



文章栏目: 涉汞技术文献计量分析专题

DOI 10.12030/j.cjee.201903076 中图分类号 X11 文献标识码 A

杨雨寒, 靳炜, 刘俐媛, 等. 基于SCI论文的汞污染防治领域的文献计量分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(6): 1488-1501.

YANG Yuhuan, JIN Wei, LIU Liyuan, et al. Bibliometric analysis of mercury pollution prevention and control based on SCI paper[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(6): 1488-1501.

基于SCI论文的汞污染防治领域的文献计量分析

杨雨寒¹, 靳炜², 刘俐媛^{3,4}, 陈扬^{3,4}, 张利田^{2,5,*}

1. 中国科学院文献情报中心, 北京 100190

2. 中国科学院生态环境研究中心《环境工程学报》编辑部, 北京 100085

3. 中国科学院北京综合研究中心, 北京 101407

4. 国家环境保护汞污染防治工程技术中心, 北京 101407

5. 中国科学院生态环境研究中心文献信息中心, 北京 100085

第一作者: 杨雨寒(1989—), 女, 硕士, 图书馆馆员。研究方向: 产业情报分析。E-mail: yangyh@mail.las.ac.cn

*通信作者: 张利田(1963—), 男, 博士, 四级职员。研究方向: 环境水质学、文献情报分析等。E-mail: zhanglt@rcees.ac.cn

摘要 汞作为一种全球性污染物, 一直是国际上热点问题之一。我国汞污染排放量大面广, 局地污染严重。为分析汞污染防治领域的发文现状和研究热点, 梳理了主要的汞污染防治技术、汞污染评价与管理3个方面的SCI论文, 并对国内外论文的发文国家/地区、发文机构、发文期刊、影响力、研究领域与热点等内容进行了统计与分析。结果表明, 汞污染的研究主要集中在处理技术和污染评价2个方面, 近10年来, 汞污染防治论文总量呈缓慢增加的趋势, 其中, 汞污染处理技术相关的论文有所减少, 汞污染评价相关的论文逐年递增。汞污染处理技术主要包括吸附处理、氧化还原、电化学修复、催化处理等方面; 污染评价主要涉及毒理研究、汞的迁移与转化、风险评估等。近年来, 汞的迁移转化与风险评估, 汞污染的电力修复、催化处理、吸附处理等领域的发文量增速较快。全球重点研发机构的研究方向趋同, 主要侧重于环境科学与生态、化学、工程、毒理学等方向的研究; 但不同机构的研究对象则具有明显的地域特点。我国在该领域的发文总量和ESI高被引论文数量均排全球首位, 研究方向、重点发文期刊与全球基本一致, 重点发文机构为中国科学院、华中科技大学、清华大学、浙江大学等机构, 这些机构在全球的发文量排名也处在前列。

关键词 汞污染; 污染防控; SCI论文; 文献计量

汞可在大气中远距离迁移, 在人为排入环境后持久存在, 也可在各种生态系统进行生物累积, 而且还会对人体健康和环境产生重大不利影响, 汞污染已成为全球关注的问题^[1-2]。我国现代工业、采矿、冶炼、电子、农业、医疗等行业快速发展, 汞的消耗量及排放量急剧增加, 导致大量含汞废物排入环境, 造成严重环境污染问题^[3]。2017年8月16日, 《关于汞的水俣公约》正式生效, 对汞的供应、贸易、使用、排放及释放等提出全面管控要求。同时, 也意味着我国的汞污染防治面临着巨大的挑战与机遇, 面对国际上限汞的压力和国内汞的高需求现状, 我国必须加大技术的研发与推广, 完善汞监测系统及相应的管理政策与法律法规。

本研究对汞污染防治领域的污染防治技术、污染评价和管理3个方面的SCI论文进行检索和分析, 揭示汞污染领域SCI论文的发文特点, 如重点发文国家与机构、重点发文期刊、论文影响力、论文研

究方向与研究热点等,为我国科研人员在该领域的科研活动、研究布局、管理等提供信息支撑。

1 数据源及分析方法

目前,汞污染防治技术与污染评价相关的技术体系已基本形成,如采用静电除尘、布袋除尘、活性炭吸附等处理含汞废气,沉淀技术、膜过滤技术等处理含汞废水,固化/稳定化、热脱附、植物修复等处理汞污染土壤,还有很多对各种方法进行组合的集成技术^[4-11]。同时,适合不同地区及国家的汞污染治理政策与法规也陆续实施。根据国内外文献与专利报道,检索到的汞污染防治相关的技术类型很多,但大多数是在原创技术基础上经过改进、调整和组合的衍生技术^[12]。因此,参照国内外的技术分类方法,对改进、调整剂组合了的衍生技术进行归类和剔除,并兼顾各类技术的重要性和典型性,筛选出18种重要技术;另外,梳理汞污染相关的毒理研究、迁移与转化、风险评估、检测与管理相关的关键词;并根据这些关键词设计检索策略。表1为汞污染防治技术、评价与管理领域划分及各领域的发文数量。

表1 汞污染防治技术、评价与管理领域划分及各领域发文数量
Table 1 Paper quantities and retrieval strategies in different areas of mercury pollution control

方向	细分领域	检索式与关键词	发文数量/篇	序号
处理技术	总体	TS=(remov* or purif* or cleans* or decotaminat* or remov* or disinfect* or steriliz* or remediati* or recover* or repair* or degradat*) and TS=mercury	7 758	1 [#]
	焚烧处理	TS=(incinerat*) and TS=mercury	240	2 [#]
	原位修复	TS=("in situ" or in-situ) and TS=mercury	1 137	3 [#]
	电动力修复	TS=(electrokinetic* or electrodynamic*) and TS=mercury	69	4 [#]
	化学淋洗	TS=(flush* or wash* or leach*) and TS=mercury	944	5 [#]
	填埋/封装	TS=(landfill or package or encapsulat* or containment) and TS=mercury	457	6 [#]
	热脱附(热处理法、热解析法)	TS=("thermal desorp*") and TS=mercury	134	7 [#]
	固化/稳定化	TS=(solidificat* or stabilizat*) and TS=mercury	334	8 [#]
	植物修复	TS=(phytoremediat*) and TS=mercury	204	9 [#]
	生物修复	TS=(bioremediat*) and TS=mercury	230	10 [#]
	沉淀/共沉淀	TS=(precipitat* or coprecipitat*) and TS=mercury	1 113	11 [#]
	氧化还原	TS=(oxidation or deoxidization or reduction or redox) and TS=mercury	5 881	12 [#]
	电化学修复	TS=(electrochemi*) and TS=mercury	2 408	13 [#]
	膜过滤	TS=(filt*) and TS=mercury	846	14 [#]
	催化处理	TS=(cataly*) and TS=mercury	2 294	15 [#]
	吸附处理	TS=(adsorb or adsorption or absorb or absorption) and TS=mercury	8 321	16 [#]
	静电处理	TS=(electrostatic) and TS=mercury	424	17 [#]
	协同脱汞	TS=(synerg*) and TS=mercury	375	18 [#]
	其他(人工湿地、离子交换、玻璃化)	TS=("constructed wetland" or resin or vitrification) and TS=mercury	538	19 [#]
评价	毒理(毒性、累积性)	TS=(toxicity or toxicology or *accumula*) and TS=mercury	7 645	20 [#]
	迁移、转化	TS=(migrat* or "chemical form" or "chemical cycl*" or pathway* or behavior or "ecological risk") and TS=mercury	5 718	21 [#]
	风险评价、污染评估	(TS=("risk assess*" or "risk evaluat*" or "pollut*assess" or "pollut* evaluat*") and TS=(mercury)) or TS=((assess* or evaluat*) near mercury)	3 695	22 [#]
	检测	TS=((detect* or monitor or determinat*) near (mercury))	4 333	23 [#]
管理	管理、政策	TS=(protect* or management or policy or convention) and TS=mercury	2 755	24 [#]

