

翟全德,张瑞雪,吴攀,等. 基于 CiteSpace 可视化的镉污染研究进展[J]. 江苏农业科学,2020,48(4):23-32.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.04.004

基于 CiteSpace 可视化的镉污染研究进展

翟全德¹, 张瑞雪^{1,2}, 吴攀^{1,2}, 肖艳桐¹

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州省普通高等学校矿山环境污染过程与控制特色重点实验室, 贵州贵阳 550025)

摘要:相对于其他重金属,镉作为一种污染物质进入人们的视野较晚,但由于镉的毒性和可能造成的环境风险,镉作为一种污染物已逐渐引起重视。当前,关于镉污染研究进展的文章较少,为了进一步了解镉污染领域的研究现状和热点进程,本文基于 CiteSpace 软件,对从 Web of Science 核心数据库集检索到 1986—2019 年期间有关镉污染的 2 303 篇文章进行分析统计,从发文数量、研究主题、关键文献、研究热点及主要研究力量进行可视化分析。结果表明,自 2000 年以后,有关镉污染的文献逐年增加;且每个时期对镉污染的研究主题不同,镉污染先后经历了来源研究、各环境介质中镉迁移转化、镉污染防治及其风险评估等。每个时期研究主题的不同导致了对于镉污染的研究热点也不同,而当前对镉污染的研究热点趋于对镉污染的治理技术及其对人类生活带来的健康风险。我国发表的关于镉污染研究的文章远多于其他国家,但发文质量还有待进一步提高。

关键词:镉污染;CiteSpace 可视化;研究趋势;研究热点

中图分类号:X502 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)04-0023-10

自从镉在 20 世纪 90 年代被认为与婴儿猝死综合征有关^[1],就进入了公众视野并引起关注,镉(Sb)作为一种全球性污染已经被列为优先控制污染物^[2]。中国镉资源丰富,储量占全世界 80% (U. S. Geological Survey,2013 年),年产量超过 15 万 t,许多地区如云南、湖南、贵州等地由于镉矿的大量开采使得当地环境受到不同程度的镉污染^[3]。国内外关于镉在环境方面的文章,主要集中在镉污染的程度、镉迁移转化过程、毒理学研究、镉污染风险

评价以及全球循环等。随着镉在环境相关领域的文献大量涌现,有必要对镉环境污染的知识现状进行梳理和总结,从而了解镉污染的研究历程并掌握其现阶段研究方向和未来发展趋势。现阶段关于镉污染综述研究的文章主要侧重在镉的某一研究领域,如镉在单一环境介质中的污染、镉对植物的毒性研究等方面,缺乏从宏观领域研究镉在环境中的现状、前沿热点和主题演进等分析。CiteSpace 是在科学计量法和数据可视化分析条件下发展起来的一个引文可视化软件,可以分析某领域文献的研究热点、演变情况等^[4]。相关学者已经将 CiteSpace 运用于经济学^[5]、生态学^[6]、土壤科学^[7]等领域进行文献分析。本研究运用 CiteSpace 软件,采用定性和定量相结合的方法,对 1986—2019 年 Web of Science 核心数据库收录的关于镉污染文献的相关研究进行全面分析,旨在用科学直观的方法来展示

收稿日期:2019-08-01

基金项目:国家自然科学基金委员会-贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目(编号:U1612442)。

作者简介:翟全德(1993—),男,贵州毕节人,硕士研究生,主要从事环境科学与工程方面研究工作。E-mail:893552328@qq.com。

通信作者:张瑞雪,硕士,副教授,主要从事环境科学与工程的教学与科研工作。E-mail:zhangxuer7908@126.com。

[52] Chen J H, Quan M Y, Zhang D Q. Genome-wide identification of novel long non-coding RNAs in *Populus tomentosa* tension wood, opposite wood and normal wood xylem by RNA-seq[J]. *Planta*, 2015, 241(1):125-143.

[53] Wang X, Ai G, Zhang C L, et al. Expression and diversification analysis reveals transposable elements play important roles in the origin of *Lycopersicon*-specific lncRNAs in tomato[J]. *New Phytologist*, 2016, 209(4):1442-1455.

[54] Mercer T R, Dinger M E, Mattick J S. Long non-coding RNAs:

insights into functions[J]. *Nature Reviews Genetics*, 2009, 10(3):155-159.

[55] Zhu Q H, Wang M B. Molecular functions of long non-coding RNAs in plants[J]. *Genes*, 2012, 3(1):176-190.

[56] Rinn J L, Chang H Y. Genome regulation by long noncoding RNAs[J]. *Annual Review of Biochemistry*, 2012, 81:145-166.

[57] Au P C, Zhu Q H, Dennis E S, et al. Long non-coding RNA-mediated mechanisms Independent of the RNAi pathway in animals and plants[J]. *RNA Biology*, 2011, 8(3):404-414.

锑污染相关领域的研究热点、趋势等。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

数据来源于 Web of Science 的核心数据库集,在 2019 年 7 月,数据检索有关锑污染的文献,检索词为“antimony pollution”“antimony pollute”“antimony contamination”“antimony contaminate”“Sb pollution”“Sb pollute”“Sb contamination”“Sb contaminate”,条件为主题,时间段为 1986—2019 年,8 组检索词累积检索到 2 303 篇文章。

1.2 研究方法

CiteSpace 是由美国费城德雷克塞尔大学信息科学与技术学院陈超美博士基于 Java 语言系统所研发的应用程序,它可以分析作者、机构、国家、关键词、期刊或科学文献引用之间的联系,基于分时动态的可视化图谱展现学科领域的宏观结构和发

展脉络,从而对某一领域知识的所有内容、发展趋势、研究热点和前沿方向进行表征^[8]。本研究选用 5.3 版本的 CiteSpace 软件(5.3. R4),对在 Web of Science 核心数据库搜索生成的完整 2 303 篇文章进行可视化分析。

