

基于 CiteSpace 可视化分析环境健康领域中全氟化合物污染的相关研究

郝若楠¹ 古丽米娜·阿力木² 张娜¹ 杨雪丽¹ 王猛^{1*}

1 新疆维吾尔自治区疾病预防控制中心理化所, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市, 830002;

2 新疆医科大学公共卫生学院, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市, 830017;

摘要: 为全面了解环境健康领域全氟化合物污染现状的研究进展、热点及趋势, 基于文献计量学方法, 运用可视化文献分析 CiteSpace. 6. 3. R1 软件对纳入的文献进行可视化分析。分析结果: 经筛选后共纳入 553 篇相关文献, 发文量大致呈现递增趋势, 研究作者大概形成 14 个团队, 研究机构多为高校和科研研究所。本文通过检索 2002 年-2024 年期间中国知网收录关于全氟化合物的毒理特性、污染现状和分析方法等研究论文, 旨在为今后全氟化合物的环境健康和检测分析研究提供参考, 给由其造成的环境损害及鉴定提供依据, 对生态环境的监测监督提供参考。

关键词: 全氟化合物; 环境健康; 污染; 可视化分析

DOI:10. 69979/3041-0673. 25. 03. 042

全氟化合物 (Perfluorinated compounds, 简称 PFCs) 是一类人工合成的有机污染物, 其中氟取代了长碳链中的所有氢原子。PFCs 中最典型的两个污染物: 全氟辛酸 (PFOA) 和全氟辛基磺酸 (PFOS) 是上百种含氟化合物的最终分解产物^[1,2]。PFCs 结构中具有水溶性官能团, 在水中溶解度较大 (PFOA 为 4.7g/L, PFOS 为 570mg/L), 在水体中能够长期存在, 进入水环境中的 PFCs 会被土壤吸附、富集, 而大气环境中的 PFCs 则通过干湿沉降过程, 最终进入土壤和水环境中, 每个过程都如此循环, 从而影响整个生态环境^[2,3]。PFCs 结构中 C-F 化学键具有高化学稳定性、耐热性、疏水疏油性和较大的表面张力等物理化学性质, 被大量使用于纺织品、食品包装、表面活性剂和其他类消费产品中^[4,5]。广泛的应用导致人们在陆地生态系统、水生生态系统、生物体中均检测到 PFCs 的存在, 反映其污染的普遍性和持续性^[6]。PFCs 还具有包括细胞毒性在内的多种毒理特性, 对自然界中各类生物体的存在带来环境健康威胁^[7]。因此, 有关 PFCs 污染的研究受到人们的广泛关注, 本文通过检索 2002 年-2024 年期间中国知网收录关于环境健康领域全氟化合物污染的相关研究, 为未来的研究趋势和热点提供参考。

1 资料来源及研究方法

1.1 资料来源

以中国知网 (CNKI) 为数据库, 以“全氟化合物 (PFCs)”、“环境污染”与“污染现状”为主题进行检索, 设定学术期刊跨度为 2002 年-2024 年, 检索日期为 2024 年 12 月 31 日。排除不相关的文献, 最终纳入 553 篇, 进行可视化分析。

1.2 研究方式

使用 CiteSpace. 6. 3. R1 软件对筛选后的文献进行可视化分析, 通过绘制作者合作、机构合作、关键词共现、突现词汇等网络图谱, 分析目前环境健康领域全氟化合物的污染现状, 并进行简单的计量分析, 了解该领域的研究力量、发展动态和热点趋势。通过参数调节设置来获取效果最佳的可视化分析图谱。用于计算模块性指数 Q 值 (Modularity Q) 和聚类轮廓性指数 S 值 (Mean Silhouette)。当 Q 值 > 0.3, 说明聚类图谱划分出的色块结构是显著的; 当 S 值 > 0.5, 说明聚类图谱是合理的; 当 S 值 > 0.7, 说明聚类图谱是高效率的, 具有说服力的。通过普赖斯定律对核心作者 (基于最高发文量作者的发文数) 进行分析, 当作者发文量超过最低发文量时, 该作者可以称为该领域内的核心作者^[8], 计算公式为 $N=0.749 \times \sqrt{N_{max}}$, 其中 N 是该领域内核心作者最低发文量, N_{max} 是该领域内最高产作者的发文量^[9]。