检索数据为科睿唯安(Clarivate Analytics)的Web of Science核心合集的SCI数据库(SCI-Expanded),检索2008—2018年发表的论文^[13]。共得到全球汞污染防治领域相关的论文28 867篇,其中中国发文7 068篇。检索时间2018年12月5日。

所采用的主要分析工具与方法为:使用“Web of Science分析检索结果”功能对检索结果进行统计、一维分析、二维分析,使用DDA(Derwent Data Analyzer)对检索结果进行分类、汇总和计算。

2 全球汞污染防治领域发文情况分析

2.1 全球汞污染防治研究领域分布

图1为全球汞污染防治细分领域的发文比例,可以看出:汞污染处理技术相关论文19 733篇,占汞污染防治领域论文的50%,其中涉及到吸附技术的论文数量最多(8 321篇),吸附法利用具有多孔性或高比表面积的材料对汞进行吸附,进而对其进行处理;其次为氧化还原技术(5 881篇);电化学修复(2 408篇),包括电解、电絮凝、电氧化还原、电浮选等。汞污染评价相关论文17 108篇,占论文总量的43.21%,包括汞污染检测(4 333篇)、汞及相关有机物的毒理研究及生物和环境累积性研究(7 645篇)、汞的迁移与转化(5 718篇)、汞污染风险评价与污染评估(3 695篇)。汞污染管理与政策相关论文2 755篇,占论文总量的6.96%。

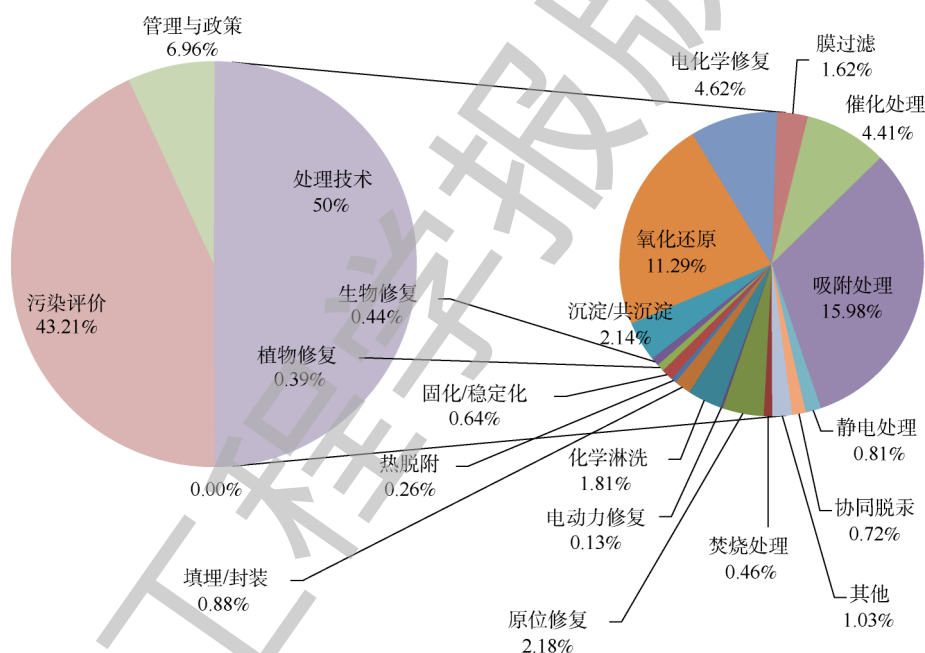


图1 汞污染防治各研究领域发文比例

Fig. 1 Proportion of published papers in different research areas of mercury pollution control

2.2 全球发文趋势与论文影响力

学术论文的发文量在一定程度上可以反映某个领域和学科的科研热度与发展状况,而对刊载学术论文的刊物进行统计分析可以揭示该领域的重要期刊,从而为学科评价以及期刊评价提供参考依据^[14]。图2为全球汞污染防治领域的发文趋势。联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)的研究指出,近年来,汞排放量呈上升趋势,但在排放区域、排放行业等方面,汞污染的排放模式非常相似^[15]。可以看出,近10年来,本领域的SCI发文数量也呈缓慢增长的趋势,从2008年的2 055篇增长至2018年的3 051篇,近3年来,增长速率有所下降。相关论文共发表在3 028种SCI期刊上,平均每本期刊约发表6篇论文,每年的发文期刊800~900种。

图3为汞污染处理、评价和管理3个分领域的发文数量随时间的变化趋势。可以看出,汞污染处理

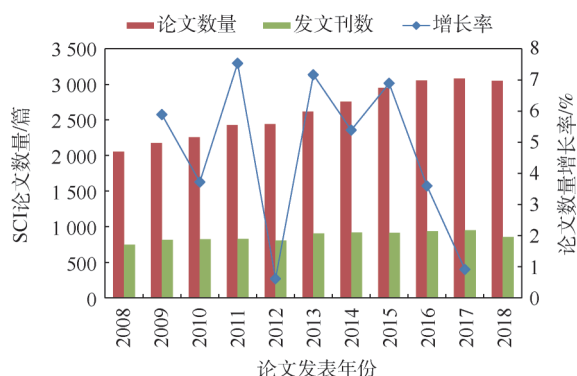


图2 全球汞污染防治领域发文趋势

Fig. 2 Development tendency of global mercury control related papers over time

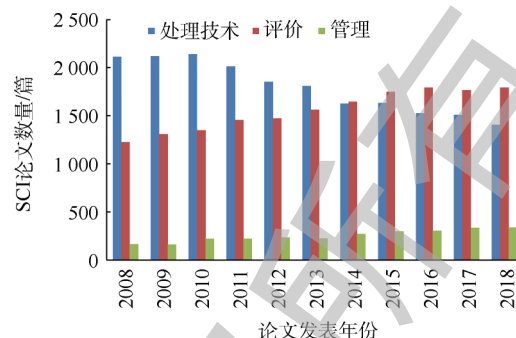


图3 汞污染处理、评价和管理分领域发文趋势

Fig. 3 Trends of paper output in the field of mercury pollution treatment, evaluation and management