2 结果与分析

2.1 发文数量分析

发文数量可以从侧面反映某研究领域的发展速度,在 Web of Science 上检索锑污染相关文献的发文数量与时间进行绘图,并与中国知网(CNKI)上检索到关于锑污染的文章进行对比,对比结果如图 1 所示。锑在 20 世纪 90 年代中期才作为一种污染物进入人们视野,所以在此之前关于锑污染研究的文章极少,自 21 世纪起,核心数据库中锑污染相关文章逐年上升,2008 年后快速增加,说明锑污染研究逐渐受到关注并快速发展起来。

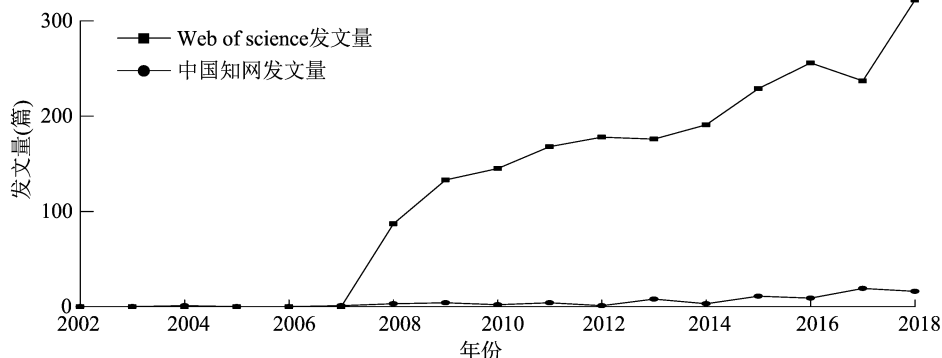


图1 发文量与发文时间对比

2.2 研究主题分析

文献被引分析的前提是同一篇论文的参考文献间秉承同一研究脉络或有相似的研究主题,因此对原始的参考文献进行共被引网络聚类可以得到细分的主题。本研究共导入 2 303 篇参考文献,得到 76 434 篇被引参考文献,对其进行聚类得到主题,绘制时间线图,图 2 为文章聚类节点较多的前 14 个聚类主题。

2.2.1 锑污染研究初始阶段 文献聚类识别由 CiteSpace 自动生成,它可以高度客观地反映特定学科的研究热点^[9]。研究持续时间的长短,可以客观体现锑污染的热点研究主题以及研究价值。从图 2 可以看出,2000 年以后,研究人员对锑污染的研究逐渐增多,在初始阶段,锑污染研究集中在大气污染,该阶段包含了 3 个聚类主题,即#1 大气颗粒物、#4 大气中的锑、#12 焚烧空气污染控制(apc)残留

物。由于对锑污染的研究甚少,缺乏数据支撑,大多数研究人员使用锑的地壳浓度值和岩石的基准元素来计算大气气溶胶中锑的富集情况。Krachler 等通过研究北极冰芯中的锑,从而探索 16 000 年以来北极大气锑沉积的完整数据,结果表明,由于人类工业活动,使得大气气溶胶中的锑含量增加,并且这些气溶胶会从工业国家远距离运输进入地球的偏远地区,如北极。因此,Sb 应该被认为是一种全球性的大气污染物^[10]。随后 Canepari 等通过化学分馏的方法研究大气颗粒物中重金属,区分大气颗粒物中重金属元素^[11],对大气中重金属的来源有重要的指导作用。早期对大气锑污染的研究阐明了其来源,表明锑应该作为一种污染物质受到关注并且重视,为之后的锑污染奠定了基础。