2 结果

2.1 文献发表时间分布

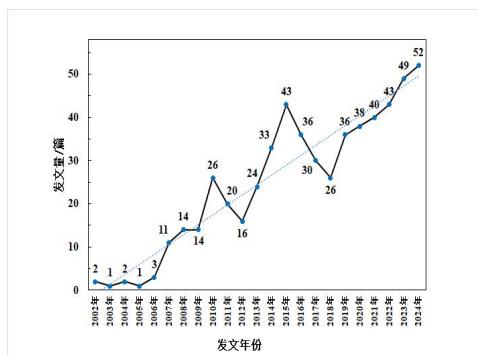


图 1 发文量统计

图 1 显示, 近二十多年来, 我国在 PFCs 的污染现状研究领域的理论水平和发展情况可大致分为 2 个阶段: 2002–2006 年是属于该研究领域的初步探索阶段, 该阶段发文量低; 从 2007 年至今, 该研究领域的发文量呈现波动性上升总趋势。截止目前, 2024 年有关 PFCs 污染状况的研究性文章发文量最高。

2.2 作者分析

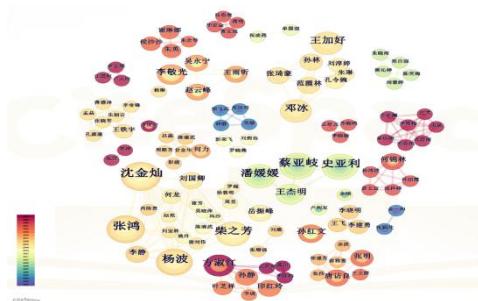


图 2 作者合作网络共现图谱

作者合作网络共现图谱 (见图 2) 显示, 共形成 25 4 个节点, 364 条连线, 网络密度为 0.0113。其中发文量前三分别为沈金灿 (13 篇)、张鸿 (12 篇) 和杨波 (11 篇), 发文量 ≥ 7 篇的作者共有 10 人 (见表 1)。从作者共现图谱可得出, 主要研究团队 (≥ 4 人) 有 14 个, 每个研究团队内部间合作联系密切, 但各个团队间合作却不多, 得出大多数研究团队都是相对独立的。

表 1 发文量 top10 的作者

序号	数量 (篇)	年份	姓名
1	13	2013 年	沈金灿
2	12	2013 年	张鸿
3	11	2013 年	杨波
4	11	2006 年	蔡亚岐
5	10	2007 年	史亚利
6	9	2008 年	潘媛媛
7	9	2013 年	柴之芳
8	8	2014 年	王加好
9	8	2014 年	邓冰
10	7	2019 年	方淑红

2.3 研究机构分析



图 3 机构合作网络共现图谱

把软件 CiteSpace 节点类型设置成研究机构 (Institution), 绘制出合作研究机构网络图谱。表 2 中是对发文量 ≥ 7 的机构进行统计有 10 所, 分别为: 中国科学院大学 (14 篇)、深圳大学物理科学与技术学院 (12 篇)、深圳出入境检验检疫局食品检验检疫技术中心 (12 篇)、中国科学院高能物理研究所 (10 篇)、中国科学院生态环境研究中心环境化学与生态毒理学国家重点实验室 (9 篇)、中国科学院生态环境研究中心 (9 篇)、深圳大学生命科学学院 (8 篇)、深圳大学化学与化工学院 (8 篇)、贵阳医学院医学心理学教研室 (7 篇) 及成都信息工程大学资源环境学院 (7 篇)。这 10 所机构共发 96 篇, 占纳入统计发文量的 17.8%。合作机构共现图谱 (图 3) 共形成 179 个节点, 79 条连线, 网络密度为 0.005, 图谱中每个节点代表 1 所机构, 节点的大小代表机构发文量的多少。因此, 中国科学院大学的节点最大, 其次是深圳大学物理科学与技术学院和深圳出入境检验检疫局食品检验检疫技术中心。连线代表机构间的合作关系, 连线的粗细表示合作的强弱, 由图 3 可知, 各机构节点间连线较少且之间连线较细。