技术相关的文章数量最多，其次分别为汞污染评价和汞污染管理。汞污染处理技术与汞污染评价2个领域的发文数量呈此消彼长的趋势。近10年来，汞污染处理技术相关文章呈下降趋势，汞污染评价和管理相关的文章则呈上升趋势。

被引频次是文献计量学中用来测度学术论文显示度和学术影响力的重要指标，该指标客观地说明期刊或论文总体被使用和受重视的程度，以及在学术交流中的作用和地位，被引频次高，可以在一定程度上表明论文学术价值较高，在同行中引起的反响较大，受关注的程度较高^[16]。论文被引用的时间累积效应一般都要经过一段时间的累积才能达到峰值^[17]。表2为2008—2018年汞污染防治领域每年发表论文的被引情况。可以看出，受论文被引的时间累积效应的影响，2008—2009年的论文总被引次数和篇均被引次数均最高，且90%以上的论文都被引用。近10年来，论文的篇均被引频次为15.2次。

表2 汞污染防治领域论文被引情况

Table 2 Citation statistics of papers in the field of mercury pollution control

年份	发文量/篇	被引论文数量/篇	总被引次数	被引率/%	篇均被引次数
2008	2 055	1 944	60 023	94.60	29.21
2009	2 176	2 071	60 088	95.17	27.61
2010	2 257	2 154	59 709	95.44	26.46
2011	2 427	2 309	54 478	95.14	22.45
2012	2 442	2 335	48 858	95.62	20.01
2013	2 617	2 478	44 587	94.69	17.04
2014	2 758	2 603	41 353	94.38	14.99
2015	2 948	2 736	33 256	92.81	11.28
2016	3 054	2 741	23 682	89.75	7.75
2017	3 082	2 439	12 820	79.14	4.16
2018	3 071	1 165	2 815	37.94	0.92

ESI(essential science indicators)高被引论文是根据对应领域和出版年中的高引用阈值，截至近4个月，在同一出版年在某一领域(基于Web of Science研究方向)的引用量前1%的文章。ESI高被引论文代表了不同学科领域的高被引论文，图4为截至2018年7—8月，汞污染防治领域的ESI高被引论文，可以看出，本领域的高被引论文呈波动上升的趋势，高被引论文数量占当年发文量的比例基本维持在1%，与SCI论文的平均影响力基本一致。

2.3 主要发文国家/地区

全球共有158个国家和地区在汞污染防治领域发表文章,图5为该领域发文量排名前15的国家,其中,发文量排名前5的国家分别是中国、美国、加拿大、印度和西班牙,这5国的发文量几乎占全球的一半。从各国家的论文影响力来看,中国的 h 指数为106(h 指数是一个混合量化指标,指该国家/地区至多有 h 篇论文分别被引用了至少 h 次,可用于评估国家/地区的学术产出数量与学术产出水平, h 指数越高,则表明该国家/地区的论文影响力越大),平均每篇文章被引16.11次;美国 h 指数117,平均每篇文章被引19.38次;加拿大 h 指数为73,平均每篇文章被引19.55次;印度 h 指数为64,平均每篇文章被引15.57次;西班牙 h 指数为57,平均每篇文章被引16.15次。美国、中国和加拿大3国不仅在发文数量上全球领先,其 h 指数和篇均被引频次也排名全球前3。

部分高发文量国家对实际生产中汞污染的处理做了严格规定,例如,美国建立全面废物管理系统,旨在对危险废物进行全生命周期的控制和安全管理;加拿大要求含汞废物的管理应同时符合国家和地方的法律法规,并规定了设施选址、设计、施工、运营和关闭、工人健康与安全、收集与储存、运输和处置的所有要求;欧盟于2005年启动了汞战略,通过全生命周期管理,明确定义含汞废物及其对应的安全处置规定,降低环境中的汞含量,并于2011年实施了更严格的标准;日本在整个生命周期中对汞采取无害措施,淘汰或尽量减少汞在产品和工业过程中的使用,并对汞的处理作出了明确的要求^[18]。

2.4 全球重点发文期刊

全球汞污染防治相关论文共发表在3 028个期刊上,平均每个期刊发文约9.5篇,期刊平均影响因子约为2.65。本领域影响因子最高的3个期刊收录的文章为:1)影响因子最高的期刊为《New England Journal of Medicine》(IF=79.260),2011年收录了由布列根和妇女医院、哈佛大学、密苏里大学哥伦比亚分校和华盛顿大学共同发表的论文《Mercury exposure and risk of cardiovascular disease in two U.S. cohorts》,对汞暴露和风险进行了研究与评价^[19];2)伦敦卫生与热带医学院于2014年在《Lancet》(IF=53.254)上发表了汞污染风险评估相关的编辑素材类文章《The minamata convention on mercury: Risk in perspective》;3)《Chemical Reviews》(IF=52.613)2015年收录了加拿大麦吉尔大学和加拿大环境部于2015年共同发表的综述类文章《Mercury physicochemical and biogeochemical transformation in the atmosphere and at atmospheric interfaces: A review and future directions》对汞污染在环境中的迁移转化进行了研究^[20],2017年收录了北京化工大学于2017年发表的综述类文章《Ionic liquids in selective oxidation: catalysts and solvents》讨论选择性氧化技术处理汞污染^[21]。

