

· 综 述 ·

宋昕 博士，中国科学院南京土壤研究所研究员，中国科学院大学教授、博士生导师。荣获美国“地下水协会杰出地下水项目奖”，入选江苏省“333 高层次人才工程”等。主要从事污染场地原位修复机制和技术（原位热脱附、原位微生物修复、原位 PRB 以及复合污染物的耦合修复技术）的研发、示范及可持续性评估，全氟化合物赋存特征、迁移转化和修复研究，土壤和地下水修复材料和修复设备的研发。主持国家自然科学基金 NSFC-EU 重大国际合作项目、国家重点研发专项、中科院重点部署项目、欧盟 Erasmus+ 项目，以及修复技术方案编制、工程示范项目等 30 余项。发表 SCI 学术论文 30 余篇，授权发明专利 11 项，在申请发明专利 9 项（国际专利 1 项），合作出版英文专著 1 部。



有机污染土壤和地下水生物修复研究热点和趋势—— 基于 Web of Science 数据库的文献计量学分析

王晴¹，杨宗帅^{1,2}，尹立普³，宋昕¹，魏昌龙¹，李燕丽²，翟伟⁴

1 中国科学院南京土壤研究所 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室，江苏 南京 210008

2 长江大学 农学院，湖北 荆州 451199

3 中科鼎实环境工程有限公司，北京 100102

4 青岛市生态环境局平度分局，山东 青岛 266700

王晴，杨宗帅，尹立普，等. 有机污染土壤和地下水生物修复研究热点和趋势——基于 Web of Science 数据库的文献计量学分析. 生物工程学报, 2021, 37(10): 3549-3564.

Wang Q, Yang ZS, Yin LP, et al. Bibliometric analysis on bioremediation of organic contaminated soil and groundwater based on Web of Science database. Chin J Biotech, 2021, 37(10): 3549-3564.

摘要: 生物修复作为经济有效、绿色可持续的修复技术，在有机污染土壤和地下水修复上具有广阔的应用前景。基于 Web of Science 核心数据库，通过文献计量可视化应用软件 VOSviewer 和 CiteSpace，分析了 1990–2020 年有机污染土壤和地下水生物修复领域的研究热点及趋势。结果表明，有机污染土壤和地下水生物修复领域的论文发表数量呈增长趋势，发文总量最多的国家是美国和中国，但是 2012 年后中国年发文量快速增加，并位居第一。该领域的相关研究主要发表在 *Chemosphere*、*Environmental Science & Technology*、*Science of the Total Environment*

Received: May 25, 2021; **Accepted:** August 16, 2021

Supported by: National Key Research and Development Program of China (No. 2019YFC1805700), National Natural Science Foundation of China (Nos. 32061133001, 41991335).

Corresponding author: Xin Song. Tel: +86-25-86881453; E-mail: xsong@issas.ac.cn

国家重点研发计划 (No. 2019YFC1805700), 国家自然科学基金 (Nos. 32061133001, 41991335) 资助。

网络出版时间: 2021-08-24

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1998.Q.20210824.1017.002.html>

等 top 期刊上。全球研究机构中中国科学院发文量最多，但是来自美国加州大学的总被引频次和 h-index 最高。发文量最多的是来自英国兰卡斯特大学的学者 Semple 教授，我国发文量最多的是来自中国科学院南京土壤研究所的骆永明研究员。下一步研究重点和热点：针对复合污染土壤和地下水，研发新型耦合强化生物修复技术，采用先进的分子生物学方法探索功能微生物及其功能基因，阐明生物降解机理，明确原位污染土壤和地下水的靶向性调控机制。

关键词：有机污染物，生物修复，土壤和地下水，计量分析

Bibliometric analysis on bioremediation of organic contaminated soil and groundwater based on Web of Science database

Qing Wang¹, Zongshuai Yang^{1,2}, Lipu Yin³, Xin Song¹, Changlong Wei¹, Yanli Li², and Wei Zhai⁴

1 CAS Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China

2 College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 451199, Hubei, China

3 China State Science Dingshi Environmental Engineering Co., Ltd, Beijing 100102, China

4 Qingdao Municipal Bureau of Ecology and Environment, Pingdu Branch, Qingdao 266700, Shandong, China

Abstract: Bioremediation is regarded as one of the most promising methods for the remediation of the soil and groundwater contaminated with organic compounds, mainly due to its cost-effectiveness and environmental friendliness. Using VOSviewer and CiteSpace, we analyzed all publications in this area in core database of Web of Science from 1990 to 2020. The number of publications in this area showed an increasing trend worldwide. The country with the largest total number of publications was USA, followed by China and India. Since 2012, the number of annual publications of China exceeded USA and ranked the first. The top three journals which published papers in this area were *Chemosphere*, *Environmental Science & Technology*, and *Science of the Total Environment*. The Chinese Academy of Sciences published the largest number of papers among the research institutions globally, but the University of California in USA had the highest total citations and h-index. Bibliometric analysis indicated that it is important to develop biotechnologies of bioremediation coupled with chemical/physical remediation to overcome the challenge of low efficiency and long remediation duration associated with bioremediation. In addition, the bioremediation on the mixed contaminants, such as organic contaminants and heavy metals, or mixtures of different organic contaminants, is an important direction. Finally, the rapid development of microbiome technologies will further promote the exploration of mechanisms involved in bioremediation on the genetic and molecular level.

Keywords: organic contaminants, bioremediation, soil and groundwater, bibliometric analysis

随着工业化与现代化的快速发展，人类活动造成的土壤和地下水污染日趋严重，严重威胁着生态环境、人体健康和社会经济可持续发展，已成为世界各国关注的焦点和亟待解决的现实问题。近几十年来，世界各国日益重视环境保护与污染土壤和地下水的修复。如美国从《资源环境与恢复法》的制定到超级基金法案的实施，逐渐囊括了废弃污染场地和现存污染地块的修复与污

染管控^[1-2]。欧盟颁布了《土壤框架指令》(2006年)及《欧盟地下水指令》(2006年)等一系列法律条令^[3-4]，要求欧盟各成员国防止土壤污染，制定污染场地清单，并修复已确定的污染场地。我国自2016年以来也陆续颁布了《土壤污染防治行动计划》(2016)、《土壤污染防治法》(2018)和《地下水污染防治实施方案》(2019)等法律法规及导则^[5-7]，明确了我国污染场地修复与安全利用

目标。

有机污染是土壤和地下水主要污染类型。根据 2014 年颁布的《全国土壤污染状况调查公报》，全国土壤的总超标率为 16.1%，其中六六六、滴滴涕和多环芳烃 3 类有机污染物的总超标率分别为 0.5%、1.9% 和 1.4%^[8]。据调查，欧洲约有 60% 的污染场地都存在有机污染^[9]。在 2011 年美国 535 个修复场地中，存在有机污染的场地数量占比高达 84%^[10]。大部分有机污染物具有持久性、生物富集性和高毒性的特点，其在环境中难以降解，并能通过多种渠道进行区域甚至全球范围的迁移活动^[11]。因此，研发经济有效的修复技术是我国可持续发展的战略需求，也是世界各国亟需解决的重要科技问题。

