

基于文献计量学的大气汞污染变化历史研究

杨诗宇, 李金建

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年6月13日; 录用日期: 2025年7月12日; 发布日期: 2025年7月28日

摘要

汞作为环境中重要的剧毒重金属元素之一, 其分布和传输过程在全球各地都受到大量关注。为了厘清历史时期大气汞污染研究情况, 本文从文献计量学的角度出发, 采用中国知网(CNKI)和Web of Science (WOS)数据库作为数据来源, 通过CiteSpace与VOSviewer等软件进行可视化分析, 对大气汞污染变化历史进行研究, 结果表明: 1) 2000~2024年国际大气汞污染历史研究呈现显著增长, 而国内研究发文量仅6篇, 与国际关注度差距明显。2) 各研究团队内部形成了较紧密的合作关系, 同时在外部分也与其他团队有一定的交流与合作。3) 研究热点呈现阶段性演变: 2008~2012年聚焦于汞积累机制与监测, 2013~2017年转向沉积过程解析, 2018年至今深化至污染源识别、汞形态转化及历史重建技术。4) 关键词突现分析表明, “排放”与“冰芯”为未来重点方向, 矿区活动、跨介质协同研究成为新兴增长点。5) 全球树轮汞记录揭示工业革命后大气汞负荷增长2~3倍, 其污染源从自然主导转向矿场与化石燃料排放, 区域异质性下森林系统通过苔藓-凋落物-土壤垂直梯度形成关键汞汇。

关键词

汞污染, 文献计量学, 可视化分析

A Bibliometric Analysis of Historical Changes in Atmospheric Mercury Pollution

Shiyu Yang, Jinjian Li

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information, Chengdu Sichuan

Received: Jun. 13th, 2025; accepted: Jul. 12th, 2025; published: Jul. 28th, 2025

Abstract

Mercury, as one of the critically toxic heavy metal elements in the environment, has garnered significant global attention regarding its distribution and transport processes. To elucidate historical

atmospheric mercury pollution, this study utilized the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and Web of Science (WOS) databases as data sources. Visual analysis was conducted using software tools such as CiteSpace and VOSviewer to investigate historical variations in atmospheric mercury pollution. The results indicate that: (1) International research on atmospheric mercury pollution history showed significant growth from 2000 to 2024, while domestic studies in China yielded only six publications, highlighting a notable disparity in global academic attention. (2) Collaborative networks revealed close intra-team partnerships and interdisciplinary cross-team interactions across specialized subfields. (3) Research hotspots evolved in distinct phases: the initial phase (2008–2012) focused on mercury accumulation mechanisms and monitoring methods; the intermediate phase (2013–2017) shifted to analyzing deposition processes; and the later phase (2018–present) deepened investigations into pollution source identification (e.g., chlor-alkali plants, smelting zones), mercury speciation transformation, and historical reconstruction techniques. (4) Keyword burst analysis identified "emissions" and "ice cores" (persisting until 2024) as critical future directions, with mining activities and cross-media comparative studies (tree rings, ice cores, sediments) emerging as new research frontiers. Enhanced international collaboration and integration of pollution source tracing with multi-media environmental records are recommended to advance global mercury pollution governance. (5) Global tree-ring mercury records demonstrate a two- to threefold increase in atmospheric mercury burden post-Industrial Revolution, with dominant pollution sources transitioning from natural origins to mining and fossil fuel emissions. Forest ecosystems, exhibiting regional heterogeneity, act as critical mercury sinks through vertically stratified mercury accumulation in moss-litter-soil systems.

Keywords

Mercury Pollution, Bibliometrics, Visual Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

在现代社会的发展中,环境问题越来越引起人们的重视。工业革命以来,随着钢铁、煤炭、冶金等重工业的迅速发展,城市能源消费和人民生活方式都发生了变化,污染元素(特别是有毒元素)大量进入生态系统中,这些有毒元素不但危害人类的健康[1],而且对植被生长甚至生态系统的平衡性造成破坏[2]。汞作为生物毒性较强的金属元素之一,通过食物链富集进而威胁生态系统健康。汞在森林生态系统中的通量以及储量变化成为汞地球化学循环的重要影响因素。受汞监测记录的时空分布限制,对汞的时空分布变化认识尚不全面。汞污染历史重建及其环境迁移规律研究,通常借助生物介质化学记录来实现动态解析汞污染变化历史。在汞的长期环境监测中,具有清晰时间标识的生物介质通过汞含量的时序波动,可精确反演百年尺度内大气汞沉降通量演变,揭示汞污染物的跨介质迁移特征与生物地球化学循环机制。

1.2. 研究现状

自20世纪五十年代末,由汞污染引起的“水俣病”被科学界认识以来,各国开始十分重视汞的生物地球化学演化规律的研究。20世纪前,对汞的监测依靠自然介质的记录,比如树木年轮、冰芯、泥炭等;1950~1990年代,主动监测技术的兴起,对汞的监测依靠仪器;2000~2010年代,Tekran自动分析仪与汞

同位素技术实现高分辨率监测；2010年代至今，卫星遥感、无人机垂直监测与树木年轮、苔藓等生物介质创新融合。这其中树木年轮对于汞的监测可以很好提供近百年的大气汞污染变化历史。