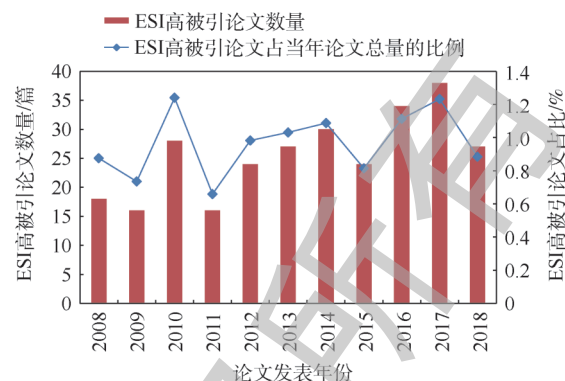


图4 ESI高被引论文数量随时间变化趋势

Fig. 4 Trends of ESI highly cited paper papers

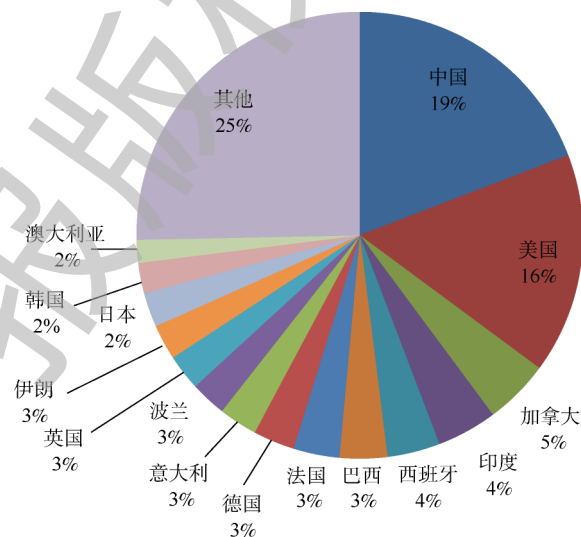


图5 汞污染防治领域全球发文量TOP 15国家

Fig. 5 TOP 15 countries in the number of published paper in mercury pollution control

表3对全球汞污染防治领域发文量最高的20个期刊进行了统计,可以看出,研究人员在《Environmental Science & Technology》上发文最多共655篇,主要发文国家为美国(美国地质调查局、密西根大学、哈佛大学),中国(中国科学院、清华大学),加拿大(加拿大环境部、阿尔伯塔大学);其次为《Science of the Total Environment》共609篇,主要发文国家为美国(美国地质调查局、密西根大学),加拿大(加拿大环境部、渥太华大学、卡尔顿大学),中国(中国科学院);《Chemosphere》共409篇,主要发文国家为中国(中国科学院)、美国、西班牙(国家研究委员会)。

表3 全球汞污染防治领域发文量TOP 20期刊
Table 3 TOP 20 global journals of mercury pollution control

序号	期刊名称	研究方向	发文量/篇	影响因子(2017年)
1	Environmental Science & Technology	工程/环境、环境科学	655	6.653
2	Science of the Total Environment	环境科学	609	4.610
3	Chemosphere	环境科学	409	4.427
4	Environmental Science and Pollution Research	环境科学	406	2.800
5	Journal of Hazardous Materials	工程/环境、环境科学	381	6.434
6	Sensors and Actuators B: Chemical	化学/分析、电化学、仪器仪表	362	5.667
7	Environmental Pollution	环境科学	335	4.358
8	Talanta	化学/分析	331	4.244
9	Fuel	能源与燃料、工程/化学	305	4.908
10	RSC Advances	化学/多学科	280	2.936
11	Electroanalysis	化学/分析、电化学	263	2.851
12	Marine Pollution Bulletin	环境科学、海洋和淡水生物学	258	3.241
13	Chemical Engineering Journal	工程/化学、工程/环境	253	6.735
14	Environmental Monitoring and Assessment	环境科学	249	1.804
15	Energy & Fuels	能源与燃料、工程/化学	246	3.024
16	Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology	环境科学、毒理学	242	1.480
17	Environmental Research	环境科学	213	4.732
18	Analytical Chemistry	化学/分析	210	6.042
19	Environmental Toxicology and Chemistry	环境科学、毒理学	207	3.179
20	Analytical Methods	化学/分析、食品科学与技术、光谱学	202	2.073

3 全球汞污染防治研究热点

3.1 全球研究方向与热点分布

图6为全球各国在汞污染领域的研究方向(基于Web of Science研究方向,下同),相关论文共涉及125个方向,其中涉及化学方向的文章数量最多(9 097篇),约占论文总量的19%,其次为环境科学与生态(8 040篇)、工程(4 902篇)、材料科学(2 549篇)、毒理学(2 262篇)、电化学(1 691篇)等方向。

3.2 汞污染防治细分领域发展趋势分析

为揭示汞污染防治领域相关处理技术和评价、管理的发文变化趋势,表4对细分领域的发文趋势和主要发文国家进行统计与分析(其中表中红色柱条代表最高值和最低值),可以看出,各细分领域

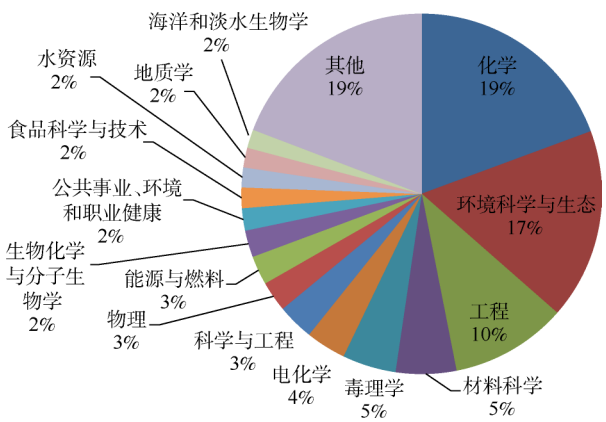


图6 基于Web of Science研究方向的全球汞污染防治研究方向
Fig. 6 Research areas of global mercury pollution control based on Web of Science research area

表 4 汞污染防治细分领域发文趋势及主要发文国家

Table 4 Trends of different research areas and main publishing countries in mercury pollution control														
方向	细分领域	主要发 文国家	年份											变化趋势
			2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
处理 技术	焚烧处理	中国、美国、 韩国	30	18	19	17	28	27	21	18	25	11	26	
	原位修复	中国、美国、 法国	75	81	90	96	86	97	122	122	140	109	120	
	电力修复	中国、美国、 意大利	5	5	4	4	6	3	7	7	9	13	7	
	化学淋洗	美国、中国、 加拿大	87	65	76	70	75	83	84	96	87	100	121	
	填埋/封装	中国、美国、 英国	29	35	34	38	54	43	26	47	49	59	43	
	热脱附	中国、西班牙、 美国	11	10	6	7	10	8	10	17	15	18	23	
	固化/ 稳定化	中国、美国、 法国	18	22	17	29	35	30	24	48	33	36	43	
	植物修复	中国、印度、 美国	12	26	15	13	17	20	20	21	20	21	19	
	生物修复	印度、中国、 美国	7	11	12	21	23	26	23	21	30	30	27	
	沉淀/ 共沉淀	美国、中国、 加拿大	81	96	74	81	87	87	103	133	130	136	106	
	氧化还原	中国、美国、 加拿大	428	443	454	497	467	515	560	567	661	634	669	
	电化学修复	中国、捷克、 美国	194	217	218	228	195	220	231	218	260	230	199	
	膜过滤	美国、中国、 法国	82	75	55	71	75	79	66	81	86	97	80	
	催化处理	中国、美国、 印度	140	171	147	172	152	169	225	243	270	305	306	
	吸附处理	中国、美国、 印度	551	602	623	686	675	725	775	854	921	937	998	
静电处理	中国、美国、 印度	24	38	30	37	36	25	40	44	50	48	52		
协同脱汞	中国、美国、 印度	10	17	26	17	22	25	33	65	50	43	70		
评价	毒理研究	美国、中国、 加拿大	536	558	575	670	709	725	731	741	833	757	823	
	迁移、转化	中国、美国、 加拿大	405	456	471	457	431	496	527	555	623	631	684	
	风险评估	美国、中国、 西班牙	266	242	262	302	299	327	353	408	399	400	445	
	检测	中国、美国、 印度	320	339	342	387	375	399	420	497	444	435	384	
管理	管理、政策	美国、中国、 加拿大	162	159	219	221	232	225	271	298	304	334	339	