2.2.2 锑污染研究细化阶段 在经历早期阶段后,锑污染受到研究人员的广泛关注,其研究方向逐渐

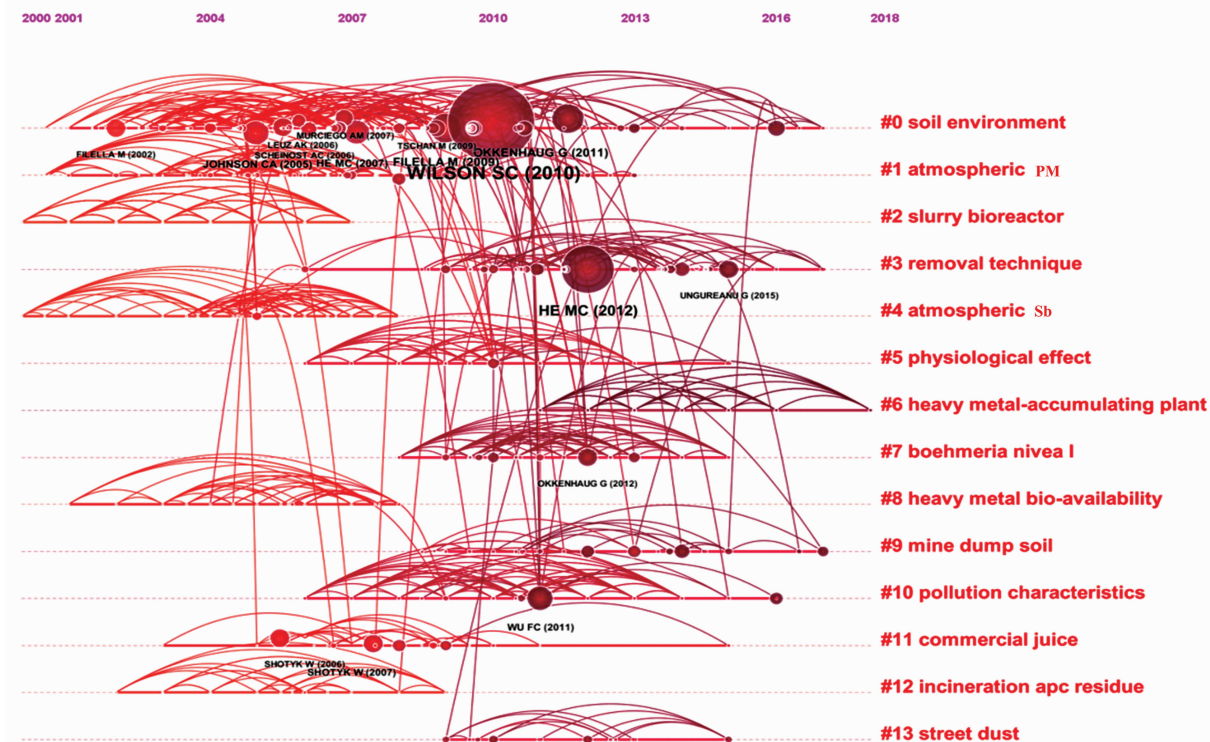


图2 文献共被引时间线

转向水体、土壤和植物。该阶段包含了 5 个聚类主题,分别为#0 土壤环境、#5 生理作用、#8 重金属生物有效性、#9 矿山废弃土、#10 污染特征、#11 商业果汁、#13 街道尘土,其中土壤镉污染经历的时间跨度最长,土壤镉污染的研究涉及范围广。在该阶段,对镉污染的研究逐渐细化且多元化,其研究包含了镉在水-沉积物、土壤-植物体系的浓度及其检测、形态、地球化学行为、毒理等:

(1) 镉在环境中浓度和形态对其在环境中的循环、毒性、行为和生物有效性有很大影响。镉在地表水、土壤和沉积物中的浓度已经被相关学者进行了全面的总结分析,并得出未受污染的海洋、土壤和沉积物的镉浓度的背景含量^[12]。虽然目前总镉含量的研究不再困难,但仍然存在 2 个问题:镉样品污染和技术检测极限。镉样本污染主要是测定样品中某些物质干扰仪器,导致分析信号有误以及采用含镉容器如 PET 材料盛放样品所导致;除了样品污染问题,对于镉含量极低的样品,仪器灵敏度是一个重要的挑战。

(2) 镉形态研究是镉污染研究的重要分支。镉形态研究主要包括镉形态测量研究、不同环境中镉主要存在形态及形成机制、影响因素等^[13]。形态测量的目的是为了明确其在系统中形成的所有化学

形态,镉形态测量研究从提取到分析整个过程具有很大的挑战性。如何从环境样品中提取镉且不改变其原有形态是形态研究热点,如对于水样中镉如何区分其 2 种氧化态、土壤样品中镉的萃取和连续提取、大气中镉的存在形态以及生物样品中如何提取镉。其中,镉在土壤环境中的化学浸出方法是研究土壤镉形态的一个重要方法。迄今为止,镉从样品到分析过程仍然没有一种公认的测量方法,这意味着各种分析工具仍然需要改进。镉在环境中的形态主要是 $Sb(V)$ 、 $Sb(III)$ 、 $Sb(0)$ 以及 $Sb(-III)$,镉在环境中的无机态比有机态更为普遍,镉在土壤环境中主要存在的形态为 $Sb(III)$ 和 $Sb(V)$ ^[13-14]。环境中常存在的 Sb 形态物质在 Li 等的研究中已经被列举^[15]。镉在环境中存在的形式受到多种因素的影响,如镉在土壤介质中的存在形式主要取决于土壤理化性质、吸附解析过程及是否无机或有机配体的存在。

(3) 镉在各介质中的吸附解吸、氧化还原、溶解沉淀及生物有效性等行为是其毒理学和污染风险研究的基础。目前关于镉在环境中的行为效应和循环方面的研究仍有很大的不足^[16],如哪些化学形式的镉更具有移动性和生物有效性等。镉的污染过程与砷相似,因此镉环境行为的研究经常参照砷

在环境中的行为效应。在这类比较研究中,的确得到了一些关于锑在环境中的行为效应,但这种比较研究也并不总是有效,如 Gebel 就证明砷在生物系统中可以通过甲基化进行解毒,而得不出锑也同样发生该过程的证据^[17]。锑在土壤-植物-水系统中的迁移转化过程及其机制研究越来越受到关注,由于溶解态锑易被植物所吸收^[18],它如何通过土壤介质转换到环境中,在植物尤其是可食用植物体内如何吸收、转化和积累等过程对了解锑污染十分重要,但这方面的研究和数据很少。研究表明,锑在植物的各部分(从根部到果实)都有分布^[19]。

(4)作为一种具有潜在毒性的元素,锑的毒理学研究也十分重要,锑毒理学研究主要包括锑毒性测试、锑毒性机制研究以及锑污染区生态学毒性研究等方面,其中锑污染所造成的人体毒理危害是锑污染的重要研究热点。确定污染物所造成的环境风险和人体风险是研究污染的重要一环,也是污染物防控和管制的基础。虽然锑被认为是具有重大潜在毒性的物质,但由于缺乏毒理学效应和毒性数据的支撑,它所造成的污染风险尚不明确^[20]。因职业接触锑化合物而引起的健康影响,由于 Sb、Pb 和 As 之间的共同关联而难以辨别,而现在可以用可靠的方法来测量人体的血液,未来可能会发展评估暴露和未曝光人群的监测工具。此外,锑常用于阻燃剂(弹药中的 Pb-Sb 合金),使得射击场锑污染情况严重^[21];电子垃圾回收场地附近的土壤中也发现锑等重金属污染^[22]。

2.2.3 锑污染研究治理阶段 污染物研究的最终目的是为了对污染物质的治理。该阶段包含了 3 个聚类主题(#2 泥浆生物反应器、#3 去除技术、#6 重金属富集植物、#7 苎麻)。随着锑污染的不断扩大,锑污染严重地区的政府和相关学者开始开展锑去除方法和技术的相关研究。由于锑和砷的污染性质相近,因此用于砷去除的修复技术也常用于锑的处理,并且往往会取得良好的效果。目前,锑污染治理技术主要包括氧化固定技术、吸附技术、电解技术、膜分离技术等^[23]。

