

DOI:10.13205/j.hjgc.202505007

竹涛,刘雨生,沙浩群,等.自然衰减在地下水治理中的研究进展与趋势:基于CiteSpace的可视化分析[J].环境工程,2025,43(5):57-66.

ZHU T, LIU Y S, SHA H Q, et al. Research progress and trends of natural attenuation technology in groundwater management: a CiteSpace-based visualization analysis[J]. Environmental Engineering, 2025, 43(5): 57-66.

自然衰减在地下水治理中的研究进展与趋势:基于CiteSpace的可视化分析

竹涛* 刘雨生 沙浩群 付顺江

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083)

摘要:自然衰减技术因其经济性、可持续性等特点,近年来在国外应用较广,但国内目前缺乏完整的工程应用案例。基于CiteSpace软件,以Web of Science核心数据库作为数据源,对2001—2021年国内外在自然衰减领域发表的文献进行可视化分析。结果表明:美国在该领域占有主导地位,发文量占全世界总发文量的31.7%,国内在该领域最有影响力的机构是中国科学院;目前自然衰减领域研究可分为2个阶段,第1阶段主要研究自然衰减机理及应用,第2阶段主要研究如何通过生物刺激或生物强化手段来强化自然衰减过程;在今后研究中,应更多关注生物主导的自然衰减过程,同时应更关注有机污染物的自然衰减过程。

关键词:自然衰减;CiteSpace;微生物;土壤与地下水

Research progress and trends of natural attenuation technology in groundwater management: a CiteSpace-based visualization analysis

ZHU Tao*, LIU Yusheng, SHA Haoqun, Fu Shunjiang

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

Abstract: Natural attenuation technology has been widely applied abroad in recent years thanks to its features such as cost-effectiveness and sustainability. However, in China, there is currently a lack of complete engineering application cases. This paper conducts a visual analysis on global literature published in the field of natural attenuation from 2001 to 2021 by relying on the CiteSpace software and taking the Web of Science(WOS) Core Database as the data source. The results reveal that the United States occupies a dominant position in this field. The number of papers published by the United States accounts for 31.7% of the total number of papers published worldwide. In China, the most influential institution in this field is the Chinese Academy of Sciences. Currently, the research in the field of natural attenuation can be divided into two stages. During the first stage, the main focus is on the mechanism and application of natural attenuation. In the second stage, the emphasis is mainly placed on how to enhance the natural attenuation process through biostimulation or bioaugmentation methods. In future research efforts, more attention should be directed towards the natural attenuation process that is dominated by organisms. Meanwhile, greater emphasis should also be placed on the natural attenuation process of organic pollutants. It is essential to explore deeper into these aspects as they play crucial roles in understanding and improving the application of natural

收稿日期:2023-09-02; 修改日期:2024-02-06; 接收日期:2024-04-03

基金项目:国家重点研发计划“典型页岩气开发场地污染防控示范”(2019YFC1805505);中国矿业大学(北京)博士研究生拔尖创新人才培养基金(BBJ2023035)

*第一作者、通信作者:竹涛(1979-),男,博士,教授,博导,主要研究方向为等离子体技术研究与应用。bamboozt@cumtb.edu.cn

attenuation technology. The natural attenuation process dominated by organisms may involve complex interactions among various biological factors, and more in-depth study of it can help us better utilize the natural power of biological systems to deal with environmental issues. Similarly, organic pollutants are common and have significant impacts on the ecological environment. Focusing on their natural attenuation processes can provide valuable insights for developing more effective pollution control and environmental restoration strategies.

Keywords: natural attenuation; CiteSpace; microbiology; soil and groundwater

0 引言

针对我国目前存在大量受到污染的土壤和地下水亟待修复的现实局面,尽快研发科学合理、经济适宜的污染场地修复技术是当前我国土壤和地下水修复领域的重要研究方向^[1]。欧美国家污染场地修复领域经过了几十年的发展,其修复思路已经从“主动修复”逐步转变成了“被动修复”,即以风险管控作为土壤和地下水污染防治的主要原则^[2]。

监控自然衰减(MNA)是实施风险管控的重要手段之一。MNA通过精确的监控技术对污染物的自然降解作用进行准确的评估和预测,结合污染物自然衰减特征,设计基于风险管控的污染综合防控方案,从而降低污染场地的修复成本,规避工程风险^[3-5]。

近些年来,国外开始大量应用监控自然衰减技术修复受污染场地,主要采用该技术修复地下水中的有机污染物。Song等^[6]以东北某在役大型石化企业为研究对象,开展土壤和地下水污染协同监测自然衰减,以治理复合污染,降低环境风险,基于详细的区域调查(2019年3月开展)获得了污染物分布,筛选土壤和地下水中的特征污染物,发现在4年监测期间,多项特征污染物浓度持续下降。

目前国内文献中对MNA的适用对象、监测方法、成本分析等均有一定的研究,但对自然衰减领域的发展历程与未来趋势的分析研究较少^[7]。李元杰等^[8]介绍了MNA方法的来源和发展,总结了MNA的国内外研究进展和相关核心技术手段,与典型的修复方法进行了成本比较,为MNA相关的研究和应用提供了参考。

Citespace软件有助于从大量文献资料中探究研究动态以及未来趋势,本文基于CiteSpace软件针对自然衰减领域,尤其是监控自然衰减方向,对Web of Science核心数据库中2001—2021年期间领域内所有已发表论文进行文献计量学可视化分析,并对自然衰减技术的研究现状及发展趋势进行综述,以期在今后开展相关研究提供参考。