有机污染土壤和地下水修复技术主要有物理修复、化学修复和生物修复等^[12-13]。物理和化学等修复技术大多具有能耗高、破坏土壤理化性质并对环境产生二次污染等问题^[14]，而生物修复因其经济性、环境可持续性等优势受到了越来越多研究者的重视^[15-16]。生物修复技术通过植物或微生物的代谢功能实现对有机污染物的吸收、转化和降解^[17]，目前研究已经证明，生物修复对多种有机污染物的修复效果较好^[18-19]，在污染土壤和地下水修复中具有广阔的应用前景。随着土壤和地下水有机污染问题日益严峻，研究低成本、低能耗并且绿色可持续的生物修复技术具有重要意义。

目前关于有机污染土壤和地下水生物修复的研究较多，但缺少从研究机构、研究内容和研究热点等方面进行计量分析来预测该领域未来的技术创新及发展方向的研究。因此，本文借助 CiteSpace 和 VOSviewer 可视化工具，通过分析国际上近 30 年间有机污染土壤和地下水生物修复领域发表的文献，旨在发现该领域不同时期的研究热点及发展趋势，为后续的研究提供新视野和新方向。

1 材料与方法

1.1 数据来源

Web of Science 数据库是国际公认权威的综合性学术信息资源数据库^[20]，被认为是大多数科研领域中最重要且使用频率最高的数据库^[21]。本研究主要针对有机污染土壤和地下水生物修复相关研究进行文献计量分析，其核心主题词主要包括“土壤和地下水、有机物污染物和生物修复”3 个方面。此外，根据已有的研究内容和关注点，有机污染土壤和地下水的生物修复主要针对石油烃、氯代烃、多环芳烃以及农药等挥发或者半挥发类有机污染物，通过生物降解将其从环境中去除，同时也包括部分生物吸附过程。为了提高修复效果，常采用生物刺激和生物强化对其进行修复。因此，结合文献常用关键词，本研究基于 Web of Science 核心数据集，以 ((bioremedia* OR bio-remedia* OR “biological remedia*” OR biodegrada* OR bio-degrada* OR “biological degrada*” OR microorganism OR microb* OR bioaugmentation OR bio-augmentation OR biostimulation OR bio-stimulation OR biosorption OR bio-sorption OR bioadsorption OR bio-adsorption) AND (soil OR “ground water” OR ground-water) AND (organic pollut* OR organic contaminat* OR POPs OR hydrocarbons OR petroleum OR TPH OR Oil OR benzene OR BTEX OR PAH OR PAHs OR pesticide OR dioxins OR phenol OR “polychlorinated biphenyl” OR PCBs OR “poly brominated diphenyl ethers” OR PBDEs OR DDT OR “Chlorinated ethenes” OR chlorohydrocarbon OR CAHs OR trichloroethylene OR TCE OR tetrachloroethylene OR PCE OR “volatile organic” OR “volatile halocarbons” OR “volatile aromatic hydrocarbons” OR “semi-volatile organic” OR “semi-volatile halocarbons” OR “semi-volatile aromatic hydrocarbons”)) NOT (“heavy metal” OR heavy-metal) 为主题检索词，时间跨度为 1990-01-01–2020-12-31，数据库的最后更新时间是 2021-03-15，得到有机污染土壤和地下水生物修复领域相关文献 19 973 篇，其中期刊论文 18 482 篇、综述 1 327 篇和其他类型 164 篇。

1.2 研究方法

本研究运用 VOSviewer (1.1.16) 和 CiteSpace (5.7.R2) 对检索到的文献进行可视化分析, 其中 CiteSpace 是一款在 Java 环境下运行的可视化分析软件, 它是通过信息可视化来呈现科学知识的结构、规律和分布的科学知识图谱^[21]。VOSviewer 是荷兰莱顿大学科技研究中心的 Waitman 和 Van 两位学者在 2009 年开发的用来可视化和构建文献计量网络的软件^[22]。通过对 1990–2020 年在有机污染土壤和地下水生物修复领域相关文献的发表国家、发表机构、主要作者、载文期刊、关键词和高被引等信息进行分析, 得到了当前有机污染土壤和地下水生物修复领域的研究热点与发展趋势。

2 结果与分析

2.1 发文量及来源国家分析

有机污染土壤和地下水生物修复领域发表学术论文的数量在一定程度上能反映该领域的发展动态。对该领域相关的 19 973 篇文献的年发文量及来源国家进行分析 (图 1), 结果指出年发文量自 1990 年以后整体呈现上升趋势, 2004 年后涨幅明显, 表明国内外对该领域的关注度逐渐提高。美国 (4 066 篇)、中国 (3 552 篇) 和印度 (1 409 篇) 是发文总量排名前 3 的国家, 约占总发文量的 45%。值得一提的是, 我国和印度作为两个发展中国家在该领域的总发文量分别居世界第二和第三位, 仅次于美国。

根据美国、中国和印度的年发文量变化趋势可以看出 (图 1), 美国早期在有机污染土壤和地下水生物修复领域发表成果较多, 2010 年以前美国在该领域的论文年发文量一直处于绝对领先地位, 但是近 20 年的年发文量没有显著变化。我国和印度发展趋势较为相似, 1990–2002 年的年发文量均小于 20 篇。2002 年以后印度在该领域的年发文量整体处于平稳上升状态, 部分年份会有降低, 但仍未超越美国。而我国在 2002 年以后

有机污染土壤和地下水生物修复领域的发文量逐渐增多, 2013 年后增长趋势极为显著, 2010 年以后我国的年发文量已超越美国, 跃居第一。2020 年我国在该领域的年发文量达到了 497 篇, 约为美国的 3 倍, 并且占该领域全球年总发文量的 32%, 说明我国对有机污染土壤和地下水的生物修复越来越重视, 未来几年我国在该领域的总发文量有望超越美国。这与中国政府推出一系列政策法规以及近 10 年不断加大对土壤修复产业的资金投入密切相关^[20]。步入 21 世纪后, 我国对土壤污染修复工作越来越重视, 近年来我国相继出台了一系列政策法规, 如 2008 年《关于加强土壤污染防治工作的意见》出台^[23], 开启了我国土壤修复行业政策体系的构建过程。随后于 2016 年颁布了《土壤污染防治行动计划》(“土十条”), 2017 年颁布了《污染地块土壤环境管理办法》以及 2018 年出台了《土壤污染防治法》等^[5-6, 24]。与此同时, 科技部、国家自然科学基金委员会和中国科学院等相继部署了土壤污染与控制修复科技研究项目, 如 2001 年污染土壤修复技术被纳入国家“863”计划中, 2018 年国家重点研发计划“场地土壤污染成因与治理技术”重点专项开始实施^[25-26], 进一步促进了土壤污染修复领域的快速发展。生物修复由于成本低廉、环境友好和绿色可持续而被逐渐关注。因此, 从发展趋势来看, 有机污染土壤和地下水的生物修复研究将会随之保持较高水平的发展。

