

# 基于文献计量分析有机质影响土壤重金属生物有效性的研究热点和趋势

张梦妍<sup>1,2</sup>, 王成尘<sup>1,2</sup>, 宗大鹏<sup>1,2</sup>, 田 稳<sup>1,2</sup>, 谢瑜媚<sup>1,2</sup>, 向 萍<sup>1,2\*</sup>

(1. 西南林业大学环境污染与食品安全及人体健康云南省创新团队, 云南 昆明 650224;

2. 西南林业大学生态与环境学院/环境修复与健康研究院, 云南 昆明 650224)

**摘 要:** 基于 CNKI 及 Web of Science 数据库, 利用 Citespace 软件, 对该方面的研究主要结构、研究基础、热点问题及趋势等开展分析, 探讨有机质对重金属生物有效性的影响。以中科院为代表的中国研究机构对该领域的研究做出了巨大贡献, 发文总量占 31.8%。该领域大多数文献发表在 Science of the Total Environment 及 Chemosphere 等国际期刊。根据 WoS 文献共被引分析, 得到该领域研究共识主要有三个方面: 一是重金属形态对其生物有效性影响巨大; 二是植物吸收、动物积累重金属与有机质及其他环境因素密切相关; 三是有机质与重金属的相互作用如溶解—沉淀、氧化—还原等是影响重金属迁移转化及生物有效性的机制。根据关键词共现分析, 得到该领域国际研究的热点类型共 11 类。通过 WoS 文献高被引文献分析, 研究主要集中在不同来源有机质与重金属在固相、液相体系环境中相互作用, 对重金属的活化或固定的作用机制及相关应用。根据关键词突现分析, 该领域“大米”、“生物炭”、“修复”等是目前国际研究热点。

**关 键 词:** 有机质; 重金属; 生物有效性; Citespace; 可视化分析; 文献计量

**中图分类号:** X53    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0564-3945(2022)05-1248-13

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022012601

张梦妍, 王成尘, 宗大鹏, 田 稳, 谢瑜媚, 向 萍. 基于文献计量分析有机质影响土壤重金属生物有效性的研究热点和趋势 [J]. 土壤通报, 2022, 53(5): 1248 - 1260

ZHANG Meng-yan, WANG Cheng-chen, ZONG Da-peng, TIAN Wen, XIE Yu-mei, XIANG Ping. Research Hotspots and Trends of Organic Matter Affecting Bioavailability of Heavy Metals in Soil based on Bibliometrics Analysis[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(5): 1248 - 1260

**【研究意义】** 重金属对环境和人类健康的影响受到广泛关注, 重金属的生物有效性已成为现阶段的研究热点<sup>[1]</sup>。重金属的生物有效性 (bioavailability) 通常被定义为有毒物质重金属到达发挥毒性作用位点的速率和程度<sup>[2]</sup>。重金属的生物有效性对污染土壤的修复起着至关重要的作用<sup>[3]</sup>。土壤中的重金属能够通过食物链发挥毒性效应, 其毒性效应与重金属的来源、总量、土壤性质及植物吸收速率、动物积累程度密切相关。同时, 土壤有机质主要来自于植物、动物、微生物残体及分泌物, 含有丰富的羧基、羟基、氨基、巯基等官能团, 不仅能与金属离子发生金属-有机配合作用, 还能对重金属起包裹作用, 对土壤表面负电荷量有重要贡献<sup>[4]</sup>, 是土壤重金属的吸

附剂, 调节着重金属的生物有效性和流动性<sup>[5]</sup>。然而, 有机质与重金属相互作用下, 对重金属起到活化还是固定作用, 不同研究的结果显示不尽相同<sup>[3, 6]</sup>。

**【前人研究进展】** 不同分子量、矿化结构的有机质与重金属发生配位作用和络合作用, 对重金属的生物有效性有不同的效应<sup>[7-8]</sup>; 小分子有机质具有活化重金属的作用, 可以促进植物富集, 而分子量大的土壤有机质如腐殖酸等, 很大程度上是与重金属结合形成不溶于水的络合形态, 降低重金属的迁移能力和植物可给性<sup>[9]</sup>。研究有机质对重金属的生物有效性的影响, 能够为污染土壤、农产品等安全的健康风险评估提供帮助, 并对针对性的开展土壤修复、阻控农产品污染起到重要作用。

收稿日期: 2022-02-06; 修订日期: 2022-03-23

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目 (2022J0508)、云南农业基础研究联合专项重点项目 (202101BD070001-023)、国家林业和草原局林草科技创新青年拔尖人才项目 (2020132613)、国家自然科学基金项目 (41967026) 和云南省高层次人才引进计划青年人才项目 (YNQR-QNRC-2018-049) 资助

作者简介: 张梦妍 (1990-), 女, 河北石家庄人, 博士研究生, 研究实习员, 主要从事土壤污染及健康方面研究, E-mail: zhang\_mengyan@126.com

\*通讯作者: E-mail: xiangping@swfu.edu.cn

【本研究切入点】利用文献计量学理论和方法来对科学研究领域的发展现状与趋势进行探究, 已被国内外众多研究学者广泛应用<sup>[10-12]</sup>。本文运用可视化分析 CiteSpace 软件, 基于 1991~2021 年 CNKI 数据库与 Web of Science 核心数据库, 对有机质作用下重金属生物有效性的相关文献进行图谱分析。【拟解决的关键问题】旨在清晰和直观展示本领域的研究现状、研究热点及未来研究趋势, 以期为今后相关研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究的英文文献来源于 Web of Science, 中文文献来自中国学术期刊出版 CNKI 总库, 时间范围为 1991~2021 年, 检索方法为 Web of science 的检索公式为  $TS = (\text{heavy metal AND bioavailability AND organic matter})$ , 共计 1709 篇, 其中文章类 1582 篇 (包含综述类文章 88 篇), 会议论文 99 篇, 书籍篇章 28 篇, 导入软件去重复, 并采用人工复筛方法, 对标题和摘要进行审阅, 去除内容明显不相关的文献, 共 1593 篇。CNKI 检索公式为主题:  $(\text{重金属 and 有机质 and 生物有效性/生物可给性})$ , 共计 607 篇, 导入软件去重复及人工复筛后, 共计 594 篇, 其中包含期刊 164 篇, 学位论文 424 篇, 会议 6 篇。