1 数据来源及分析方法

1.1 数据来源

以中国知网CNKI数据库作为中文文献检索平台,检索方式选择高级检索,来源类别限定为“核心期刊”,以“监控自然衰减”或“自然衰减”为主题词进行检索,检索时间跨度为2001-01-01—2021-12-31,经人工确认关键词无误且没有重复记录后,共得到103篇中文文献,由于中文文献数量过少,因此未对中文文献进行CiteSpace分析。英文文献来源于Web of Science(WOS)核心数据库,设置检索策略为:TS=(“monitored natural attenuation” or “natural attenuation”),语言选择“English”,文献类型为“Article”和“Review”,时间跨度设为2001—2021年,同样经过人工确认研究主题无误且没有重复记录后,共得2814篇英文文献,将其导入CiteSpace中进行统计分析。

1.2 分析方法

具有可视化分析功能的软件有很多,如CiteSpace、VOS viewer、Bib Excel等^[9]。CiteSpace软件能够将文献之间的关系以知识图谱的方式呈现,使读者可以通过知识图谱直观地观察到某一学术领域中近几十年来的研究动态变化情况,并且可据此对未来研究前景进行一定的展望^[10-11]。本文基于JAVA环境下CiteSpace软件的可视化分析功能,对在WOS数据平台导出的2814篇关于自然衰减的相关文献进行可视化分析,以期能够对该领域的发展动态进行梳理并对未来的发展趋势进行展望。

2 结果与分析

2.1 发文量与被引频次变化趋势分析

根据WOS核心数据库中自然衰减领域内2001—2021年发文情况绘制了统计图,其中发文量如图1a所示。可知:自然衰减领域的年发文量呈逐渐上升趋势,说明该领域的研究热度在持续增加。其中,发文量年增长率最高的年份为2011年,相比2010年增长了30.58%。发文量最多的年份为2021年,发文

182篇,占近20年发文量的6.47%。2019、2020、2021年的发文量分别为181,179,182篇,是发文数量最多的3年。被引频次图1b所示。可知:自然衰减领域内的论文被引频次逐年上升且增长速度较快,2001年发表的论文被引频次仅为46次,占总被引数的0.06%,经过20年的发展,在2021年发表的论文被引频次已经达到了9368次,占总被引数的12.07%,与20年前相比被引次数增加了约200倍,自然衰减领域内文献的总被引频次达到了77626次。综合分析论文发表数量及被引频次的数据可知:自然衰减领域迎来了飞速发展,尤其是2021年,发文量与被引频次均达到历史最高水平。

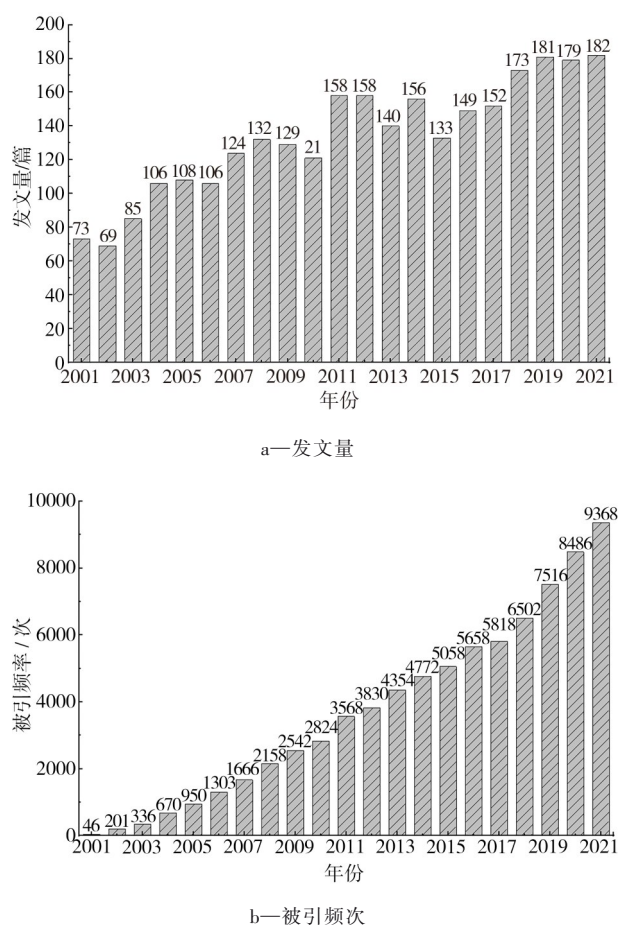


图1 WOS核心数据库中自然衰减领域内近20年统计图

Figure 1 Statistical charts for the last 20 years in the field of natural attenuation in the WOS core database

2.2 主要研究国家分析

监测自然衰减领域发文量排名前10位的国家如图2所示。可知:美国在该领域的发文量为894篇,占总发文量的31.7%,远超其他国家,表明美国在该领域的研究优势十分明显;发文量第2的国家是中

国,共发文311篇,仅次于美国;发文量第3的国家是德国,共发文244篇;自然衰减领域内发文量在200篇以上的国家只有美国、中国、德国,3个国家共发文1449篇,占总发文量的51.49%,超过了总发文量的1/2,表明在自然衰减领域内美国、中国、德国具有影响力优势。

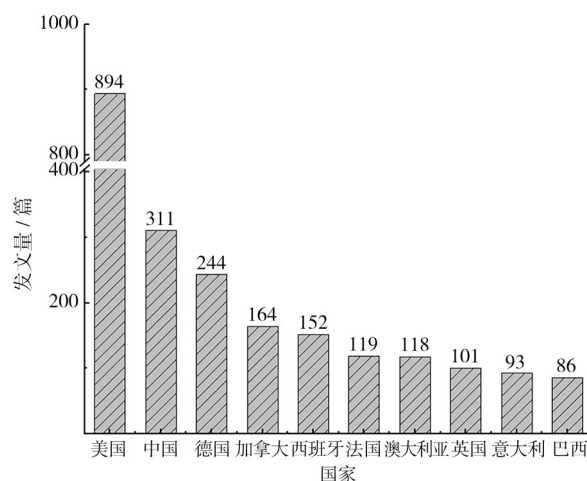


图2 自然衰减领域英文发文量前10国家及发文量统计图

Figure 2 Top 10 countries by English-language publication volume in natural attenuation research and their publication statistics