通过 VOSviewer 软件将各个发文国家间的联系可视化 (图 2), 图中节点的大小表示发文量的多少, 各节点间的距离代表合作紧密程度, 节点间连线的粗细代表合作次数。在有机污染土壤与地下水的生物修复方面, 发文量较多的国家有美国、中国、印度、德国、加拿大、法国、西班牙和英国。其中我国和美国合作次数最多, 欧盟国家间的合作次数较多。我国与美国、英国、日本和巴基斯坦合作紧密, 美国与印度和日本合作紧密。

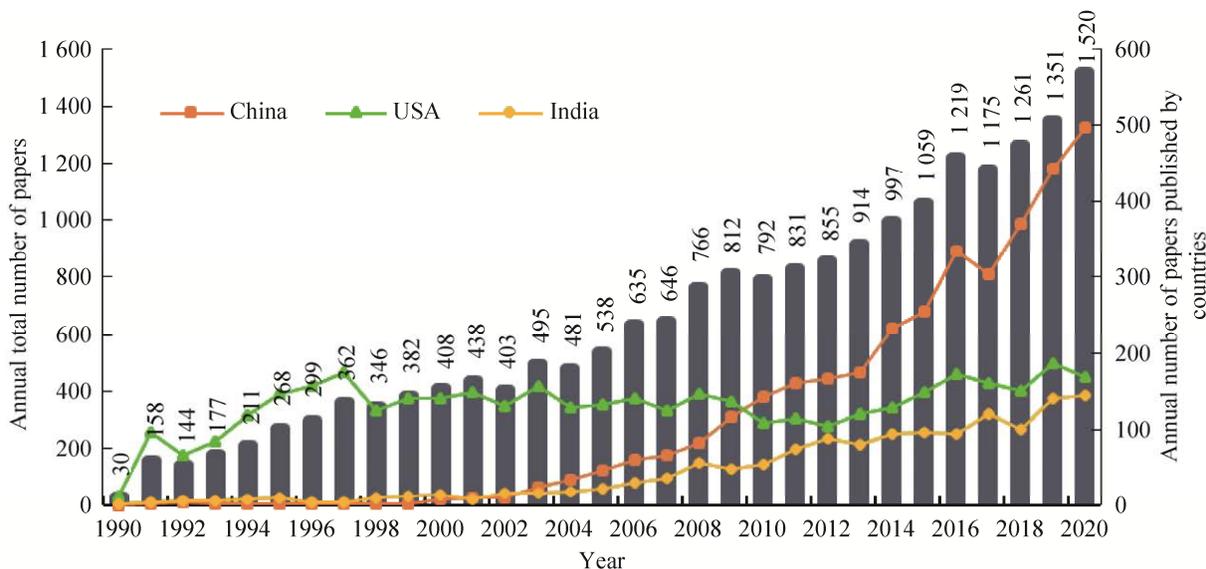


图1 1990-2020年有机污染土壤和地下水生物修复领域的发文量及发文量排名前3的国家

Fig. 1 The top three countries in terms of the number of papers published in the field of bioremediation of organic contaminated soil and groundwater in 1990-2020.

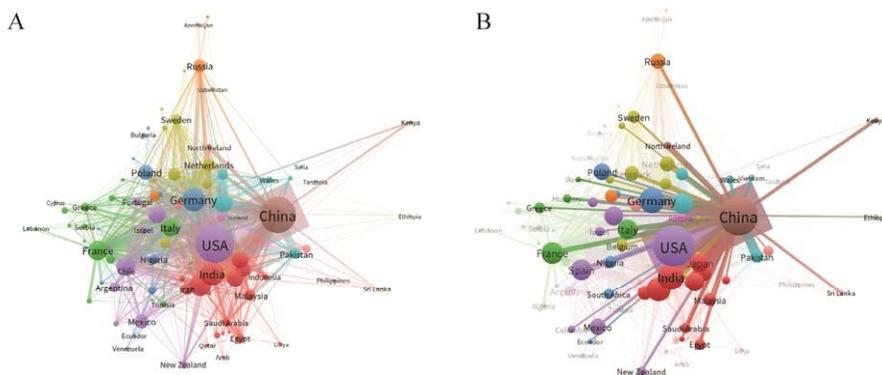


图2 有机污染土壤和地下水生物修复领域国家合作关系

Fig. 2 International cooperation on the topic of bioremediation of organic contaminated soil and groundwater. (A) Cooperation among countries. (B) Cooperation between China and other countries.

2.2 发文机构分析

对主要的发文机构进行分析,能够更好地了解当前有机污染土壤和地下水生物修复领域研究最多、最具权威的机构(表1)。有来自全世界8158家机构参与了该领域的研究,其中发文量排名前10位的机构发文量共3849篇,占总发文量的20%,包括3家美国机构、2家中国机构、2家法国机构,德国、西班牙和印度各有1家。这些机构大部分都来自发达国家,只有印度和中

国是发展中国家。中国科学院是发文量最高的机构,其发文量约为排名第二的法国国家科学研究中心的2倍,但是在总被引频次和h-index方面,加州大学拥有最高的总被引频次和h-index,其次为德国亥姆霍兹联合会和中国科学院。来自美国的3家机构其总被引频次和h-index普遍都较高,说明美国在有机污染土壤和地下水生物修复领域具有一定的权威性。

我国有机污染土壤和地下水生物修复领域发

文量前 10 的机构 (表 2) 共发文 2 305 篇, 占我国总发文量的 64.9%, 其中中国科学院发文量最多 (843 篇), 占总发文量的 23.7%, 且被引次数 (16 964 次) 和 h-index (62) 均最高, 说明中国科学院在该领域的研究成果显著。尤其是中国科学院南京土壤研究所, 其发文量 (198 篇)、被引次数 (4 554 次) 和 h-index (38) 均仅次于中国科学院大学和浙江大学。除了中国科学院, 排名前 5 的还包括中国科学院大学、浙江大学、中国科学院南京土壤研究所和南京农业大学。

2.3 主要作者分析

对发文作者进行分析, 可以彰显研究人员的科研水平。总联系强度 (Total link strength) 代表每位作者与其他作者的共现次数, 在一定程度上能反映作者间的合作交流关系。通过 VOSviewer 作者共现分析, 得到该领域相关 19 973 篇文献中的 58 411 位作者, 将每位作者的最小贡献量设置为 5 篇, 得到符合条件的 2 239 位作者。需要特别说明的是 VOSviewer 中提供的作者耦合分析是全体作者的分析, 而不是第一作者。表 3 列出了

表 1 1990–2020 年有机污染土壤和地下水生物修复领域发文量前 10 的机构

Table 1 Top 10 institutions in the field of bioremediation of organic contaminated soil and groundwater in 1990–2020

Rank	Institution	Country	Number of papers	Total cited times	H-index
1	Chinese Academy of Sciences	China	843	16 964	62
2	Centre National De La Recherche Scientifique	France	439	13 017	55
3	Helmholtz Association	Germany	416	17 848	63
4	Consejo Superior de Investigaciones Cientificas	Spain	356	10 960	56
5	University of California System	USA	345	20 753	73
6	National Research Institute for Agriculture, Food and Environment	France	337	10 255	53
7	United States Department of Agriculture	USA	307	14 653	58
8	Council of Scientific Industrial Research	India	282	8 364	47
9	University of Chinese Academy of Sciences	China	275	25 003	38
10	United States Department of Energy	USA	249	14 113	60