每种治理技术有其各自的优缺点,如何选择适合的方法须要与实际的污染场地相结合。目前,土壤锑污染治理技术主要有氧化和固定技术、土壤清洗技术。其中氧化和固定技术主要包括生物氧化法、共沉淀法和化学氧化法。生物氧化法通过利用适合植物或微生物改变重金属的氧化状态,从而

实现净化^[24],该方法是一种经济有效的土壤净化方法。研究表明,苎麻可以累积砷、锑等重金属元素,因此可以作为土壤修复植物对受到锑污染的土壤进行治理^[23,25]。土壤清洗技术已运用于多种土壤重金属污染处理,但对于土壤锑污染治理还未实际运用。

水体锑污染处理技术主要有吸附沉淀技术、电解技术和膜分离技术。其中吸附和沉淀常被用于锑污染治理,如 Castaldi 等利用 2 种水处理残渣(Fe-and Al-WTRs)吸附水中的锑^[26],该方法简单且有效,成本较低。电解技术主要包括电渗析、酸萃取和溶剂去除,是废水中锑处理和去除的新技术,目前已在实验室规模上使用但应用电流的效率和系统的经济性还不清楚^[27]。膜分离技术有反渗透(RO)、纳米过滤(NF)、超滤(UF)和微滤(MF),其工艺复杂,运行成本高。

2.3 关键文献分析

将 1986—2019 年每年划分为一系列时间切片,提取每个时间切片前 50 名的引文分析为出版物代表,在此分析中每个时间切片设置为 1 年,根据科学网提取文献记录得到的文献共被引网络图(图 3),在该网络图中共生成 697 个节点和 1 551 个连线。其中,节点表示收集到的文章的被引情况,连线表示共被引的关系。表 1 列出了 1986—2019 年与锑污染相关的 8 种被引用最多的出版物。该表列举的出版物都是期刊文章,其中有 3 篇是综述类文章。第 1 篇综述是 Wilson 等 2010 年的文章,主要介绍锑在环境中的各种行为以及其与 As 相关内容^[28];第 2 篇综述是关于中国锑污染的现状,云南、广西、贵州等地由于锑的开采和冶炼过程以及煤炭燃烧中的锑副产品导致的锑污染问题在全世界都是一个不可忽略的问题^[29]。第 3 篇是对环境中锑的行为的知识现状进行系统性评论的综述,从锑污染的主要研究领域到研究空白都进行讨论,并在此基础上提出未来锑进一步研究的方向^[1],这 3 篇综述的中心度很高,说明它们是研究锑污染问题中比较重要的文献资源。其他的文章是关于锑污染在特定领域或者环境介质中锑的研究,例如 He 和 Okkenhaug 等的 2 篇文章都是关于锑矿周围土壤和植物体内锑的各种形态和分布的^[30-31]。Johnson 等则是对射击场周边的土壤进行采样,分析其锑污染状况以及对锑的形态及溶解度进行研究^[21]。Wu 等通过饮食暴露及毛发调查,对锑矿区周边居民长期

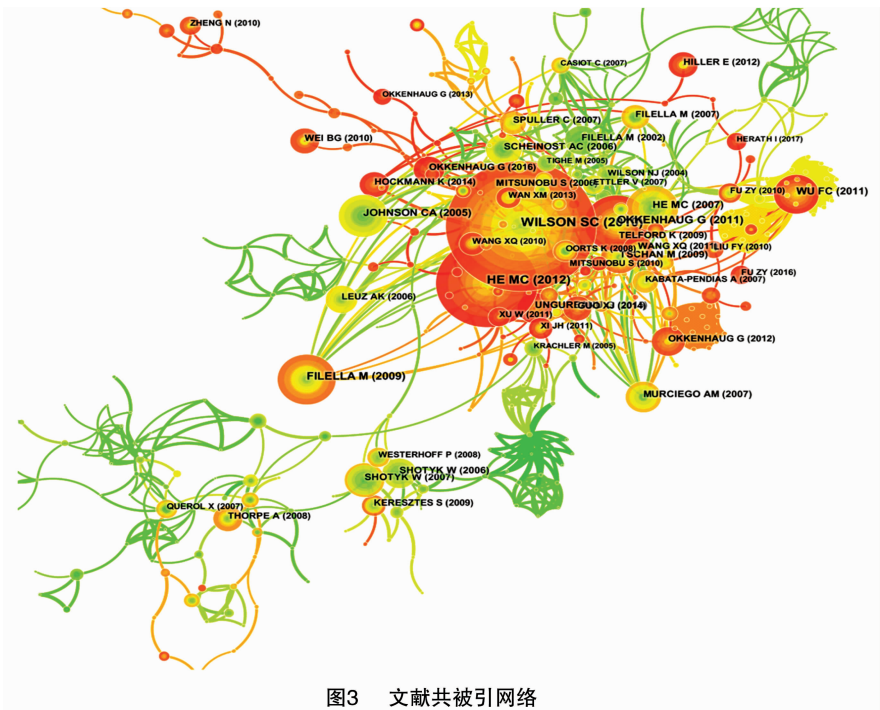


图3 文献共被引网络

表 1 锑污染研究领域关键文献

序号	作者	题目	年份	发文期刊	引用次数 (次)	中心度
1	Wilson S C, Lockwood P V, Ashley P M, et al.	The chemistry and behaviour of antimony in the soil environment with comparisons to arsenic; A critical review	2010	Environmental Pollution	147	0.04
2	He M, Wang X, Wu F, et al.	Antimony pollution in China	2012	Science of the Total Environment	100	0.05
3	Okkenhaug G, Zhu Y G, Luo L, et al.	Distribution, speciation and availability of antimony (Sb) in soils and terrestrial plants from an active Sb mining area	2011	Environmental Pollution	66	0.03
4	Filella M, Williams P A, Belzile N	Antimony in the environment: knowns and unknowns	2009	Environmental Chemistry	60	0.11
5	He M C	Distribution and phytoavailability of antimony at an antimony mining and smelting area, Hunan, China	2007	Environmental Geochemistry and Health	51	0.03
6	Johnson C A, Moench H, Wersin P, et al.	Solubility of Antimony and Other Elements in Samples Taken from Shooting Ranges	2005	Journal of Environmental Quality	49	0.01
7	Wu F, Fu Z, Liu B, et al.	Health risk associated with dietary co - exposure to high levels of antimony and arsenic in the world's largest antimony mine	2011	Science of the Total Environment	46	0.06
8	Shotyk W, Krachler M	Contamination of bottled waters with antimony leaching from polyethylene terephthalate (PET) increases upon storage	2007	Environmental Science & Technology	41	0.03