### 1.2 分析方法

本文采用 CiteSpace 软件, 结合 Web of science 网站检索结果分析、知网研学统计分析, 以及 Excel 统计分析等方法, 对数据实现文献计量学的可视化分析, 通过可视化图谱, 结合文献信息, 分析本领域内的研究背景、研究现状及研究热点和发展趋势。

## 2 结果与讨论

### 2.1 发文量年度变化趋势

图 1 是 1991~2021 年有机质作用下重金属的生物有效性研究的中英文文献发文量的逐年统计结果。其中, 英文文献数量总体呈上升趋势, 个别年份有小幅波动, 在 2015 年后急剧上升, 显示了该领域的研究热度不断提高。中文发文量自 2000 年才有相关研究, 起步较晚, 总量较少。

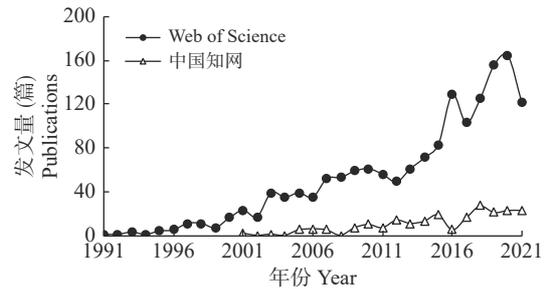


图 1 1991~2021 年发文量  
Fig.1 Publications from 1991 to 2021

### 2.2 主要研究国家及机构分析

采用 Citespace 软件进行外文文献中发文国家共现分析 (表 1)。结果显示, 发文国家中数量最高为中国共 543 篇, 占发文总量的 31.8%, 中心度达 0.55。其次是美国, 数量 162 篇, 占比 9.5%, 中心度 0.62。西班牙 99 篇和法国 73 篇较少, 中心度分别是 0.14 和 0.18。表明中国研究机构和学者在该领域的研究数量最多, 展示了中国日益强大的科研实力, 中心度显示了我国与其他国家紧密合作, 开展相关工作, 但总体上看, 合作强度稍弱于美国。西班牙和法国也有大量相关研究, 且与其他国家的合作较为紧密。其余国家的研究工作较为集中, 未与其他国家开展更为广泛的合作关系。

表 1 外文文献发表该领域论文最多的 5 个国家  
Table 1 Top 5 countries published the articles in foreign literature

发文国家 Country	数量 (篇) Amount	中心度 Centrality	发文比例 (%) Proportion
中国	543	0.55	31.8
美国	162	0.62	9.5
西班牙	99	0.14	5.8
法国	73	0.18	4.3
巴西	69	0.02	4.0

发文量在一定程度上代表着开展该领域研究的机构实力。表 2 对已获得的文献进行发文机构统计, 其中外文研究机构根据 Web of science 中分析统计结

果, 中文期刊文献以发文机构计算, 学位论文以研究者毕业机构为准。总体来看, 中国科学院无论在外文研究机构, 还是中文研究机构中, 都占有非常

大的比重, 其科研实力不容小觑。此外, 外文研究机构中, 法国国家科学研究中心、法国国家农业食品与环境研究院发文量也位列前茅。浙江大学、西北农林科技大学在外文期刊发表方面数量分别位于 6、7 位, 西班牙科学研究会、埃及知识库及南澳大学排名依次在 8~10 位。而分析中文研究机构, 可以发现研究有机质与重金属生物有效性的机构中, 浙江

大学占据主导地位, 其次是西北农林科技大学、中国科学院, 南京农业大学, 中国农业科学院及西南大学, 分列 2~6 位, 四川农业大学及兰州大学, 湖南农业大学, 华南及华中农业大学发文量递减, 位于 7~11 位。也可由中文研究机构名单发现主要是农林类院校开展相关研究较多。

表 2 发文量前 10 位的研究机构  
Table 2 The top 10 research Institutions published the articles

标注外文研究机构 Research Institute	发文量 (篇) Amount	发文比例 (%) Proportion	标注中文研究机构 Research Institute	发文量 (篇) Amount	发文比例 (%) Proportion
中国科学院	165	9.7	浙江大学	36	6.1
法国国家科学研究中心	53	3.1	西北农林科技大学	26	4.3
中科院南京土壤研究所	47	2.8	中国科学院	24	4.0
中国科学院大学	44	2.6	南京农业大学	22	3.7
法国国家农业食品与环境研究院	42	2.5	中国农业科学院	19	3.2
浙江大学	40	2.3	西南大学	18	3.0
西北农林科技大学	37	2.2	四川农业大学	14	2.4
西班牙科学研究会	36	2.1	兰州大学、湖南农业大学	12	2.0
埃及知识库	34	2.0	华南农业大学、华中农业大学	10	1.7
南澳大学	29	1.7			

### 2.3 主要发文期刊分析

通过对发文期刊的统计分析, 便于研究者开展资料收集和论文发表。研究领域主要发文期刊发文量排名前五的统计如表 3。主要发文期刊统计表, 其中外文期刊影响因子为 Web of Science 中的 JCR (Journal of Reports) 数据, 中文期刊影响因子来自“中国学术期刊综合引证报告 2021 年版”期刊复合影响因子。外文期刊发文量总量较多, 发文量前几位

的期刊都隶属于环境科学领域, 前两名是 Science of the Total Environment 及 Chemosphere, 发文量占 6% 以上, 5 个外文期刊均在中科院分区内隶属环境科学与生态学大类, 环境科学小类, Ecotoxicology and Environmental Safety 也属毒理学小类。中文文献中期刊类发文量总数较少, 主要发文中集中在农业环境科学学报共 18 篇占比 11%, 说明该研究问题与农业环境科学密切相关, 其他期刊主要为环境类研究期刊。

表 3 主要发文期刊统计表  
Table 3 Main journals published the articles

外文期刊 Journal	发文量(篇) Amount	影响因子 Impact Factor	发文比例 (%) Proportion	中文期刊 Journal	发文量 Amount	影响因子 Impact Factor	发文比例 (%) Proportion
Science of the Total Environment	109	7.963	6.8	农业环境科学学报	18	3.026	11.0
Chemosphere	101	7.086	6.2	环境科学	7	3.936	4.3
Environmental Pollution	89	8.071	5.5	环境污染与防治	5	1.416	3.0
Environmental Science and Pollution Research	77	4.223	4.8	环境化学	5	1.873	3.0
Ecotoxicology and Environmental Safety	64	6.291	4.0	环境工程	5	1.782	3.0