表 2 发文量 top10 的机构

序号	数量 (篇)	年份	机构
1	14	2013 年	中国科学院大学
2	12	2013 年	深圳大学物理科学与技术学院
3	12	2013 年	深圳出入境检验检疫局食品检验检疫技术中心
4	10	2012 年	中国科学院高能物理研究所
5	9	2007 年	中国科学院生态环境研究中心环境化学与生态毒理学国家重点实验室
6	9	2006 年	中国科学院生态环境研究中心
7	8	2013 年	深圳大学生命科学学院
8	8	2013 年	深圳大学化学与化工学院
9	7	2014 年	贵阳医学院医学心理学教研室
10	7	2019 年	成都信息工程大学资源环境学院

2.4 关键词分析

2.4.1 共现分析



图4 关键词共现图谱

关键词是文章的核心词，是可以概括和提炼文章的中心，高频关键词可反映出研究领域的重点和方向[10]。图4中共现图谱显示关键词节点有300个，连线数292条，节点越显现突出且越大，说明所指代的关键词频次越高且热度也高；连线数越粗说明关键词之间联系越紧密^[11, 12]。关键词的频次及中心性排名如表，频次前三的关键词：全氟辛酸（50）、固相萃取（23）、污染特征（23），中心性较高的是吸附（0.43）、全氟辛酸（0.37）、毒性（0.18）。PFCs是一类有机污染物，可通过土壤、水、包装材料等途径进行传播，污染生态系统和生产资料，造成人体健康危害，其典型代表物主要为全氟辛酸（PFOA）、全氟辛基磺酸（PFOS），这两种标志物恰好是反映了PFCs研究热点的污染物^[13-15]，与之前的研究分析相一致。

表3 关键词和中心性统计

序号	关键词	频次	中心性	年份
1	全氟辛酸	50	0.37	2007年
2	固相萃取	23	0.08	2009年
3	污染特征	23	0.12	2015年
4	风险评估	17	0.06	2016年
5	土壤	17	0.04	2010年
6	吸附	14	0.43	2007年
7	污染水平	13	0.15	2012年
8	毒性	11	0.18	2002年
9	检测	11	0.06	2008年
10	分析方法	8	0.16	2011年

2.4.2 聚类分析

将关键词进行聚类分析可以得出该研究领域的热点话题。经过网络模块分析，图谱显示模块聚类值（Q）=0.8887，大于0.3，我们认为聚类结果显著；平均轮廓值（S）=0.9747，大于0.7，聚类结果是合理，说明该聚类是高效率且具有说服力的^[16]。如图5中，聚类主要得到12个大小、颜色不同的集群，前六个出现频数较

高的分别是#0 全氟辛酸、#1 吸附、#2 去除技术、#3 毒性、#4 污染水平、#5 污染特征，图中重叠部分说明相互之间联系密切。



图5 关键词聚类分析

在CiteSpace中，关键词聚类时间线图谱是指时间线功能对各个聚类演变的时间跨度进行展现的。由图6可知，综合聚类标签和分布情况来看，关键词分布较为均匀，说明该领域一直受重视，这与人们的认知和科研水平进步是密不可分的。#0全氟辛酸、#1吸附、#2去除技术，关键词出现频次较多，说明在该研究领域中占据重要位置，而对于PFCs污染控制技术应用范围最广的就是吸附处理，此法操作简单且经济适应性高。观察图中关键词的出现，PFCs污染情况从2002年就有报道且持续至今，说明我国在PFCs带来的污染风险是一直存在的，且我国环境中PFCs的污染分布广泛^[17, 18]。

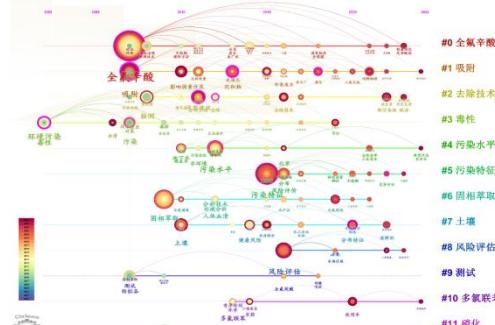


图6 关键词时间线聚类图谱

2.4.3 突现分析

为掌握某领域的研究趋势，在限定的时间段里，可用关键词突现分析来得出。图7是关键词突现图谱，图中深色横线部分代表该关键词突现的年份和持续时间。环境污染和毒性是突现出现时间内最早的关键词，且持续时间较长。从突现的18个关键词中发现，污染类的词汇占据三分之一的关键词量，说明自2002年开始我国研究人员一直在关注PFCs的污染情况，人们也将越来越重视PFCs对环境和人体的危害^[19]。