表 2 1990–2020 年有机污染土壤和地下水生物修复领域发文量前 10 的中国机构

Table 2 Top 10 Chinese institutions in the field of bioremediation of organic contaminated soil and groundwater in 1990–2020

Rank	Institution	Number of papers	Total cited times	H-index	Proportion (%)
1	Chinese Academy of Sciences	843	16 964	62	23.7
2	University of Chinese Academy of Sciences	275	5 003	40	7.7
3	Zhejiang University	246	5 418	40	6.9
4	Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences	198	4 554	38	5.6
5	Nanjing Agricultural University	148	3 036	33	4.2
6	Tsinghua University	142	3 353	33	3.9
7	Shenyang Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences	127	2 828	32	3.5
8	Chinese Academy of Agricultural Sciences	110	2 194	27	3.1
9	Peking University	109	2 321	32	3.1
10	China University of Geosciences	107	1 559	24	3.0

表 3 1990–2020 年有机污染土壤和地下水生物修复领域发文量前 10 的作者

Table 3 Top 10 authors in the field of bioremediation of organic contaminated soil and groundwater in 1990–2020

Rank	Author	Institution	Number of papers	Total link strength
1	Semple KT	Lancaster University	68	50
2	Naidu R	University of South Australia	53	50
3	Luo YM	Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences	48	150
4	Teng Y	Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences	47	146
5	Ball AS	Flinders University	43	62
6	Megharaj M	University of Newcastle	42	48
7	Christie P	Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences	41	117
8	Jiang X	Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences	38	132
9	Martin-laurent F	University of Burgundy	38	48
10	Wick LY	UFZ-Helmholtz Centre for Environmental Research	35	42

发文量前 10 位的作者及相关信息,其中来自英国兰卡斯特大学的 Semple、澳大利亚南澳大学的 Naidu 和中国科学院南京土壤研究所的骆永明名列前 3。发文量前 10 位中有 4 位学者来自中国科学院南京土壤研究所,且这 4 位作者发文的总联系强度远高于其他学者,说明该研究机构的这 4 位研究人员在有机污染土壤和地下水生物修复领域具有一定的影响力,其发表的文章已成为国内该领域研究者的学习参考对象。其中总联系强度最高的学者骆永明于 1998 年在中国科学院南京土壤研究所开创了土壤污染与修复领域的研究,他专注于土壤污染及其修复、区域土壤环境质量与风险管理等工作研究,并首次提出了“土壤修复”是一门新兴的土壤科学分支学科^[27],在土壤修复领域影响力很大。除了以上 4 位中国学者,其余的学者均来自发达国家,但是不包括发文量最高的美国学者。不难看出发达国家依旧是有机污染土壤和地下水生物修复领域的领跑者,虽然我国在该领域的研究起步较晚,但近些年来发展较快,有望进入世界前列。

2.4 载文期刊分析

分析载文期刊能帮助研究者快速准确地找到当前有机污染土壤和地下水生物修复领域的权威期刊^[28]。该领域相关的 19 973 篇文献共来源于 1 672 个出版物。载文量排名前 10 的出版物(表 4)共发文 4 855 篇,占该领域发文总量的 24.3%,

其中来自美国的期刊有 4 个,来自英国的期刊有 3 个,来自荷兰的期刊有 2 个,另外一个来自德国。近 5 年(2015-2019)影响因子大于 5 的期刊包括 *Chemosphere* (5.705)、*Science of the Total Environment* (6.419)、*Environmental Science & Technology* (8.543)、*Journal of Hazardous Materials* (8.512)、*Soil Biology & Biochemistry* (6.767)、*Environmental Pollution* (6.939) 这 6 类。前 10 位中近 5 年影响因子最高的期刊是来自美国的 *Environmental Science & Technology* (8.543),载文量为 565 篇,说明该领域的研究成果主要发表在环境领域的主流期刊,其研究成果创新性强、质量高。

载文量前 3 的期刊近 30 年的年发文量如图 3 所示。从图中可看出, *Chemosphere* 和 *Environmental Science & Technology* 两类期刊在 2005 年以前的年发文量呈现交替领先的态势,2005 年后 *Chemosphere* 有了较明显的增长趋势。*Science of the Total Environment* 期刊在有机污染土壤和地下水生物修复领域的载文量越来越多,2013 年后大幅增长,并且在 2015 年后的发文量处于领先地位,2020 年在该领域的年发文量已经是 *Chemosphere* 的 1.5 倍左右。按照这种趋势,该领域未来几年在 *Science of the Total Environment* 上发表的文章总量有望超过在 *Chemosphere* 上发表的文章总量。

表 4 1990–2020 年有机污染土壤和地下水生物修复领域载文量前 10 的期刊

Table 4 Top 10 journals in bioremediation of organic contaminated soil and groundwater in 1990–2020

Rank	Journal	Country	Number of papers	5-Year Impact factor
1	<i>Chemosphere</i>	England	841	5.705
2	<i>Science of the Total Environment</i>	Netherland	584	6.419
3	<i>Environmental Science & Technology</i>	USA	565	8.543
4	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	Netherland	549	8.512
5	<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	Germany	465	3.306
6	<i>International Biodeterioration & Biodegradation</i>	England	439	4.046
7	<i>Soil Biology & Biochemistry</i>	England	376	6.767
8	<i>Environmental Pollution</i>	USA	371	6.939
9	<i>Applied and Environmental Microbiology</i>	USA	353	4.597
10	<i>Applied Microbiology and Biotechnology</i>	USA	312	3.913

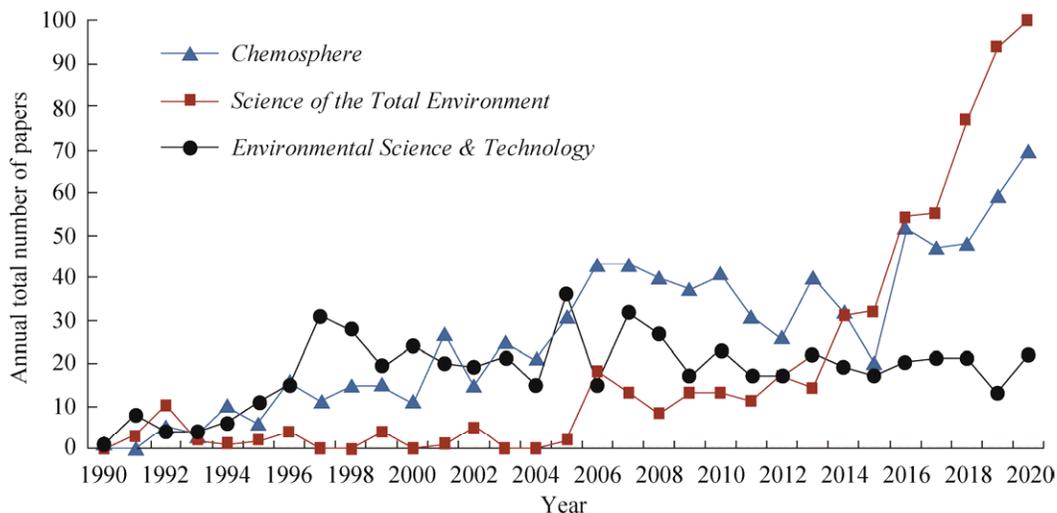


图 3 有机污染土壤和地下水生物修复领域发文章量排名前 3 期刊的年发文章量

Fig. 3 Top three journals in terms of the number of papers published in the field of bioremediation of organic contaminated soil and groundwater.

