的重要文献则是关注于污染场地微生物修复菌种资源、研究技术、毒性评价、污染响应及修复方案^[23-27]。

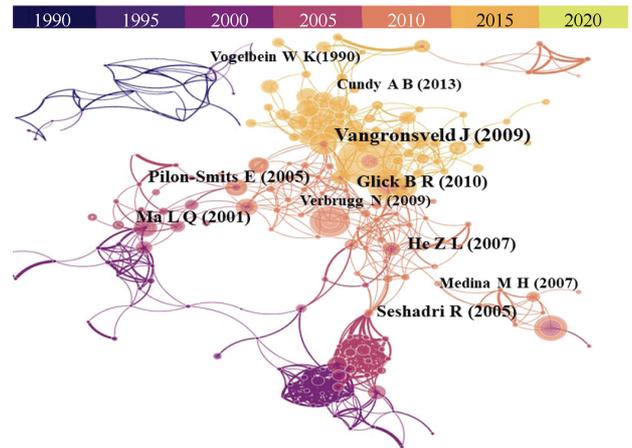


图 3 文献共被引聚类视图

Fig. 3 View of clusters of co-cited literature

2.6 污染场地研究关键词聚类

文章的关键词是对文章主旨的高度概括, 一个关键词出现的次数越多, 也即表明相关主题受到重视程度也越高。基于 VOSviewer 软件, 选取高频关键词, 构建污染场地研究领域关键词共现网络 (图 4)。出现次数较高的关键词有: heavy-metal (重金属, 1 541 次)、soils (土壤, 1 319 次)、contamination (污染, 1 068 次)、biodegradation (生物降解, 926 次)、PAHs (多环芳烃, 892 次)、bioremediation (生物修复, 884 次)、Cd (镉, 807 次)、degradation (降解, 759 次)、sediments (沉积物, 659 次)、phytoremediation (植物修复, 617 次)、accumulation (积累, 604 次) 和 water (水体, 575 次) 等。根据关键词共现网络, 污染场地相关研究可划分为 4 个聚类 (图 4), 图中不同颜色表示不同聚类, 代表着不同的热点内容。

图 4 中关键词聚类 1 (Cluster1) 主要是关于污染场地毒理研究的相关内容, 包括的关键词有: contamination (污染, 1 068 次)、sediments (沉积物, 659 次)、exposure (暴露, 396 次)、PCBs (多氯联苯, 395 次)、fish (鱼, 327 次)、biomakers (生物标记物, 231 次)、biomonitor (生物检测器, 158 次)、rainbow-trout (虹鳟鱼, 136 次) 和 organic chlorine pesticides (有机氯农药, 80 次)。诊断污染场地的生物毒性, 对污染场地的危险识别与风险评价具有重要意义, 许多研究中将鱼作为环境变化的监测器, 用于化学物质的毒性测试^[28]。关键词聚类 2 (Cluster2) 主要是污染场地土壤重金属及修复技术的相关内容, 包括的关键词主要有: heavy-metal (重金属, 1 541 次)、soils (土壤, 1 319 次)、Cd (镉, 807 次)、phytoremediation (植物修复, 617 次)、Pb (铅, 509 次)、Zn (锌, 506 次)、Cu (铜, 459 次)、phytoextraction (植物萃取, 174 次)、phytosabilization (植物固定, 68 次) 和 mine tailings (尾矿, 64 次)。镉、铅、锌、铜均为污染场地土壤中典型的重金属污染物, 植物修复、萃取和固化在污染场地土壤重金属修复中已开展了相关的研究。但值得注意的是, 由于适用条件、管理难度、修复周期及植物材料处理等原因, 与农田土壤重金属植物修复进展相比, 植物修复在污染场地上的实际应用及其完整的技术规范尚较缺乏^[15-18]。关键词聚类 3 (Cluster3) 主要是污染场地污染物环境行及水体修复等相关内容, 包括的关键词主要有: water (水体, 575 次)、remediation (修复, 509 次)、groundwater (地下水, 442 次)、removal (清除, 292 次)、kinetics (动力学, 185 次)、systems (系统, 184 次)、adsorption (吸附, 179 次)、sorption (吸附, 172 次)、model (模型, 144 次)、management (管理, 131 次) 和 tetrachloroethene (四氯乙烯, 79 次) 等。许多数学模型常用于研究污染物的迁移特性, 来评估对水体的污染风险^[29]。关键词聚类 4 (Cluster 4) 主要是关于有机污染物生物修复的相关内容, 包括的关键词有: biodegradation (生物降解, 926 次)、PAHs (包含萘、菲、芘、苯并芘等 16 种多环芳烃, 892 次)、bioremediation (生物修复, 884 次)、degradation (降解, 759 次)、bacteria (细菌, 408 次)、crude-oil (原油, 184 次)、petroleum-hydrocarbons (石油烃, 125 次) 和 petroleum (石油, 116 次) 等。此外, biosurfactants (生物表面活性剂,