### 2.4 研究内容及热点分析

**2.4.1 外文共被引文献分析 (研究基础)** 共被引分析是 Citespace 软件最强大的功能之一, 通过文献之间的共被引关系可以挖掘出被引中心度、频次最高的论文以及被引论文之间的关系。被引中心度、频次、突现性高的文献代表着该领域广泛认可的研究背景和理论基础, 即关键文献<sup>[13]</sup>。但由于中文 CNKI 检索的文献结果不具备被引文献数据, 本文仅

对外文文献开展共被引文献分析, 按照中介中心度为主排序, 中心度 > 0.1 或频次 > 20 或突现性 > 10 的作为关键共被引文献, 筛选结果共 10 篇如表 4 所示:

通过分析共被引文献, 可得出本领域的主要研究理论基础。从上述文献的研究内容、对象及结果来看, 开展有机质作用下重金属的生物有效性问题主要基于四个研究层面。

表 4 关键文献表  
Table 4 Key literatures

中心度 Centrality	年份 Year	第一作者 Author	期刊 Journal	标题 Title	参考文献 Reference
0.14	2003	Tipping,E	Environmental Pollution	The solid-solution partitioning of heavy metals (Cu, Zn, Cd, Pb) in upland soils of England and Wales	[14]
0.13	2011	Karami,N	Journal of Hazardous Materials	Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass	[15]
0.13	2008	Vermeulen,F	Environmental Pollution	Habitat type-based bioaccumulation and risk assessment of metal and As	[16]
0.13	2009	Van Gestel ,CAM	Science of the Total Environment	Physico-chemical and biological parameters determine metal bioavailability in soils	[17]
0.12	2005	Lu,AX	Geoderma	Time effect on the fractionation of heavy metals in soils	[18]
0.10	2006	Ma,YB	Environmental Toxicology and Chemistry	Short-term natural attenuation of copper in soils: effects of time,temperature, and soil characteristics	[19]
0.03	2014	Bolan,N	Journal of Hazardous Materials	Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils – To mobilize or to immobilize?	[3]
0.03	2014	Ahmad,M	Chemosphere	Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water:A review	[20]
0.00	2015	Zhao,FJ	Environmental science &Technology	Soil Contamination in China: Current Status and Mitigation Strategies	[21]
0.01	2017	Lu,KP	Journal of Environmental Management	Effect of bamboo and rice straw biochars on the mobility and redistribution of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in contaminated soil	[22]

(1) 有机质作用下重金属在土壤中的的分级提取和形态。如 Lu 研究了时间对中国 3 种典型土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 分馏的影响, 其采用连续提取法对土壤中外源添加重金属进行分馏分析, 发现有机质含量高的土壤中, 有机质结合态组分更高<sup>[18]</sup>。

(2) 有机质作用下重金属在固液体系中的相互作用和分配。如 Tipping 等人测量英格兰及威尔士高地的 98 个土壤关键参数, 并开展回归分析, 期望能够利用固液体系中重金属分配的影响因素, 预测自由金属离子浓度<sup>[14]</sup>。Vermeulen 开展了荷兰三个地区土壤、植物、动物等系列重金属污染水平测定, 结果表明通过孔隙水或 CaCl<sub>2</sub> 提取的重金属有效浓度并不能很好的预测重金属吸收及积累水平<sup>[17]</sup>。

(3) 有机质对重金属的植物吸收及毒性影响。Ma 针对金属添加到土壤中的老化及生物有效性及毒性开展研究, 对欧洲 19 个土壤采用同位素稀释技术, 研究添加外源铜后对番茄生长周期的影响, 其结果显示铜的生物有效性/毒性效应衰减的土壤和环境因素主要是 pH、有机质含量、培养时间和温度<sup>[19]</sup>。

(4) 有机质对重金属在动物体内的积累水平及毒性。Van Gestel 等人探讨了环境因子对蚯蚓、甲虫及土虱体内重金属 As、Cd、Cu、Pb 和 Zn 积累的贡献, 发现仅用土壤重金属污染水平、pH 和有机碳特征来预测生物积累重金属含量是不够准确的, 以特定生境的方法进行表征更为准确<sup>[16]</sup>。

研究达成的基本共识一是重金属形态对其生物

有效性影响巨大, 采用化学提取法对重金属进行分级提取, 有利于研究其不同形态、生物有效性和毒性<sup>[23]</sup>, 如 Tipping 等人对英格兰和威尔士的表层土壤分析分发现, 土壤溶液中总重金属浓度与土壤中的有机质呈正相关, 与土壤 pH 呈负相关; 通过调整模型中的“活性”腐殖物质含量可以很好的预测游离的金属浓度<sup>[14]</sup>。而对于有机结合态重金属的生物有效性, 不同学者持不同意见。如 Lu 等报道, 根据土壤理化性质的不同, 重金属铁锰氧化物和有机结合态是相对活跃的形态<sup>[18]</sup>。而 Lu 等则认为有机结合态的重金属更加稳定, 其研究竹炭和稻草生物炭对冶炼厂周边土壤的修复效果, 发现稻草生物炭的添加能够明显提高土壤有机结合态重金属含量, 起到有效固定重金属, 降低重金属在污染土壤中迁移率和生物有效性<sup>[22]</sup>。

基本共识二是植物吸收、动物积累的重金属与有机质密切相关, 但同时受其他因素如 pH 值、CEC、孔隙度等影响。如 Ahmad 综述了生物炭作为吸附剂对污染土壤的改良作用, 提到了复杂的土壤性质和污染类型是限制生物炭广泛应用的重要原因<sup>[20]</sup>。

基本共识三是有机质与重金属的相互作用如吸附解吸、络合和螯合以及有机质的降解等都是影响重金属迁移转化及生物有效性的重要机制。Bolan 等人从重金属(类金属)的来源、重金属在土壤中的相互作用、生物有效性, 不同土壤改良剂对重金属的活化、固定作用等方面开展土壤改良剂控制重金