排名前10的国家中,除中国外,其余均为西方国家,反映出国家的经济发展水平一定程度上影响着该国科研机构在监测自然衰减领域的研究发展状况。

2.3 主要研究机构分析

通过CiteSpace软件对自然衰减领域主要研究机构进行合作网络图谱分析,结果如图3所示。可知:该领域的研究机构之间合作相对较为紧密,其中美国地质调查研究所(US Geol Survey)、亥姆霍兹环境研究中心(UFZ Helmholtz Ctr Environm Res)的节点较大,说明在该领域内这2家机构研究所取得的成果最多,影响力较大。

近20年来在监测自然衰减领域发文量排名前5的机构如表1所示。可知:德国杜宾根大学(Univ Tubingen)发文62篇,位列第3;中国科学院(Chinese Acad Sci)发文53篇,位列第4;加拿大滑铁卢大学(Univ Waterloo)发文52篇,位列第5。总发文量在100篇以上的机构仅有2所,均为美国科研机构,进一步证明了美国在该领域内具有非常大的影响力。

2.4 关键词分析

突现是指一个关键词在某个时段内频次突然增

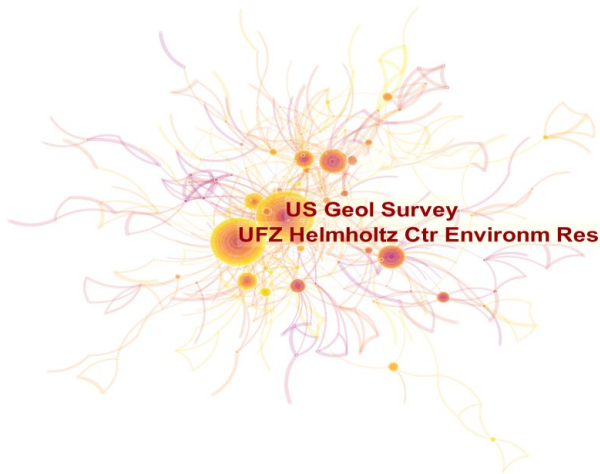


图3 WOS核心数据库中监测自然衰减研究机构合作网络图谱
Figure 3 Collaborative network mapping of research institutions in natural attenuation monitoring from the WOS Core Database

表 1 自然衰减领域英文发文量前 5 机构

Table 1 Top 5 institutions by English-language publication volume in the field of natural attenuation

排名	机构名称	发文量
1	US Geol Survey	107
2	UFZ Helmholtz Ctr Environm Res	105
3	Univ Tubingen	62
4	Chinese Acad Sci	53
5	Univ Waterloo	52

高。分析研究领域中的突现关键词,可以反映某领域的研究热点及前沿^[12]。使用 CiteSpace 对 WOS 数据库中 2814 篇英文文献的关键词进行突现词分析,得到如图 4 所示的突现强度最高的 25 个关键词。可知:25 个突现出的关键词被明显地分成了 2 部分,第 1 部分是 2001—2012 年突现出的关键词,共 13 个,第 2 部分是 2015—2021 年突现出的关键词,共 12 个,2012—2015 年并没有突现出关键词,说明这 3 年的研究与往年相比并没有明显的变化,且较为分散。

为进一步研究关键词随着时间的演变,生成自然衰减领域关键词共线时间图谱,如图 5 所示。该领域的研究可分为 2 个阶段:

2001—2012 年共突现出了 13 个关键词,其中有 5 个关键词在 2001 年就已突现,分别是 organic compound(有机化合物)、in situ(原位)、metabolism(新陈代谢)、toluene(甲苯)、microbial dechlorination(微生物脱氯)。可见,从 2001 年开始,该领域的研究人员就已针对如何通过微生物的新陈代谢作用来原位去除污染环境中的有机化合物以及利用微生物进

Top 25 Keywords with the Strongest Citation Bursts

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2001 - 2021
organic compound	2001	9.66	2001	2006	
in situ	2001	8.15	2001	2008	
metabolism	2001	7.83	2001	2008	
toluene	2001	6.63	2001	2003	
microbial dechlorination	2001	6.59	2001	2005	
tert butyl ether	2001	9.91	2002	2007	
intrinsic bioremediation	2001	9.44	2002	2008	
hydrogen	2001	6.41	2003	2009	
dispersion	2001	8.66	2004	2009	
carbon isotope fractionation	2001	7.53	2004	2011	
field	2001	7.52	2004	2008	
ferrihydrite	2001	7.18	2005	2012	
plume	2001	6.2	2007	2010	
identification	2001	7.69	2015	2019	
sp. nov.	2001	11.56	2016	2021	
waste water	2001	11.26	2016	2021	
microbial community	2001	9.83	2016	2021	
removal	2001	6.96	2017	2021	
risk assessment	2001	6.26	2017	2021	
bioaugmentation	2001	9.63	2018	2021	
polluted soil	2001	7.69	2018	2021	
personal care product	2001	7.6	2018	2021	
bacterial community	2001	6.72	2018	2021	
remediation	2001	9.41	2019	2021	
contaminated soil	2001	8.61	2019	2021	

图4 WOS核心数据库中“自然衰减”领域关键词突现图(前 25)
Figure 4 Top 25 keyword burst map in the field of natural attenuation from the WOS core database

