



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406119

引用格式:杨玉飞,卢永琦,刘婷婷,等.基于CiteSpace可视化分析粉煤灰堆存对水环境影响研究进展[J].科学技术与工程,2025,25(13):5285-5296.

Yang Yufei, Lu Yongqi, Liu Tingting, et al. Review on the impact of coal fly ash stockpiling on water environment based on CiteSpace visualization analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(13): 5285-5296.

环境科学、安全科学

基于 CiteSpace 可视化分析粉煤灰堆存 对水环境影响研究进展

杨玉飞^{1,2}, 卢永琦^{1,2}, 刘婷婷^{1,2}, 徐思琪^{1,2,3}, 黄瑞潇^{1,2}, 迭庆杞^{1,2*}

(1. 中国环境科学研究院固体废物污染控制技术研究所, 北京 100012;

2. 国家黄河流域生态保护和高质量发展联合研究中心, 北京 100012; 3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100085)

摘要 粉煤灰长期堆存会释放大量的有毒有害物质,并对水环境构成威胁。为全面了解该领域的研究进展,采用文献计量学方法,系统并深入地对中国知网(CNKI)和Web of Science数据库中从建库至2023年间的相关文献进行了可视化分析。结果表明:该领域的年总发文量整体呈上升趋势,其中:中国科学家在该领域进行了大量研究工作,发文量最多,占总发文量的18.87%,为后续研究提供了重要科学依据,美国发文的中介中心性(0.51)明显高于其他国家,研究成果更具国际影响力;研究热点主要围绕粉煤灰中重金属等污染物,探究其在不同条件下的浸出、淋溶释放规律,揭示粉煤灰堆场污染物迁移带来的环境影响。基于高频关键词分析,探讨了粉煤灰污染物组成特征和可能释放到水环境中的污染物类型,系统梳理和分析了污染物的释放机制、规律和关键影响因素,以及污染物在环境介质中的迁移规律研究进展。未来研究应进一步关注粉煤灰堆存过程中Pb、Cr、Hg等重金属,As、Se、Mo等微量元素和 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 等特征污染物的释放问题,探究复杂环境影响下特征污染物的释放特性,并明确不同因素是否存在协同或抑制机制,建立粉煤灰固相中污染物指标与其释放进入水环境的指标间的定量关系,为科学评价粉煤灰环境影响提供理论基础,进而有效防范粉煤灰中污染物对水环境的潜在威胁。

关键词 CiteSpace; 粉煤灰; 水环境; 文献计量学; 可视化

中图分类号 X705; **文献标志码** A

Review on the Impact of Coal Fly Ash Stockpiling on Water Environment Based on CiteSpace Visualization Analysis

YANG Yu-fei^{1,2}, LU Yong-qi^{1,2}, LIU Ting-ting^{1,2}, XU Si-qi^{1,2,3}, HUANG Rui-xiao^{1,2}, DIE Qing-qi^{1,2*}

(1. Institute of Solid Waste Pollution Control Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

2. National Joint Research Center for Ecological Conservation and High Quality Development of the Yellow River Basin, Beijing 100012, China;

3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100085, China)

[Abstract] Long-term stockpiling of coal fly ash releases a large amount of toxic and hazardous substances, posing a threat to the soil and water environment. In order to have a comprehensive understanding of the research progress in this field, a bibliometric method was conducted to systematically and deeply visualize and analyze the relevant literature in CNKI and Web of Science databases from the period of database construction to 2023. The results show that the annual total number of publications in this field is generally on the rise. Among them, Chinese scientists have conducted a substantial amount of research in this field, accounting for the highest publication volume, which makes up 18.87% of the total, providing important scientific foundation for subsequent studies. The betweenness centrality of publications from the United States (0.51) is significantly higher than that of other countries, and its research results have greater international influence. The research hotspots focus on contaminants like heavy metals in coal fly ash, investigating their leac-

收稿日期: 2024-08-15 修订日期: 2025-01-09

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2023YSKY-40); 黄河流域生态保护和高质量发展联合研究项目(2022-YRUC-01-0301)

第一作者: 杨玉飞(1977—),男,汉族,江西上饶人,博士,研究员。研究方向: 危险废物环境风险控制和固体废物资源化环境安全性评价。E-mail: yangyf@craes.org.cn。

* 通信作者: 迭庆杞(1988—),男,汉族,河南南阳人,博士,副研究员。研究方向: 固体废物环境管理和风险评估。E-mail: die.qingqi@craes.org.cn。

ing and release patterns under various conditions, and revealing the environmental impacts of contaminants migration from coal fly ash landfills. Based on high-frequency keyword analysis, the composition of contaminants in coal fly ash and the types of contaminants potentially released into the water environment were examined. A systematic review and analysis of contaminants release mechanisms, release regularity, key influencing factors, and the migration regularity of mechanisms in environmental media were conducted. Future research should further focus on the release of heavy metals such as Pb, Cr, and Hg, trace elements like As, Se, and Mo, and specific mechanisms such as F^- , Cl^- , and SO_4^{2-} , PO_4^{3-} during the coal fly ash stockpiling. Studies should explore the release characteristics of these mechanisms under complex environmental conditions, investigate whether synergistic or inhibitory mechanisms exist between various factors, and establish quantitative relationships between mechanisms indicators in the solid phase of coal fly ash and their release into water environment. This will provide a theoretical basis for scientifically evaluating the environmental impacts of coal fly ash and effectively preventing potential threats to water environment.

[Keywords] CiteSpace; coal fly ash; water environment; bibliometrics; visualization

粉煤灰是燃煤电厂在生产过程中产生的一种主要大宗工业固废^[1], 2022年中国粉煤灰产量达8.31亿t^[2], 综合利用率约为70%^[3], 剩余部分主要以露天堆存、填埋等方式处置。粉煤灰中含有多种无机污染物, 如重金属、氟化物、氮化物及氯化物等^[4]。在自然风化、雨水淋滤等环境影响下, 污染物会不断释放, 并经大气沉降、地表径流及纵向渗透等途径进入土壤和地下水, 对周边环境造成影响。此外, 部分粉煤灰堆场位于生态脆弱区, 一旦管控不当, 极易对当地生态环境造成严重威胁^[5-6]。

随着人们对堆存粉煤灰引起的水环境污染问题的日益关注, 相关研究文献逐渐增加。近年来, 国内外学者在粉煤灰理化性质^[7-8]、浸出毒性特性^[9]及污染物淋溶释放规律^[10]等方面开展了大量研究工作。王雅男等^[11]通过室内模拟实验探究了粉煤灰中氮素(NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N)的淋滤释放规律, 并发现 NO_2^- -N浓度超过《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中Ⅲ类水体标准。袁霄梅等^[12]利用同位素示踪技术并结合堆场水文地质状况研究发现: 粉煤灰的长期堆存一定程度上导致附近地下水中 Cr^{6+} 、 F^- 等污染物浓度升高, 对其周围地下水造成影响。Lange等^[13]通过模拟降雨淋溶作用, 提出粉煤灰中As、Cd、Mo和Zn可长期释放, 并对土壤和地下水存在潜在风险。Szatylowicz等^[14]通过对不同颗粒尺寸煤燃烧获得的粉煤灰进行浸出, 发现在所有粉煤灰浸出液中均发现了多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)。Wang等^[15]系统综述了粉煤灰的颗粒外观、晶体组成、化学成分、比表面积和粒径分布等理化性质对污染物浸出能力的影响, 并提出需要在实际自然条件下更加深入地探究粉煤灰中污染物浸出规律及控制机制。由上述研究可以发现: 粉煤灰堆场是重金属、氟化物和氮素、有机污染物等的重要释放源, 会通过释放和迁移过程对周边水环境质量造成严重影响, 因此识别堆存场景下粉煤灰中污染物的释放迁移规律和环境影响机制是防控其环境风险的关键。