自20世纪60年代初开始，国际上就已经有学者利用树木年轮资料开展环境污染方面的研究。1975年Lepp首次将年轮化学方法用于检测环境中痕量金属元素的长期变化而获得成功，提出年轮化学的概念[3]。到20世纪末，北美洲、欧洲、亚洲、南美洲以及大洋洲等都相继开展了这方面的工作。而我国的树轮气候学研究开展时间较晚，最早的树轮气候研究是在20世纪30年代和40年代进行的。

近年来，各国学者对其他元素、同位素的关注与研究越来越多，特别是对汞元素的研究。在美国，对在谢南多厄国家公园收集的树轮中的汞积累和同位素组成进行量化处理，证明了树木年轮化学在示踪大气汞浓度变化历史方面的贡献[4]。康虎虎等学者采集中国东北多年冻土区优势树种落叶松和樟子松年轮样品，建立了年分辨率的汞浓度历史记录，研究结果指出了冻土环境和树种对树木年轮汞浓度记录的影响，为全面了解多年冻土区森林汞浓度变化和汞循环过程做出贡献[5]。贺春露等学者以中国天山雪岭云杉为研究对象，探讨了环境因子和幼龄效应对树木年轮汞浓度的影响，并将树木年轮汞浓度记录与新疆地区人为汞排放资料和其他研究数据对比，以评估雪岭云杉树轮汞浓度记录的可靠性，验证了树轮可成为重建历史大气汞趋势可靠的自然档案[6]。

1.3. 研究意义

研究大气汞污染历史变化可以填补研究空白与理论整合。我们可以系统性梳理研究脉络，通过文献计量学方法，系统分析大气汞污染研究历史的演变路径、核心研究主题和学科交叉特点，揭示该领域知识结构和发展规律，为后续研究提供理论框架。本研究通过统计高频关键词及国际合作网络，明确当前的研究热点和薄弱环节，为该领域指明未来的研究方向。

通过历史数据来分析汞污染治理政策的阶段性效果，为全球及区域性汞污染防治政策的制定与优化提供科学依据。通过可视化分析呈现汞污染研究的社会关注度变化，达到推动公众对汞污染危害的认知，促进环境教育与社会参与的目的。

本文基于文献计量学的研究方法，可以突破传统环境历史依赖定性分析的局限。引入文献计量学的定量工具，利用文献数据库的全球覆盖性，对比不同国家、地区汞污染研究的历史轨迹，揭示了经济发展、政策干预与科学研究间的互动关系，提炼全球环境治理的共性规律。

2. 资料和方法

2.1. 数据来源

中文文献来自于中国知网(CNKI)数据库，使用高级检索，检索条件设置为“主题 SU= 树木年轮*汞”字样，时间为1970~2024年，共检索6篇文献。外文文献来自于Web of Science (WOS)，索引选择为SCI-EXPANDED, SSCI，使用高级检索，检索条件设置为“TS=(“tree rings” AND “mercury”)”，时间范围为1980年1月1日~2024年12月31日，共检索66篇文献。经过筛选去除与研究主题无关的文献，共得到中文有效文献6篇，英文有效文献48篇。

2.2. 研究方法

通过使用CiteSpace与VOSviewer软件的可视化分析方法，结合CNKI和WOS数据库，中国知网检索到的文献经Refworks格式导出，导出记录包含文章类型、作者、研究机构、关键词数据库来源等。通过对下载的中英文文献进行可视化，并结合使用Excel，结合文献信息，整理分析得到CNKI以及WOS的发文趋势、作者分析、主要研究力量以及该领域的研究现状、研究热点以及发展趋势。

3. 研究结果

3.1. 发文量分析

从 CNKI 的检索情况(图 1)来看, 1970~2024 年, 国内发表树木年轮汞污染相关的期刊论文共有 6 篇。从发文阶段来看, 国内对树木年轮汞污染领域的学术研究起始于 1979 年, 并呈现出稳定发展的趋势。整体来看, 国内论文发文量不大。

从 WOS 的检索情况(图 1)来看, 1980~2024 年, WOS 收录树木年轮汞污染相关文献共 48 篇, 发文量整体呈现上升趋势, 仅在 2011、2015、2021、2024 年出现小幅度回落, 2020 年, 发文量有显著回升。近年来, 论文发表总体呈现出中文期刊发文量趋于稳定而外文期刊发文量逐步增长的趋势, 这说明国际上树木年轮汞污染领域的相关研究力量在不断增强。

对 WOS 的数据库进行分析论文发文量排名前五的国家(表 1), 结果可知, 全球大气汞污染变化历史研究领域呈现出显著的地域不均衡性。美国位居首位, 中国位列第二。而其他国家发文量均较少, 因此国家与国家之间的合作交流还应受到重视。