Top 18 Keywords with the Strongest Citation Bursts



图 7 关键词突现

3 讨论与分析

3.1 发文量与国家逐步重视相关

对 2002 年-2024 年有关 PFCs 研究的文献进行统计分析发现，此领域发文量呈现波动性上升，说明我国越来越重视新型污染物监测和治理工作，与中共中央、国务院发布的重点管控新污染物治理发展的一系列行业政策息息相关，如“十四五”规划中新出现了一个环境概念—新污染物、《重点管控新污染物清单 2022 版》、重点管控新污染物清单（2023 年版）、《新污染物生态环境监测标准体系表（2024 年版）》等，表明自“十四五”规划中提出新污染物监测指标“全氟化合物”后，党和国家更加重视新污染物的治理，重视新污染物评估治理体系建设。国家对生态环境监测标准体系不断加强管理，制定一系列新污染物治理行动方案，切实保障生态环境安全和人民健康，发文量也随着国家和研究人员的重视而逐渐递增。

3.2 PFCs 的污染问题获得持久关注

通过关键词突现图谱可以看出，在 2002 年出现“环境污染”一词，之后不断涌现出“污染”、“污染水平”、“污染特征”、“污染现状”这些类似词汇，可以看出 PFCs 污染问题一直以来都备受关注，且科研者一直都在研究新技术来治理其带来的生态环境污染状况^[20-22]。但因 PFCs 具有疏水、疏油等结构特殊和化学性质稳定，是一类持久性新型有机污染物，国家在其治理上是一个论持久战的过程。

3.3 需加强本领域间的多方合作

从作者合作和发文机构合作网络分析中可以看出，该领域的研究主要集中以高校为中心，作者合作模式是相对独立的团队，之间联系甚少。发文机构之间中心性分析，发现有 99% 的机构中介中心性为 0，说明跨机构的合作交流不足够紧密，此领域学术共同体并未形成规模，未来本领域的多方合作还需要全面加强。

3.4 研究热点与未来研究趋势

从有关 PFCs 研究的文献进行统计分析发现，PFCs 研究领域重点已经从研究 PFCs 的毒性危害、提取方法，向 PFCs 对环境污染的状况和对人体健康风险评估研究的转变^[23, 24]。PFCs 由于在我国应用广泛，前期此类产品的大量生产和使用过程中会逐渐释放到空气、土壤、水体和人体中，目前已在水体环境、陆地环境、大气环境、人体环境等各种介质中都能检测到 PFCs 的存在，并且 PFCs 的污染已经成为全球性的重点关注问题^[25]。PFCs 可通过食物链富集在生物体内，通过食物网进行传递，对整个全球的生态系统造成潜在的风险，并且这类物质与人体内蛋白质结合，在一定条件下引起人们多种身体健康问题^[26]。因此，我国亟需制定相关法律法规，遏制 PFCs 的生产和排放，应进一步加强生物介质中 PFCs 含量的监测和各环境体系中 PFCs 使用的管控，从而更好地控制 PFCs 对环境体系、人体健康的影响。因此，绿色健康化学品材料的安全可替代性也刻不容缓，需要更多的科研工作者共同努力。

4 结语

随着国家对环境监测力度不断增强，制定系列新污染物治理行动方案，切实保障生态环境安全和人民健康。但目前 PFCs 的污染预防治理和实时监测仍有许多亟待解决的问题，特别是我国对 PFCs 的研究起步较晚，相关理论研究尚显不足。因此在国家重点管控新污染物治理发展的政策要求下，要鼓励多行业、多部门研究者联合进行深入研究其动力学机理、暴露途径、环境迁移等方面，对应相关领域限量标准能全面覆盖。未来加强 PFCs 研究工作的纵深和广度无疑是我国科研工作者所面临的迫切问题。

参考文献

- [1] 魏立娥, 丁光辉, 魏媛媛, 等. 典型全氟化合物(PFCs)