然而, 当前针对该环境问题的研究较为分散, 亟须从宏观尺度上深入并系统地分析该领域的研究现状及发展趋势, 阐明破解粉煤灰环境污染的关键科学问题和技术方向。

文献计量学分析是一种以应用数学和统计学为基础来获取不同研究领域动态的方法, 可帮助研究人员迅速掌握该领域的研究现状、趋势及热点^[16]。目前, 文献计量学方法已经广泛应用于自然科学、社会科学与人文科学等领域^[17-18]。现利用CiteSpace软件, 从文献发表数量、发文国家、发文机构、发文作者和文章关键词等方面, 对粉煤灰堆场对水环境质量影响研究方向的发展态势进行可视化分析, 梳理该领域研究人员关注的重点和研究热点。在此基础上, 研究从水环境质量和风险防控的角度出发, 剖析粉煤灰堆存过程中的污染物释放迁移规律和关键影响因素, 探讨相关研究中尚未解决的关键问题。以期为后续研究人员快速了解该领域研究现状和未来发展提供趋势提供参考与借鉴。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

以全面掌握长期堆存的粉煤灰对水环境质量影响为目标, 系统分析国内外在该领域的研究现状及进展。数据来源于CNKI数据库和Web of Science(WOS)核心合集, 时间设置为建库以来至2023年12月31日; 利用CNKI数据库的高级检索功能, 以“粉煤灰”OR“粉煤灰堆场”OR“堆存粉煤灰”AND“影响”OR“污染”OR“恶化”OR“破坏”AND“水环境”OR“水体”OR“地下水”OR“地表水”OR“水质”OR“水资源”为关键词, 文献类型限定为学术期刊与学术论文, 筛选出95篇中文文献(包括24篇学位论文); 利用WOS数据库高级检索功能, 检索式: TS = (“fly ash” or “coal fly ash” or “Coal-fired fly ash”) AND TS = (influence or effect or impact or pollut * or contaminat *) AND TS = (“water

environment” or “water quality” or “water body”), 研究方向确定为 Environmental Sciences Ecology、Engineering、Water Resources、Energy Fuels、Toxicology、Geochemistry Geophysics、Public Environmental Occupational Health, 筛选出 594 篇英文文献。

1.2 研究方法

运用 CiteSpace 软件对所收集的大量文献数据信息进行可视化输出, 参数设置: 时间切片单位为 1 年, 节点间关系强度选择 Cosine 算法, 阈值选择标准为 g 指数 (g -index), 比例因子 $k = 10$, 对于较为复杂网络, 选择 pruning sliced networks 进行简化。

2 结果与分析

2.1 发文趋势分析

年度文献数量的统计分布在一定程度上能够直观地反映出特定领域研究的动态变化^[19]。与“粉煤灰堆存对水环境质量影响”这一主题相关的文章的发文量如图 1 所示, 可见其整体呈逐年上升的趋势, 并且英文文献的发文量明显高于中文。其中, 2014—2019 年发文量增长速度较快, 可能归因于在此期间世界各地发生的多起粉煤灰环境污染问题, 例如: 2018 年, 山西忻州某电厂违反政府和环保法的规定, 在忻府区内多个乡镇肆意倾倒粉煤灰, 污染了当地环境, 对居民生活造成危害; 2014 年, 美国北卡罗来纳州发生粉煤灰泄漏事件, 该事件导致 50 000 ~ 82 000 t 的煤灰流入了北卡罗来纳州伊甸附近的丹河^[20]。此外, 美国国家环境保护局 (U. S. Environmental Protection Agency, EPA) 在 2015 年颁布了美国联邦政府的煤灰管理规定 (Coal Ash Rule), 旨在规范粉煤灰的管理和处置, 以保护公共健康和环境。

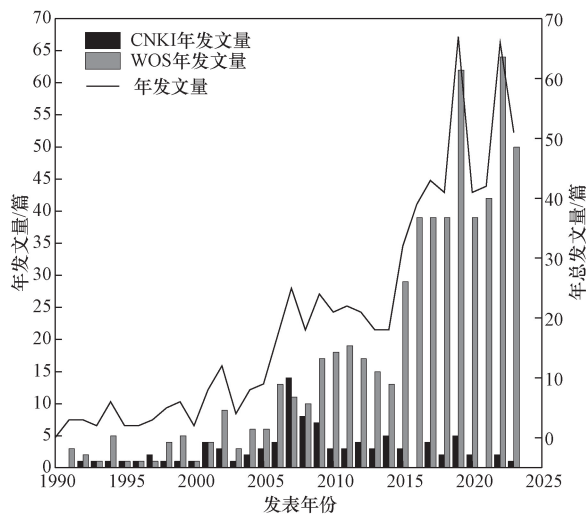


图 1 发文量统计

Fig. 1 Statistics on the number of published literature

2.2 研究力量组成

2.2.1 发文国家组成

以“Country”为研究对象对 WOS 核心合集数据库文献进行分析, 评估各国在该领域的研究贡献。分析发现共有 72 个国家在该领域发表过文章, 根据发文量筛选出了居于前十名的国家, 如表 1 所示。其中, 中国以 144 篇发文量居于首位, 占总发文量的 18.87%。中国科学家在粉煤灰污染领域进行了大量研究工作, Wang 等^[21]的研究表明, Pb、Cr、Cd、Hg 等重金属在粉煤灰中普遍存在, 并且具有较高的环境风险。在对粉煤灰中高危险性重金属 (Cr、Cd、Hg) 迁移规律进行研究时发现, 其浸出率随粉煤灰粒径的增大而降低。同时, 实验数据和迁移模拟结果均表明, 重金属离子会通过渗透作用向土壤深层和地下水迁移。此外, Huang 等^[22]的研究中同样揭示了粉煤灰中的 Cr 具有较大的释放潜力, 需重点关注其长期环境影响, 在其另一篇文章中, Huang 等^[23]进一步研究了粉煤灰中 Hg 的释放, 发现尽管 Hg 浸出率较低 (< 0.110%), 但在某些利用过程中 (如涉及加热的制砖工艺) 可能会导致汞的跨介质排放, 这一潜在风险还需进一步评估。上述科学家的研究为粉煤灰污染评估与防控提供了重要科学依据。

除中国外, 美国和印度以 118 篇发文量分别位列第二和第三。美国的中介中心性为 0.51, 远高于其他国家, 表明其研究成果在国际上更具影响力。各个国家合作网络如图 2 所示, 可以看出在该领域世界各国间的研究关系较为密切。

表 1 WOS 数据库中发文量排名前十国家

Table 1 Top 10 countries with the most published literature in the WOS database

国家	发文量/篇	中介中心性	发文量占比/%	总被引频次	均篇被引频次
中国	144	0.14	18.87	3 292	22.86
美国	118	0.51	15.47	3 165	26.82
印度	118	0.26	15.47	2 990	25.34
澳大利亚	22	0.10	2.88	789	35.86
加拿大	20	0.08	2.62	332	16.60
南非	19	0.19	2.49	359	18.89
波兰	18	0.02	2.36	174	9.67
土耳其	17	0.01	2.23	566	33.29
英国	16	0.37	2.10	643	40.19
韩国	14	0.15	1.83	205	14.64

2.2.2 研究机构分析

以“Institution”为研究对象进行分析, 能够体现各研究机构在该领域的协作关系。CNKI 数据库和 WOS 核心合集数据库中该领域的研究机构合作网络分别如图 3 和图 4 所示。

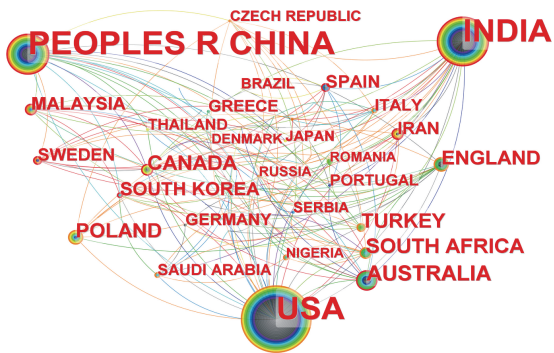


图2 国家合作共现网络

Fig. 2 National cooperation co-occurrence network

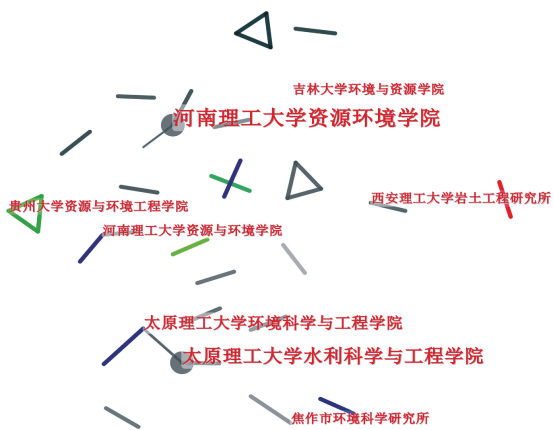


图3 研究机构合作网络(CNKI)