66 次) 和 *Pseudomonas aeruginosa* (铜绿假单胞菌, 59 次) 在污染场地有机污染物修复中的应用已有一定的报道。如 *Pseudomonas aeruginosa* 对多种多环芳烃具有优异的降解能力, 是生物修复的理想材料^[30], 但是微生物修复有机污染物在实际应用过程中仍存在许多局限性^[31]。

2.7 污染场地研究重点与发展趋势

结合领域的重要文献 (图 3、表 4)、热点聚类 (图 4) 及近十年突现指标 (表 5), 对近 30 年来污染场地研究重点与发展趋势进行归纳与总结。

2.7.1 土壤与地下水是污染场地有害物质重要载体

污染场地的有害物质载体很多, 包括土壤、沉积物、地下水与大气等, 根据这些环境介质作为关键词出现的比例, 可看出土壤是被重点关注的环境介质, soil 作为关键词出现了 1 319 次 (图 4, 图 5a)。土壤是各种污染物的载体, 污染物质通过食物链的传递最终会对食品安全产生威胁, 危害人体健康^[32]。需要说明的是, 污染场地土壤与地下水常是同步受到污染的, 此外, 一些挥发性较强的污染物容易迁出场地外, 污染空气, 给场地修复造成很大困难^[1]。针对场地土壤污染修复, 我国相继出台了系列技术导则与相关规划, 如 2014 年环境保护部发布了《污染场地土壤修复技术导则》, 强调修复污染场地土壤需防止对施工人员、周边人群健康以及生态环境产生危害和二次污染^[33]。随后, 2016 年国务院印发的《“十三五”生态环境保护规划》中提出要分类防治土壤环境污染, 修订土壤环境质量标准; 要对电子废物拆解、历史遗留尾矿库等土壤环境问题集中区域风险排查, 建立健全风险管控名录^[34]。而在未来 5 年的“十四五”时期, 围绕国家场地土壤污染防治的重大科技需求, 设立“场地土壤污染成因与治理技术”重点专项将对场地土壤污染形成机制、监测预警、风险管控、治理修复、安全利用等展开更深入的研究。关于地下水体作为污染介质的问题同样引起了重视, 水体与地下水作为关键词累计出现次数也达 1 017 次 (图 4)。然而, 在我国污染场地的调查与修复当中还需要对地下水的污染与修复给予更多的关注, 如果忽视了对地下水污染的修复, 则可能会导致二次污染^[35]。根据国外的污染场地修复经验, 地下水如果被污染, 其修复治理难度会很大, 地下水污染的修复状况才是决定一个场地是否得到真正与有效修复的重要指标^[35-36]。