行脱氯^[13-17]开展研究。其他 8 个突现出的关键词为 tert butyl ether(叔丁基醚)、intrinsic bioremediation(内在的生物修复)、hydrogen(氢)、dispersion(弥散/扩散)、carbon isotope fractionation(碳同位素分馏)、field(场地)、ferrihydrite(水铁矿)、plume(羽流)。对从 2002 年开始陆续出现的 8 个新的突现关键词进行分析可知:在后续发展中,除了原本受到广泛关注的微生物在自然衰减过程中的作用之外,物理作用对自然衰减的贡献也逐渐受到关注。此外,更多研究人员也开始把研究重点放在了更加微观的研究方法或宏观的应用中,如碳同位素分馏技术,该技术可通过在研究微生物对有机物的自然衰减作用程中进行更加微观的研究,同时部分研究人员重点研究了场地污染、大气羽流等方面,表明如何将自然衰减技术应用在实际的污染场地修复中^[18-21]已逐步成为研究热点。

2015—2021 年共突现 12 个关键词,这 12 个关键词中,除 identification(鉴别)外,剩余 11 个关键词一直到 2021 年都是热门研究对象,这 11 个词分别为 sp. nov(species nova,新种)、waste water(废水)、microbial community(微生物群落)、removal(清除)、risk assessment(风险评估)、bioaugmentation(生物强

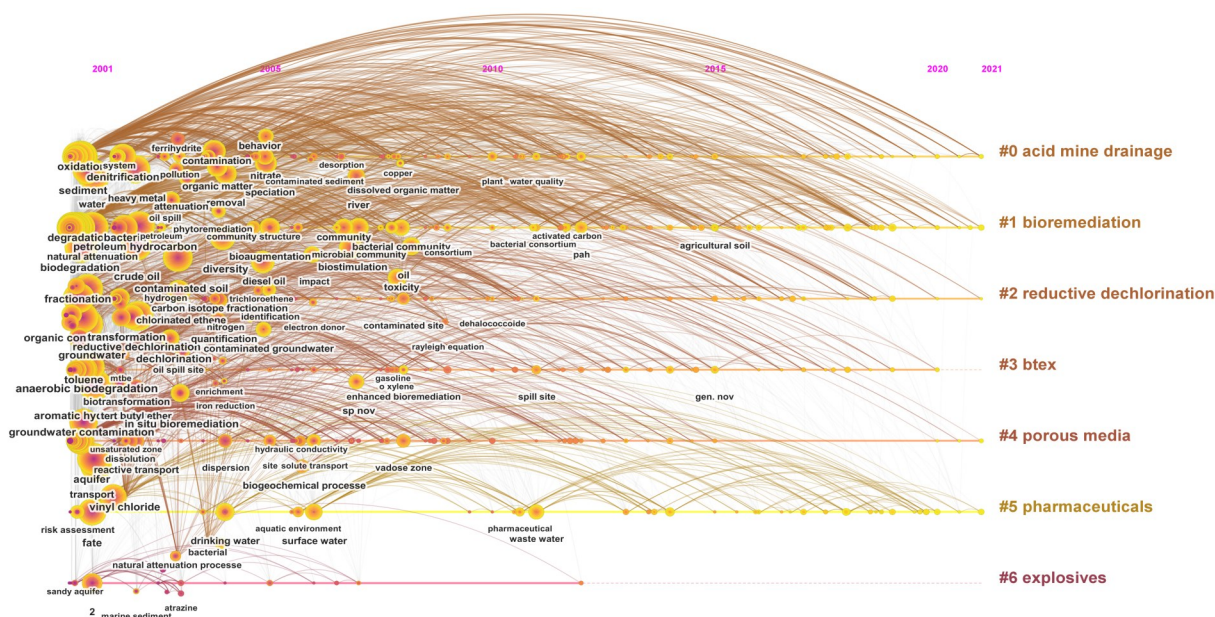


图5 WOS核心数据库中“自然衰减”领域关键词共现时间图谱

Figure 5 Co-occurrence of keywords in the field of natural attenuation from the WOS core database

化)、polluted soil(污染土壤)、personal care product(个人护理产品)、bacterial community(细菌群落)、remediation(修复)、contaminated soil(污染土壤)。这11个突现出的关键词表明,近5年来自然衰减领域内的研究人员开始探索如何通过接种新的细菌种群,或通过生物强化的方式来提高环境中污染物质的自然衰减速率,从而使得,被污染的水或土壤中的污染物质通过自然衰减作用被清除掉,即强化自然衰减^[22-24]。

新兴污染物是近年来的研究热点,突显词中仅个人护理产品这一类新兴污染物被凸显出来,意味着自然衰减技术在新兴污染物中的研究可能首先在个人护理产品领域出现,因此深入理解自然衰减技术在个人护理产品中的研究现状,有利于了解自然衰减技术在新兴污染物治理中的研究现状与未来发展潜力,以personal care product为关键词在2814篇文献所有字段中进行检索,共检索到3篇文献,出版时间分别为2011,2018,2021年。结合图4可知:personal care product突现出的时间区间为2018—2021年,因此对2018、2021年出版的2篇文献其进行重点分析。2018年由Willach等^[25]研究表明,环境微污染物磺胺甲恶唑(SMX)在低、中、高压汞灯和模拟光照条件下的光转化过程。利用特定化合物稳定同位素分析法(CSIA),可以区分工程(如用LP灯的紫外线消毒)和SMX的自然光降解过程,还可以确定阳光

直接光解对SMX等微污染物的自然衰减的影响^[25]。2021年由Zhang等^[26]总结了环境流行率最高的5种抗肿瘤药物(即他莫西芬、环磷酰胺、异环磷酰胺、5-氟尿嘧啶和甲氨蝶呤)的理化性质、自然衰减以及与水氧化物质的化学反应性。综上可知:越来越多研究人员开始关注个人护理产品、药品等新兴微污染物的自然衰减机制。