Fig. 3 Research institution cooperation network(CNKI)

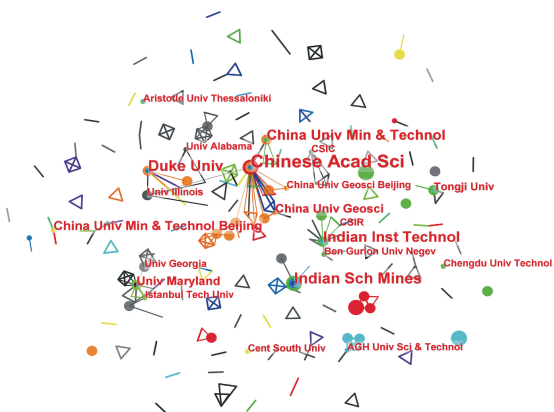


图4 研究机构合作网络(WOS)

Fig. 4 Research institution cooperation network(WOS)

由图3分析可见,CNKI数据库文献的网络节点数量(N)为85,连线(E)为33,密度为0.009 2,各个节点连线之间相对稀疏,表明各研究机构间合作相对较少;而WOS核心合集数据库文献的网络节点数量(N)为442,连线(E)为321,密度为0.003 3(图4)。具体来看,中国科学院与国际上其他机构之间的合作最为密切,其次是以印度矿业学院(Indian Sch Mines)、杜克大学(Duke Univ)、印度理工学院(Indian Inst Technol)为中心的协作网络。以上分析

发现:在粉煤灰堆存对水环境质量影响的研究领域,国际各研究机构之间的合作关系更为密切,而国内机构间的合作有待加强。

2.2.3 发文作者组成

以“Author”为研究对象进行分析,得出该研究领域的文献作者合作共现网络,分别如图5和图6所示。图5为CNKI数据库文献作者合作网络共现图,共涉及187名作者,其中发表文献最多的作者是尹国勋(发表6篇),其次是张永波、时红、郭慧霞,分别发表3篇文章;图6为WOS核心合集数据库文献作者合作网络共现图,共有623名作者在该领域发表文章,发文量最高的作者是Aydilek Ahmet H,共发表6篇文章,其次发文量较高的作者是Vengosh Avner、Hart Megan L、Kevern John T、Holmes Ryan R,分别发表5篇文章。值得注意的是,Aydilek等在其被引频次最高的文章中研究了高碳粉煤灰制路基材料技术,揭示了粉煤灰资源化产品中元素Ba、B、Cu和Zn的浸出规律及其对地下水的影响,并指出粉煤灰掺量的增加和石灰掺量的减少促进了Ba、B和Cu的浸出,而Zn的浸出主要受粉煤灰掺量的影响,且金属浸出到地下水的浓度会根据场地条件发生变化^[24]。



图5 作者合作网络(CNKI)

Fig. 5 Author cooperation network(CNKI)

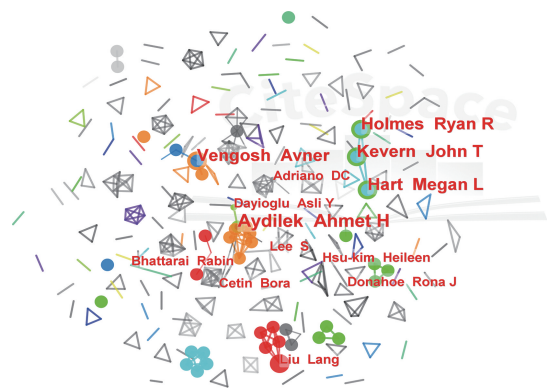


图6 作者合作网络(WOS)

Fig. 6 Author cooperation network(WOS)

3 研究热点与前沿

关键词作为对一篇文章的高度凝练与概括, 通过系统分析可揭示该领域的研究现状与热点^[25]。用 CiteSpace 对 CNKI 数据库文献与 WOS 数据库文献的关键词进行分析, 得到出现频次排在前十名的关键词, 如表 2 所示。

CNKI 文献中出现频次最高的关键词除“粉煤灰”外, 分别是“地下水”“淋滤”“土壤”“重金属”等, 说明中国研究比较关注粉煤灰对地下水环境的影响, 且其主要途径为降水淋滤^[26]。粉煤灰被雨水淋溶后, 释放的污染物会首先在土壤中迁移, 而后通过包气带进一步向下入渗, 长期滞存的灰水会降低土壤环境容量, 并向下进一步迁移到地下水, 造成地下水污染^[9]。重金属作为高频关键词出现表明其在粉煤灰中的普遍存在性, 是粉煤灰中对水环境影响的特征污染物^[27-28]。WOS 数据库文献出现频次最高的关键词是“coal fly ash”, 其次是“heavy metal”“removal”“aqueous solution”“adsorption”“trace element”“groundwater”“soil”等。与 CNKI 文献的发现结果具有高度一致性, 表明国内外的研究均重点关注了粉煤灰中重金属、微量元素等对土壤及水环境产生的影响。结合高频关键词, 研究从以下几个方面对粉煤灰堆场影响水环境质量的环境问题进行分析。

表 2 出现频次前十名的关键词

Table 2 Frequency of the top 10 keywords

CNKI 数据库			WOS 数据库		
关键词	词频	中介中心性	关键词	词频	中介中心性
粉煤灰	44	1.11	coal fly ash	404	0.15
地下水	12	0.10	heavy metal	130	0.23
淋滤	7	0.06	removal	70	0.16
土壤	5	0.04	aqueous solution	70	0.09
重金属	4	0.04	adsorption	69	0.12
综合利用	3	0	trace element	66	0.10
贮灰场	3	0.05	groundwater	58	0.13
水环境	3	0	soil	47	0.20
氟化物	3	0.03	water	47	0.08
灰水	2	0.08	behavior	40	0.12

3.1 粉煤灰污染特性分析

粉煤灰中几种典型污染物的含量分布如表 3 所示。Pb、Cr、Hg 等重金属元素及 Se、As 等微量元素是粉煤灰中主要的重金属类污染物, 这类物质含量约占粉煤灰成分的 0.16% ~ 0.22%^[29]。粉煤灰中的 N、P、S、Cl、F 等无机元素含量呈现出 Cl (0.099% ~ 0.131%)^[30] > P (0.13% ~ 0.28%)^[31] > S (0.02% ~ 0.11%)^[32] > F (0.005% ~ 0.09%)^[33-34] > N (0.01 ~ 0.03%)^[35] 的特征。此外, 部分粉煤灰还含有微量有

机污染物, 如多氯联苯 (polychlorinated biphenyls, PCBs)、多环芳烃 (PAHs) 等, 这是由于煤的不完全燃烧导致有机物残留在粉煤灰中, 其中 PAHs 和 PCBs 主要以 2 环和 3 环 PAHs、2 ~ 4 环 PCBs 等低分子质量的同系物为主^[36]。

不同粉煤灰中污染物种类及含量存在显著差异, 主要取决于发电厂燃煤的类型、使用的煤清洗技术以及化学元素自身性质^[32]。例如, 循环流化床粉煤灰和煤粉锅炉粉煤灰中 Pb、As、Cr 等元素含量相对其他物质更高, 主要是由于煤高温燃烧时, Pb、As、Cr 等中等挥发性元素在炉内蒸发后, 随烟气冷却凝结于细小粉煤灰中, 而 Hg、Cd 等为高挥发性元素, 主要以气态形式逸出^[37]。对于褐煤与烟煤粉煤灰, 褐煤粉煤灰中重金属元素富集程度依次为 Cd > Pb > Zn > As > Cu, 烟煤粉煤灰中则依次为 As > Cd > Zn > Pb > Cu, 该现象主要与粉煤灰粒径与元素化学性质有关^[38]。此外, 粉煤灰中污染物含量也表现出地区性差异, 有研究将内蒙古上都、广西来宾、广西南宁、云南威信地区的粉煤灰污染物含量进行对比时发现, 不同粉煤灰中 B 含量相差范围在 32 ~ 1 445 mg/kg, V 在 141 ~ 1 378 mg/kg^[39]。