属污染土壤的生物有效性的研究综述, 得出重金属在土壤中的动态变化主要包括吸附和解吸、沉淀和溶解、氧化和降解、甲基化和去甲基化作用。解吸剂、螯合剂、有机改良剂、含盐水、化肥、微生物活化作用是重金属提高生物有效性的途径, 而磷酸盐化合物、石灰、有机堆肥、金属氧化物、生物炭等发挥固定作用可以降低重金属的生物有效性<sup>[3]</sup>。

**2.4.2 英文高影响力文献分析 (研究框架)** 文章的被引频次在一定程度上能够衡量论文的质量和重要性, 创新性高和高质量的文章往往被引用的次数

更多。高被引的文章也能为该领域的研究人员提供最有价值的信息参考。其中将外文文献中近 5 年被 Wos 网站列入高被引的 10 篇文献进行分析如表 5。总结研究有机质作用下重金属的生物有效性, 主要研究思路集中于有机质输入过程及性质对重金属的影响, 有机质与重金属活化或固定机制, 结合液相体系、固相体系的不同组分影响研究重金属的形态转化, 重点分析其对重金属的迁移、生物积累量及生物有效量之间的关系, 总结形成研究框架, 如图 2 所示。

表 5 近 5 年高被引文献 top 10 (基于 Wos 高被引数据)  
Table 5 Top 10 highly cited literatures in recent 5 years (based on WoS highly cited data)

被引频次 Citation Count	出版年 Year	第一作者 Author	期刊 Journal	文章标题 Title	参考文献 Reference
316	2017	Antoniadis, V	Earth-science Reviews	Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation-A review	[24]
296	2017	Lu, KP	Journal of Environmental Management	Effect of bamboo and rice straw biochars on the mobility and redistribution of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in contaminated soil	[22]
205	2020	Palansooriya, KN	Environment International	Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review	[25]
176	2018	Xue, WJ	Journal of Hazardous Materials	Nanoscale zero-valent iron coated with rhamnolipid as an effective stabilizer for immobilization of Cd and Pb in river sediments	[26]
162	2017	Shahid, M	Reviews of Environmental Contamination and Toxicology	Cadmium Bioavailability, Uptake, Toxicity and Detoxification in Soil-Plant System	[27]
161	2017	Ming, LL	Environmental Pollution	PM2.5 in the Yangtze River Delta, China: Chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events	[28]
147	2018	Kushwaha, A	Ecotoxicology and Environmental Safety	A critical review on speciation, mobilization and toxicity of lead in soil microbe-plant system and bioremediation strategies	[29]
141	2017	Sharma, B	Waste Management	Agricultural utilization of biosolids: A review on potential effects on soil and plant grown	[30]
127	2019	Yuan, P	Science of the Total Environment	Review of biochar for the management of contaminated soil: Preparation, application and prospect	[31]
97	2017	Li, Z	Geoderma	Interaction between selenium and soil organic matter and its impact on soil selenium bioavailability: A review	[7]

重金属的天然和人为来源是研究其污染控制的重要手段<sup>[29]</sup>。有机物料改良土壤的有机质输入过程对重金属的生物有效性作用得到广泛关注。采用堆肥、污泥、生物炭等有机物料作为土壤修复措施、土壤改良措施, 其可能作为有机质源与原有土壤共同作用下影响土壤重金属活性<sup>[22,30-31]</sup>。此外其他土壤改良措施由于可能对介质环境中的有机质性状产生变化, 从而影响重金属的迁移和生物利用度, 如采用纳米零价铁作为修复河流沉积物改良剂<sup>[26]</sup>。

对于土壤重金属污染问题, 研究者从有机质对重金属的调控作用是活化还是固定入手, 目的在于指导有机物料作为土壤改良剂的实践应用过程。由于有机质结合态重金属可能是源也是汇, 因此在选择合适的修复技术和土壤改良剂之前, 有必要了解

影响重金属迁移的土壤特性和过程。以外源有机质对重金属 Se 作用机制为例<sup>[7]</sup>, 研究者认为有以下假设可能: (1) 有机质改变土壤微观结构, 有利于土壤团聚体形成, 促进微生物对重金属的还原和固定。(2) 有机质为微生物提供了额外的电子供体和碳源, 促进土壤中微生物的生物还原作用。(3) 秸秆和植物源肥料含有丰富的吸附性官能团, 如羟基和羧基, 导致 Se 的生物利用度下降。(4) 有机物料施加后, 增加了溶解性有机碳, 促进了固定 Se 的释放。此外, 不同研究者总结了不同活化/固定机理, 如溶解—沉淀; 氧化—还原; 配位—络合; 甲基化—去甲基化等<sup>[3]</sup>。Palansooriya 等人认为离子交换、络合和吸附是有机质固定重金属主要机制, 有机质中的酚类、羧基、羧酸盐和氨基等官能团可作为重金属的结合

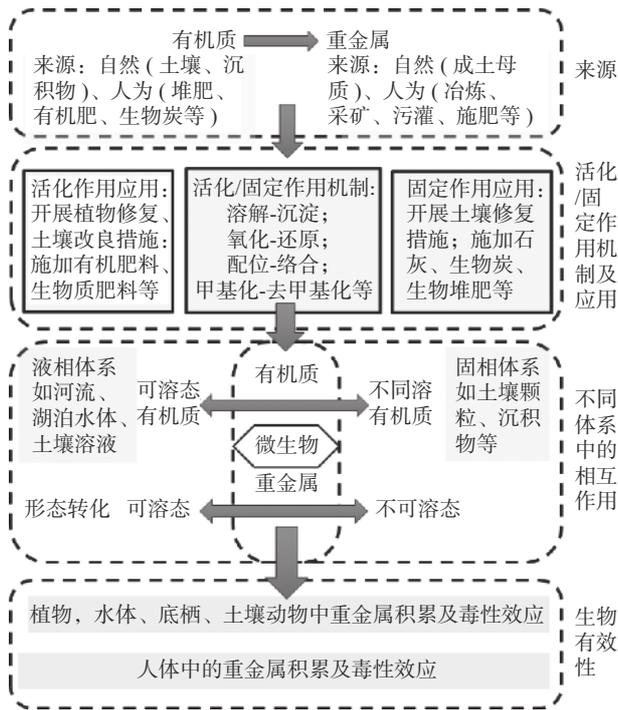


图2 有机质作用下重金属生物有效性研究维度图

Fig.2 Dimension diagram of bioavailability of heavy metals under the influence of organic matter