表 5 近 10 年关键词突现指标

Table 5 Keywords strongest in citation burst in the recent 10 years

关键词 Keywords	突现强度 Strength	起始 Begin	结束 End	关键词 Keywords	突现强度 Strength	起始 Begin	结束 End
代谢 Metabolism	9.856	2010	2012	压力 Stress	6.492	2013	2016
吸附 Adsorption	6.415	2010	2011	微量元素 Trace element	6.684	2014	2019
微量金属 Trace metal	15.02	2010	2014	多氯联苯 PCBs	12.45	2014	2015
生物标志物 Biomarker	4.759	2010	2011	模型 Model	11.69	2014	2015
动力学 Kinetics	5.651	2010	2011	运输 Transport	9.228	2015	2016
大肠杆菌 <i>Escherichia coli</i>	11.19	2010	2011	群落 Community	3.468	2016	2019
系统 System	15.93	2011	2013	废水 Waste water	9.895	2016	2019
植物萃取 Phytoextraction	5.576	2011	2012	中国 China	10.99	2016	2019
鱼 Fish	4.025	2012	2013	河流 River	11.93	2017	2019
耐受性 Tolerance	5.697	2012	2014	影响 Impact	8.122	2017	2019
微生物 Microorganism	15.61	2012	2016	微生物群落 Microbial community	15.77	2017	2019

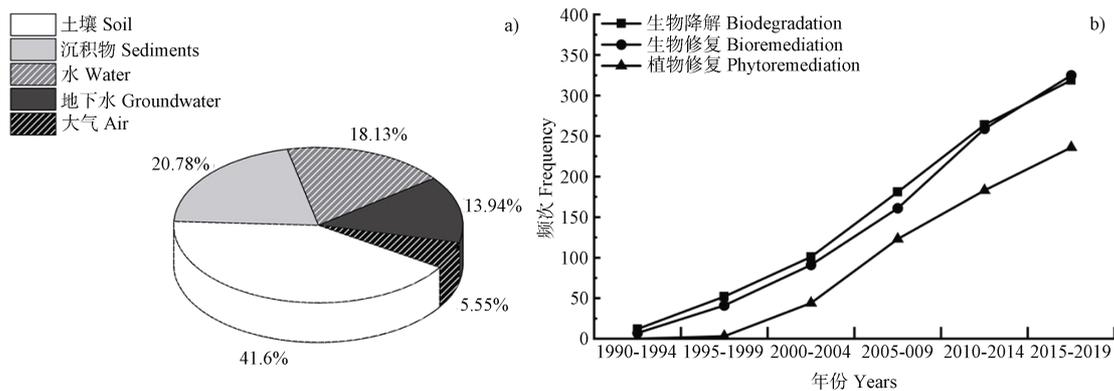


图 5 关键词中环境介质的比例 (a) 及生物修复相关关键词数量 (b)

Fig. 5 Proportion of "environmental media" in keywords (a) and number of bioremediation related keywords (b)

2.7.2 重金属和多环芳烃是污染场地重点关注的污染物 关键词共现网络中, heavy-metal 是出现频次最高的关键词 (图 4), 表明重金属污染是目前污染场地研究领域的一个重点。土壤的重金属污染是全球主要的环境问题之一, 而这一问题在中国尤其突出^[3]。在各种报道的污染物中, 重金属被认为是中国食品安全问题的最大威胁^[37], 被重点关注的重金属主要是 Cd、Pb、Zn 与 Cu 等 (图 4, Cluster2)。中国已经发生了多起重金属污染事件, 以我国湖南省 (粮食主产区之一) 为例, 由于频繁采矿活动, 导致土壤与水体严重的重金属污染, 土壤中镉、砷含量均高于中国标准规定的阈值 (GB15618, 1995),

给当地居民健康带来了安全隐患^[32]。自 2011 年国务院批复实施了《重金属污染综合防治“十二五”规划》以来, 我国重金属污染防治工作取得了积极成效, 但是目前我国重金属污染防治工作依然不容乐观, “十四五”时期, 我国环境保护工作必须与时俱进, 打好重金属污染防治的攻坚战^[38]。而污染场地有机污染物种类相对较多, 主要包括有多环芳烃、石油类污染物、多氯联苯与有机氯农药等 (图 4), 这些典型的有机污染物可通过食物链进入人体, 对人体健康造成影响^[6]。在这些有机物污染物中, 作为关键词出现频次最高的是 PAHs, 累计出现 892 次。由此可见, 多环芳烃是污染场地中重点关注的