接触锑的健康风险和主要途径进行了评价^[32]。而 Shotyk 等的文章都是关于以 PET 为材料的桶装水锑污染及其衍生问题^[33-34]。

2.4 研究热点分析

关键词一般被视为文章的灵魂,在研究前沿分析中,可以为相关领域的研究人员提供学科演变的最新动态,预测研究领域的发展趋势^[35]。在

CiteSpace 研究前沿分析中,常使用突现词来表达某时间段学科研究热点的改变趋势。突现词是指在某一时间段内出现频率变化较高的关键词,其基本原理是根据文献的标题、摘要及关键词的增长频率来确定该领域的热点词汇,从而得知研究领域的热点^[36]。相对于传统使用高频主题词进行前沿分析,突现词能更好地探测学科的变化趋势和新兴方向。

康的关系,铈在大气中的形态研究主要集中在大小方面。铈主要以离子形态存在于大气颗粒物中,主要是人类活动的金属冶炼和燃烧过程^[37],而未受工业影响地区,会由于大气的运输产生铈污染。因此,“排放物”“PM₁₀”“运输”在该时期呈现较高的热度。相关研究表明,地衣可作为评估空气中元素的生物监测器,对大气污染进行评价^[38-39]。

2010—2014 年的突现词主要有“等离子体质谱法”“原子吸收光谱法”“样品”“溶解度”“富集因子”“中子活化分析”“毒性”“吸附作用”“萃取”“连续提取”等。对比前 2 年,这个时期的突现词表现出多样化,锑污染已经开始受到广泛研究并逐渐细化。在该阶段,锑在土壤-植物体系内形态及迁移转化特征得到大量研究。相关学者对锑矿周边所产生的锑污染进行了研究,锑的浸出率决定锑污染的严重程度,而重金属的形态对其毒理有着关键作用。土壤污染所带来的连锁反应就是植物的污染,而植物尤其是可食用植物的污染将会直接影响到人类健康。因此,在该时期“样品”“富集因子”“毒性”“吸附作用”“萃取”“连续提取”等词呈现较高的热度。

刚出厂的瓶装水的锑含量平均为万亿分之一百六十,并且时间越长,温度越高,塑料瓶中的锑元素在水中的溶解量越大^[33-34]。其主要原因是由于人们对聚对苯二甲酸乙二酯(PET)材料的使用增加,三氧化二锑(Sb_2O_3)是制备聚对苯二甲酸乙二酯(PET)的一种最重要的催化剂。研究人员对在实验室测定环境介质中锑总量问题时是否会因为使用该材料的容量瓶而产生二次污染,从而导致锑含量测定不符合实际情况进行分析^[42]。在这些研究中,样品的采集及处理方法、检测分析方法受到了广泛的关注,锑样品的采集、保存,样品的检测方法具有强烈的挑战性,因此在这个阶段各种改进的分析技术的研究也不断增加,等离子体质谱法、原子吸收光谱等用于锑含量测定的关键词,在这个时期也呈现一个较大的热度和突现性。