2.5 关键词共现分析

关键词是一篇文章的核心概括, 分析关键词可以更好地了解 and 掌握有机污染土壤和地下水生物修复领域的研究热点。利用 VOSviewer 中关键词分析功能, 得到该领域 19 973 篇相关文献中包含的 41 500 个关键词, 将最低共现次数设置为 10 次, 得到符合条件的 2 548 个关键词 (图 4)。Biodegradation (生物降解, 6 473 次) 出现的次数最多, bioremediation (生物修复, 4 181 次) 出现的频率其次, 其余出现次数较多的关键词包括 soil (土壤, 4 161 次)、polycyclic aromatic-hydrocarbons

(多环芳烃, 2 587 次)、bacteria (细菌, 1 529 次)、phenanthrene (菲, 1 266 次) 等。由这些关键词不难看出, 该领域关注更多的是采用某类细菌对土壤中多环芳烃 (尤其是低环菲) 开展生物修复方面的研究。

高频率的关键词可以反映有机污染土壤和地下水生物修复领域的研究热点和研究趋势, 突现关键词可以反映出该领域某一时间段内新兴的研究热点^[20]。利用 CiteSpace 可视化软件将关键词的连续突现时间设置为 5 年, 时间切片为 1 年, 得到近 30 年内的 294 个突现词。按照突现时间和突现强度提取其中的 20 个突现词进行分析 (表 5),

结果指出早期地下水中的氯代烃污染最为显著,非饱和带(土壤)中多环芳烃的生物降解研究一直处于研究热点。高频关键词从早期的“黄孢原毛平革菌和微生物降解(1991–2002年)”“生物利用率(2001–2005年)”“新物种(2005–2009年)”,随后集中到“土壤微生物群落(2013–2020年)”和“功能基因(2015–2020年)”,说明早期研究主要集中在筛选和分离高效降解菌并探究其种类与生物降解特性,尤其是对污染物的生物利用率方面。随着分子微生物技术的发展,土著微生物群落多样性也得到了国内外的广泛关注,目前的研究更深入地揭示了微生物降解有机污染物的基因表达和功能信息。但是各国专家对有机污染物的有效降解菌的研究也从未停止过。除了传统的生物降解,新的生物修复技术如“微生物燃料电池(2014–2018年)”近年来正逐渐被开发。此外,“中国”作为突现词在2014–2018年频繁出现,说明近些年来我国对于有机污染土壤和地下水生物修复领域的研究越来越多。

2.6 被引文献分析

论文的被引频次是文献计量学中测度学术论文社会影响力的重要指标。表6列出了Web of Science数据库中被引频次最高的前5篇文献。来自印度的研究者Haritash等综述了多环芳烃生物降解方面的

研究,阐明了不同细菌、真菌、酶对多环芳烃的降解效率和机理,并提出了植物-微生物联合修复多环芳烃污染土壤的建议^[29];美国学者Pignatello从吸附动力学角度出发,阐明了吸附作用对污染物的生物降解、生物有效性的影响^[30]。Weber等研究了铁元素对微生物种群代谢多样性的影响,并进一步讨论了在铁元素影响下微生物修复土壤污染物的潜力^[31]。Johnsen等综合讨论了多环芳烃的微生物降解机理,特别说明了影响多环芳烃生物降解的生物和非生物因素^[32]。Kanaly等将目前细菌修复高分子量多环芳烃的研究进行了汇总对比,并阐明了多种菌株降解高分子量多环芳烃的机理^[33]。从以上这些高被引文献可以看出,目前对土壤多环芳烃的生物降解机理、影响因素等方面的探讨仍然是研究热点。同时,将其其他修复技术与微生物修复耦合的方法也引起了学者们的广泛关注。

文献共被引(Co-citation)是指2篇文献共同出现在第3篇施引文献目录中,文献共被引可以反映发表文献之间的紧密关系,基于此可以进一步进行共被引聚类分析。共被引次数排名靠前的文献主要集中于近5年(图5),共被引频次前5文献中(表7),美国学者Hatzinger早在1995年就进行了菲和4-硝基苯酚复合污染在土壤老化

表6 1990–2020年有机污染土壤和地下水生物修复领域被引次数排名前5的文献

Table 6 Top 5 literatures cited in bioremediation of organic contaminated soil and groundwater in 1990–2020

Rank	Title	Year	Author	Institution	Cited times
1	Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review	2009	Haritash AK	Delhi Technological University	1 532
2	Mechanisms of slow sorption of organic chemicals to natural particles	1996	Pignatello JJ	Connecticut Agricultural Experiment Station	1 208
3	Microorganisms pumping iron: anaerobic microbial iron oxidation and reduction	2006	Weber KA	So Illinois Univ	918
4	Principles of microbial PAH-degradation in soil	2005	Johnsen AR	Ecole Polytech Fed Lausanne	723
5	Biodegradation of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons by bacteria	2000	Kanaly RA	Marine Biotechnol Inst	722

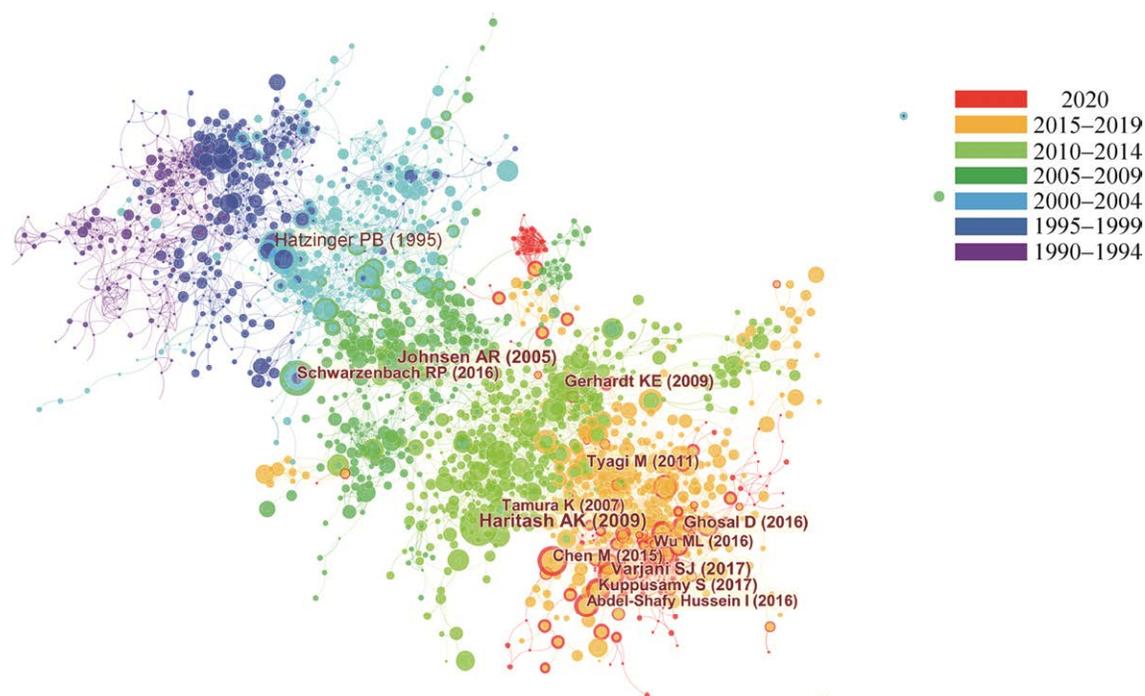


图 5 1990–2020 年有机污染土壤和地下水生物修复领域文献共被引分布

Fig. 5 Co-citation distribution of literatures on bioremediation of organic contaminated soil and groundwater in 1990–2020.