位点<sup>[25]</sup>。有机质与重金属相互作用机制的研究对选择合适的重金属土壤改良或修复方法和措施有重要意义。

不同介质环境下有机质与重金属的相互作用不同,是控制重金属生物有效性的重要因素。有研究者认为,施加有机物料后,溶解性有机质(DOM)的提高可能增加重金属的流动性和风险,而增加的颗粒有机质(POM)则可能起到固定作用<sup>[25]</sup>。在液相体系中,如土壤和自然水体如河流、湖泊中,DOM是一种重要的、很活跃的的化学组分,控制重金属对水体中藻类、动物等毒性效应,因此有机质是重金属水体风险评估模型中的重要影响参数<sup>[32-34]</sup>,也是土壤-植物系统中与植物根系直接作用的部分,控制着重金属在土壤-植物系统中的迁移转化及毒性效应<sup>[24,27,29,35]</sup>。在固相体系中,沉积物、土壤中的不溶性有机质、腐殖质等与重金属相互作用,控制着重金属的迁移转化<sup>[36]</sup>。如有机质增加后,可能提升土壤阳离子交换量CEC,提高土壤总体滞留重金属的能力,重金属、有机质和矿物质还可以相互作用形成三元络合物,减少重金属的淋溶效应,或促进形成微团聚体结构,将重金属包裹固定,此外,微生物作用下的生物固定、降解作用等生物过程也是影响有机质对重金属生物有效性的重要作用,引起

广泛关注<sup>[7]</sup>。

在植物、动物积累和吸收重金属及毒性效应的研究层面。研究者认为植物对重金属的吸收外排效应在外部借助于根系分泌物和根际微生物,内部则与植物自身特异性防御机制密切相关,有机质的施用可以极大促进植物生长,增加土壤持水能力,改善土壤结构,提高植物对重金属的耐受性<sup>[34]</sup>。采用有机质及其他环境因子修正的模型,更有利于评估重金属对动物的毒性效应模型<sup>[37]</sup>。对于重金属的人体生物有效性方面,在研究PM<sub>2.5</sub>中重金属的生物有效性实验中,采用模拟肺提取可溶性重金属浓度,更加真实的反映了人体的情况,便于开展健康风险评估相关工作<sup>[28]</sup>。

关于研究检测和分析方法方面,新的技术手段也应运而生。如采用FTIR和同步荧光相结合的二维光谱的探索DOM与铜的结合过程,结果显示羧基和多糖基团对铜的结合反应最快,随后酚和芳基羧基振动变化,诱导富里酸类组分荧光猝灭,最后少量酰胺和脂肪族基团参与铜的结合<sup>[38]</sup>。稳定性同位素示踪技术可能对探测重金属的归趋作出更有帮助的贡献。采用薄膜扩散梯度DGT技术与激光烧蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICPMS)结合作为土壤重金属毒性评价方法可能相较传统的化学提取法更有效<sup>[7,24]</sup>。

2.4.3 关键词共现及聚类分析(研究热点) 利用Citespace软件的关键词共现分析,若研究主题关键词出现频率和中心度较高,则被认为是重点关注方向并与热门话题有关<sup>[39]</sup>。分析生成CNKI文献关键词共现图谱如图3, WoS文献关键词共现图谱如图4所示。结合软件聚类分析功能,分析研究热点内容。CNKI文献聚类图谱模块值Q = 0.7695, 平均轮廓值S = 0.9327, WoS文献聚类图谱模块值Q = 0.7584,



图3 CNKI文献关键词共现图

Fig.3 Co-occurrence of keywords in CNKI

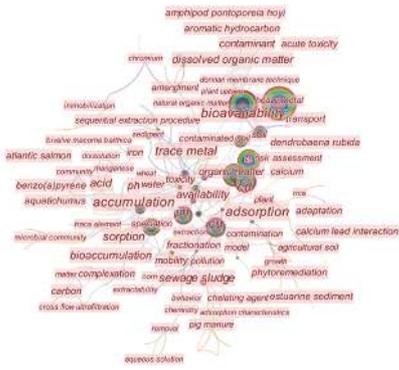


图 4 WoS 文献关键词共现图  
Fig.4 Co-occurrence of keywords in WoS

平均轮廓值  $S = 0.9297$ 。  $Q > 0.3$  且  $S > 0.5$  则表明本研究分析结果聚类效果良好，聚类主题明确。

文献关键词聚类分析能够帮助研究者进一步了解研究热点领域，聚类大小代表该类中关键词的数量，轮廓值表示不同类之间的区分度，基于 LLR 算法的 Top team 则显示了该类中重要度前 5 位的主题词，通过这些主题词可以分析该类的主要研究内容。通过聚类分析，得到中文文献关键词共 9 类，各聚类内前 5 位关键词见表 6 中文文献关键词共现聚类表。外文文献关键词共现聚类结果见表 7，共 11 类，现将外文各聚类研究热点总结如下：

表 6 CNKI 文献关键词共现聚类表  
Table 6 Keywords co-occurrence clustering table of CNKI

聚类名称 Cluster	大小 Size	轮廓值 Silhouette	高频主题词 Top team (LLR)
#0 养分	19	0.966	养分； 锌冶炼区； 修复效果； 土壤改良剂； 重金属
#1 土壤	14	0.915	土壤； 蔬菜； 赋存形态； 重金属； 植物
#2 生物炭	14	1	生物炭； 有机质； 秸秆还田； 有效性； 改良剂
#3 形态	14	0.929	形态； 水稻； Cd 污染； 有机肥； 模型
#4 土壤养分	11	1	土壤养分； 有机物料； 黑土； 油枯； 小白菜生长
#5 沉积物	11	0.877	沉积物； 岱海； 风险评估； 相平衡模型法； 达里诺尔
#6 吸附	11	0.819	吸附； Cu； 解吸； Cd 形态； Dom
#7 化学形态	11	0.92	化学形态； Pb； 模拟酸雨； 茶园； 植物毒性
#8 土壤酶	5	0.929	土壤酶； 植物修复； 水分； 基础呼吸； 代谢商