的主要发文国家集中在中国、美国、加拿大、韩国、法国、印度等。

2010年以来，以燃煤为主的化石燃料和生物质的固定燃烧排放的汞占人为排放源排放的总汞的约24%；其他排放源还包括有色金属生产，约占15%；水泥生产，约占11%；含汞废物，约占7%^[15]。结合各细分领域的发文趋势来看，吸附处理、氧化处理、电化学修复、催化处理等大气、水和土壤通用

表5 汞污染防治领域TOP 10 ESI高被引论文

Table 5 TOP 10 ESI highly cited papers in mercury pollution control

第一作者	第一作者所属机构	所属国家	发文期刊	期刊影响力 (2017年)	题名	文献类型	发表年份	被引频次	研究领域
KIM H N	韩国大学	韩国	Chemical Society Reviews	40.182	Fluorescent and colorimetric sensors for detection of lead, cadmium, and mercury ions	综述	2012	1 113	检测(荧光比色传感器)
AHMARUZ ZAMA M	印度国家技术学院 (National Institute of Technology, Silchar)	印度	Progress in Energy and Combustion Science	25.242	A review on the utilization of fly ash	综述	2010	836	处理技术 (粉煤灰吸附)
NAGAJYOTI P C	东国大学	韩国	Environmental Chemistry Letters	3.125	Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review	综述	2010	814	毒理(植物毒性)
JACOB D J	哈佛大学	美国	Atmospheric Environment	3.708	Effect of climate change on air quality	综述	2009	615	迁移转化
Pirrone, N.	意大利国立研究会(CNR)	意大利	Atmospheric Chemistry and Physics	5.509	Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources	论文	2010	569	迁移转化
XUE X J	新加坡国立大学	新加坡	Journal of the American Chemical Society	14.357	One-step, room temperature, colorimetric detection of mercury (Hg ²⁺) using DNA/nanoparticle conjugates	论文	2008	559	检测(DNA/纳米耦联体)
LI D	中国科学院上海应用物理研究所	中国	Accounts of Chemical Research	20.955	Target-responsive structural switching for nucleic acid-based sensors	综述	2010	519	检测(电化学法)
NIE Z H	哈佛大学	美国	Lab on a Chip	5.995	Electrochemical sensing in paper-based microfluidic devices	论文	2010	501	检测(电化学法)
LU W B	中国科学院长春应用化学研究所	中国	Analytical Chemistry	6.042	Economical, green synthesis of fluorescent carbon nanoparticles and their use as probes for sensitive and Selective detection of mercury(II) ions	论文	2012	496	检测(荧光碳纳米颗粒)
PACYN A E G	挪威空气研究所	挪威	Atmospheric Environment	3.708	Global emission of mercury to the atmosphere from anthropogenic sources in 2005 and projections to 2020	论文	2010	470	迁移转化

表6 汞污染防治领域ESI热点论文

Table 6 ESI hot papers in mercury pollution control

第一作者	第一作者所属机构	所属国家	发文期刊	期刊影响力 (2017年)	题名	文献类型	发表年份	被引频次	研究领域
SUN Q	佛罗里达州立大学	美国	Journal of the American Chemical Society	14.357	Postsynthetically modified covalent organic frameworks for efficient and effective mercury removal	论文	2017	104	处理技术(吸附、螯合、COF)
LI H B	南京大学	中国	Chemosphere	4.427	Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications	综述	2017	67	处理技术(吸附-生物炭)
SHERLALA A I A	马来亚大学	马来西亚	Chemosphere	4.427	A review of the applications of organo-functionalized magnetic graphene oxide nanocomposites for heavy metal adsorption	综述	2018	23	处理技术(吸附-氧化石墨/碳纳米复合材料)
BAHAREH G	德黑兰医科大学	伊朗	Food and Chemical Toxicology	3.977	Concentration of lead and mercury in collected vegetables and herbs from Markazi province, Iran: a non-carcinogenic risk assessment	论文	2018	14	风险评估

的综合处理技术的发文数量一直处于较高的水平；另一方面，电动力修复、催化处理、吸附处理等领域发文量的增速较快，其他领域则呈现波动上升的趋势。在汞污染评价中，近年来对汞污染迁移转化和风险评估的研究增速较快，而对汞的毒理研究的发文量则持续维持在较高水平；对于汞污染的管理与政策研究近年来则呈上升趋势。

高被引论文和热点论文的研究内容在一定程度上能反映一个领域的研究热点。汞污染防治领域的282篇高被引论文(被SCI论文引用次数)中，汞污染处理技术的论文占51%，汞污染评价相关的论文占38%，汞污染管理相关的论文占11%，高被引论文的主要发文期刊为《Chemical Engineering Journal》《Fuel》《Analytical Chemistry》《Atmospheric Chemistry and Physics》。表5统计了汞污染防治领域被引频次TOP 10的ESI高被引论文，表6为汞污染防治领域的4篇ESI热点论文(ESI热点论文是指在过去两年内发表，并且在2018年7—8月内受到引用的次数是其学术领域中前0.1%的文章)，可以看出，高被引论文侧重于汞污染检测、迁移转化等领域的研究，而近期的热点论文则主要对汞污染处理技术进行研究。