表 3 粉煤灰污染物含量分布

Table 3 Distribution of coal fly ash contaminants content

污染物	含量/(mg·kg ⁻¹)	污染物	含量/(mg·kg ⁻¹)
Pb	28 ~ 119.57	P	1 300 ~ 2 800
Cr	5 ~ 950	S	1 000 ~ 1 500
Hg	0.133 ~ 1.26	Cl	990 ~ 1 310
Se	0.46 ~ 25.15	F	47.4 ~ 900
As	3 ~ 33.18	PCBs	0.011 ~ 0.032
N	100 ~ 300	PAHs	0 ~ 0.940

注: 数据来源于文献[9-10, 26, 30-31, 33-35, 39-47], 单位统一换算成 mg/kg。

3.2 粉煤灰对水环境质量的影响

粉煤灰对水环境的影响主要通过污染物释放到浸出液然后迁移至水环境中。部分粉煤灰中污染物的浸出潜力和粉煤灰堆场周边地下水中污染物的浓度分布情况分别如表 4 和表 5 所示。

粉煤灰中的污染物可能会影响地下水的感官性状和一般化学指标。如粉煤灰浸出液通常呈碱性, 可能会影响地下水 pH; 浸出液中还含有硫酸盐、氯化物、氨氮等一般化学指标类污染物, 耿方方等^[48]对粉煤灰浸出液中上述污染物含量进行检测时发现 SO₄²⁻ 浓度高达 999 mg/L; 此外, 粉煤灰中的氟化物、Cr⁶⁺、As、Se、Ba、Mo 等毒性指标在粉煤灰浸出过程中也表现出较高的浸出潜力, 有研究指出粉煤灰浸出液中 Cr⁶⁺ 浓度可达 6.75 mg/L, 为地下水 III 类水体标准的 135 倍^[48], As、Se 在浸出液中浓度

表4 粉煤灰污染物释放潜力
Table 4 Coal fly ash contaminants release potential

粉煤灰来源	水环境指标		水环境影响	参考文献
	一般化学指标	毒理学指标		
中国陕西省	pH、SO ₄ ²⁻ 、Cl ⁻ 、NH ₃ -N、	F ⁻ 、NO ₃ ⁻ 、NO ₂ ⁻ 、Cr ⁶⁺ 等	pH 超标 1.25 倍, SO ₄ ²⁻ 超标 4 倍, Cr ⁶⁺ 超标 135 倍	[48]
中国安徽淮北某火力发电厂的贮灰场	Al ³⁺ 、SO ₄ ²⁻	Cr ⁶⁺ 、Se、NO ₃ ⁻ 、NO ₂ ⁻ 、F ⁻	浸出液超标: Al ³⁺ 为 5.55 倍, SO ₄ ²⁻ 为 1.7 倍, Cr ⁶⁺ 为 2.22 倍, Se 为 9.75 倍, NO ₃ ⁻ 为 1.28 倍, NO ₂ ⁻ 为 9.17 倍, F ⁻ 为 7.16 倍	[52]
中国四座燃煤发电厂	pH、Mn	Hg、As、Cr、Cd、Ba、Pb	浸出液超标: pH 超标 1.32 ~ 1.44 倍, 其中三座电厂 Cr 分别超标 1.76 ~ 2.57 倍, 其中一座电厂 Ba 超标 1.98 倍	[47]
中国大唐国际某煤气化项目	pH、Cu、Zn	B、Cr ⁶⁺ 、Ni、Cd、Ba、Pb、As、Hg	浸出液超标: 不同粒径 As 分别超标 4.89 ~ 12.03 倍, 不同 pH 浸提剂浸出后的浸出液均为碱性, pH 分别超标 0.99 ~ 1.18 倍	[53]
中国内蒙古、广西、云南省五座燃煤电厂	Cu、Zn	Cd、Cr、Pb、Ni	浸出液超标: Cr 最高超标 1.65 倍	[54]
河北省邯郸市某燃煤发电厂	pH、Cu、Zn	Be、B、Co、Ni、Se、Mo、Cd、Sb、Ba、Hg、Tl、Pb	浸出液超标: pH 最高超标 1.49 倍, As、Se 最高超标 300 倍以上, B、Tl、Mo、Ba 最高分别超标 44、31、39、3.3 倍	[49]

注: 水环境影响参考标准均为《地下水环境质量标准》(GB 14848—2017)中Ⅲ类水体标准。

表5 世界各地粉煤灰对水环境污染现状
Table 5 The current situation of coal fly ash-induced water pollution in different regions around the world

粉煤灰来源	水环境指标		水环境影响	参考文献
	一般化学指标	毒理学指标		
印度阿里加尔哈尔杜阿甘杰热电厂	pH、Ca ²⁺ 、硬度、Cl ⁻ 、Na ⁺ 、SO ₄ ²⁻ 等	NO ₃ ⁻ 等	附近地下水理化参数大多超过 WHO(2011)和 BIS(2012)的建议浓度限值	[55]
印度本德尔坎德州占西县帕里恰热电站	Fe、Mn、Al	Ni、Pb、Cr	距灰池 5 km 范围内重金属呈重度污染, 7 km 范围内呈中度污染, 15 km 范围内呈极低污染	[51]
中国安徽省淮南市某粉煤灰堆场	TN、TP、Cl ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 、COD、NH ₃ -N、Ca ²⁺ 、Na ⁺ 、Mg ²⁺ 、HCO ₃ ⁻	F ⁻ 、NO ₃ ⁻	粉煤灰堆场对周边地表水中 TN、TP、F ⁻ 、Cl ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 、NO ₃ ⁻ 浓度, 周边地下水中 COD、NH ₃ -N、TP、Ca ²⁺ 、Na ⁺ 、Mg ²⁺ 、HCO ₃ ⁻ 和 SO ₄ ²⁻ 浓度存在一定影响	[56]
土耳其亚塔甘火电厂	Cu、Fe、Mn、Zn、SO ₄ ²⁻	As、Hg、Cd、Co、Pb	部分地下水样品中 Fe、Pb、Cd 和 Mn 含量高于欧共体和世卫组织的指导值	[57]

可达 3 mg/L 以上, 超出标准的 300 倍^[49]。与重金属类指标相比较, 现有研究较少关注粉煤灰浸出液中 F⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、PO₄³⁻、硝酸盐等指标对水环境的潜在影响, 但根据粉煤灰中污染物含量和浸出浓度结果, 未来研究应更加重视这些污染物对水环境的潜在危害。

现有部分研究已表明, 粉煤灰堆存场已对周边水环境质量造成实际影响, 且可能对周边生态系统造成长期危害。Wang^[50]对粉煤灰堆存场周边的 20

口监测井采集的 480 份水样进行分析, 根据水质指数(water quality index, WQI)分析结果得出灰场周围水质均不适合饮用, 根据危险商数(hazard quotient, HQ)和危险指数(hazard index, HI)进行健康风险评估得出, 煤灰周围 16 种元素中, As、Sb、Cd、Pb、V 和 Cr 是最大的健康风险因子。Verma 等^[51]曾对堆场附近地下水进行重金属污染指数(heavy metal pollution index, HEI)计算, HEI 结果表明在距灰池 5 km 范围内地下水表现为重度污染, 在距灰池 7 km

范围内表现为中度污染,在距灰池 15 km 范围内表现为极低污染。这些研究结果充分证明,粉煤灰堆存场会导致附近水体中出现重金属及其他类型污染物(如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等)超标、理化参数异常等问题,并且这些污染均表现出距离效应。