污染物。多环芳烃是一种具有“三致”效应的持久性有机污染物，通常在煤焦油生产、石油泄漏及废物燃烧等过程产生^[5]。

2.7.3 寻求高效绿色的修复技术仍是重点 2010—2019 近十年间，microorganism（微生物）、community（群落）和 microbial community（微生物群落）均有很高的突现强度（表 5），关于生物修复的文献也有很高的中心度（图 3、表 4），关键词共现网络中 biodegradation（生物降解）、bioremediation（生物修复）出现次数均较高（图 4）。根据生物修复相关的关键词在不同时间段出现的次数，可以看出生物修复等较为绿色的修复方式是近些年来污染场地领域研究的重点（图 5b）。其中，微生物修复技术作为一种更为绿色的技术，在土壤修复方面的优势逐渐突出，特别是在有机污染场地修复中有很应用价值^[39-40]。在有机污染物修复中，表面活性剂-微生物修复与电动-微生物修复是比较典型的强化微生物修复技术，可在一定程度上提高微生物的修复效果^[39]。添加表面活性剂可明显提高有机污染物在水中的溶解度，便于这些污染物从土壤中解吸，促进微生物对其降解^[41]。电动-微生物修复技术可促进营养物质的迁移，加快降解菌与有机污染物的反应，同时一定程度上，改善了环境参数，提高修复效率^[39]。但由于微生物修复技术在实际应用过程中有着一定的不可控性，目前微生物修复技术于污染场地修复中的实际应用仍有局限性^[31, 39]，未来的研究需要探索微生物降解有机污染物的最佳条件等来优化生物修复应用的技术体系。总体而言，我国污染场地修复工作相较发达国家而言起步较晚，大多数的污染场地修复技术均处于实验室的研发阶段^[40]，现场的实际经验比较缺乏。国内污染场地状况复杂，不同污染物性质各异，且我国土壤类型丰富，各修复标准也有不同，因而修复难度较大，所以寻求高效绿色原位的修复技术仍是未来工作的重点。

3 结 论

基于 1990—2019 年发表的污染场地研究领域的 9 940 篇文献的主要发文国家、机构、学者、发文期刊、研究热点与发展趋势等可视化分析，结果表明：污染场地相关研究涉及多个国家之间的相互合作，近五年中国超过美国成为在该领域发文量最

大的国家。中国科学院、橡树岭国家实验室、滑铁卢大学、中国科学院大学与亥姆霍兹环境研究中心在污染场地研究领域合作广泛。*Science of the Total Environment*、*Chemosphere*、*Environmental Science & Technology* 与 *Environmental Science and Pollution Research* 等是污染场地领域主要发期刊。领域内重要发文学者有 Naidu Ravi、Huang Guohe 与 Megharaj Mallavarapu，重要文献中生物修复相关的内容占 1/2 的比例。污染场地研究关键词共现网络分成生物毒理研究、土壤重金属及修复技术、污染物环境行为及水体修复、有机污染物生物修复等四个聚类。土壤与地下水是污染场地中有害物质的重要载体，其中重金属与多环芳烃是污染场地重点关注的污染物。我国污染场地修复工作近些年来得到重视与发展，寻求高效绿色的修复技术仍是工作的重点。

参考文献（References）

- [1] Luo Y M. Contaminated site remediation in China: Progresses , problems and prospects[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2011, 23 (3): 1—6. [骆永明. 中国污染场地修复的研究进展、问题与展望[J]. 环境监测管理与技术, 2011, 23 (3): 1—6.]
- [2] Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, et al. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals[J]. Interdisciplinary Toxicology, 2014, 7 (2): 60—72.
- [3] Fei X F, Christakos G, Xiao R, et al. Improved heavy metal mapping and pollution source apportionment in Shanghai City soils using auxiliary information[J]. Science of the Total Environment, 2019, 661: 168—177.
- [4] Khalid S, Shahid M, Niazi N K, et al. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2017, 182: 247—268.
- [5] Fu J M, Mai B X, Sheng G Y, et al. Persistent organic pollutants in environment of the Pearl River Delta, China: An overview[J]. Chemosphere, 2003, 52 (9): 1411—1422.
- [6] Li X N, Song Y, Wang F, et al. Combined effects of maize straw biochar and oxalic acid on the dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons and microbial community structures in soil: A mechanistic study[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 364: 325—331.
- [7] van Eck N J, Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping[J]. Scientometrics, 2010, 84 (2): 523—538.
- [8] Yan K, Wang H Z, Lou J et al. Bibliometric analysis of the literature and research trend of soil-borne diseases