3.3 全球重点机构研究布局

重点机构的研究领域布局可以从另一个角度说明汞污染防治领域的科研热点。表7为全球汞污染防治领域发文量排名前15的机构，包括5家中国机构、4家美国机构，巴西、俄罗斯、加拿大、葡萄牙、西班牙和伊朗机构各1家。这些机构的研究方向趋同，主要包括环境科学与生态、化学、工程、毒理学、物理、电化学、海洋和淡水生物学、能源与燃料、气象学和大气科学、公共事业/环境和职业健康10大方向。从高频关键词来看，首先，TOP 15发文机构的研究具有一定的地域特点。例如，中国机构发表的文章中，中国、青藏高原等出现频次高；葡萄牙机构关注阿威罗河口；伊朗机构则关注波斯湾、里海等流域；巴西机构关注亚马孙区域。其次，这些机构更侧重于污染检测、迁移与分布(检测范围包括土壤、河流、高原、鱼类、北极、烟道气等)、毒理研究(生物累积、氧化应激、生物有效性、

表7 全球汞污染防治领域发文量TOP 15机构

Table 7 TOP 15 global organizations in the number of published papers in mercury pollution control

机构名称	所属国家	发文数量/篇	主要研究方向	高频关键词(基于作者关键词)
中国科学院	中国	1 324	环境科学与生态、化学、工程	土壤、中国、鱼类、形态
美国地质调查局	美国	359	环境科学与生态、毒理学、工程	生物累积、鱼类、底泥
中国科学院大学	中国	276	环境科学与生态、化学、工程	青藏高原、孔隙结构、大米、吸附
密西根大学	美国	248	环境科学与生态、工程、毒理学	神经毒理学、野生动物、鱼类、风险评价
俄罗斯科学院	俄罗斯	232	化学、物理、电化学	Frumkin等温线、甲基甲酰胺、生物累积、二甲基甲酰胺
阿威罗大学	葡萄牙	226	环境科学与生态、海洋和淡水生物学、化学	生物累积、氧化应激、阿威罗河口、底泥
伊斯兰阿扎德大学	伊朗	225	化学、环境科学与生态、工程	吸附、波斯湾、里海、晶体结构
华中科技大学	中国	223	工程、能源与燃料、化学	密度泛函理论、吸附、煤燃烧、烟道气
清华大学	中国	223	工程、环境科学与生态、化学	中国、孔隙结构、原子荧光法、排放因子
圣保罗大学	巴西	222	化学、环境科学与生态、毒理学	氧化应激、亚马孙、顺序注射分析、痕量元素
加拿大环境部	加拿大	201	环境科学与生态、气象学和大气科学、工程	稳定同位素、北极、鱼类、生物放大
哈佛大学	美国	201	环境科学与生态、公共事业、环境和职业健康、毒理学	环境暴露、鱼类、产前暴露迟发效应
国家研究委员会	西班牙	198	环境科学与生态、工程、化学	生物有效性、飞灰、汞形态、多孔性
浙江大学	中国	194	工程、化学、环境科学与生态	吸附、活性炭、汞形态、还原
美国国家环境保护局	美国	180	环境科学与生态、工程、气象学和大气科学	生物累积、鱼类、底泥、暴露

暴露等)等方面。

4 中国汞污染防治技术发文情况分析

4.1 中国发文趋势分析

目前我国几乎拥有 UNEP《汞排放定量定性估算工具包》中规定的 11 大类 59 小类的所有排放源,控汞形式十分严峻^[22]。针对我国的汞污染状况,近年来我国出台多项政策和标准:2010 年发布了《电石法聚氯乙烯行业汞污染综合防治方案》完善汞触媒的全过程监督管理机制^[23];2011 年发布了《火电厂大气污染物排放标准》对几种大气汞污染源提出了限制要求^[24];2013 年发布了《关于加强主要添汞产品及相关添汞原料生产行业汞污染防治工作的通知》加强添汞产品生产及相关行业的汞污染防治^[25]。在基础研究方面,我国在汞污染防治领域的发文数量最多、文章影响力排名靠前、高发文量机构数量多。图 7 和图 8 分别为中国在汞污染防治领域的论文总量和 ESI 高被引论文的发表趋势,可以看出,近 10 年来,中国的发文数量不断上升,增长速率超过全球水平,每年的发文数量占全球发文总量的比例不断上升;中国高被引论文数量同样呈逐年上升的趋势,且在全球的占比也不断增加,到 2017 年左右中国高被引论文数量几乎占全球的一半。

4.2 中国研究方向分布

图 9 为中国在汞污染领域的研究方向,可以看出,中国相关论文共涉及 88 个研究方向,其中涉及化学方向的文章数量最多(2 838 篇),与全球的重点研究方向一致。由于我国是汞矿资源大国,金属冶炼、煤炭燃烧和电池、荧光灯的生产及水泥生产为最大的排放源^[22],与全球的研究方向对比,我国更关注工程、方向、能源与燃料、光谱学、设备和仪器等方向;而对环境科学与生态、毒理学、公共事业/环境和职业健康、水资源、海洋和淡水生物学的研究比例相对较低。

4.3 中国重点发文期刊分析

中国汞污染防治相关论文共发表在 977 个期刊上,平均每个期刊发文约 7.2 篇,期刊平均影响因子约为 2.85。表 8 为我国在该领域发文量排名前 20 的期刊,除《Biosensors & Bioelectronics》《Analyst》《Construction and Building Materials》等 5 个期刊外,中国的 TOP 20 发文期刊与国际基本一致,仅在排名上有所不同。中国影响因子最高的 3 个发文期刊分别为:《Chemical Reviews》(IF=52.613)、《Energy & En-

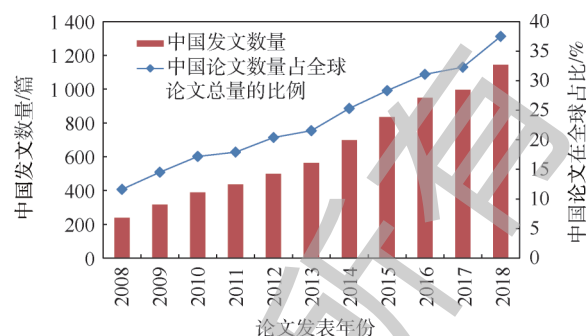


图7 中国汞污染防治领域发文趋势

Fig. 7 Development tendency of mercury pollution control related papers published by Chinese authors over time



图8 中国汞污染防治领域ESI高被引论文数量随时间变化趋势

Fig. 8 Trends of ESI highly cited paper in mercury pollution control published by Chinese authors