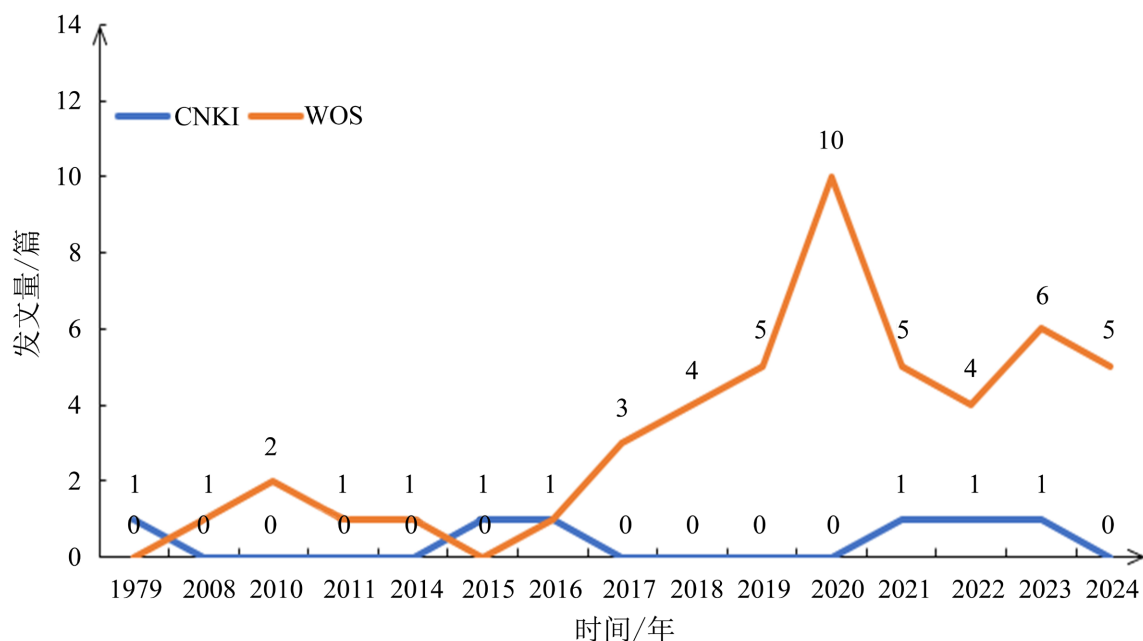


Figure 1. Annual publication volume of papers in the research field of atmospheric mercury pollution historical trends
图 1. 大气汞污染变化历史研究领域论文年度发文量

Table 1. Top 5 countries by total publication volume
表 1. 发文总量排名前 5 的国家

序号	国家	发文量	引用次数	平均被引次数
1	USA	20	608	30.4
2	China	11	108	9.8
3	Czech Republic	7	190	27.1
4	Canada	7	299	32.7
5	Germany	3	25	8.3

3.2. 作者分析

通过 VOSviewer 进行布局, 对 WOS 中检索到的英文文献作者合作关系进行网络图谱展示(图 2), 节点数为 25, 连线数为 93, 连线强度为 105, 代表了图谱中包含 25 位作者, 存在合作关系连线 93 条, 领域总合作关系强度为 105。从图中可以明显看出, 少数几位学者处于网络的中心位置, 这类学者通常是领域内的权威专家, 他们的工作对推动整个研究方向起到关键作用。

通过学者发文量以及被引次数来定量分析国际上大气汞污染变化历史的研究领域影响力较大的学者。根据 WOS 论文统计数据, 发文量排名前五的研究人员见表 2。

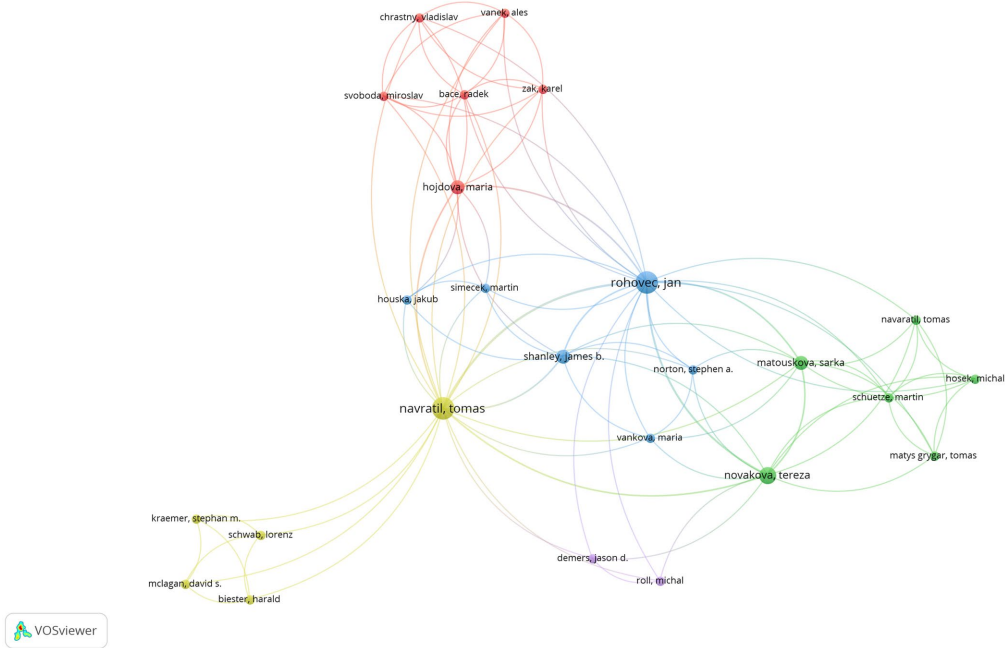


Figure 2. International author co-occurrence network
图 2. 国际作者共现图谱

Table 2. Top 5 authors by publication volume
表 2. 发文量排名前五的作者

序号	作者	发文量	引用次数
1	Gustun. mae sexauer	8	324
2	Navratil, tomas	5	77
3	Rohovec, jan	5	77
4	Guo, junming	4	55
5	Kang, huhu	4	55