表 7 1990–2020 年有机污染土壤和地下水生物修复领域共被引次数排名前 5 的文献

Table 7 Top 5 co-citation literatures on bioremediation of organic contaminated soil and groundwater in 1990–2020

Rank	Title	Year	Author	Country	Cited times
1	Principles of microbial PAH-degradation in soil	2005	Johnsen AR	Switzerland	116
2	Effect of aging of chemicals in soil on their biodegradability and extractability	1995	Hatzinger PB	USA	90
3	Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes	2011	Tyagi M	Portugal	79
4	Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soils: technological constraints, emerging trends and future directions	2017	Kuppusamy S	South Korea	77
5	Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: applications, microbes and future research needs	2015	Chen M	China	75

后对其生物降解的影响研究^[34]。葡萄牙研究者 Tyagi 在实验室和原位中试试验尺度下比较了生物强化和生物刺激两种修复方法对有机污染物的修复效果和影响因素^[35]。韩国研究者 Kuppusamy

综述了目前多环芳烃污染土壤的修复技术及未来修复趋势，重点强调了微生物修复作为绿色可持续发展的修复技术，将在未来一段时间内被广泛关注^[36]。中国学者 Chen 研究了生物堆肥技术对土壤中有

机污染物的修复效果,并评述了修复过程对土壤微生物群落的影响^[37]。通过以上共被引最高的文献可以看出,复合污染物的生物降解以及在原位尺度的强化生物修复近年来成为被关注的热点,有机污染土壤和地下水的原位生物修复技术具有广阔的发展和应用前景。

将时间切片划分为5年,分析共被引文献的聚类,可以间接看出不同时间段该领域的研究热

点(图6)。图中圆圈称为引文年环(Tree ring history),年环的大小反映论文共被引用的次数,圆圈颜色代表相应年份,越接近红色就离现在的时间越近。CiteSpace依据该领域相关论文的研究内容及发表时间将其分为28个聚类(聚类22和24未显示)。近几年国际上在有机污染土壤和地下水生物修复领域研究较多(红色年环)的有#2 petroleum hydrocarbon(聚类2,石油烃)、#4 PAH

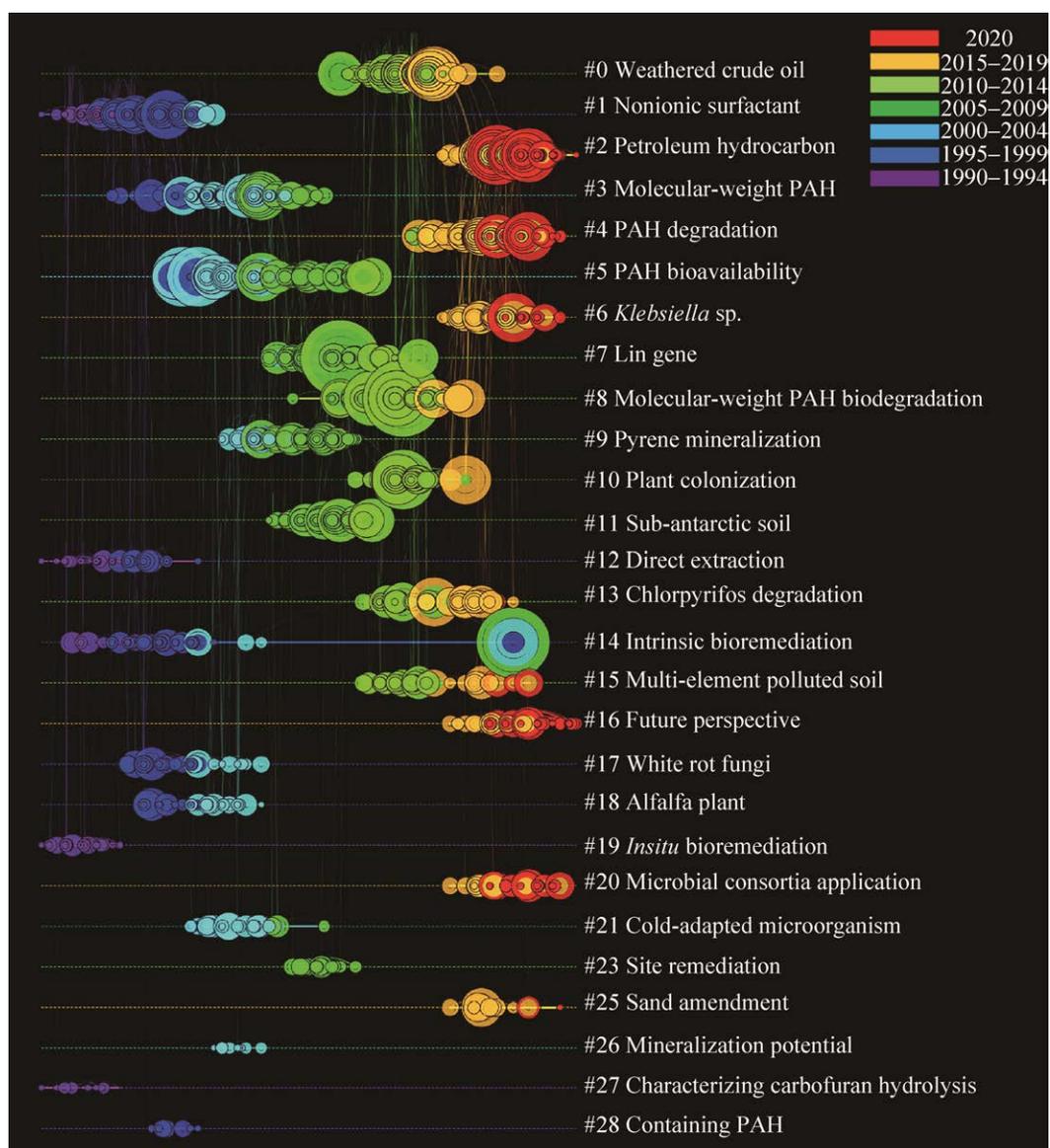


图6 1990–2020年有机污染土壤和地下水生物修复领域文献共被引聚类图

Fig. 6 Co-citation cluster of literatures on bioremediation of organic contaminated soil and groundwater in 1990–2020.