3.3 粉煤灰污染物释放机制分析

溶解、扩散、吸附、沉淀等是粉煤灰中重金属类污染物释放的主要机制,污染物的赋存形态则是控制其释放的关键因素。

煤高温燃烧会导致粉煤灰中微量元素如: As、Se、Cr、V、Mo 分别主要以 As(V)、Se(IV)、Cr(III)、V(IV)、Mo(VI)形式存在于粉煤灰中^[58]。As 元素通常赋存在粉煤灰颗粒的表面,且 As(V)易溶,有研究表明 As 在粉煤灰中的可溶性状态约占总量的 29.08%,As 与铁矿物具有较高的亲和力,因此 Fe 的存在也会影响其释放行为;Cr 在粉煤灰中 10% 以上以可溶态存在,且酸性越强,浸出浓度越高^[59],通常以 Cr(III)形式进入水体;Mo 主要以 MoO_3 形式沉积在粉煤灰颗粒表面,在碱性条件下具有较高的迁移率;部分 Se 元素可能以亚硒酸盐(Na_2SeO_3 、 CaSeO_3)的形式在粉煤灰中赋存, Na_2SeO_3 物质易溶于水, CaSeO_3 可溶于酸;V 主要以氧化物和硅酸盐形式存在,以氧化物(VO_2)形式存在的 V,极易溶解在酸性或碱性溶液中^[58]。Hg 是煤中常见的有毒元素,会在煤燃烧过程中挥发成烟气,一部分以 HgCl_2 和 HgS 形式吸附在粉煤灰表面^[60],吸附在粉煤灰表面的 HgCl_2 可直接溶于水, HgS 可微溶于酸。

F 元素在粉煤灰中可能以 NaFSiO_4 、 KFSiO_4 和 MgFSiO_4 等硅酸盐形式存在,以硅酸盐形式存在的 F 性质相对稳定,但在酸性条件下仍会部分溶解;Cl 元素可能以金属氯化物(如 KCl 、 NaCl)的形式存在^[61],在雨水淋溶与浸出作用下, Cl^- 可直接溶于水;S 元素在粉煤灰中会以 CaSO_4 、磁黄铁矿 [$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$] 等形式存在^[62],硫酸盐是其主要存在形式,占粉煤灰中总硫含量的 80% 以上^[63],进入水体后会以 SO_4^{2-} 形式存在;N 元素可能以铵盐形式沉积于粉煤灰表面^[64],铵盐的溶解性通常较高,进入水体后可转化为氨氮或硝态氮。P 元素主要以磷酸盐形式存在于硅酸盐矿物中,只有在较低 pH 条件下其浸出量会显著增加,并以 PO_4^{3-} 形式进入水体^[58]。

粉煤灰中的有机污染物(PCBs、PAHs 等)属于疏水性化合物,主要吸附在粉煤灰表层,在水中溶解度较低,在降雨淋溶作用下,携带 PCBs 和 PAHs 的细小颗粒从粉煤灰表面解吸悬浮于水中,随水流进入地表水或地下水。此外,降雨和水流的持续扰动也可使其微量溶于水体,并以乳化态形式

存在^[9]。

关于固体废物中污染物释放机制的研究还可通过耦合释放规律和理论模型进行分析。一般而言,重金属类污染物的释放规律通常符合一维扩散方程、抛物线方程、零级动力学方程、一级动力学方程、二级动力学方程、Elovich 方程和 Freundlich 方程等动力学模型^[65],简单的 Elovich 模型和拟二级动力学模型最适合预测粉煤灰中 Zn 和 Pb 等重金属元素的浸出速率^[66]。粉煤灰中氮的累积释放量随时间的变化符合对数规律^[11]。柱淋溶实验中淋溶液的 pH、Cd 浓度呈多项式曲线形式分布, Cr^{6+} 浓度呈对数曲线形式分布, F^- 浓度呈直线形式分布^[67]。PAHs 从粉煤灰中的溶出规律基本呈现先增后减,最终稳定的趋势^[68]。这些结果表明不同类型污染物的释放规律存在显著差异,主要是由于污染物的性质及其在粉煤灰中的赋存形态不同,导致其释放机制不同^[13]。此外,不同实验条件也是影响污染物释放的关键因素。

3.4 粉煤灰中污染物释放的影响因素分析

粉煤灰向水体释放污染物过程受多种因素影响,主要包括降雨 pH、降雨量(液固比)、淋溶频率与粉煤灰自身物理化学性质等。

pH 是影响粉煤灰中重金属类无机污染物释放的关键因素^[69]。通常情况下,Cr、Cu、Co、Ni 等重金属类元素在酸性条件下更容易被浸出^[39,70];而 Mo 元素则在碱性条件下更容易浸出^[58,71];对于一些两性物质(Al、V、As 等),在极酸或极碱性条件下都应有更高的浸出潜力,例如,粉煤灰中 As 在 $\text{pH} < 4$ 及 $\text{pH} > 9$ 条件下迁移率较高,而在中性条件下其释放量可忽略不计^[72]。目前关于 pH 对粉煤灰中有机物污染物释放的影响研究较少。

污染物浸出浓度也会随固液比的改变而发生相应变化,Dutta 等^[73]研究粉煤灰的长期静态浸出过程时发现:当固液比为 0.05 ~ 0.20 时,在接触时间为 15 d 时,随着固液比的增加,Cr、Pb、As 等元素的浸出浓度呈现增加趋势,而 Fe 元素相反,在固液比为 0.05 时浸出浓度最高;此外,粉煤灰的物化特性^[74]对污染物释放具有直接影响,包括颗粒大小、比表面积以及化学成分等因素,颗粒较小粉煤灰具有更大比表面积,能够更充分地与溶液接触,从而加速污染物的溶解和释放,例如,有研究指出,粉煤灰粒径越小,Al 元素的浸出率越高^[15],粉煤灰的化学成分也对污染物的释放有显著影响。例如,含有高钙和铝硅酸盐成分的粉煤灰在水中可能会形成稳定的沉淀,从而降低重金属的溶解度和释放速率。

在粉煤灰堆存的实际场景中,污染物释放会受

多重因素的复合影响,现有研究主要分析了不同因素对污染物释放的单一影响,而缺乏实际复杂环境条件下的综合模拟,尤其是自然降水变化、温度波动、粉煤灰性质随时间变化等因素对粉煤灰中污染物释放的综合影响,不同因素之间是否存在协同或抑制机制,是未来的研究中应重点考虑的方向。

3.5 粉煤灰堆存场景下污染物迁移规律

对于未采取防渗措施的粉煤灰堆场,污染物可能随降雨淋溶进入非饱和带,经对流、弥散、扩散、吸附等作用,一部分被土壤吸附,另一部分通过空气带入含水层,进而随地下水流进行横向迁移,并在地下水中形成羽状体污染晕扩散。

国内外学者对污染物在地下水中的迁移开展了广泛的研究。目前,使用数值模型是模拟预测污染物在环境介质中迁移的常用方法。美国地质调查局开发的三维地下水流动模型(modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, MODFLOW)与美国国家盐土实验室(U. S. Salinity Laboratory)开发的 Hydrus 模型等成为土壤包气带和地下水中污染物迁移模拟的常用工具^[75-77]。不同的数值模型在粉煤灰污染物迁移研究中有各自的适用场景,传统一维模型会将复杂的迁移过程进行简化,因此更适用于模拟降水入渗污染物在环境介质中的垂直迁移,MODFLOW 等三维模型更适合模拟复杂地下水流动和污染物的迁移过程。王雪等^[77]曾采用 Hydrus-1D 模型模拟预测了 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在包气带中的迁移动态变化。Chowdhury 等^[78]使用 MODFLOW 和 MT3DMS 模型对 Rajshahi 含水层的地下水流量和污染物迁移进行了建模,并表明该模型可用作监测特定位置地下水污染物传输的有效决策工具。

污染物在环境介质中的迁移会受污染物性质、场地水文地质参数等多重因素的影响。在相同环境因素下,非饱和带中苯比萘更容易穿透非饱和带污染地下水,苯在重力和淋洗作用下,能够穿过渗透性差的粉土层进入更深的土层;而萘在相同作用下,大部分萘富集表层,只有少量萘不断向深层土壤扩散和迁移^[79]。高渗透性土层具有较高的渗透系数、强对流和扩散作用、低有机物和矿物吸附性,重金属易随地下水迁移^[80]。在浅埋基岩层中,重金属迁移不仅受包气带岩土层性质的影响,还与基岩的岩性和风化程度相关,基岩破碎较强时,重金属随裂隙水迁移的能力增强。因此,在研究粉煤灰中污染物在土壤和地下水中的迁移时应重点考虑污染物的理化性质和场地的水文地质条件。