2015 年以后出现的突现词主要有“饮用水”“矿

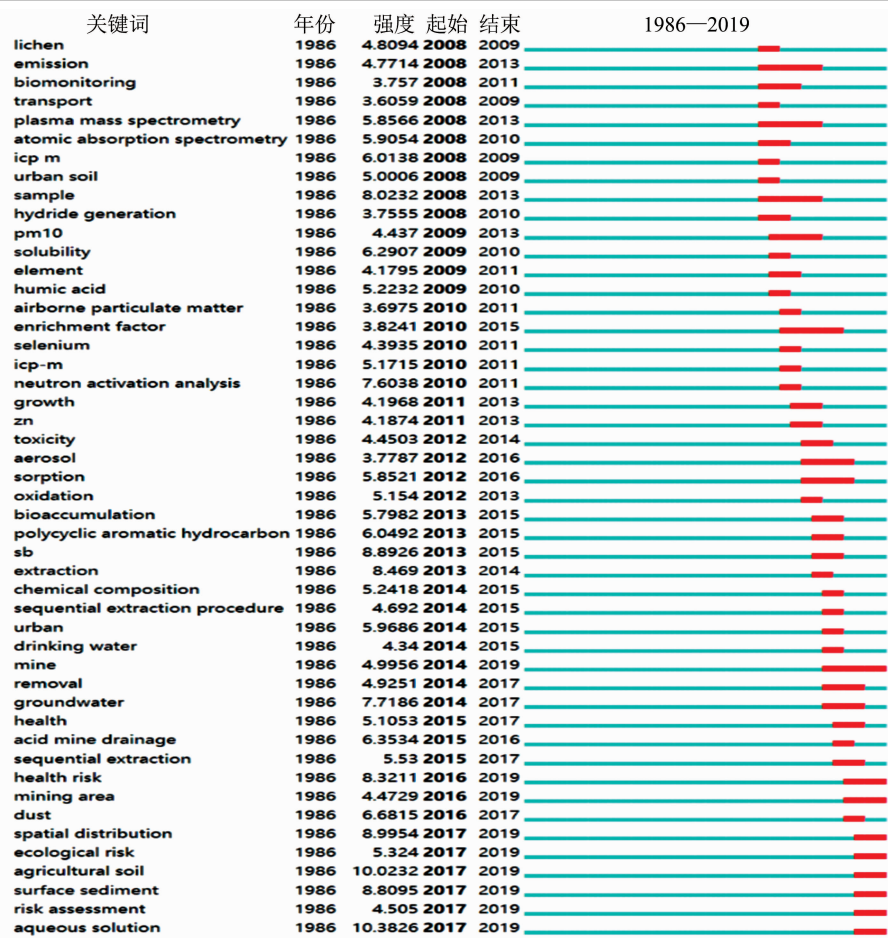


图5 基于 WOS 的镉污染研究的实现词

山”“去除”“地下水”“健康风险”“酸性矿山废水”“空间分布”“农业土壤”“风险评估”等。近年来，随着镉矿的开采，在选矿和处理尾矿和矿渣的过程中，造成了矿区周边的河流、土壤、植物不同程度的镉污染，因此，对镉污染的研究逐渐转向了其去除技术及风险评估。镉污染治理技术须要根据其污染性质进行选择，首先须要考虑的是处理技术的可行性及经济效益。目前对于水体和土壤镉污染治理技术研究较广泛的主要有植物修复技术、吸附沉淀法，这 2 种技术工艺简单、成本低，去除效果好。

揭示环境污染状况须要对其进行风险评估，生态风险评估可以利用重金属的各种化学形态、毒理学和生态学等来评估重金属对环境的影响^[43]。由于镉矿的长期开采，对镉矿区周边的居民人体健康和生态环境构成巨大威胁，因此，镉的风险评估受到许多学者的关注。Fei 等对对湖南省玉溪河流域镉及相关重金属污染物（铅、锌、砷）的时空分布及人群暴露风险进行了大量调查，得出每种重金属的危险系数（HQ），评估了重金属污染对健康和生态

的危害^[44]。Long 等对湖南省锡矿山矿区周边土壤中镉（Sb）、锰（Mn）、锌（Zn）、砷（As）、镉（Cd）、铅（Pb）的总含量进行了测定，通过计算生态风险指数（RI），了解土壤重金属污染程度和潜在生态风险^[45]。但是，迄今为止，许多关键方面，包括不同环境系统中镉的检测、痕量和形态以及人类对其实际接触情况的了解仍然很少，这也是镉污染今后研究的重点和方向^[46]。

2.5 主要研究力量分析

2.5.1 主要发文国家对比 通过对发文国家研究（图 6 和表 2）分析得出，在 1986—2019 年，发文量最大的国家是中国，其次是美国。说明在对于镉污染研究领域来说，中国对其研究和关注度是属于世界前列的。但是，对比发文量前 10 的国家的中心度，西班牙、法国、意大利、德国和英国的发文量虽然远不及中国的发文量，但其中心度较高，说明其发表的文章有较高的参考价值。中国的发文量虽然很大，但是中心度较低，发文质量相对于欧洲国家而言较差，未来在发文质量上应更为关注。

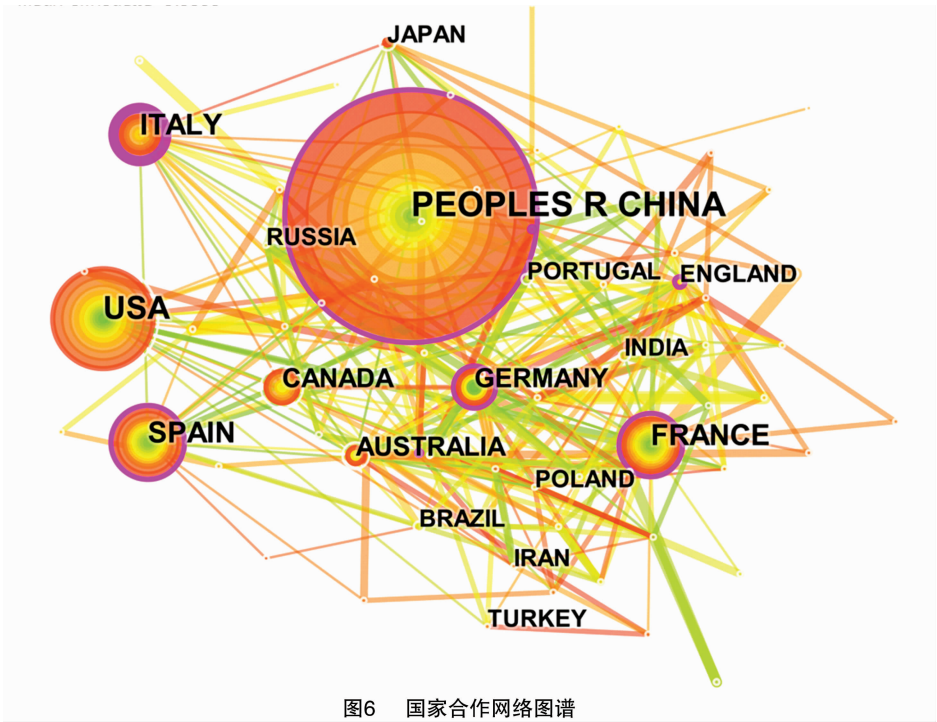


图6 国家合作网络图谱

表 2 发文量前 10 的国家

发文国家	发文量 (篇)	中心度
中国	517	0.10
美国	264	0.08
西班牙	180	0.15
法国	164	0.18
意大利	157	0.20
加拿大	119	0.06
德国	117	0.18
澳大利亚	94	0.05
日本	80	0.07
英国	76	0.18

2.5.2 主要研究机构 中国锑研究的发文量远超世界上其他国家,发文前 10 的机构中(图 7),中国的研究机构和主要发文量有中国科学院(Chinese Acad Sci) 169 篇、北京师范大学(Beijing Normal Univ)55 篇、中国环境科学研究院(Chinese Res Inst Environm Sci) 47 篇、中国科学院大学(Univ Chinese Acad Sci)46 篇、中国地质大学(China Univ Geosci) 22 篇、中南大学 22 篇。其他国家的发文机构主要有西班牙国家研究委员会(CSIC)38 篇、俄罗斯科学院(Russian Acad Sci)23 篇、法国图卢兹大学(Univ Toulouse) 21 篇、美国地质调查局(US Geological Survey)20 篇。