2.5 主要研究者分析

表2为自然衰减领域近20年来英文发文量排名前10的高产作者及发文情况。在数据库内对发文量排名前5作者的论文进行检索,每位作者被引数最多的论文如表3所示,并逐篇进行分析。Alvarez团队^[27]通过在实验室中模拟北极等敏感的寒冷气候生态系统,在4℃和14℃温度条件下分别测试无任何措施即自然衰减、生物刺激和生物强化3种不同情况下地下水中二噁烷的衰减速率,这是领域内首次报告在北极等敏感的寒冷气候生态系统中,二噁烷生物修复和受污染地下水自然衰减的潜力^[27]。Cozzarelli团队^[28]发表的关于有机污染物在地下水中迁移、转化和降解过程的综述论文,提到对溶解性有机污染物污染羽流的研究已经取得了一定的进展,但在了解物理、化学、生物和水文地质非均质性、孔隙尺度相互作用和混合对有机污染物迁移、转化和降解的影响方面仍然存在挑战,当前研究人员应将目光聚集在地质碳封存、非点源污染、含水层储存和回收、石

油和天然气开发中污染物的迁移以及强化生物修复等问题上。Vogt团队^[29]分析了以硫酸盐为电子受体降解苯的原位反应器中的微生物群落,提出了在硫酸盐还原条件下共养苯降解的功能模型。Ball团队^[30]是在实验室内通过自然衰减、生物刺激、生物强化、生物刺激-强化复合4种方法分别处理从利比亚获取的柴油污染土壤,并观察污染土壤中石油烃的降解情况,结果表明以豌豆秸秆为添加物的生物刺激法对污染土壤中石油烃的降解效果最佳。Hunkeler团队^[31]发表的关于同位素分析方法的综述介绍了连续流同位素比质谱(IRMS)的基本特点,讨论了能够对极性污染物(例如农药或药物)进行同位素测量的策略和最近的进展,特别强调分析环境矩阵中低浓度污染物的可能解决办法,并讨论了有机污染物气相色谱-同位素比质谱(GC-IRMS)中不同级别的校准和引用,指出了建立化合物特异性同位素标准的迫切需要。

表 2 自然衰减领域英文发文量前 10 的作者
Table 2 Top 10 authors by English-language publication volume in the field of natural attenuation

排名	作者	发文量
1	ALVAREZ, PEDRO J J	22
2	COZZARELLI, ISABELLE M	20
3	VOGT, CARSTEN	19
4	BALL, ANDREW S	18
5	HUNKELER, DANIEL	16
6	BEKINS, BARBARA A	15
7	GRATHWOHL PETER	15
8	BJERG POUL L	12
9	GRIEBLER CHRISTIAN	12
10	THORNTON SF	11

对自然衰减领域内最有影响力的 5 位作者的代

表作进行逐篇分析,可以发现自然衰减能够去除 PAHs 等有机污染物、无机盐污染物以及重金属如六价铬、汞等;在利用自然衰减作用将这些污染物从环境中进行转化降解时,研究人员最关注通过生物作用对有机污染物进行快速的自然衰减。未来在研究自然衰减过程中的生物、物理、化学过程时,可将研究重点放在生物主导的自然衰减过程;在众多污染物中,应尽可能地将有机污染物作为研究的特征污染物。

2.6 高被引论文分析

将 2814 篇论文根据被引频次高低进行排序,选择出该领域内被引次数最多,影响力最大的文献,图 6 为自然衰减领域研究文献共被引网络图谱,图中每个节点代表 1 篇高被引文献,节点越大,则表示该文献的被引次数越多。其中,被引次数排名前 5 的论文如表 4 所示,5 篇均为综述文章。由表 4 可知:在该领域内被引次数最多的论文“Environmental applications for biosurfactants”被引 907 次,综述了生物表面活性剂在土壤和水处理中的环境应用,指出生物表面活性剂在自然衰减过程中的作用尚未明确^[32]。排名第 2 的“Nitrate attenuation in groundwater: a review of biogeochemical controlling processes”被引 765 次,其对控制含水层硝酸盐衰减的生物地球化学过程进行了评述:反硝化作用是地下水中主要的硝酸盐衰减过程,反硝化细菌在地表下普遍存在,因此反硝化作用的关键限制因素是氧和电子供体浓度和可用性;其他环境条件的变化,如硝酸盐浓度、养分有效性、pH 值、温度、毒素的存在和微生物的驯化等只对反硝化速率产生次级影响^[33]。排名第 3 的“Chemical and microbial remediation of hexavalent

表 3 WOS 核心数据库发文量排名前 5 作者最高被引论文
Table 3 Most-cited papers of the top 5 authors by publication volume in the WOS Core Database

排序	题目	作者	期刊	发表年份	被引频次
1	1,4-Dioxane biodegradation at low temperatures in Arctic groundwater samples	ALVAREZ, PEDRO J J	Water Research	2010	54
2	Organic contaminant transport and fate in the subsurface: Evolution of knowledge and understanding	COZZARELLI, ISABELLE M	Water Resources Research	2015	74
3	Molecular characterization of bacterial communities mineralizing benzene under sulfate-reducing conditions	VOGT, CARSTEN	Fems Microbiology Ecology	2008	86
4	Bioremediation potential of diesel-contaminated Libyan soil	BALL, ANDREW S	Ecotoxicology and Environmental Safety	2016	40
5	Current challenges in compound-specific stable isotope analysis of environmental organic contaminants	HUNKELER, DANIEL	Analytical and Bioanalytical Chemistry	2012	168