现有的数值模型为污染物迁移研究提供了有效工具,但它们在实际应用中仍面临一定的局限

性。例如,这些模型在处理实际环境中的复杂水流和污染物迁移时,通常需要对边界条件和反应过程进行简化,可能导致对污染物迁移路径、速度和降解过程的预测不够精确^[81]。此外,模型的高数据需求和计算资源消耗也是实际应用中的主要挑战。因此,未来的研究应加强数据收集与模型精度优化,并结合人工智能和机器学习方法,以提高预测的准确性和效率。

4 结论与展望

(1) 在研究时间范围内,CNKI 数据库与 WOS 核心合集中关于粉煤灰堆存对水环境质量影响的文章年发文总量呈整体上升趋势,中国发文量最多,占比为总发文量的 18.87%,美国发文量仅次于中国,但其中介中心性最高,研究成果得到广泛认可,中国科学院与国际上的研究机构合作最为密切。

(2) 通过对关键词进行分析,粉煤灰污染物成分复杂,包括重金属、微量元素、N、P、S、Cl、F 等无机物质及少量有机物,现有研究关注更多的是重金属和微量元素,不同类型粉煤灰中污染元素含量差异显著。污染物的赋存形态是控制其释放的关键因素,且不同污染物释放规律不同,污染物释放会受 pH、液固比、污染物自身性质等多重因素影响。粉煤灰堆存场景下可能释放迁移进入水体的特征污染物主要包括 Pb、Cr、Hg 等重金属、As、Se、Mo 等微量元素,以及 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 、氮素等水质指标。对于污染物迁移已有较为成熟的模拟方法,在实际模拟污染物迁移过程中应综合考虑污染物的理化性质和污染场地的水文地质条件等复杂因素影响。

(3) 基于研究现状及热点分析,首先未来研究可更多关注粉煤灰中除重金属等常规污染物之外的其他指标(如 F^- 、COD、有机物等);其次,目前针对粉煤灰在实际复杂环境条件下污染物释放的综合模拟研究仍处于空白,尤其是在考虑自然降水变化、温度波动、粉煤灰性质随时间变化等因素时,不同因素之间是否存在协同或抑制机制,是未来的研究中应重点考虑的方向。最后,目前粉煤灰中污染物含量,与其在特定环境条件下释放至水体中污染物浓度之间的定量关系尚不明确,因此,建立粉煤灰中污染物含量与其淋溶释放进入水体中污染物指标之间的定量关系(例如:粉煤灰中总 N、总 S 等污染物指标分别与释放到水体中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 SO_4^{2-} 等指标的定量关系),对今后固废管理具有重要指导意义,但深入研究这一领域亟须克服粉煤灰中污染物的复杂释放迁移机制,以及定量关系构建中多变量耦合作用等难点。

参 考 文 献

- [1] 周桓锐, 崔高航, 程卓, 等. 粉煤灰改良粉砂土动静力学特性研究[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(4): 1619-1626.
Zhou Huanrui, Cui Gaohang, Cheng Zhuo, et al. Dynamic and static characteristics of fly ash amended chalk soil[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(4): 1619-1626.
- [2] 言九. 2023 年中国粉煤灰行业现状、相关政策及产业链上下游分析[EB/OL]. (2024-02-22) [2024-03-07]. <https://www.huaon.com/channel/trend/950275.html>.
Yan Jiu. Current situation, relevant policies, and upstream and downstream analysis of China's fly ash industry in 2023[EB/OL]. (2024-02-22) [2024-03-07]. <https://www.huaon.com/channel/trend/950275.html>.
- [3] 秦身钧, 徐飞, 李神勇, 等. 粉煤灰中稀土元素的赋存及其提取研究进展[J]. 稀有金属, 2022, 46(8): 1097-1110.
Qin Shenjun, Xu Fei, Li Shenyong, et al. Research progress on occurrence of rare earth elements in coal fly ash and their extraction[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46(8): 1097-1110.
- [4] Zierold K M, Odoh C. A review on fly ash from coal-fired power plants: chemical composition, regulations, and health evidence[J]. Reviews on Environmental Health, 2020, 35(4): 401-418.
- [5] 单雪媛. 粉煤灰中有价元素分布规律及浸出行为研究[D]. 太原: 山西大学, 2020.
Shan Xueyuan. Study on distribution and extraction characteristics of valuable elements in fly ash[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020.
- [6] 王小芳. 基于 CFB 粉煤灰提铝的铁杂质分离基础研究[D]. 太原: 山西大学, 2021.
Wang Xiaofang. Study on the separation of iron impurities based on the extraction of aluminum from CFB fly ash[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2021.
- [7] Revenko A G, Pashkova G V. Study of the chemical composition of coal and coal ash by X-ray fluorescence method: a review[J]. X-Ray Spectrometry, 2024(7): 3444.
- [8] Šulc R, Šídllová M, Formáček P, et al. A study of physicochemical properties of stockpile and ponded coal ash[J]. Materials, 2022, 15(10): 3653.
- [9] Chen Y, Fan Y, Huang Y, et al. A comprehensive review of toxicity of coal fly ash and its leachate in the ecosystem[J]. Ecotoxicology Environmental Safety, 2024, 269: 115905.
- [10] 王智欣, 张凝凝, 彭宝山. 粉煤灰中微量有害元素的淋滤特性研究[J]. 煤化工, 2022, 50(5): 83-86, 90.
Wang Zhixin, Zhang Ningning, Peng Baoshan. Study on leaching characteristics of trace harmful elements in fly ash[J]. Coal Chemical Industry, 2022, 50(5): 83-86, 90.
- [11] 王雅男, 肖长来, 刘婷. 粉煤灰淋滤液中氮对水环境影响的实验研究[J]. 人民长江, 2014, 45(3): 94-96, 100.
Wang Yanan, Xiao Changlai, Liu Ting. Experimental research on nitrogen pollution of fly-ash leachate to water environment[J]. Yangtze River, 2014, 45(3): 94-96, 100.
- [12] 袁霄梅, 赵晋刚, 尹国勋, 等. 某粉煤灰堆放场对周围岩溶地下水的影响分析[J]. 环境监测管理与技术, 2014, 26(2): 48-51, 5.
Yuan Xiaomei, Zhao Yinggang, Yin Guoxun, et al. Influence of fly ash dumping site on karst groundwater[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2014, 26(2): 48-51, 5.
- [13] Lange C N, Flues M, Hiromoto G, et al. Long-term leaching of As, Cd, Mo, Pb, and Zn from coal fly ash in column test[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191: 1-12.
- [14] Sztaylowicz E, Hawrylik E. Assessment of migration of PAHs contained in soot of solid fuel combustion into the aquatic environment[J]. Water, 2022, 14(19): 3079.
- [15] Wang N, Sun X, Zhao Q, et al. Leachability and adverse effects of coal fly ash: a review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 396: 122725.
- [16] 李瑞瑞, 党佩佩, 李琛. 生物炭农田利用领域的研究热点与趋势: 基于文献计量学的可视化分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(33): 14440-14450.
Li Ruirui, Dang Peipei, Li Chen. Hotspots and emerging trends in the research area of agricultural application of biochar: visualization analysis based on bibliometrics[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(33): 14440-14450.
- [17] Wong S, Mah A X Y, Nordin A H, et al. Emerging trends in municipal solid waste incineration ashes research: a bibliometric analysis from 1994 to 2018[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(8): 7757-7784.
- [18] Lü P, Liu X, Yao T. A bibliometric analysis of literature on bibliometrics in recent half-century[J]. Journal of Information Science, 2023(8): 191233.
- [19] Li J, Weng G, Pan Y, et al. A scientometric review of tourism carrying capacity research: cooperation, hotspots, and prospect[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 325: 129278.
- [20] Ku P, Tsui M T K, Liu S, et al. Examination of mercury contamination from a recent coal ash spill into the Dan River, North Carolina, United States[J]. Ecotoxicology Environmental Safety, 2021, 208: 111469.
- [21] Wang C, Liu K, Huang D, et al. Utilization of fly ash as building material admixture: basic properties and heavy metal leaching[J]. Case Stud Constr Mater, 2022, 17: e01422.
- [22] Huang Y, Liu J, Wang G, et al. Concentrations, speciation, and potential release of hazardous heavy metals from the solid combustion residues of coal-fired power plants[J]. Journal of Environmental Research Public Health, 2022, 19(19): 12617.
- [23] Huang Y, Liu J, Wang G, et al. Leachability of mercury in coal fly ash from coal-fired power plants in southwest China[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 887837.
- [24] Cetin B, Aydilek A H, Li L. Experimental and numerical analysis of metal leaching from fly ash-amended highway bases[J]. Waste Management, 2012, 32(5): 965-978.
- [25] 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.
Chen Yue, Chen Chaomei, Liu Zeyuan, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2): 242-253.
- [26] 孙敏, 唐莹, 郝亚婷, 等. 红枫湖水源附近粉煤灰堆场重金属存在形态及静态淋溶规律[J]. 环境化学, 2021, 40(3): 678-686.
Sun Min, Tang Ying, Hao Yating, et al. Heavy metal existence and static leaching rules in fly ash accumulation field near Hongfeng Lake water source[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40