- based on Web of Science database[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(3): 680—690. [严康, 汪海珍, 楼骏, 等. 基于 Web of Science 对土传病害研究现状和趋势的计量分析[J]. *土壤学报*, 2020, 57(3): 680—690.]
- [9] Chen C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature[J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2006, 57(3): 359—377.
- [10] Zhang W R, Yan K, Wang H Z, et al. Bibliometric analysis of research progress on polycyclic aromatic hydrocarbons-degrading genes during 1983—2019[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(3): 1138—1148. [张维荣, 严康, 汪海珍, 等. 基于 1983—2019 年文献计量对多环芳烃降解基因研究及进展的剖析[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(3): 1138—1148.]
- [11] Garfield E. From the science of science to Scientometrics visualizing the history of science with HistCite software[J]. *Journal of Informetrics*, 2009, 3(3): 173—179.
- [12] Zhang Y X, Fang Z Q. Bibliometric analysis of patents on the remediation technologies of heavy-metal (loid) contaminated sites[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(12): 3019—3026. [张雅贤, 方战强. 重金属污染场地修复技术的专利计量分析[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(12): 3019—3026.]
- [13] Wu J Y, Fang Z Q, Xue C J, et al. Bibliometric analysis of patents for the soil remediation of organic contaminated sites in China[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(8): 2015—2024. [吴嘉茵, 方战强, 薛成杰, 等. 我国有机物污染场地土壤修复技术的专利计量分析[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(8): 2015—2024.]
- [14] 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.]
- [15] Thavamani P, Megharaj M, Krishnamurti G S R, et al. Finger printing of mixed contaminants from former manufactured gas plant (MGP) site soils: Implications to bioremediation[J]. *Environment International*, 2011, 37(1): 184—189.
- [16] Yang A L, Huang G H, Qin X S, et al. Evaluation of remedial options for a benzene-contaminated site through a simulation-based fuzzy-MCDA approach[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 213/214: 421—433.
- [17] Vangronsveld J, Herzig R, Weyens N, et al. Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: Lessons from the field[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2009, 16(7): 765—794.
- [18] Locatelli L, Binning P J, Sanchez-Vila X, et al. A simple contaminant fate and transport modelling tool for management and risk assessment of groundwater pollution from contaminated sites[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2019, 221: 35—49.
- [19] Glick B R. Using soil bacteria to facilitate phytoremediation[J]. *Biotechnology Advances*, 2010, 28(3): 367—374.
- [20] Pilon-Smits E. Phytoremediation[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2005, 56(1): 15—39.
- [21] Ma L Q, Komar K M, Tu C, et al. A fern that hyperaccumulates arsenic[J]. *Nature*, 2001, 409(6820): 579.
- [22] Verbruggen N, Hermans C, Schat H. Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants[J]. *New Phytologist*, 2009, 181(4): 759—776.
- [23] Seshadri R, Adrian L, Fouts D E, et al. Genome sequence of the PCE-dechlorinating bacterium *Dehalococcoides ethenogenes*[J]. *Science*, 2005, 307(5706): 105—108.
- [24] He Z L, Gentry T J, Schadt C W, et al. GeoChip: a comprehensive microarray for investigating biogeochemical, ecological and environmental processes[J]. *The ISME Journal*, 2007, 1(1): 67—77.
- [25] Fournie J W, Vogelbein W K. Exocrine pancreatic neoplasms in the mummichog (*Fundulus heteroclitus*) from a creosote-contaminated site[J]. *Toxicologic Pathology*, 1994, 22(3): 237—247.
- [26] Medina M H, Correa J A, Barata C. Micro-evolution due to pollution: Possible consequences for ecosystem responses to toxic stress[J]. *Chemosphere*, 2007, 67(11): 2105—2114.
- [27] Cundy A B, Bardos R P, Church A, et al. Developing principles of sustainability and stakeholder engagement for “gentle” remediation approaches: The European context[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129: 283—291.
- [28] Ameur W B, El Megdiche Y, de Lapuente J, et al. Oxidative stress, genotoxicity and histopathology biomarker responses in *Mugil cephalus* and *Dicentrarchus labrax* gill exposed to persistent pollutants. A field study in the Bizerte Lagoon: Tunisia[J]. *Chemosphere*, 2015, 135: 67—74.
- [29] Wang L, Cheng Y, Lamb D, et al. The application of rapid handheld FTIR petroleum hydrocarbon-contaminant measurement with transport models for site assessment: A case study[J]. *Geoderma*, 2020, 361: 114017.
- [30] Zhang Z Z, Hou Z W, Yang C Y, et al. Degradation of n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in petroleum by a newly isolated *Pseudomonas aeruginosa* DQ8[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(5): 4111—4116.