degradation (聚类 4, 多环芳烃降解)、#6 *Klebsiella* sp. (聚类 6, 克雷伯氏菌)、#16 future perspective (聚类 16, 未来展望)、#20 microbial consortia application (聚类 20, 微生物菌群应用)。石油烃、多环芳烃是近些年研究较多的污染物, 其中多环芳烃作为聚类关键词在多个年份都有出现, 说明多环芳烃一直是各国学者重点研究的污染物。克雷伯氏菌的研究从 2015 年开始越来越多, 包括克雷伯氏菌对苊^[38-39]、菲^[40]、溴氰菊酯^[41-42]、多环芳烃^[43]、石油烃^[44-45]等有机污染物降解的研究。除了关注单一菌株的研究, 目前对微生物菌群尤其在应用方面的研究也是研究热点, 这可能和学者开始重视原位尺度上的生物强化修复研究有关。此外, 有机污染土壤和地下水生物修复的未来发展趋势也是各国学者关注的重点。

2.7 研究重点与研究趋势

土壤和地下水有机污染物的生物修复研究作为近年来的研究热点正在快速发展, 生物修复技术相对于其他修复技术更契合美国超级基金会所提倡的绿色修复、原位修复和高效修复的理念^[46], 也更符合我国绿色可持续发展的重大需求。基于对有机污染土壤和地下水生物修复领域相关文献的计量结果分析, 其研究重点与趋势如下。

(1) 土壤和地下水中污染物种类复杂, 并且多种污染物共存, 需要进一步针对复合污染物的生物降解机理及影响因素开展研究;

(2) 随着生物技术的进步, 结合高通量测序技术、宏基因组学、转录组学、蛋白质组学和代谢组学等技术, 从 DNA、RNA 和蛋白质等水平上解析微生物相互作用机制及其污染物代谢机理;

(3) 研发新型耦合强化生物修复技术, 通过强化污染土壤和地下水中土著微生物的方法, 解析土著微生物多样性及其功能基因的变化, 开展原位污染土壤和地下水的靶向性调控。

3 总结

本研究通过 CiteSpace 和 VOSviewer 科学知识图谱绘制工具对 Web of Science 核心数据集中 1990–2020 年有机污染土壤和地下水生物修复领域的相关文献进行计量分析, 结果表明: 有机污染土壤和地下水生物修复领域的发文量逐年增加, 美国、中国和印度是该领域发表文献量前 3 的国家, 近年来我国在该领域迅速发展, 2010 年以后中国的年发量处于领先地位; 中国科学院是发文量最多的机构, 但是来自美国加州大学的总被引频次和 h-index 最高; 来自英国兰卡斯特大学的学者 Semple 在该领域发表了最多的文章, 中国科学院南京土壤研究所的 4 位学者位居前 10, 其发文的总联系强度远高于其他学者; 关于有机污染土壤和地下水生物修复领域的文章主要发表在 *Chemosphere*、*Environmental Science & Technology*、*Science of the Total Environment* 等环境领域 top 期刊上。目前研究热点包括从微生物群落和功能基因等层面阐明污染物的生物降解机理, 尤其是针对复合污染物, 研发新型原位耦合强化生物修复技术、研究原位污染土壤和地下水的靶向性调控机制与技术是未来发展的趋势, 污染土壤和地下水的原位生物修复具有广阔的发展和应用前景。

REFERENCES

- [1] Hamilton JT, Viscusi WK. How costly is “clean”? An analysis of the benefits and costs of superfund site remediations. *J Pol Anal Manage*, 1999, 18(1): 2-27.
- [2] 焦文涛, 方引青, 李绍华, 等. 美国污染地块风险管控的发展历程、演变特征及启示. *环境工程学报*, 2021, 15(5): 1821-1830.
Jiao WT, Fang YQ, Li SH, et al. Risk management and control of contaminated sites in the United States: development process, evolution characteristics and enlightenment. *Chin J Environ Eng*, 2021, 15(5): 1821-1830 (in Chinese).

- [3] 徐珍, 郭小品, 丁怀, 等. 欧盟重金属污染防治制度研究. 环境污染与防治, 2014, 36(8): 102-110.
Xu Z, Guo XP, Ding H, et al. Heavy metal pollution prevention system of European Union. Environ Pollut Control, 2014, 36(8): 102-110 (in Chinese).
- [4] 刘卓, 戴向前, 马俊. 欧盟地下水管理法规政策体系及其启示. 水利发展研究, 2019, 19(5): 61-65.
Liu Z, Dai XQ, Ma J. The policy and regulation system of groundwater management in European Union and its enlightenments. Water Resour Dev Res, 2019, 19(5): 61-65 (in Chinese).
- [5] 国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知 [EB/OL]. [2021-08-06]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm.
- [6] 中华人民共和国土壤污染防治法 [EB/OL]. [2021-08-06]. http://www.npc.gov.cn/zgrdw/npc/lfzt/rlyw/2018-08/31/content_2060840.htm.
- [7] 关于印发地下水污染防治实施方案的通知 [EB/OL]. [2021-08-06]. http://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/201904/t20190401_698148.html.
- [8] 骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望. 土壤学报, 2020, 57(5): 1137-1142.
Luo YM, Teng Y. Research progresses and prospects on soil pollution and remediation in China. Acta Pedol Sin, 2020, 57(5): 1137-1142 (in Chinese).
- [9] Jelusic M, Lestan D. Effect of EDTA washing of metal polluted garden soils. Part I: toxicity hazards and impact on soil properties. Sci Total Environ, 2014, 475: 132-141.
- [10] 刘晶晶, 杨勇, 陈恺. 有机污染场地修复工程中的大气环境二次污染防治及案例分析. 环境工程技术学报, 2018, 8(4): 381-389.
Liu JJ, Yang Y, Chen K. Secondary air pollution prevention and case study in organic pollutants contaminated site remediation project. J Environ Eng Technol, 2018, 8(4): 381-389 (in Chinese).
- [11] 王春辉, 吴绍华, 周生路, 等. 典型土壤持久性有机污染物空间分布特征及环境行为研究进展. 环境化学, 2014, 33(11): 1828-1840.
Wang CH, Wu SH, Zhou SL, et al. A review on spatial distribution and environmental behavior of typical persistent organic pollutants in soil. Environ Chem, 2014, 33(11): 1828-1840 (in Chinese).
- [12] Zhou MZ, Li QH, Wang X, et al. Electrokinetic combined peroxymonosulfate (PMS) remediation of PAH contaminated soil under different enhance methods. Chemosphere, 2022, 286: 131595.
- [13] Němeček J, Steinová J, Špánek R, et al. Thermally enhanced in situ bioremediation of groundwater contaminated with chlorinated solvents - A field test. Sci Total Environ, 2018, 622-623: 743-755.
- [14] Christopher JM, Sridharan R, Somasundaram S, et al. Bioremediation of aromatic hydrocarbons contaminated soil from industrial site using surface modified amino acid enhanced biosurfactant. Environ Pollut, 2021, 289: 117917.
- [15] Ajona M, Vasanthi P. Bioremediation of petroleum contaminated soils - a review. Mater Today: Proc, 2021, 45: 7117-7122.
- [16] 刘志培, 刘双江. 我国污染土壤生物修复技术的发展及现状. 生物工程学报, 2015, 31(6): 901-916.
Liu ZP, Liu SJ. Development of bioremediation in China-a review. Chin J Biotech, 2015, 31(6): 901-916 (in Chinese).
- [17] 刘自力, 王红旗, 孔德康, 等. 不同植物-微生物联合修复体系下石油烃的降解. 环境工程学报, 2018, 12(1): 190-197.
Liu ZL, Wang HQ, Kong DK, et al. Degradation of petroleum hydrocarbons under different plant-microbial remediation system. Chin J Environ Eng, 2018, 12(1): 190-197 (in Chinese).
- [18] Chaudhary DK, Kim J. New insights into bioremediation strategies for oil-contaminated soil in cold environments. Int Biodeterior Biodegrad, 2019, 142: 58-72.
- [19] Sharma JK, Gautam RK, Nanekar SV, et al. Advances and perspective in bioremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soils. Environ Sci Pollut Res, 2018, 25(17): 16355-16375.
- [20] 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. 土壤学报, 2021, 58(2): 445-455.
Liu XM, Zhao J, Xu JM. Research on immobilization of heavy metals in contaminated agricultural soils ——bibliometric analysis based on Web of Science database. Acta Pedol Sin, 2021, 58(2): 445-455 (in Chinese).