chromium from contaminated soil and mining/metallurgical solid waste: a review”被引用了 569 次,综述了铬的化学性质、用途、毒性和在土壤中的迁移,总结了 Cr(VI)的化学生物修复工艺及修复效果,讨论了铬与不同菌株的相互作用及其对 Cr(VI)的还原能力^[34]。排名第 4 的“Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: current knowledge and future directions”被引 512 次,主要对能够转化降解多环芳烃(PAHs)的真菌、细菌进行了综述与讨论,描述了好氧、厌氧降解的主要途径并重点介绍了一些目前的生物修复技术^[35]。排名第 5 的“Sources and remediation for mercury contamination in aquatic

systems: a literature review”被引 504 次,其通过文献综述对水生系统中汞污染的来源进行研究,结果表明大气沉降、侵蚀、城市排放、采矿、燃烧和工业排放等是主要的污染源,封顶和疏浚可能是有效的修复方法,自然衰减是一种被动的去除污染物的替代方案^[36]。综上可知,自然衰减可去除污染物的范围广泛,既有 PAHs 等有机污染物,又有无机盐污染物如硝酸盐,还有重金属如 Cr(VI)、Hg 等;在利用自然衰减作用将这些污染物从环境中进行转化降解时,研究人员最关注的、对自然衰减过程影响最大的是微生物在自然衰减过程中所扮演的角色。

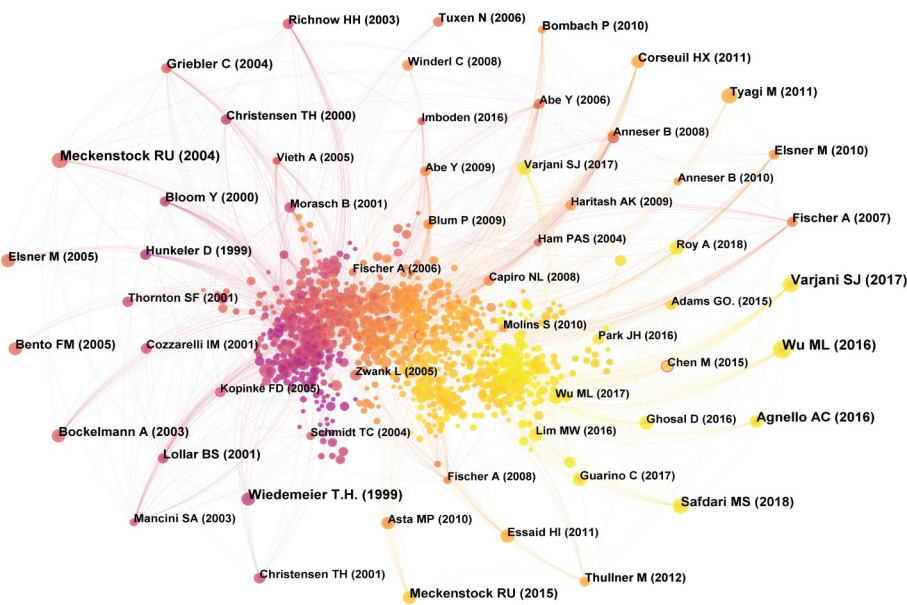


图 6 WOS 核心数据库中“自然衰减”领域共被引文献图谱
Figure 6 Mapping of co-citations in the field of natural attenuation from the WOS core database

表 4 WOS 核心数据库中被引排名前 5 论文
Table 4 Top 5 most-cited papers in the WOS Core Database

排序	题目	作者	期刊	发表年份	被引频次
1	Environmental applications for biosurfactants	MULLIGAN C N	<i>Environmental Pollution</i>	2005	907
2	Nitrate attenuation in groundwater: a review of biogeochemical controlling processes	RIVETT, MICHAEL O	<i>Water Research</i>	2008	765
3	Chemical and microbial remediation of hexavalent chromium from contaminated soil and mining/metallurgical solid waste: a review	DHAL, B	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	2013	569
4	Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: current knowledge and future directions	BAMFORTH, S M	<i>Journal of Chemical Technology and Biotechnology</i>	2005	512
5	Sources and remediation for mercury contamination in aquatic systems : a literature review	WANG, Q R	<i>Environmental Pollution</i>	2004	504

2.7 相关性综述分析

在 WOS 中将 2814 篇论文中的 182 篇综述论文按

照相关性强弱进行排序,排名前 3 的综述论文如表 5 所示。相关性最强的论文“Application of monitored

natural attenuation in contaminated land management: a review and recommended approach for Europe”对 2 种不同的 MNA 概念进行了回顾和综述^[37]:第 1 种是在美国使用的基于风险管控的 MNA 概念,第 2 种是在德国发展的依赖于土壤和地下水保护的预防性原则的 MNA 概念,并对这些概念的优点和局限性进行了讨论并给出了改进建议。排名第 2 的“Performance assessment of bioremediation and natural attenuation”主要围绕生物修复和自然衰减对目标污染物微生物降解效果的评估方法进行综述,并讨论了未来的研究

方向^[38]。排名第 3 的“Importance of heterocyclic aromatic compounds in monitored natural attenuation for coal tar contaminated aquifers: a review”在德国的 3 个地点研究了典型的杂环芳烃(HET)的自然衰减,测定了所有主要污染物(BTEX、PAH 和 HET)的污染羽长度,结果表明所有下游污染物羽流的 HET 浓度都高于典型的多环芳烃浓度,表明与其他煤焦油组分相比,部分 HET 通常具有持久的生物降解特性,这导致 HET 的田间半衰期相对增加^[39]。

表 5 WOS 核心数据库相关性前 3 名综述文章
Table 5 Top 3 most relevant review articles in the WOS Core Database

排序	题目	作者	期刊	发表年份	被引频次
1	Application of monitored natural attenuation in contaminated land management: a review and recommended approach for Europe	RUEGNER, HERMANN	<i>Environmental Science & Policy</i>	2006	49
2	Performance assessment of bioremediation and natural attenuation	ILLMAN, WALTER A	<i>Critical Reviews in Environmental Science and Technology</i>	2009	44
3	Importance of heterocyclic aromatic compounds in monitored natural attenuation for coal tar contaminated aquifers: a review	BLUM, PHILIPP	<i>Journal of Contaminant Hydrology</i>	2012	57