- [31] Megharaj M, Ramakrishnan B, Venkateswarlu K, et al. Bioremediation approaches for organic pollutants: A critical perspective[J]. *Environment International*, 2011, 37 (8): 1362—1375.
- [32] Kopittke P M, Menzies N W, Wang P, et al. Soil and the intensification of agriculture for global food security[J]. *Environment International*, 2019, 132: 105078.
- [33] Wang W G, Wu B L. Discussion on the legal countermeasures for improving the remediation of contaminated plots in China[J]. *Environmental Protection*, 2018, 46 (20): 36—41. [王文革, 吴冰凌. 论完善我国污染地块修复的法律对策[J]. *环境保护*, 2018, 46 (20): 36—41.]
- [34] Wang J N, Wan J, Wang Q, et al. The development of China's ecological and environmental planning in forty years of reform and opening-up[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2018, 10 (6): 5—18. [王金南, 万军, 王倩, 等. 改革开放 40 年与中国生态环境规划发展[J]. *中国环境管理*, 2018, 10 (6): 5—18.]
- [35] Song X, Lin N, Yin P H. Contaminated site remediation industry in China: Current state and future trends[J]. *Soils*, 2015, 47 (1): 1—7. [宋昕, 林娜, 殷鹏华. 中国污染场地修复现状及产业前景分析[J]. *土壤*, 2015, 47 (1): 1—7.]
- [36] Xu T, Nan F, Jiang X F, et al. Progresses in research on sources and characteristics of chromium pollution in soils and groundwater of tannery sites[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (6): 1341—1352. [徐腾, 南丰, 蒋晓锋, 等. 制革场地土壤和地下水中铬污染来源及污染特征研究进展[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (6): 1341—1352.]
- [37] Liu H Y, Probst A, Liao B H. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan , China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 339 (1/2/3): 153—166.
- [38] Jia J L, Lu R, Wang Z S, et al. Study of the ideas and tasks of prevention and control of heavy metal pollution during the 13th Five-Year Plan period[J]. *Environmental Protection Science*, 2018, 44 (2): 1—5. [贾杰林, 卢然, 王兆苏, 等. “十三五”时期我国重金属污染防控思路与任务[J]. *环境保护科学*, 2018, 44 (2): 1—5.]
- [39] Li Y J, Zhang J Y, Li J K. Research advance of microbial remediation in organic polluted site[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, 31 (2): 1—5. [李亚娇, 张静玉, 李家科. 有机污染场地微生物修复研究进展[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31 (2): 1—5.]
- [40] Zhao L, Teng Y, Luo Y M. Status of organochlorine pesticide contaminated sites in China and advances in site remediation[J]. *Soils*, 2018, 50 (3): 435—445. [赵玲, 滕应, 骆永明. 我国有机氯农药场地污染现状与修复技术研究进展[J]. *土壤*, 2018, 50 (3): 435—445.]
- [41] Cheng M, Zeng G M, Huang D L, et al. Advantages and challenges of Tween 80 surfactant-enhanced technologies for the remediation of soils contaminated with hydrophobic organic compounds[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 314: 98—113.

(责任编辑：陈荣府)