3.3. 期刊来源

关于大气汞污染变化历史的研究, 国际上发文量最多《Science of the Total Environment》《Environment Science & Technology》《Environment Pollution》, 其中《Environment Science & Technology》篇均被引最高(表 3)。

Table 3. Top 7 journals by publication volume
表 3. 发文量前 7 的期刊

序号	期刊	发文量	引用次数
1	Science of the total environment	6	193
2	Environmental science & technology	6	230
3	Environmental pollution	6	99
4	Biogeochemistry	3	96
5	Acs earth and space chemistry	2	23
6	Water air and soil pollution	2	55
7	Bulletin of environmental contamination and toxicology	2	52

3.4. 研究热点和前沿

3.4.1. 国内热点分析

使用 VOSviewer 软件来分析关键词，可以反映领域内的研究热点和趋势。本研究基于文献计量学理论，将文献数据中出现频次 ≥ 1 的关键词纳入共现网络构建。通过 VOSviewer 可视化工具生成的关键词聚类图(图 3)显示，各节点对应的圆形聚类区域表征不同的研究主题簇群，其中节点面积与关键词频次呈正相关，连边密度反映关键词间的共现强度。根据图 3 可知，大气汞污染变化历史主要研究热点包括树木年轮、汞、汞污染、年轮化学等。