综合上文可知,目前相关性最强的 3 篇综述文章中,分别从 MNA 发展历程入手,围绕美国、德国对 MNA 概念的差异性进行了综述与讨论并提出建议;对自然衰减中微生物降解效果的评估方法以及 HET 的自然衰减特性 2 个方面进行研究及综述。上述文献均从自然衰减领域研究中的具体问题切入,针对微观方向进行综述与讨论,如不同 MNA 概念的优劣及改进措施、微生物降解效果评估方法未来的研究方向、不同污染物质的自然衰减特性等,但它们并未对自然衰减领域整体的发展情况、趋势及研究热点进行综述与讨论。故而本文针对该部分内容进行综述,以期为研究自然衰减领域整体的发展情况、趋势及研究热点的研究人员提供参考。

3 结 论

本文基于 CiteSpace 可视化图谱对自然衰减领域研究的不同国家、机构及关键作者的发文情况,研究进展、热点前沿等进行了全面分析,主要结论如下:

发文情况方面:从发文量和被引频次变化情况可以看出,自然衰减领域的发文量及被引频次一直处于稳步上升阶段,自然衰减领域在 2001—2021 年迎来了飞速发展,尤其是 2021 年,当前论文发表数量(182 篇)与被引频次(9368 次)均达到历史最高水平。从主要研究国家分析结果可知,美国在该领域内影

响力最大,共发文 894 篇,占总发文量的 31.7%,中国发表论文 311 篇,仅次于美国。从主要研究机构分析结果可知,全世界最有影响力的 5 家机构中,3 家为美国科研机构,1 家属于加拿大,1 家属于中国。

研究进展方面:通过突现关键词的变化分析可知,该领域内的研究大致可分为 2 个阶段:第 1 阶段主要研究内容为自然衰减过程本身,如怎样通过微生物的新陈代谢作用进行原位脱氯,以及采用碳同位素分馏技术研究有机污染物自然衰减过程中微生物代谢有机污染物的贡献。当科研人员明确了自然衰减机理后,将研究重点转移到如何更高效利用自然衰减,即如何强化自然衰减当中;第 2 阶段主要研究内容为通过生物刺激(加入优势降解菌种)或生物强化(加入营养物质)的方式来提高环境中污染物质的自然衰减速率,从而缩短污染物自然衰减到标准值以下所需的时间。

未来发展趋势方面:对自然衰减领域内最有影响力的 5 位作者的代表作、被引频次排名前 5 的论文、相关性最强的 3 篇综述进行逐一分析,发现自然衰减能够去除 PAHs、硝酸盐、Cr(VI)、Hg 等不同类型的污染物;在利用自然衰减作用将这些污染物从环境中进行转化降解时,研究人员最关注的是如何通过生物作用对有机污染物进行快速的自然衰减。未