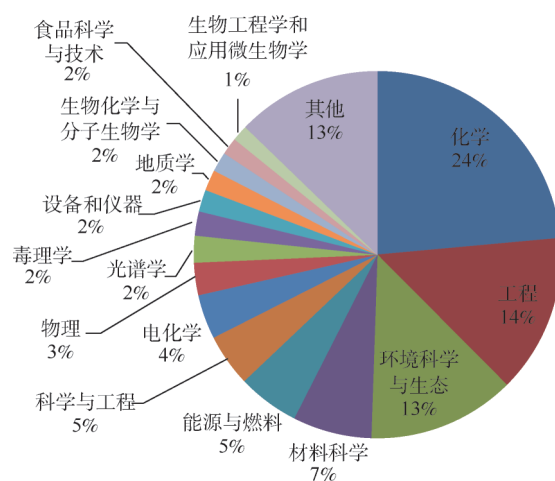


图9 基于Web of Science研究方向的汞污染防治研究方向

Fig. 9 Research areas of mercury pollution control in China based on Web of Science research area

表8 中国在汞污染防治领域发文量TOP 20期刊

Table 8 TOP 20 journals of mercury pollution control in China

序号	期刊名称	研究方向	发文量/篇	影响因子(2017年)
1	Sensors and Actuators B: Chemical	化学/分析、电化学、仪器仪表	194	5.667
2	Fuel	能源与燃料、工程/化学	175	4.908
3	Environmental Science & Technology	工程/环境、环境科学	164	6.653
4	Journal of Hazardous Materials	工程/环境、环境科学	162	6.434
5	Energy & Fuels	能源与燃料、工程/化学	159	3.024
6	RSC Advances	化学/多学科	151	2.936
7	Chemical Engineering Journal	工程/化学、工程/环境	149	6.735
8	Talanta	化学/分析	116	4.244
9	Biosensors & Bioelectronics	生物物理、生物技术与应用微生物学	111	8.173
10	Environmental Science and Pollution Research	环境科学	111	2.800
11	Environmental Pollution	环境科学	106	4.358
12	Microchimica Acta	化学/分析	98	5.705
13	Analytical Chemistry	化学/分析	96	6.042
14	Chemosphere	环境科学	96	4.427
15	Analytical Methods	化学/分析、食品科学与技术、光谱学	87	2.073
16	Science of the Total Environment	环境科学	86	4.610
17	Analyst	化学/分析	77	3.864
18	Construction and Building Materials	施工和建筑技术、工程/市政	73	3.485
19	Journal of Environmental Sciences	环境科学	73	3.120
20	Analytica Chimica Acta	化学/分析	71	5.123

vironmental Science》(IF= 30.067)、《Progress in Energy and Combustion Science》(IF= 25.242)。发文量最多的期刊为《Sensors and Actuators B: Chemical》，主要发文机构为中国科学院、吉林大学、山西大学；其次为《Fuel》，主要发文机构为华中科技大学、华北电力大学和中国地质大学；第三为《Environmental Science & Technology》，主要发文机构为中国科学院、清华大学和中国科学院大学。

4.4 中国重点发文机构

表9为中国汞污染防治领域发文量排名前10的机构，这些机构的研究方向基本一致，主要包括环

表9 中国汞污染防治领域发文量TOP 10机构

Table 9 TOP 10 Chinese organizations in the number of published paper in mercury pollution control

机构名称	发文数量/篇	主要研究方向	高频关键词(基于作者关键词)
中国科学院	1324	环境科学与生态、化学、工程	土壤、中国、鱼类、形态
中国科学院大学	276	环境科学与生态、化学、工程	青藏高原、孔隙结构、大米、吸附
华中科技大学	223	工程、能源与燃料、化学	密度泛函理论、吸附、煤燃烧、烟道气
清华大学	223	工程、环境科学与生态、化学	中国、孔隙结构、原子荧光法、排放因子
浙江大学	194	工程、化学、环境科学与生态	吸附、活性炭、汞形态、还原
上海交通大学	166	环境科学与生态、工程、化学	吸附、烟道气、催化氧化、氧化锰
东南大学	163	工程、能源与燃料、材料科学	微观结构、烟道气、强度、燃煤发电厂
中国地质大学	159	工程、能源与燃料、化学	多孔结构、渗透性、分形维数、页岩气
南京大学	157	化学、环境科学与生态、工程	荧光传感器、吸附、检测、化学提取
北京大学	128	环境科学与生态、工程、化学	吸附、汞排放、红树林、底泥

境科学与生态、化学、工程、能源与燃料4大方向。而从高频关键词来看,中国科学院、中国科学院大学、清华大学、北京大学侧重于对中国的汞污染现状和环境分布等进行研究;华中科技大学、上海交通大学、东南大学侧重于废气中汞污染的处理,相关技术主要涉及吸附、催化氧化等。

5 结论

1) 近10年来,汞污染防治相关的论文数量呈缓慢增加的趋势,近年来增长率有所下降;其中,汞污染处理技术相关的文章数量呈下降趋势,汞污染评价与管理相关的发文量则呈上升趋势。相关论文影响力基本与SCI论文的平均影响力一致。发文量前5的国家依次为中国、美国、加拿大、印度和西班牙。

2) 全球汞污染防治相关论文共发表在3 028个期刊上,研究方向侧重于环境科学与生态、化学、工程、毒理学等。发文量最多的期刊为《Environmental Science & Technology》。全球发文量排名前15的机构分布在中国、美国、巴西、俄罗斯、加拿大、葡萄牙、西班牙和伊朗。这些机构的研究方向趋同,但研究对象具有明显的地域特点,且多侧重于毒理、风险评价、迁移转化等方面的研究。

3) 汞污染防治技术与评价相关的论文几乎各占论文总量的一半,汞污染防治技术中吸附处理、氧化还原、电化学修复和催化处理相关的论文数量最多。近年来,对汞污染的电力修复、催化处理、吸附处理,以及汞污染迁移转化和风险评估研究的发文量增速较快。高被引论文和热点论文侧重于汞的检测、毒理与迁移转化、吸附处理等领域的研究。

4) 我国在汞污染防治领域的发文数量全球最多,增长率高于全球平均水平;在该领域的ESI高被引论文数量居全球首位, h 指数为106,平均每篇文章被引16.11次,论文影响力略低于美国。全球发文量前15的机构中,有5家为中国机构。我国论文的研究方向、高发文量期刊与全球总体水平基本一致。高发文量机构为中国科学院、中国科学院大学、华中科技大学、清华大学、浙江大学和上海交通大学。

5) 我国在论文总量、ESI高被引论文数量、研究领域、高发文机构等方面全球领先,但控汞形式仍然十分严峻。对汞污染的防治还需从源头控制,减少工业源的排放,通过排放标准、质量标准以及技术标准对含汞化学品进行全生命周期管理。同时,加强汞污染信息检测,加大汞替代技术及产品的研发力度,尽快制定完善的汞污染防治政策。