3 结论

本研究利用 CiteSpace 对锑污染研究进展进行统计分析,得出以下结论:

(1)锑污染研究起步较晚,在 2000 年之前,对锑污染研究的文章极少;但自 2000 年之后,随着锑污染的发生,使得其相关的文章数量逐年迅速上升,有关锑污染的研究逐渐受到关注并快速发展。

(2)文献共被引时间线图谱可以清晰呈现每个时间段对于锑污染研究的主题。早期对大气锑污染的探索,阐明了锑污染的来源,为后期锑污染研究得到大量细化奠定了基础;在锑污染研究细化阶段,对环境各介质如水体、土壤、植物等锑的地球化学行为均进行研究,为后期锑污染治理研究提供坚实的理论依据;随着研究的深化,在前期大量的研究基础上,对锑污染的研究转向了锑污染治理技术及其风险评估。

(3)每个时期有关锑污染研究的热点不同,这与该时间段学者对于锑污染的研究主题和认知程度有关,每个时期的突现词可以清晰地反映出该阶段锑污染的研究方向、热点,从而得知锑污染的发展趋势。目前,“去除”“地下水”“风险评估”“健康风险”等突现词表现出对锑污染的研究主要集中在锑污染治理技术和风险评估。

(4)现阶段有关锑污染的发文量,中国的发文

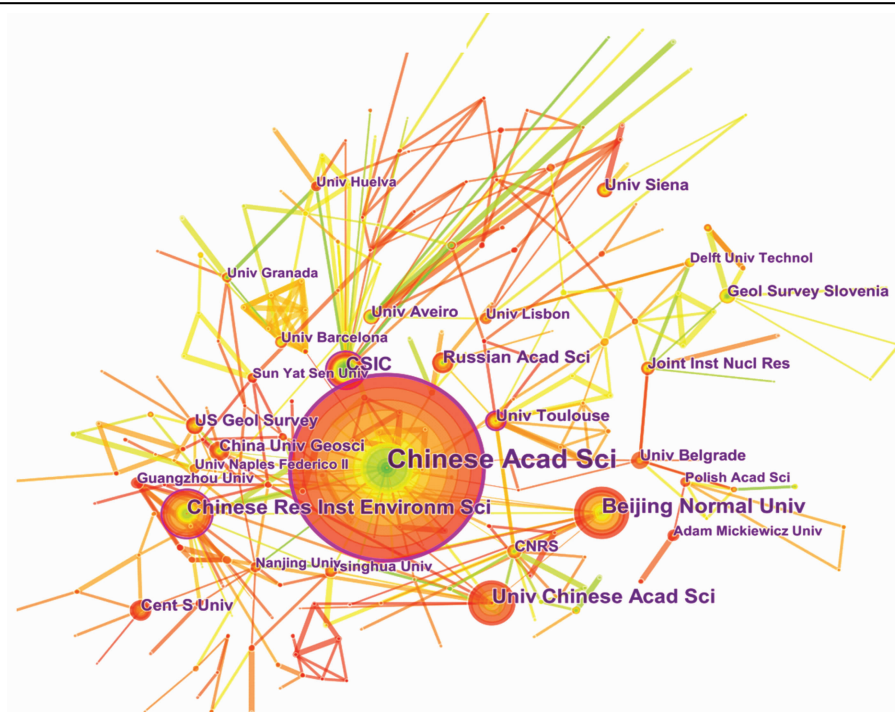


图7 发文机构合作网络图谱

量远远超过其他国家,大多发文机构都集中在中国顶尖研究机构 and 高校,这基于中国是锑储量大国;但欧洲国家文章质量相对于其他国家而言较为领先。

参考文献:

- [1] Filella M, Williams P A, Belzile N. Antimony in the environment: knowns and unknowns[J]. Environmental Chemistry, 2009, 6(2): 95–105.
- [2] Leuz A K, Hug S J, Wehrli B, et al. Iron-mediated oxidation of antimony(III) by oxygen and hydrogen peroxide compared to arsenic(III) oxidation[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(8): 2565–2571.
- [3] 蓝唯源, 宋书巧, 吴浩东, 等. 土壤三价锑污染对甜芥菜生长及品质的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(2): 20–23.
- [4] 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.
- [5] 郭毅, 郝琳, 胡旺波. 人的发展经济学研究的科学知识图谱——基于 CiteSpace 的文献计量分析[J]. 改革与战略, 2016(5): 1–7.
- [6] 祝薇, 向雪琴, 侯丽朋, 等. 基于 CiteSpace 软件的生态风险知识图谱分析[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4504–4515.
- [7] 张颖, 陈桂芬. 基于 CiteSpace 的土壤肥力知识图谱可视化挖掘与分析[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(3): 209–213, 229.
- [8] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242–253.
- [9] Ji Z, Pei Y. Bibliographic and visualized analysis of geopolymer research and its application in heavy metal immobilization: a review[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231: 256–267.
- [10] Krachler M, Zheng J, Fisher D, et al. Atmospheric Sb in the arctic during the past 16,000 years: Responses to climate change and human impacts[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2008, 22(1): GB1015.
- [11] Canepari S, Pietrodangelo A, Perrino C A, et al. Enhancement of source traceability of atmospheric PM by elemental chemical fractionation[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(31): 4754–4765.
- [12] 何孟常, 万红艳. 环境中锑的分布、存在形态及毒性和生物有效性[J]. 化学进展, 2004, 16(1): 131–135.
- [13] He M, Wang N, Long X, et al. Antimony speciation in the environment: Recent advances in understanding the biogeochemical processes and ecological effects[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 75: 14–39.
- [14] Ungureanu G, Santos S, Boaventura R, et al. Arsenic and antimony in water and wastewater: overview of removal techniques with special reference to latest advances in adsorption[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 151: 326–342.
- [15] Li J, Zheng B, He Y, et al. Antimony contamination, consequences and removal techniques: a review[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 156: 125–134.
- [16] Filella M, Belzile N, Chen Y W. Antimony in the environment: a review focused on natural waters I. Occurrence[J]. Earth-Science Reviews, 2002, 57(1/2): 125–176.
- [17] Gebel T. Arsenic and antimony: comparative approach on mechanistic toxicology[J]. Chemico-Biological Interactions,