- (3): 678-686.
- [27] 张子哈, 李晓姣, 王红涛, 等. 循环流化床粉煤灰特性对重金属赋存迁移的影响研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(11): 3205-3209.
- Zhang Zihan, Li Xiaojiao, Wang Hongtao, et al. Research progress on influence of fly ash characteristics on occurrence and migration of heavy metals in circulating fluidized bed[J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(11): 3205-3209.
- [28] 许欣, 武小燕, 陈敏洁, 等. 粉煤灰在矿坑生态化利用过程中的环境行为研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2023, 75(1): 73-81.
- Xu Xin, Wu Xiaoyan, Chen Minjie, et al. Environmental behavior of fly ash during the process of ecological utilization of mine pits[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(1): 73-81.
- [29] Rivera N, Kaur N, Hesterberg D, et al. Chemical composition, speciation, and elemental associations in coal fly ash samples related to the Kingston ash spill[J]. Energy & Fuels, 2015, 29(2): 954-967.
- [30] 邓雨生, 郑文凯, 卢晓斌, 等. CFB 锅炉粉煤灰工艺矿物学特性[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(S2): 35-41.
- Deng Yusheng, Zheng Wenkai, Lu Xiaobin, et al. Mineralogical characteristics of CFB boiler fly ash process[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2): 35-41.
- [31] 吴平. 粉煤灰热再生沥青胶浆微观作用机理及其混合料性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- Wu Ping. Study on microscopic mechanism of fly ash hot recycled asphalt mortar and performance of mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [32] Gopinathan P, Santosh M, Dileepkumar V, et al. Geochemical, mineralogical and toxicological characteristics of coal fly ash and its environmental impacts[J]. Chemosphere, 2022, 307: 135710.
- [33] 雷旭. 粉煤灰基超疏水涂层的研究[D]. 太原: 山西大学, 2020.
- Lei Xu. Study on fly ash-based superhydrophobic coating[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020.
- [34] 郭江波. 火电厂粉煤灰中污染物在不同压实条件下的迁移规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- Guo Jiangbo. Study on the migration of pollutants in fly ash from thermal power plants under different compaction conditions[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [35] 韩云婷, 杨利香, 纪晶. 脱硝工艺对粉煤灰材性影响与安全利用控制技术研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(7): 95-100.
- Han Yunting, Yang Lixiang, Ji Jing. Study on effect of denitration on performance of fly ash and the technology of resource security utilization[J]. China Concrete and Cement Products, 2018(7): 95-100.
- [36] Li Z, Chen L, Liu S, et al. Characterization of PAHs and PCBs in fly ashes of eighteen coal-fired power plants[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2016, 16(12): 3175-3186.
- [37] 李快, 栗照帅, 董庭轩, 等. 湿法磁选对粉煤灰中铁和重金属元素的分布影响研究[J]. 无机盐工业, 2024, 56(4): 98-104, 150.
- Li Kuai, Li Zhaoshuai, Dong Tingxuan, et al. Study on effect of wet magnetic separation on distribution of Fe and heavy metal in fly ash[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024, 56(4): 98-104, 150.
- [38] 刘楷, 杨常亮, 李世玉, 等. 火电厂粉煤灰中重金属元素的分布和富集特性[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12): 145-150.
- Liu Kai, Yang Changliang, Li Shiyu, et al. Characteristics of distribution and enrichment of heavy metal elements in fly ash from coal-burning electric power plant[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(12): 145-150.
- [39] Zhao L, Dai S, Finkelman R B, et al. Leaching behavior of trace elements from fly ashes of five Chinese coal power plants[J]. International Journal of Coal Geology, 2020, 219: 103381.
- [40] 张治国, 谭雨柠, 胡友彪, 等. 宁东能源化工基地粉煤灰重金属赋存特征及生态风险评价[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(11): 144-152.
- Zhang Zhiguo, Tan Yuning, Hu Youbiao, et al. Occurrence characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in fly ash of Ningdong Energy Chemical Industry Base[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(11): 144-152.
- [41] 圣楠, 孙晓蕾, 张伟, 等. 粉煤灰协同水热法稳定飞灰中重金属及其机理探究[J]. 燃烧科学与技术, 2022, 28(5): 605-616.
- Sheng Nan, Sun Xiaolei, Zhang Wei, et al. Stabilization and mechanism of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash by co-hydrothermal processing with coal fly ash[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2022, 28(5): 605-616.
- [42] 高林君, 张凝凝, 吕明杰. 三道沟煤矿粉煤灰中重金属元素的赋存状态研究[J]. 煤质技术, 2022, 37(5): 64-69, 74.
- Gao Linjun, Zhang Ningning, Lü Mingjie. Study on leaching characteristics of heavy metal elements in fly ash from Sandaogou coal mine[J]. Coal Quality Technology, 2022, 37(5): 64-69, 74.
- [43] 陈国杰. 循环流化床粉煤灰物化特性及重金属浸出影响研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- Chen Guojie. Study on physicochemical properties and contributing factors of heavy metals leaching of circulating fluidized bed fly ash[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [44] Apostolova D, Kostova I, Bechtel A, et al. PAHs in feed coals and fly ashes from coal-fired thermal power plants in Bulgaria[J]. International Journal of Coal Geology, 2021, 243: 103782.
- [45] Li Z, Li X, Ma H, et al. Polychlorinated biphenyls in fly ashes collected from five coal-fired power plants in North China[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Sanya: IOP Publishing, 2017, 52(1): 012054.
- [46] Basu M, Pande M, Bhadoria P, et al. Potential fly-ash utilization in agriculture: a global review[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(10): 1173-1186.
- [47] Zhao S, Duan Y, Lu J, et al. Chemical speciation and leaching characteristics of hazardous trace elements in coal and fly ash from coal-fired power plants[J]. Fuel, 2018, 232: 463-469.
- [48] 耿方方, 王延辉, 饶虎, 等. 粉煤灰浸出试验在灰场地下水环评中的应用[J]. 电力勘测设计, 2019(12): 34-39.
- Geng Fangfang, Wang Yanhui, Rao Hu, et al. Application of fly ash leaching test in groundwater environmental impact assessment of ash field[J]. Electric Power Survey & Design, 2019(12): 34-39.
- [49] Zhang S, Dai S, Finkelman R B, et al. Leaching characteristics of alkaline coal combustion by-products: a case study from a coal-