表 7 WoS 文献关键词共现聚类  
Table 7 Co-occurrence clustering of key words in WoS

聚类名称 Cluster	大小 Size	轮廓值 Silhouette	高频主题词 Top team (LLR)
#0 冶炼厂	19	0.899	冶炼厂； 大米； 重金属； 施肥； 植被重建
#1 土壤	18	1	土壤； 金属； 肥料； 络合； 淋溶
#2 锌	17	0.937	锌； 铜； 土壤呼吸； 锌； 钙质土
#3 猪粪	17	0.902	猪粪； 堆肥； 重金属生物有效性； 铜离子； 植物修复
#4 铅	17	0.902	铅； pH； 提取； 金属； 铅
#5 高通量测序	16	0.886	高通量测序； 形态； 微生物群落； 镉污染； 细菌多样性
#6 形态	16	0.932	形态； 生物炭； 脱氢酶活性； 酸性挥发硫化物； 硒
#7 沉积物	15	0.914	沉积物； 质量标准； 选择性提取； 城市化； 里约热内卢
#8 污染物负荷指数	14	0.949	污染负荷指数； 风险评估代码； 人为； 废水； 长期灌溉
#9 生物炭	13	0.945	生物炭； 矿山土壤； 金属； 沉积物； 土壤
#10 河口	10	0.985	河口； 空间分布； 形态转化； 胶体； 表层沉积物

#0 冶炼厂聚类主要针对工业冶炼过程可能带来的“重金属”污染问题开展研究，如污染场地的“植被重建”，污染场地可能对附近农田、作物的污染问题如冶炼厂附近“大米”污染以及“施肥”措施的影响。研究者对智利中部铜冶炼厂附近的土壤进行石灰和氮肥改良，发现明显降低了当地多年生草本植物慈竹根系和地上部分的铜含量<sup>[40]</sup>。

#1 土壤聚类聚焦金属的“络合”作用、“肥料”施用造成的污染问题，以及重金属在“土壤”中的“淋溶”

作用。因污泥堆肥施用后，重金属的淋溶和积累是主要问题，研究者分析有机质（包括颗粒有机质和溶解有机质）是影响土壤重金属淋溶的关键问题<sup>[41]</sup>。

#2 锌聚类涉及“锌”、“铜”等元素污染，“钙质土”中的重金属迁移转化规律以及重金属污染对“土壤呼吸”的作用。研究发现连续施用猪粪 6 年，土壤表层 20 cm 土壤中 Cu 和 Zn 的全金属含量及其全化学组分均有所增加<sup>[42]</sup>。土壤呼吸、过氧化氢酶和脱氢酶活性被认为是铜毒害效应的生物指标，研究发现

在有机质含量较高的土壤中, 微生物参数对铜的添加不敏感, 而在有机质贫乏的土壤中, 铜的施用对微生物活性有较强的抑制作用<sup>[43]</sup>。

#3 猪粪聚类主要针对“猪粪”等有机“堆肥”对土壤理化性质及“重金属生物有效性”的影响开展研究, 探讨有机堆肥施加对“植物修复”污染土壤的作用。猪粪施加可以增加土壤有机质含量, 提升土壤肥力, 但其可能造成的重金属污染问题备受关注, 研究者指出施用猪粪等有机肥, 可能会增加水稻对镉的吸收以及镉向下迁移到地下水的风险<sup>[44]</sup>。Meng 等研究者利用猪粪共热解等技术改良和降低其中重金属的生物有效性和潜在污染风险<sup>[45]</sup>。Wang 等研究者采用无机添加剂, 改良猪粪施肥可能造成的污染<sup>[46]</sup>。

#4 铅聚类主要研究不同 pH, “铅”污染的形态及分级“提取”与生物有效性的相关关系。研究者采用生物有效性测定胃肠模拟体外实验和分级提取法研究污染农用地表层土壤, 发现可以将分级提取作为重金属有效性的指示, 其中铅在土壤中主要以氧化物结合态的形式存在<sup>[47]</sup>。不同土壤有机质和腐殖质结构差异是土壤吸附铜、铅作用的关键因素<sup>[48]</sup>。

#5 高通量测序聚类主要是通过“高通量测序”等研究手段, 开展重金属与土壤“微生物群落”、“细菌多样性”相互关系的相关研究。针对复合重金属污染的污水水库区域, 研究者发现重金属与有机质和 pH 联合介导污染区微生物多样性, 促进微生物生态位划分, 强调了金属在塑造微生物结构中的重要性, 并为未来生物修复污染场地提供参考<sup>[49]</sup>。

#6 形态聚类主要针对“生物炭”等改良剂对重金属形态的变化以及沉积物中重金属污染对底栖生物、水生生物物种的影响研究。河湖沉积物中的“酸可挥发硫化物”可作为重金属生物毒性指标之一。“脱氢酶活性”则与沉积物微生物活性与有机质状态指标的密切相关。研究者分析沉积物中固相、液相物理化学性质, 以及底栖生物敏感性和行为对沉积物中金属的生物有效性及毒性影响, 并认为如果可能, 有必要建立不同生物针对基于酸挥发性硫化物、有机质、铁锰氧化物影响下重金属生物有效性及毒性模型<sup>[37]</sup>。

#7 沉积物聚类与#6 同样针对是沉积物中重金属的生物有效性研究, 但侧重在沉积物的重金属来源, 如“城市化”进程导致的污染问题。探索沉积物有机质高度富集的环境中, 重金属的风险评估的影响,

如采用选择性提取方法, 评估“里约热内卢”的周边海域重金属污染毒性风险<sup>[50]</sup>。

#8 污染物负荷指数聚类主要采用“污染物负荷指数”即 PLI 对重金属污染开展风险评估, 如针对“人为”污染作用下, 如“废水”排放、“长期灌溉”等措施的重金属风险开展评估。Guan 等人对东北黑土带典型河流开展风险评估, 采用污染负荷指数评价沉积物样品均已被污染<sup>[51]</sup>。Martins 等则利用 PLI 对葡萄牙 Ria de Aveiro 的湖泊进行污染地区识别, 并筛选得到对有机质和金属富集具有敏感性但耐受性强的底栖生物<sup>[52]</sup>。