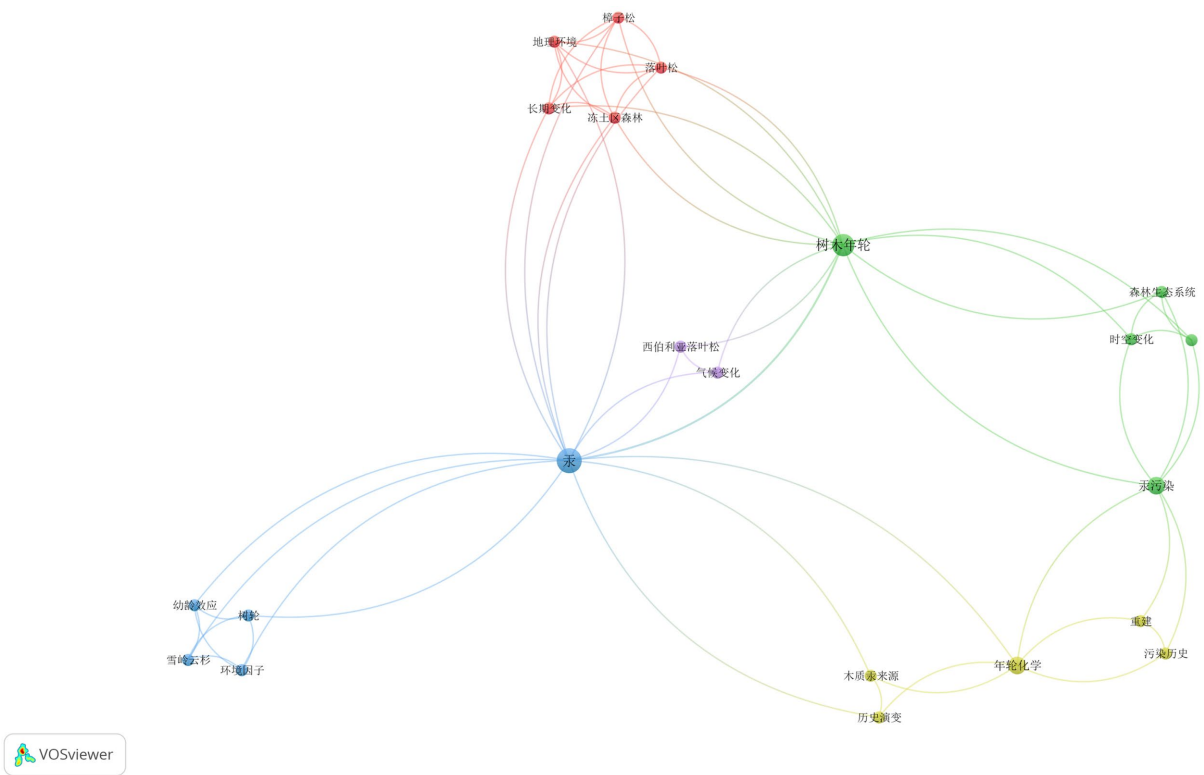


Figure 3. Keyword cluster map of Chinese literature
图 3. 中文文献关键词聚类图

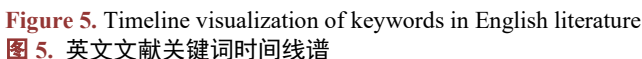
本研究其工文其



图 4. 英文文献关键词聚类图

关键词的叶区分布图能够

12345678910111213141516171819202122232425262728293031323334353637383940414243444546474849505152535455565758596061626364656667686970717273747576777879808182838485868788899091929394959697989910010110210310410510610710810911011111211311411511611711811912012112212312412512612712812913013113213313413513613713813914014114214314414514614714814915015115215315415515615715815916016116216316416516616716816917017117217317417517617717817918018118218318418518618718818919019119219319419519619719819920020120220320420520620720820921021121221321421521621721821922022122222322422522622722822923023123223323423523623723823924024124224324424524624724824925025125225325425525625725825926026126226326426526626726826927027127227327427527627727827928028128228328428528628728828929029129229329429529629729829930030130230330430530630730830931031131231331431531631731831932032132232332432532632732832933033133233333433533633733833934034134234334434534634734834935035135235335435535635735835936036136236336436536636736836937037137237337437537637737837938038138238338438538638738838939039139239339439539639739839940040140240340440540640740840941041141241341441541641741841942042142242342442542642742842943043143243343443543643743843944044144244344444544644744844945045145245345445545645745845946046146246346446546646746846947047147247347447547647747847948048148248348448548648748848949049149249349449549649749849950050150250350450550650750850951051151251351451551651751851952052152252352452552652752852953053153253353453553653753853954054154254354454554654754854955055155255355455555655755855956056156256356456556656756856957057157257357457557657757857958058158258358458558658758858959059159259359459559659759859960060160260360460560660760860961061161261361461561661761861962062162262362462562662762862963063163263363463563663763863964064164264364464564664764864965065165265365465565665765865966066166266366466566666766866967067167267367467567667767867968068168268368468568668768868969069169269369469569669769869970070170270370470570670770870971071171271371471571671771871972072172272372472572672772872973073173273373473573673773873974074174274374474574674774874975075175275375475575675775875976076176276376476576676776876977077177277377477577677777877978078178278378478578678778878979079179279379479579679779879980080180280380480580680780880981081181281381481581681781881982082182282382482582682782882983083183283383483583683783883984084184284384484584684784884985085185285385485585685785885986086186286386486586686786886987087187287387487587687787887988088188288388488588688788888989089189289389489589689789889990090190290390490590690790890991091191291391491591691791891992092192292392492592692792892993093193293393493593693793893994094194294394494594694794894995095195295395495595695795895996096196296396496596696796896997097197297397497597697797897998098198298398498598698798898999099199299399499599699799899910001001100210031004100510061007100810091010101110121013101410151016101710181019102010211022102310241025102610271028102910301031103210331034103510361037103810391040104110421043104410451046104710481049105010511052105310541055105610571058105910601061106210631064106510661067106810691070107110721073107410751076107710781079108010811082108310841085108610871088108910901091109210931094109510961097109810991100110111021103110411051106110711081109111011111112111311141115111611171118111911201121112211231124112511261127112811291130113111321133113411351136113711381139114011411142114311441145114611471148114911501151115211531154115511561157115811591160116111621163116411651166116711681169117011711172117311741175117611771178117911801181118211831184118511861187118811891190119111921193119411951196119711981199120012011202120312041205120612071208120912101211121212131214121512161217121812191220122112221223122412251226122712281229123012311232123312341235123612371238123912401241124212431244124512461247124812491250125112521253125412551256125712581259126012611262126312641265126612671268126912701271127212731274127512761277127812791280128112821283128412851286128712881289129012911292129312941295129612971298129913001



时区图谱分析可以将所分析的数据按照关键词首次出现的时段,把关键词作时区显现,进一步展现关键词的时区演变,得到该领域的研究前沿与发展趋势[8],它可以反映某个关键词在这段时间内受到的重视程度,判断未来值得继续关注的前沿热点[9]。由图6可知,中英文文献关键词突变情况。淡蓝色线段表示在这个时间段内该文章还没有发表,深蓝色线段代表一篇文章发表的时间,红色线段代表关键词突现周期的开始和结束。最早出现的关键词是铅;突现周期持续最长的关键词是土壤类;关键词突变强度最大的是排放,表示排放是大气汞污染变化历史研究方面的重要研究主题;冰芯在爆发时间段的末尾还是呈现红色,它在未来几年内可能会成为前人研究的热点。

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2008 - 2024
lead	2008	1.71	2008	2014	
historical changes	2010	1.21	2010	2011	
soils	2011	1.43	2011	2019	
pine	2011	1.27	2011	2014	
methylmercury	2011	1.21	2011	2014	
emissions	2016	1.73	2016	2019	
core	2014	1.34	2018	2020	
heavy metals	2019	1.32	2019	2020	
mercury	2019	1.23	2019	2021	
ice core	2019	1.47	2021	2024	