参 考 文 献

- [1] 中国人大网. 关于汞的水俣公约(中文本)[EB/OL]. [2019-01-10]. http://www.npc.gov.cn/wxzl/gongbao/2016-07/11/content_1994472.htm.
- [2] 刘红盼,程颜,朱江,等. 基于文献计量分析的土壤中汞形态现状研究[J]. 化学工程师, 2018(12): 51-56.
- [3] 尚慧洁. 我国汞污染及防治现状综述[J]. 广州化工, 2018, 46(6): 25-26.
- [4] ATWOOD D A, ZAMAN M K. Mercury Removal from Water[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005: 164-181.
- [5] 张文博,李芳勤,吴江,等. 电厂烟气汞脱除技术[J]. 化学进展, 2017, 29(12): 1435-1445.
- [6] HE F, GAO J, PIERCE E, et al. In situ remediation technologies for mercury-contaminated soil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(11): 8124-8147.
- [7] 冯钦忠,陈扬,刘俐媛,等. 发达国家汞污染防治技术现状及发展趋势[C]//中国环境科学学会. 第六届重金属污染防

- 治及风险评价研讨会论文集. 厦门, 2016: 142-148.
- [8] 张正洁, 刘舒, 陈扬, 等. 典型含汞废物处理处置污染防治可选技术研究[J]. 资源再生, 2013(7): 62-65.
- [9] 李震, 陈扬, 冯钦忠, 等. 大气汞监测技术进展[J]. 环境科学研究, 2018, 31(7): 1193-1200.
- [10] HUGHNER R S, MAHER J K, CHILD N M. Review of food policy and consumer issues of mercury in fish[J]. Journal of the American College of Nutrition, 2008, 27(2): 185-194.
- [11] SELIN N E. Global biogeochemical cycling of mercury: A Review[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2009, 34: 43-63.
- [12] 郭书海, 吴波, 胡清, 等. 污染土壤修复技术预测[J]. 环境工程学报, 2017, 11(6): 3797-3804.
- [13] Web of Science. Web of Science 核心合集[DB/OL]. [2018-12-05]. <http://apps.webofknowledge.com/>.
- [14] 吕凯, 张彩丽. 中国土壤重金属污染修复研究的文献计量分析[J]. 农学学报, 2017, 7(5): 56-59.
- [15] UN Environment Programme. Global mercury assessment 2018[DB/OL]. [2019-04-02]. <https://www.unenvironment.org/explore-topics/chemicals-waste/what-we-do/mercury/global-mercury-assessment>.
- [16] 王维朗, 游滨, 张苹, 等. 科技期刊高被引论文对编辑工作的启示[J]. 编辑学报, 2016, 28(6): 572-574.
- [17] 黄春燕. 《能源研究与信息》1998—2017年发文被引情况分析[J]. 能源研究与信息, 2018, 34(3): 182-185.
- [18] UN Environment Programme. Global mercury waste assessment [DB/OL]. [2019-04-02]. http://unepmercurycop1.mediafrontier.ch/wp-content/uploads/2017/08/fact-sheet_global-mercury-waste-assessment.002.pdf.
- [19] MOZAFFARIAN D, SHI P, MORRIS J S, et al. Mercury exposure and risk of cardiovascular disease in two U.S. cohorts[J]. New England Journal of Medicine, 2011, 364(12): 1116-1125.
- [20] ARIYA P A, AMYOT M, DASTOOR A, et al. Mercury physicochemical and biogeochemical transformation in the atmosphere and at atmospheric interfaces: A review and future directions [J]. Chemical Reviews, 2015, 115(10): 3760-3802.
- [21] DAI C N, ZHANG J, HUANG C P, et al. Ionic liquids in selective oxidation: Catalysts and solvents[J]. Chemical Reviews, 2017, 117(10): 6929-6983.
- [22] 刘思妹, 朱毅, 郝睿. 国内外汞污染现状及管理措施[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(S2): 290-294.
- [23] 中汞网. 电石法聚氯乙烯行业汞污染综合防治方案(全文)[DB/OL]. [2019-04-02]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20170419/821078.shtml>.
- [24] 生态环境部. 火电厂大气污染物排放标准[DB/OL]. [2019-04-02]. http://kjs.mee.gov.cn/hjbhbz/bzwb/dqhjbh/dqgdwrywrw-pfbz/201109/t20110921_217534.shtml.
- [25] 中汞网. 关于加强主要添汞产品及相关添汞原料生产行业汞污染防治工作的通知(环发[2013]119号)[DB/OL]. [2019-04-02]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20171205/865696.shtml>.

(本文编辑:郑晓梅)

Bibliometric analysis of mercury pollution prevention and control based on SCI paper

YANG Yuhan¹, JIN Wei², LIU Liyuan^{3,4}, CHEN Yang^{3,4}, ZHANG Litian^{2,5,*}

1. National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Editorial Board of Chinese Journal of Environmental Engineering, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3. Beijing Advanced Sciences and Innovation Centre, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China

4. State Environmental Protection Engineering Technology Center for Mercury Pollution and Control, Beijing 101407, China

5. Documentation and Information Center, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

* Corresponding author, E-mail: zhanglt@rcees.ac.cn

Abstract As a global pollutant, mercury has always been one of the hot issues in the world. In China, the emission of mercury pollution are large and widespread, its local pollution is serious. In order to analyze the current status of paper publishing and research hot points of mercury pollution prevention and control, the SCI papers in the fields of mercury pollution prevention and control technologies, assessment, and management were reviewed with from the perspective of bibliometrics. And countries and institutions of the authors, journals, impacts, research areas and hotspots of these papers were statistically analyzed. The results showed that treating technology and mercury pollution assessment were two main research aspects. In recent decades, the total amount of published papers on mercury pollution increased slowly, of which the published papers related to treating technology declined, and related to mercury pollution assessment increased annually. Mercury pollution treatment technologies mainly include adsorption, redox, electrochemical remediation, catalytic treatment, etc; pollution assessment mainly involves toxicology, migration transformation and risk assessment. And recently the popular research themes are mercury migration and risk assessment, electrodynamic remediation, catalytic or adsorption treatments, and so on. Moreover, the research directions in global research institution are convergence, and they are focused on environmental science, ecology, chemistry, engineering, and toxicology, while the research objects of different institutions present obvious regional property. The total number of published papers and the number of ESI highly cited papers in this field by Chinese authors rank first in the world. The research areas and TOP journals are almost identical to the world. The top publishing institutions are Chinese Academy of Science, Huazhong University of Science and Technology, Tsinghua University, and Zhejiang University, their published paper amount are also among the top of global rankings.

Keywords mercury pollution; pollution prevention and control; SCI paper; bibliometrics