- [21] 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. 环境科学学报, 2020, 40(3): 1138-1148.
Zhang WR, Yan K, Wang HZ, et al. Bibliometric analysis of research progress on polycyclic aromatic hydrocarbons-degrading genes during 1983–2019. Acta Sci Circumstantiae, 2020, 40(3): 1138-1148 (in Chinese).
- [22] 侯铤, 刘丽君, 赵岩, 等. 智能矿井和数字矿山研究热点与前沿知识图谱分析. 能源与环保, 2021, 43(1): 95-101.
Hou T, Liu LJ, Zhao Y, et al. Research hotspots and frontier knowledge map analysis of intelligent mine and digital mine. China Energy Environ Prot, 2021, 43(1): 95-101 (in Chinese).
- [23] 环境保护部发布关于加强土壤污染防治工作的意见[EB/OL]. [2021-10-07]. http://www.gov.cn/gzdt/2008-06/15/content_1016959.htm.
- [24] 污染地块土壤环境管理办法[EB/OL]. [2021-08-06]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bl/201701/t20170118_394953.htm.
- [25] 骆永明: 土壤污染与修复研究 20 年的系统总结 [EB/OL]. [2021-10-07]. <https://new.qq.com/rain/a/20200525A0284G00>.
- [26] 科技部关于发布国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”等重点专项 2018 年度项目申报指南的通知 [EB/OL]. [2021-10-07]. http://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzdgnr/qtwj/qtwj2018/201807/t20180706_140465.html.
- [27] 骆永明, 滕应, 过园. 土壤修复——新兴的土壤科学分支学科. 土壤, 2005, 37(3): 230-235.
Luo YM, Teng Y, Guo Y. Soil remediation—a new branch discipline of soil science. Soils, 2005, 37(3): 230-235 (in Chinese).
- [28] 郭兵, 杨庭, 肖成磊, 等. 基于 Web of Science 数据库石油污染土壤生物修复研究的文献计量分析. 现代化工, 2021, 41(2): 11-18.
Guo B, Yang T, Xiao CL, et al. Bibliometric analysis on bioremediation research on petroleum contaminated soil based on Web of Science database. Mod Chem Ind, 2021, 41(2): 11-18 (in Chinese).
- [29] Haritash AK, Kaushik CP. Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review. J Hazard Mater, 2009, 169(1-3): 1-15.
- [30] Pignatello JJ, Xing BS. Mechanisms of slow sorption of organic chemicals to natural particles. Environ Sci Technol, 1996, 30(1): 1-11.
- [31] Weber KA, Achenbach LA, Coates JD. Microorganisms pumping iron: anaerobic microbial iron oxidation and reduction. Nat Rev Microbiol, 2006, 4(10): 752-764.
- [32] Johnsen AR, Wick LY, Harms H. Principles of microbial PAH-degradation in soil. Environ Pollut, 2005, 133(1): 71-84.
- [33] Kanaly RA, Harayama S. Biodegradation of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons by bacteria. J Bacteriol, 2000, 182(8): 2059-2067.
- [34] Hatzinger PB, Alexander M. Effect of aging of chemicals in soil on their biodegradability and extractability. Environ Sci Technol, 1995, 29(2): 537-545.
- [35] Tyagi M, da Fonseca MM, de Carvalho CC. Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. Biodegradation, 2011, 22(2): 231-241.
- [36] Kuppusamy S, Thavamani P, Venkateswarlu K, et al. Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soils: technological constraints, emerging trends and future directions. Chemosphere, 2017, 168: 944-968.
- [37] Chen M, Xu P, Zeng GM, et al. Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: applications, microbes and future research needs. Biotechnol Adv, 2015, 33(6): 745-755.
- [38] Li X, Zhang X, Li L, et al. Anaerobic biodegradation of Pyrene by *Klebsiella* sp. LZ6 and its proposed metabolic pathway. Environ Technol, 2020, 41(16): 2130-2139.
- [39] Singha LP, Pandey P. Rhizobacterial community of *Jatropha curcas* associated with Pyrene biodegradation by consortium of PAH-degrading bacteria. Appl Soil Ecol, 2020, 155: 103685.
- [40] Li XZ, Peng DL, Zhang Y, et al. *Klebsiella* sp. PD3, a phenanthrene (PHE)-degrading strain with plant growth promoting properties enhances the PHE

- degradation and stress tolerance in rice plants. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2020, 201: 110804.
- [41] Tang J, Hu Q, Lei D, et al. Characterization of deltamethrin degradation and metabolic pathway by co-culture of *Acinetobacter junii* LH-1-1 and *Klebsiella pneumoniae* BPBA052. *AMB Express*, 2020, 10(1): 106.
- [42] Tang J, Hu Q, Liu B, et al. Efficient biodegradation of 3-phenoxybenzoic acid and pyrethroid pesticides by the novel strain *Klebsiella pneumoniae* BPBA052. *Can J Microbiol*, 2019, 65(11): 795-804.
- [43] Xu XY, Zhou H, Chen X, et al. Biodegradation potential of polycyclic aromatic hydrocarbons by immobilized *Klebsiella* sp. in soil washing effluent. *Chemosphere*, 2019, 223: 140-147.
- [44] Ozyurek SB, Bilkay IS. Biodegradation of petroleum by *Klebsiella pneumoniae* isolated from drilling fluid. *Int J Environ Sci Technol*, 2018, 15(10): 2107-2116.
- [45] You ZY, Xu HY, Zhang SJ, et al. Comparison of petroleum hydrocarbons degradation by *Klebsiella pneumoniae* and *Pseudomonas aeruginosa*. *Appl Sci*, 2018, 8(12): 2551.
- [46] 李亚娇, 张静玉, 李家科. 有机污染场地微生物修复研究进展. *环境监测管理与技术*, 2019, 31(2): 1-5. Li YJ, Zhang JY, Li JK. Research advance of microbial remediation in organic polluted site. *Adm Tech Environ Monit*, 2019, 31(2): 1-5 (in Chinese).

(本文责编 陈宏宇)