1019 环境保护前沿

3.5. 树木年轮汞记录时空变化

3.5.1. 全球汞排放的历史演变趋势

根据 WOS 数据库以及 CNKI 数据库搜索的文献, 可以得出区域树轮汞浓度变化历史(表 4)。研究发现, 大部分地区在 1970s 汞浓度都出现了峰值。在韩国东南地区的研究发现, 在 1970s 以后树轮汞浓度的峰值反映了工业活动的汞排放[10]。在加拿大北部地区的研究发现, 近海岸树轮汞浓度反映了航海业对汞浓度的影响[11]。在捷克共和国用欧洲落叶松研究发现, 汞的高值期在 1970s, 同样的高值也在加拿大北部近海岸地区的树轮中发现[11][12]。康虎虎等在中国天山重建的大气汞浓度趋势反映出, 自第二次工业革命以来, 随着工业化进程加速, 树木年轮汞蓄积水平自 19 世纪末期开始呈现持续性攀升态势。在第二次世界大战期间, 受全球性军事冲突导致的工业生产暂时性萎缩及能源结构调整影响, 树轮汞浓度出现明显阶段性低谷, 这一现象在国际汞循环研究数据库中具有独特的地域性表征。伴随战后全球经济复苏及工业化进程的全面重启, 天山地区树轮汞浓度再次进入快速增长期[13]。在美国地区的树木年轮汞浓度变化中发现, 1800~1900 年, 树轮汞浓度增加到工业革命前的 3 倍以上, 而在 1900 年之后, 有的地区仍在增加而有些地区降低, 这种差异可能反映了地区的汞浓度变化对树木年轮记录的影响[14]。尽管树轮汞浓度趋势存在区域性差异, 但背景区的树轮汞浓度都呈现增加的趋势, 结合湖芯、冰芯的汞浓度趋势可以发现, 大气汞浓度从工业革命到现在增加了 2~3 倍[15][16]。

Table 4. Variations in average tree-ring mercury concentrations across global regions
表 4. 全球不同地区平均树轮汞浓度变化

浓度($\ln g * g^{-1}$)	树种	研究区域	文献
1.8~37.5	欧洲落叶松	捷克共和国	[17]
1.4~28.6	阔叶树, 针叶树	美国东北部	[18]
2.95~5.62	侯恩松, 芹菜顶松	澳大利亚	[19]
4.34~11.15	日本柏树	韩国	[20]
0.1~28.8	黑松	意大利南部	[21]
2.61~4.11	白云杉	加拿大育空	[11]
2.1~8.3	苏格兰松, 欧洲落叶松	捷克共和国	[22]
0.36~3.96	落叶松, 松树	中国东北部	[5]
3.4~249.1	欧洲落叶松	德国	[23]
4.6~394	栗子树	意大利中部	[24]
1.8~19.3	云杉	中国西北部	[25]
0.9~6.0	榕树	秘鲁亚马逊	[26]

3.5.2. 大气汞源 - 汇时空分异

众多研究表明, 树轮中的汞浓度高值出现的区域往往能追踪到其污染源, 无污染地区树轮汞浓度一般低于 $10 \text{ ng} * \text{g}^{-1}$ 。人类活动产生的汞排放是树木年轮汞浓度增加的主要因素。尽管树轮汞同位素的测量由于树轮中汞浓度较低存在一些挑战, 但是对树轮汞同位素的研究能够较好地揭示汞循环[27]。研究发现, 美国弗吉尼亚州阔叶和针叶树的树轮汞同位素比率特征和北美其他地区的树叶汞同位素比率特征没有显著差别, 说明树干中的汞和树叶中的汞有着相同的大气汞源[4]。树轮中的汞浓度高值时间为工业革命时期, 这说明此时大气汞的主要来源为人为排放, 如矿场、工厂排放。而在工业革命前, 树轮中的汞含量较低, 这说明在工业革命前的大气汞来源主要是自然源, 比如火山与地热活动、土壤释汞等。

康虎虎等在对中国祁连山脉树木年轮的汞堆积研究中评估中国西北部祁连山的 Hg 积累动态。平均汞浓度按以下顺序增加：树干木材 < 枝 < 根 < 针 < 树皮 < 土壤 < 凋落物 < 苔藓[13]。这说明，苔藓、凋落物、土壤、树木都是大气汞的主要汇。此外，所搜集的文献大都在各地森林区研究，说明森林区是大气汞的重要汇区。

4. 结论与展望

4.1. 主要结论

该研究采用前人公认较成熟的文献计量学进行研究，与现有研究相比，该研究从年度发文量、发文趋势、作者、关键词等方面相对全面地对大气汞污染变化历史相关领域进行文献研究，系统揭示了过去二十余年大气汞污染历史演变研究的动态特征与发展趋势，研究发现：

1) 国际研究呈现持续增长态势，WOS 收录文献量达 48 篇且合作网络活跃，形成以 25 位核心学者为枢纽的合作体系；而国内研究较少，发文量仅 6 篇，显示出该领域在国际学术界的受关注度显著高于国内。由此可见，后续国家与国家之间的合作交流还应受到重视。

2) 国际作者合作共现图谱显示，在大气汞污染变化历史研究领域有多个研究团体，各研究团队内部形成了较紧密的合作关系，同时在外部也与其他团队有一定的交流与合作。

3) 研究热点随时间呈现明显阶段性变化：2008~2012 年聚焦于汞污染积累机制与监测方法；2013~2017 年转向历史沉积过程分析；2018 年后深化至污染源的追踪与汞形态转化的研究；近三年则重点发展历史重建技术，利用树木年轮等环境介质反演区域污染历史变化。

4) 关键词突现分析显示“排放”和“冰芯”为关键研究方向，说明追踪汞污染源头、整合多种环境介质的研究在未来的研究中会更受关注。矿区活动、历史重建方法与跨介质比较正在形成新的研究热点。