- 的降解与控制研究进展[J]. 环境科技, 2015, 28(3): 5.
- [2] 王若男, 史箴, 胡倩, 等. 四川省地市级饮用水源地全氟化合物污染状况调查研究[J/OL]. 环境化学, 2025, 1-11.
- [3] 孙丽莎, 陆光华, 叶秋霞, 等. 全氟化合物的分布, 累积及生态毒理学效应[J]. 四川环境, 2012, 31(2): 5.
- [4] Lin Y M, Sun J N, Yang X W, et al. Fluorinated magnetic porous carbons for dispersive solid-phase extraction of perfluorinated compounds. [J]. Talanta, 2022, 252: 123860-123860.
- [5] Cai Y P, Wang Q Y, Zhou B H, et al. A review of responses of terrestrial organisms to perfluorinated compounds[J]. Science of the Total Environment, 2021, 793: 148565.
- [6] Li P P, Zhi D, Zhang X X, et al. Research progress on the removal of hazardous perfluorochemicals: A review[J]. Journal of environmental management, 2019, 250: 109488.
- [7] Song J H, Song J, Zhang R, et al. Study on interaction, feedback, and response between perfluorinated compounds and soil environments[J]. Emerging Contaminants, 2024, 100428.
- [8] 宋瑞新, 耿柳娜. 人与自然和谐共生研究热点与前沿分析——基于 CiteSpace 软件的可视化研究[J]. 生态经济, 2024, 40(09): 221-226.
- [9] 丁学东. 文献计量学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 1993.
- [10] 曾灿, 李碧涵, 刘逸文, 等. 基于 CiteSpace 对近十年镉中毒研究文献的可视化分析[J]. 山东化工, 2024, 53(02): 201-205.
- [11] 贲航, 张一凡, 王佩文, 等. 基于文献计量的菊粉研究进展分析[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-13[2024-12-24].
- [12] 吴佳楠, 梁颖诗, 胡扬晖, 等. 基于 CiteSpace 可视化分析 8-羟基脱氧鸟苷的相关研究[J]. 广东医科大学学报, 2024, 42(01): 10-17.
- [13] 李健, 张海东, 王修保, 等. 环境中全氟和多氟烷基化合物分析方法研究进展 [J]. 化学试剂, 2024, 46(1): 17-26.
- [14] 李飞, 沈春花, 赵志领. 全氟化合物检测、污染、来源及迁移研究现状[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2011, 25(04): 30-35.
- [15] 齐鹏, 苏日古嘎, 杜艳青, 等. 全氟化合物的污染现状和检测技术的研究进展[J]. 化学世界, 2021, 62(03): 137-143.
- [16] 荣康丽, 张虎彪. 国内垃圾分类治理研究现状、热点主题及发展趋势——基于 CiteSpace 可视化分析[J]. 环境保护科学, 2024, 50(01): 1-8.
- [17] 吴坤, 周贻兵, 赵君. 全氟化合物最新检测及去除方法研究进展[J]. 贵州师范学院学报, 2023, 39(12): 29-36.
- [18] 黄金鑫, 令狐文生. 全氟化合物检测的前处理技术研究综述[J]. 绍兴文理学院学报(自然科学), 2015, 35(08): 22-25.
- [19] 李兵, 马浩天, 贲克明, 等. 全氟化合物的污染现状及分析方法研究进展[J]. 中国司法鉴定, 2022, (06): 48-56.
- [20] 吴思寒, 赵楠, 曹丝雨, 等. 环境介质中全氟和多氟化合物分析方法研究进展[J]. 环境保护与循环经济, 2023, 43(09): 66-71.
- [21] 季钰浩, 林子增, 王方方. 全氟化合物水处理技术研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(12): 3688-3693.
- [22] 韩亚萌, 郭丽莉, 王蓓丽, 等. 水环境中全氟化合物的传感检测方法研究进展[J]. 环境化学, 2023, 42(09): 3112-3124.
- [23] 刘艳艳, 夏秀峰, 许楷, 等. 全氟化合物污染风险控制研究进展[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2019, 41(05): 491-496.
- [24] 田洛嘉, 张誉, 张静, 等. 四川省猪肉与鱼肉全氟化合物污染水平和膳食暴露评估[J]. 毒理学杂志, 2024, 38(03): 215-220+226.
- [25] 宋彦敏, 周连宁, 郝文龙, 等. 全氟化合物的污染现状及国内外研究进展[J]. 环境工程, 2017, 35(10): 82-86.
- [26] 吴晓妍, 廖佳. 全氟化合物的环境污染及检测方法[J]. 化学世界, 2021, 62(01): 8-13.

作者简介: 郝若楠(1994-), 女, 硕士, 助理实验师, 从事理化检验工作。

通讯作者: 王猛, 男, 博士, 高级实验师, 从事理化检验工作。