#9 生物炭聚类是采用“生物炭”作为土壤改良剂以及重金属吸附剂对污染的“矿山土壤”等污染“土壤”开展相关研究。研究者认为作为高温下生产的生物炭是相对稳定且不溶的碳池, 施加后溶解性有机碳释放的浓度较低, 可能是降低金属的迁移率的原因<sup>[53]</sup>。同时研究生物炭的原料和制备条件、特性及改性或活化技术, 探究其如何对土壤理化性质的改善作用, 提高植物对土壤养分的吸收, 降低重金属的生物可给性<sup>[31]</sup>。

#10 河口聚类聚焦在“河口”区域, 作为农业、采矿、冶炼的下游, 河口地区往往重金属污染较为严重。主要聚焦研究该区域重金属的“空间分布”特征, 以及表层沉积物中重金属与有机质作用下“形态变化”、“胶体”对重金属的生物有效性的影响<sup>[54]</sup>。

结合图 3、表 6 的中文文献关键词共现结果, 对比中英文文献研究热点, 发现中文文献侧重于有机质作用下土壤养分变化及对重金属污染的修复作用, 沉积物中有机质与重金属作用下的风险评估, 而英文文献更侧重于重金属与有机质相互作用机制、形态变化的研究, 这与二者的文献数量、研究者基础等多种因素有关。此外, 不论中英文文献, 都倾向于研究生物堆肥、污水污泥、生物炭等可能作为有机质来源的土壤改良剂对重金属迁移转化及有效性的影响。而关于重金属的植物生物有效性的研究, 中英文文献均较多, 研究的科学基础较为成熟, 而针对动物生物有效性的研究深度和广度远不及植物方面。