5) 大气汞污染变化历史虽然存在区域差异性，但全球背景区树轮汞浓度普遍呈现 2~3 倍增长趋势，与冰芯记录共同印证了工业革命后大气汞的剧增。工业革命前树轮汞浓度以火山与地热活动、土壤释汞等自然源为主，而在工业化进程中树轮汞浓度以矿场开发、化石燃料排放等人为源为主。森林生态系统通过苔藓 - 凋落物 - 土壤 - 树木的垂直梯度，构成重要的大气汞汇。

4.2. 存在的问题与展望

本研究针对近二十多年来在大气汞污染的变化历史研究领域的工作进行了整理，但仍可能存在一定局限性，比如这次分析只用了 CNKI 和 Web of Science 的核心文献，可能导致数据遗漏，分析不全面。在未来的工作中应纳入更多数据库的文献，可以更全面地揭示该领域的研究进展。本研究基于文献计量学，利用可视化分析，可能存在一定的主观性。检索条件设置为“树木年轮和汞”，检索数据较少，存在局限性。

基于本文的分析，对于大气汞污染变化历史研究领域研究者而言，未来可重点关注以下几个方面的研究。

1) 区域研究的拓展与本土化。当前研究多聚焦欧美地区，国内相关成果仅 6 篇，且缺乏针对东亚季风区、矿区密集带等典型区域的系统性分析。未来需结合中国汞污染特征，加强树木年轮、冰芯、湖泊沉积物等多介质记录的协同研究，构建本土化大气汞沉降历史数据库，为区域环境治理提供科学依据。

2) 多学科方法整合与技术创新。可以把树轮、冰芯、沉积物数据互相验证，同时开发汞同位素示踪、机器学习辅助的高精度历史重建模型，解决单一介质时空分辨率不足的问题。

3) 汞形态转变与生态健康风险研究。现在的研究多关注总汞浓度，对汞毒性形态的生成、迁移及生物累积过程关注不足。未来可以结合分子生物学与微区分析技术，揭示汞在环境介质中的形态转变规律及其对食物链的影响。

4) 全球合作与政策支撑体系构建。依托《关于汞的水俣公约》履约需求, 全球得先建设全球数据共享平台, 建立汞污染历史-现状-预测的全生命周期评估体系; 将环境科学、公共卫生与政策研究结合起来, 制定基于历史重建证据的动态减排政策, 助力碳中和目标下汞污染协同控制。

基金项目

衷心感谢“省级大学生创新创业训练计划”(项目编号: S202410621050)对本项目的资助。

参考文献

- [1] 李争显, 李伟, LEI Jiajun, 等. 常见金属元素对人体的作用及危害[J]. 中国材料进展, 2020, 39(12): 934-944.
- [2] 段斐, 吴福忠, 杨万勤, 等. 川西高山峡谷区暗针叶林粗木质残体金属元素贮量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(4): 623-630.
- [3] Lepp, N.W. (1975) The Potential of Tree-Ring Analysis for Monitoring Heavy Metal Pollution Patterns. *Environmental Pollution* (1970), **9**, 49-61. [https://doi.org/10.1016/0013-9327\(75\)90055-5](https://doi.org/10.1016/0013-9327(75)90055-5)
- [4] Scanlon, T.M., Riscassi, A.L., Demers, J.D., Camper, T.D., Lee, T.R. and Druckenbrod, D.L. (2020) Mercury Accumulation in Tree Rings: Observed Trends in Quantity and Isotopic Composition in Shenandoah National Park, Virginia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **125**, e2019JG005445. <https://doi.org/10.1029/2019jg005445>
- [5] 康虎虎, 刘晓宏, 郭军明, 等. 中国东北多年冻土区树木年轮汞序列[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(7): 1299-1309.
- [6] 贺春露, 高源, 李瑶等. 天山雪岭云杉树木年轮汞记录对区域大气汞历史演变的重建及其方法验证[J]. 地球与环境, 2023, 51(4): 455-464.
- [7] Wang, Y., Jiang, R., Xie, J., Zhao, Y., Yan, D. and Yang, S. (2019) Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model: A Systemic Review. *Journal of Coastal Research*, **93**, 22-30. <https://doi.org/10.2112/si93-004.1>
- [8] 马珮瑶, 邓志华, 向萍, 等. 2000-2021 年废弃物生物炭应用领域研究进展与前沿分析[J]. 中国农学通报, 2023, 39(3): 61-70.
- [9] Wu, P., Wang, Z., Bolan, N.S., Wang, H., Wang, Y. and Chen, W. (2021) Visualizing the Development Trend and Research Frontiers of Biochar in 2020: A Scientometric Perspective. *Biochar*, **3**, 419-436. <https://doi.org/10.1007/s42773-021-00120-3>
- [10] Arnold, J., Gustin, M.S. and Weisberg, P.J. (2018) Evidence for Nonstomatal Uptake of Hg by Aspen and Translocation of Hg from Foliage to Tree Rings in Austrian Pine. *Environmental Science & Technology*, **52**, 1174-1182. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04468>
- [11] Eccles, K.M., Majeed, H., Porter, T.J. and Lehnher, I. (2020) A Continental and Marine-Influenced Tree-Ring Mercury Record in the Old Crow Flats, Yukon, Canada. *ACS Earth and Space Chemistry*, **4**, 1281-1290. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.0c00081>
- [12] Clackett, S.P., Porter, T.J. and Lehnher, I. (2018) 400-Year Record of Atmospheric Mercury from Tree-Rings in Northwestern Canada. *Environmental Science & Technology*, **52**, 9625-9633. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01824>
- [13] Kang, H., Liu, X., Zhang, X., Guo, J., Huang, J., Ying, X., et al. (2024) Important Accumulated Mercury Pool in a Remote Alpine Forest and Dynamic Accumulation Revealed by Tree Rings in China's Qilian Mountains. *Science of The Total Environment*, **951**, Article 175441. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175441>
- [14] Peckham, M.A., Gustin, M.S. and Weisberg, P.J. (2019) Assessment of the Suitability of Tree Rings as Archives of Global and Regional Atmospheric Mercury Pollution. *Environmental Science & Technology*, **53**, 3663-3671. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06786>
- [15] Engstrom, D.R., Fitzgerald, W.F., Cooke, C.A., Lamborg, C.H., Drevnick, P.E., Swain, E.B., et al. (2014) Atmospheric Hg Emissions from Preindustrial Gold and Silver Extraction in the Americas: A Reevaluation from Lake-Sediment Archives. *Environmental Science & Technology*, **48**, 6533-6543. <https://doi.org/10.1021/es405558e>
- [16] Schuster, P.F., Krabbenhoft, D.P., Naftz, D.L., Cecil, L.D., Olson, M.L., Dewild, J.F., et al. (2002) Atmospheric Mercury Deposition during the Last 270 Years: A Glacial Ice Core Record of Natural and Anthropogenic Sources. *Environmental Science & Technology*, **36**, 2303-2310. <https://doi.org/10.1021/es0157503>
- [17] Navrátil, T., Nováková, T., Shanley, J.B., Rohovec, J., Matoušková, Š., Vaňková, M., et al. (2018) Larch Tree Rings as a Tool for Reconstructing 20th Century Central European Atmospheric Mercury Trends. *Environmental Science & Technology*, **52**, 11060-11068. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02117>