- fired power plant, Hebei Province, China[J]. *Fuel*, 2019, 255: 115710.
- [50] Wang J. Statistical study on distribution of multiple dissolved elements and a water quality assessment around a simulated stackable fly ash [J]. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 2018, 159: 46-55.
- [51] Verma C, Hussain A, Madan S, et al. Assessment of heavy metal pollution in groundwater with respect to distance from ash pond by using heavy metal evaluation index[J]. *Applied Water Science*, 2021, 11: 1-6.
- [52] 魏林宏, 叶念军, 朱春芳, 等. 露天堆放粉煤灰对地下水的污染研究[J]. *高校地质学报*, 2013, 19(4): 683-691.
Wei Linhong, Ye Nianjun, Zhu Chunfang, et al. Effects of air exposed coal fly ash on groundwater contamination[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2013, 19(4): 683-691.
- [53] Niu M, Fu Y, Liu S. Distribution and leachability of hazardous trace elements in Lurgi gasification ash from a Coal-to-SNG plant [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2021, 98: 223-233.
- [54] Peng W, Liu Y, Lin M, et al. Toxicity of coal fly ash and coal gangue leachate to *Daphnia magna*: focusing on typical heavy metals[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 330: 129946.
- [55] Khan I, Umar R. Environmental risk assessment of coal fly ash on soil and groundwater quality, Aligarh, India[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2019, 8: 346-357.
- [56] 芮玥纪. 粉煤灰堆场周边水体中重金属分布特征及其环境风险研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
Rui Yueji. Study on the distribution characteristics and environmental risks of heavy metals in water bodies around fly ash dumps[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2024.
- [57] Demirak A, Balci A, Dalman Ö, et al. Chemical investigation of water resources around the Yatagan thermal power plant of Turkey [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, 162: 171-181.
- [58] Tian Q, Guo B, Nakama S, et al. Distributions and leaching behaviors of toxic elements in fly ash [J]. *ACS Omega*, 2018, 3(10): 13055-13064.
- [59] 邱龙凤. 涉煤产业聚集区沟谷型粉煤灰堆场重金属迁移阻隔关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
Qiu Longfeng. Study on key technologies of heavy metal migration and barrier from gully type fly ash dumps in coal industry gathering area [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [60] 黄奕鸣. 贵州省燃煤电厂烟气治理固体副产物中重金属的跨介质迁移潜力研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2022.
Huang Yiming. Study on the cross-media release of heavy metals in the flue gas derived combustion byproducts of coal-fired power plants in Guizhou province, China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2022.
- [61] Deng S, Shu Y, Li S, et al. Chemical forms of the fluorine, chlorine, oxygen and carbon in coal fly ash and their correlations with mercury retention [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 301: 400-406.
- [62] Goodarzi F. Characteristics and composition of fly ash from Canadian coal-fired power plants[J]. *Fuel*, 2006, 85(10/11): 1418-1427.
- [63] 郑以梅. 粉煤灰中环境敏感性微量元素含量分布及淋滤析出特征研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2017.
Zheng Yimei. Distribution and leaching characteristic of environmentally sensitive trace elements on coal ash [D]. Hefei: Anhui University, 2017.
- [64] 张格, 吕晓辉, 梁慧超, 等. 一种粉煤灰中铵离子含量快速测定方法的研究 [J]. *中国水泥*, 2024(S2): 284-286.
Zhang Ge, Lü Xiaohui, Liang Huichao, et al. A rapid method for the determination of ammonium ion content in fly ash[J]. *China Cement*, 2024(S2): 284-286.
- [65] 刘博, 梁宇廷, 孟棒棒, 等. 电解锰渣-赤泥路面砖中锰的浸出行为研究及长期释放预测[J]. *环境科学研究*, 2023, 36(10): 2000-2010.
Liu Bo, Liang Yuting, Meng Bangbang, et al. Study on leaching behavior of manganese in electrolytic manganese residue and red mud paving bricks and long-term release prediction[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(10): 2000-2010.
- [66] Hailu S L, McCrindle R I, Seopela M P, et al. Speciation of major and trace elements leached from coal fly ash and the kinetics involved[J]. *Journal of Environmental Science Health, Part A*, 2019, 54(12): 1186-1196.
- [67] 时红, 王玉和. 电厂粉煤灰场对土壤及浅层地下水污染的试验研究[J]. *太原理工大学学报*, 2005(3): 358-361.
Shi Hong, Wang Yuhe. The study on pollution of ash fields on the soil and shallow groundwater[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2005(3): 358-361.
- [68] 邓寅生, 何莎莎, 韩哲楠. 粉煤灰井下填充时 PAHs 对地下水环境的影响[J]. *环境工程学报*, 2007(6): 109-113.
Deng Yinsheng, He Shasha, Han Zhenan, et al. Impact of PAHs on ground water during mine-filling with fly ash [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007(6): 109-113.
- [69] Izquierdo M, Querol X. Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: an overview[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 94: 54-66.
- [70] 周思雨, 张世文, 李恩伟, 等. 不同 pH 值条件下煤基固废重金属浸出特征及环境风险分析[J]. *安徽工程大学学报*, 2024, 39(1): 53-62.
Zhou Siyu, Zhang Shiwen, Li Enwei, et al. Characteristics and environmental risk analysis of heavy metal leaching from coal-based solid waste under different pH values[J]. *Journal of Anhui Polytechnic University*, 2024, 39(1): 53-62.
- [71] 陈国杰, 袁进, 刘玉香, 等. 循环流化床粉煤灰中重金属的浸出性研究进展 [J]. *应用化工*, 2022, 51(7): 2121-2125, 33.
Chen Guojie, Yuan Jin, Liu Yuxiang, et al. Progress of study on leaching characteristics of heavy metals from circulating fluidized bed fly ash[J]. *Applied Chemical Industry*, 2022, 51(7): 2121-2125, 33.
- [72] Jegadeesan G, Al-Abed S R, Pinto P. Influence of trace metal distribution on its leachability from coal fly ash[J]. *Fuel*, 2008, 87(10/11): 1887-1893.
- [73] Dutta B K, Khanra S, Mallick D. Leaching of elements from coal fly ash: assessment of its potential for use in filling abandoned coal mines[J]. *Fuel*, 2009, 88(7): 1314-1323.
- [74] Xiang W, Han B, Zhou D, et al. Physicochemical properties and heavy metals leachability of fly ash from coal-fired power plant [J]. *International Journal of Mining Science Technology*, 2012, 22(3): 405-409.
- [75] Hariharan V, Shankar M U. A review of visual MODFLOW applications in groundwater modelling [C]//IOP Conference Series;

- Materials Science and Engineering. London: IOP Publishing, 2017, 263(3): 032025.
- [76] 陈铭, 袁立江, 尹洪峰, 等. 基于 Hydrus-1D 的某电厂 COD 污染物在包气带中迁移规律研究[C]//2017 年全国工程地质学术年会论文集. 桂林: 中国地质学会, 2017: 6.
- Chen Ming, Yuan Lijiang, Yin Hongfeng, et al. Study on the migration patterns of COD contaminant in aeration zone of a power plant based on Hydrus-1D[C]//Proceedings of the 2017 National Engineering Geology Annual Conference. Guilin: Geological Society of China, 2017: 6.
- [77] 王雪, 张永波, 张志祥, 等. 基于包气带-含水层联合模型的污染迁移研究[J]. 太原理工大学学报, 2017, 48(5): 805-810.
- Wang Xue, Zhang Yongbo, Zhang Zhixiang, et al. Study on pollution transfer based on coupling model of vadose zone and aquifer [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017, 48(5): 805-810.
- [78] Chowdhury A, Rahnuma M. Groundwater contaminant transport modeling using MODFLOW and MT3DMS: a case study in Rajasthan City [J]. Water Practice Technology, 2023, 18(5): 1255-1272.
- [79] 戎艳青, 王林芳, 党晋华. 山西典型焦化场地特征污染物在非饱和带迁移规律及影响因素[J]. 环境化学, 2023, 42(12): 4278-4291.
- Rong Yanqing, Wang Linfang, Dang Jinhua. Study on the migration law and influencing factors of characteristic pollutants in the unsaturated zone of typical coking sites in Shanxi [J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(12): 4278-4291.
- [80] 王蓉, 梁雨蕾, 陈忠清. 长三角地区环境水文地质特征及其对重金属污染物迁移的影响[J]. 上海国土资源, 2024, 45(2): 48-52.
- Wang Rong, Liang Yulei, Chen Zhongqing. Study on environmental hydrogeological characteristics of the Yangtze River Delta and their impact on the transport of heavy metal contaminants [J]. Shanghai Land & Resources, 2024, 45(2): 48-52.
- [81] Beven K, Germann P R R. Macropores and water flow in soils revisited [J]. Water Resources Research, 2013, 49(6): 3071-3092.