来研究自然衰减过程中的生物、物理、化学过程时,可将研究重点放在研究生物主导的自然衰减过程;在众多污染物中,应尽可能将有机污染物作为研究的特征污染物。

参考文献

- [1] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等. 全国土壤污染状况调查公报探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692.
CHEN N C, ZHENG Y J, HE X F, et al. Analysis on the bulletin of the national general survey of soil pollution [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [2] 周长松,邹胜章,朱丹尼,等. 土壤与地下水污染修复主要技术研究进展[J]. 中国矿业, 2021, 30(增刊2): 221-227.
ZHOU C S, ZOU S Z, ZHU D N, et al. Research progress on the main technologies for remediation of soil and groundwater pollution [J]. China Mining Magazine, 2021, 30(增刊2): 221-227.
- [3] U. S. EPA. Monitored natural attenuation of petroleum hydrocarbons [R]. Washington DC: Office of Research and Development, EPA/600/F-98/021, 1999.
- [4] WILSON K, SEWELL G, KEAN J A, et al. Enhanced attenuation: Its place in the remediation of chlorinated solvents [J]. Remediation Journal, 2007, 17(2): 39-49.
- [5] 李元杰,王森杰,张敏,等. 土壤和地下水污染的监控自然衰减修复技术研究进展[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 1185-1193.
LI Y J, WANG S J, ZHANG M, et al. Research progress on the monitored natural attenuation remediation technology for soil and groundwater pollution [J]. China Environmental Science, 2018, 38(3): 1185-1193.
- [6] SONG Q, XUE Z, WU H, et al. The collaborative monitored natural attenuation (CMNA) of soil and groundwater pollution in large petrochemical enterprises: A case study [J]. Environmental Research, 2023, 216: 114816.
- [7] 周星星,王利刚,姜彬慧. 监控自然衰减技术研究现状及应用进展[J]. 环境保护与循环经济, 2021, 41(5): 71-74.
ZHOU X X, WANG L G, JIANG B H. Research status and application progress of monitored natural attenuation technology [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2021, 41(5): 71-74.
- [8] 李元杰,王森杰,张敏,等. 土壤和地下水污染的监控自然衰减修复技术研究进展[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 9.
LI Y J, WANG S J, ZHANG M, et al. Research progress on the monitored natural attenuation remediation technology for soil and groundwater pollution [J]. China Environmental Science, 2018, 38(3): 9.
- [9] 侯剑华,胡志刚. CiteSpace软件应用研究的回顾与展望[J]. 现代情报, 2013, 33(4): 99-103.
HOU J H, HU Z G. Review and prospect of the application research on Citespace software [J]. Journal of Modern Information, 2013, 33(4): 99-103.
- [10] 李杰,陈超美. CiteSpace科技文本挖掘及可视化[M]. 北京:首都经济贸易大学出版社, 2016: 91-97.
LI J, CHEN C M. CiteSpace: Text mining and visualization for scientific and technological literatures [M]. Beijing: Capital University of Economics and Business Press, 2016: 91-97.
- [11] 张晓晴,李雅,魏珊,等. 基于CiteSpace土壤重金属污染防治的知识图谱研究[J]. 中国农学通报, 2022, 38(4): 133-143.
ZHANG X Q, LI Y, WEI S, et al. a knowledge graph study on the prevention and control of heavy metal pollution in soil based on Citespace [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(4): 133-143.
- [12] LIU K H, GUAN X J, et al. Global perspectives and future research directions for the phytoremediation of heavy metal-contaminated soil: A knowledge mapping analysis from 2001 to 2020 [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2021, 16(6): 1-20.
- [13] KEELEY J W, RUSSELL H H, et al. Monitored natural attenuation of contaminants in the subsurface: processes [J]. Ground Water Monitoring and Remediation, 2001, 21(2): 97-107.
- [14] KHAN F I, HUSAIN T. Risk-based monitored natural attenuation: a case study [J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, 85(3): 243-272.
- [15] FILZ G M, WIDDOWSON M A, LITTLE J C. Barrier-controlled monitored natural attenuation [J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(15): 3225-3230.
- [16] WITT M E. Natural attenuation of chlorinated solvents at Area 6, Dover Air Force Base: groundwater biogeochemistry [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2002, 57(1/2): 61-80.
- [17] PAKDEESUSUK U, LEE C M, et al. Reductive dechlorination of polychlorinated biphenyls in sediment from the Twelve Mile Creek arm of Lake Hartwell, South Carolina, USA [J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 2003, 22(6): 1214-1220.
- [18] HUNKELER D, ARAVENA R. Assessment of degradation pathways in an aquifer with mixed chlorinated hydrocarbon contamination using stable isotope analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(16): 5975-5981.
- [19] HAAAS II, JOSEPH. A Field Application of hydrogen-releasing compound (HRCTM) for the enhanced bioremediation of methyl tertiary butyl ether (MTBE) [J]. Soil & Sediment Contamination, 2001, 10(5): 555-575.
- [20] MECKENSTOCK R U, MORASCH B. Stable isotope fractionation analysis as a tool to monitor biodegradation in contaminated aquifers [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, 75(3/4): 215-255.
- [21] COREUIL H X, MONIER A L. BTEX Plume dynamics following an ethanol blend release: geochemical footprint and thermodynamic constraints on natural attenuation [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(8): 3422-3429.
- [22] DERCOVA K, DUDASOVA H. The hierarchy in selection of bioremediation techniques: the potentials of utilizing bacterial

- degraders[J]. *Chemicke Listy*, 2015, 109(4):281-290.
- [23] KOLHATKAR R. Land application of sulfate salts for enhanced natural attenuation of benzene in groundwater: a case study[J]. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 2017, 37(2): 43-57.
- [24] RAMALINGAM V, CUPPLES A M. Anaerobic 1, 4-dioxane biodegradation and microbial community analysis in microcosms inoculated with soils or sediments and different electron acceptors [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2020, 104(9): 4155-4170.
- [25] WILLACH S, LUTZE H V, ECKEY K, et al. Direct photolysis of sulfamethoxazole using various irradiation sources and wavelength ranges—insights from degradation product analysis and compound-specific stable isotope analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(3): 1225-1233.
- [26] ZHANG S Q, Ye C S. Treatment-driven removal efficiency, product formation, and toxicity evolution of antineoplastic agents: current status and implications for water safety assessment [J]. *Water Research*, 2021, 206.
- [27] LI M, CHATHAM J R. 1, 4-Dioxane biodegradation at low temperatures in Arctic groundwater samples[J]. *Water Research*, 2010, 44(9):2894-2900.
- [28] ESSAID H I, BEKINS B A, COZZARELLI I M. Organic contaminant transport and fate in the subsurface: evolution of knowledge and understanding [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(7):4861-4902.
- [29] SABINE K, JANA B. Molecular characterization of bacterial communities mineralizing benzene under sulfate-reducing conditions[J]. *Fems Microbiology Ecology*, 2010(1):143-157.
- [30] KOSHLAF E, SHAHSAVARI E. Bioremediation potential of diesel-contaminated Libyan soil [J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2016, 133:297-305.
- [31] ELANER M, HOFSTETTER T B. Current challenges in compound-specific stable isotope analysis of environmental organic contaminants [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2012, 403(9):2471-2491.
- [32] MULLIGAN CN. Environmental applications for biosurfactants [J]. *Environmental Pollution*, 2005, 133(2):183-198.
- [33] RIVETT M O. Nitrate attenuation in groundwater: a review of biogeochemical controlling processes[J]. *Water Research*, 2008, 42(16):4215-4232.
- [34] DHAL B. Chemical and microbial remediation of hexavalent chromium from contaminated soil and mining/metallurgical solid waste: A review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 250-251(30):272-291.
- [35] BAMFORTH SM, SINGLETON I. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: current knowledge and future directions [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2010, 80(7):723-736.
- [36] WANG Q. Sources and remediation for mercury contamination in aquatic systems: a literature review[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 131(2):323-336.
- [37] RAGNAR H, FINKEL M, et al. Application of monitored natural attenuation in contaminated land management : A review and recommended approach for Europe[J]. *Environmental Science & Policy*, 2006, 9(6):568-576.
- [38] IILLMAN W A, ALVAREZ P J. Performance assessment of bioremediation and natural attenuation [J]. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*, 2009, 39(4):209-270.
- [39] BLUM P. Importance of heterocyclic aromatic compounds in monitored natural attenuation for coal tar contaminated aquifers: A review[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2011, 126(3/4):181-194.