- 1997,107(3):131–144.
- [18] Baroni F, Boscagli A, di Lella L A, et al. Arsenic in soil and vegetation of contaminated areas in southern Tuscany (Italy) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2004, 81(1): 1–14.
- [19] 何孟常, 季海冰, 赵承易, 等. 锑矿区土壤和植物中重金属污染初探[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2002, 38(3): 417–420.
- [20] 冯人伟, 韦朝阳, 涂书新. 植物对锑的吸收和代谢及其毒性的研究进展[J]. *植物学报*, 2012, 47(3): 302–308.
- [21] Johnson C A, Moench H, Wersin P, et al. Solubility of antimony and other elements in samples taken from shooting ranges[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(1): 248–254.
- [22] Zhao W, Ding L, Gu X, et al. Levels and ecological risk assessment of metals in soils from a typical e-waste recycling region in southeast China[J]. *Ecotoxicology*, 2015, 24(9): 1947–1960.
- [23] Mubarak H, Chai L Y, Mirza N, et al. Antimony (Sb) – pollution and removal techniques – critical assessment of technologies[J]. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 2015, 97(10): 1296–1318.
- [24] Mondal P, Bhowmick S, Chatterjee D, et al. Remediation of inorganic arsenic in groundwater for safe water supply: a critical assessment of technological solutions[J]. *Chemosphere*, 2013, 92(2): 157–170.
- [25] Chai L Y, Mubarak H, Yang Z H, et al. Growth, photosynthesis, and defense mechanism of antimony (Sb) – contaminated *Boehmeria nivea* L. [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016, 23(8): 7470–7481.
- [26] Castaldi P, Diquattro S, Lauro G P, et al. Water treatment residuals as a resource for the recovery of soil and water polluted with Sb(V): sorption and desorption trials at different pH values[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2018, 229(6): 174.
- [27] Bergmann M, Koparal A S. Electrochemical antimony removal from accumulator acid: Results from removal trials in laboratory cells[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 196: 59–65.
- [28] Wilson S C, Lockwood P V, Ashley P M, et al. The chemistry and behaviour of antimony in the soil environment with comparisons to arsenic: a critical review[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1169–1181.
- [29] He M C, Wang X Q, Wu F C, et al. Antimony pollution in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 421/422(3): 41–50.
- [30] He M. Distribution and phytoavailability of antimony at an antimony mining and smelting area, Hunan, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2007, 29(3): 209–219.
- [31] Okkenhaug G, Zhu Y G, Luo L, et al. Distribution, speciation and availability of antimony (Sb) in soils and terrestrial plants from an active Sb mining area [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2427–2434.
- [32] Wu F, Fu Z, Liu B, et al. Health risk associated with dietary co-exposure to high levels of antimony and arsenic in the world's largest antimony mine area [J]. *The Science of the Total Environment*, 2011, 409(18): 3344–3351.
- [33] Shoty W, Krachler M. Contamination of bottled waters with antimony leaching from polyethylene terephthalate (PET) increases upon storage [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(5): 1560–1563.
- [34] Shoty W, Krachler M, Chen B. Contamination of Canadian and European bottled waters with antimony from PET containers [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2006, 8(2): 288–292.
- [35] 包平, 周露. 基于 CiteSpace 的学科服务可视化研究[J]. *农业图书情报学刊*, 2014, 26(7): 40–43.
- [36] 况扬, 陈明辉. 国内翻转课堂研究前沿热点及趋势——基于 CiteSpace V 可视化分析[J]. *开封教育学院学报*, 2018, 38(1): 105–106.
- [37] Smichowski P. Antimony in the environment as a global pollutant: a review on analytical methodologies for its determination in atmospheric aerosols [J]. *Talanta*, 2008, 75(1): 2–14.
- [38] Conti M E, Pino A, Botrè F, et al. Lichen usnea barbata as biomonitor of airborne elements deposition in the province of tierra del fuego (southern Patagonia, Argentina) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(4): 1082–1089.
- [39] Boamponsem L K, Adam J I, Dampare S B, et al. Assessment of atmospheric heavy metal deposition in the Tarkwa Gold mining area of Ghana using epiphytic lichens [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research (Section B, Beam Interactions With Materials and Atoms)*, 2010, 268(9): 1492–1501.
- [40] Andra S S, Makris K C, Shine J P. Frequency of use controls chemical leaching from drinking – water containers subject to disinfection [J]. *Water Research*, 2011, 45(20): 6677–6687.
- [41] 郭豪, 宋庆国, 邱国福. 不同材质水桶的使用次数对 Sb 和 BPA 渗出量的影响[J]. *水资源保护*, 2016, 32(4): 127–130, 153.
- [42] 张彦波, 王莹, 吕亮. 微波消解 – ICP – MS 法测定 PET 瓶中的锑[J]. *大连工业大学学报*, 2014, 33(1): 25–27.
- [43] Wang N, Wang A, Kong L, et al. Calculation and application of Sb toxicity coefficient for potential ecological risk assessment [J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 610–611: 167–174.
- [44] Fei J C, Min X B, Wang Z X, et al. Health and ecological risk assessment of heavy metals pollution in an antimony mining region: a case study from South China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(35): 27573–27586.
- [45] Long J M, Tan D, Deng S H, et al. Pollution and ecological risk assessment of antimony and other heavy metals in soils from the world's largest antimony mine area, China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2018, 24(3): 679–690.
- [46] Herath I, Vithanage M, Bundschuh J. Antimony as a global dilemma: geochemistry, mobility, fate and transport [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 223: 545–559.