-
- [18] Yang, Y., Yanai, R.D., Driscoll, C.T., Montesdeoca, M. and Smith, K.T. (2018) Concentrations and Content of Mercury in Bark, Wood, and Leaves in Hardwoods and Conifers in Four Forested Sites in the Northeastern Usa. *PLOS ONE*, **13**, e0196293. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196293>
- [19] Schneider, L., Allen, K., Walker, M., Morgan, C. and Haberle, S. (2019) Using Tree Rings to Track Atmospheric Mercury Pollution in Australia: The Legacy of Mining in Tasmania. *Environmental Science & Technology*, **53**, 5697-5706. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06712>
- [20] Ahn, Y.S., Jung, R. and Moon, J. (2020) Approaches to Understand Historical Changes of Mercury in Tree Rings of Japanese Cypress in Industrial Areas. *Forests*, **11**, Article 800. <https://doi.org/10.3390/f11080800>
- [21] Rimondi, V., Costagliola, P., Benesperi, R., Benvenuti, M., Beutel, M.W., Buccianti, A., *et al.* (2020) Black Pine (*Pinus nigra*) Barks: A Critical Evaluation of Some Sampling and Analysis Parameters for Mercury Biomonitoring Purposes. *Ecological Indicators*, **112**, Article 106110. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106110>
- [22] Nováková, T., Navrátil, T., Demers, J.D., Roll, M. and Rohovec, J. (2021) Contrasting Tree Ring Hg Records in Two Conifer Species: Multi-Site Evidence of Species-Specific Radial Translocation Effects in Scots Pine versus European Larch. *Science of The Total Environment*, **762**, Article 144022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144022>
- [23] Nováková, T., Navrátil, T., Schütze, M., Rohovec, J., Matoušková, Š., Hošek, M., *et al.* (2022) Reconstructing Atmospheric Hg Levels near the Oldest Chemical Factory in Central Europe Using a Tree Ring Archive. *Environmental Pollution*, **304**, Article 119215. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119215>
- [24] Fornasaro, S., Ciani, F., Nannoni, A., Morelli, G., Rimondi, V., Lattanzi, P., *et al.* (2023) Tree Rings Record of Long-Term Atmospheric Hg Pollution in the Monte Amiata Mining District (Central Italy): Lessons from the Past for a Better Future. *Minerals*, **13**, Article 688. <https://doi.org/10.3390/min13050688>
- [25] Kang, H., Liu, X., Guo, J., Xu, G., Wu, G., Zeng, X., *et al.* (2018) Increased Mercury Pollution Revealed by Tree Rings from the China's Tianshan Mountains. *Science Bulletin*, **63**, 1328-1331. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.09.010>
- [26] Gerson, J., Lehnher, I., Luu, T., Bergquist, B., Szponar, N., Fernandez, L.E., *et al.* (2025) Ficus Insipida Tree Rings as Biomonitoring for Gaseous Elemental Mercury in the Artisanal Gold Mining-Impacted Peruvian Amazon. *Frontiers in Environmental Science*, **13**, Article ID:1531800. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1531800>
- [27] 康虎虎, 刘晓宏, 张馨予, 等. 树木年轮汞记录: 进展、问题和展望[J]. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3733-3742.