**2.4.4 突现词分析 (研究热点发展趋势)** CiteSpace 软件提供的突现词的分析结果可用于分析该研究领域的在不同时期的发展趋势, 针对英文及中文文献开展关键词的突现分析如图 5、图 6, 结果显示了国

引用次数最高的前 20 个关键词

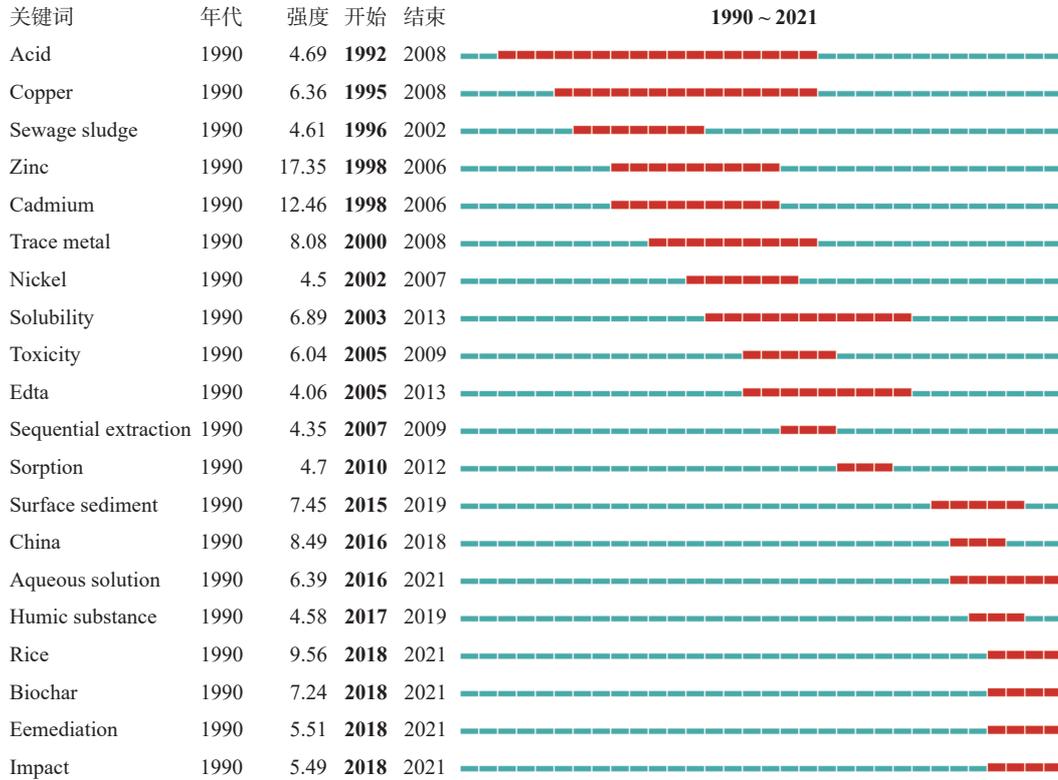


图 5 WoS 文献关键词突现图  
Fig.5 Key words flash map of WoS

引用次数最高的前 20 个关键词

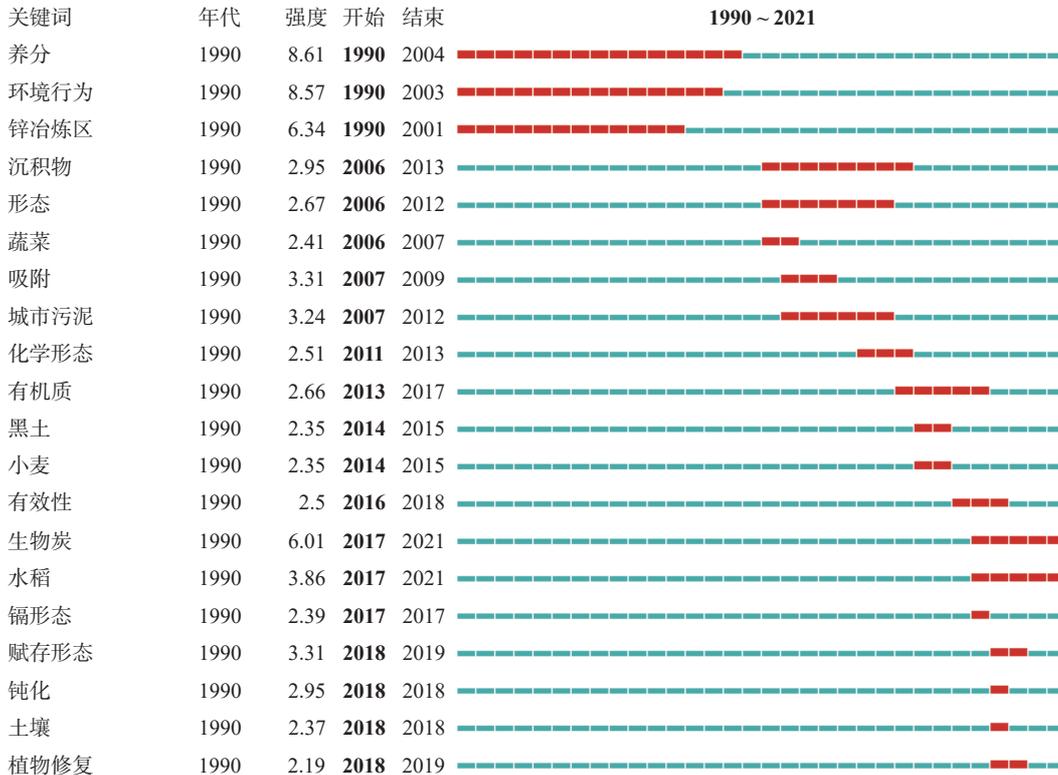


图 6 CNKI 文献关键词突现图  
Fig.6 Key words flash map of CNKI

际上针对该领域研究的不同时间阶段的趋势变化和热点特征。2010 年以前, 重金属“铜”“锌”“镉”“镍”的污染问题依次成为突出热点, “痕量金属”概念在 2000 年爆发, 1996~2002 年间研究“污水污泥”热点频现, 体现对污泥利用的思考, 2003 年后“可溶性”“毒性”效应一直维持了较长时间的热度, “分级提取”“EDTA”等也突显。2010~2015 年“吸附”作为有机质与重金属相互作用的关键机制爆发成为热点。2015~2019 年“中国”“腐殖质”“水溶液”成为热点, 2015 年后“大米”“生物炭”“修复”“影响”“等热度一直持续至今。说明 2015 年以后, 中国水稻的重金属污染问题已成为国际热点, 采用生物炭、腐殖质等手段作为土壤重金属修复或土壤改良措施, 已经成为国内外研究者研究的热点话题。CNKI 检索结果显示与英文基本呈现一直规律, 从初期聚焦在“锌冶炼区”“环境行为”“养分”问题, 到 2006~2011 年“化学形态”“吸附”等成为热点, 关注到“城市污泥”“沉积物”等环境中重金属与有机质的相互作用。2016 年, “有效性”概念才在中文期刊中突现。与英文热点相似, “水稻”及“生物炭”成为 2017 年延续至今的热点词汇。中英文研究热点结果展现了有机质作用下的重金属生物有效性相关研究从发现表观问题到研究问题机制、研究应用领域的转变过程。

### 3 结论与展望

有机质是影响土壤中重金属行为和生物有效性的重要因素, 本文以有机质作用下重金属的生物有效性研究领域文献计量数据为基础, 对 1991~2021 年的 CNKI 及 WoS 数据库收录的相关文献进行分析。结果表明: 全球范围内对有机质作用下的重金属生物有效性研究重视程度越来越高。该领域重要的研究机构为中国科学院、浙江大学等。论文主要发表在 *Science of the Total Environment*、*Chemosphere*、*农业环境科学学报* 等期刊。研究主要集中在不同来源有机质与重金属在固相、液相体系环境中相互作用, 对重金属的活化或固定的作用机制, 期望能有助于选择有针对性作用的改良剂或修复剂, 用于解决存在的重金属污染问题。总结目前研究的不足及展望如下:

(1) 针对重金属动物、人体毒性的评估, 因受限于设备、实验条件及检测技术条件限制, 相关研究较少, 且理论基础相对匮乏, 但随着评价生物有

效性的方法不断更新, 采用模拟肺、胃肠道体外实验、动物实验、细胞模型实验等生物有效性评估手段, 将有助于帮助进一步探究重金属对生物体的生物有效量及毒性作用机制。

(2) 由于天然有机质分子结构和形态具有高度异质性, 有机质与重金属之间的生物效应和非生物效应交织, 控制有机质组分将导致的其他物理化学性质变化, 使研究难度增大, 且传统的化学提取手段并不能完全反应体系中重金属与有机质真实存在状态, 随着检测技术和设备不断更新将为研究提供帮助, 如利用稳定性同位素示踪技术、同步辐射表征技术、三维荧光光谱等开展相关研究。

(3) 由于有机质和重金属相互作用伴随时间产生老化作用, 重金属修复手段和改良剂等研究应综合实验室模拟和长期野外监测数据, 才能更为全面的评估可能产生的效益。

本研究运用文献计量学方法, 采用 CiteSpace 软件开展大量文献的可视化分析, 实现对文献信息的潜在知识脉络整理, 探索其中规律, 但受限于提取信息及计算方法, 一定程度上会影响分析结果的准确性。未来随着文献信息来源丰富度提高, 相关领域软件及模型算法的发展, 该分析方法将进一步完善。综上, 本文的研究有助于了解有机质作用下重金属的生物有效性方面取得的研究进展, 聚焦研究基础, 探索和跟踪研究热点及动态。

#### 参考文献:

- [1] 王 坤, 肖羽芯, 李梦莹, 等. 重金属人体生物有效性、吸收及毒性研究中的肠道细胞模型[J]. *生态毒理学报*, 2021, 16(4): 57-71.
- [2] Adams W, Blust R, Dwyer R, et al. Bioavailability Assessment of Metals in Freshwater Environments: A Historical Review[J]. *Environ Toxicol Chem*, 2020, 39(1): 48-59.
- [3] Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, et al. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils - To mobilize or to immobilize?[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 266: 141-66.
- [4] 王亚男, 曾希柏, 白玲玉, 等. 外源砷在土壤中的老化及环境条件的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(7): 1342-1349.
- [5] Qu C, Chen W, Hu X, et al. Heavy metal behaviour at mineral-organo interfaces: Mechanisms, modelling and influence factors[J]. *Environment International*, 2019, 131: 104995.
- [6] 罗 梅, 柏宏成, 陈亭悦, 等. 腐殖酸对土壤铅镉吸附、赋存形态及生物可给性的影响[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(3): 1191-1202.

- [ 7 ] Li Z, Liang D L, Peng Q, et al. Interaction between selenium and soil organic matter and its impact on soil selenium bioavailability: A review[J]. *Geoderma*, 2017, 295: 69 – 79.
- [ 8 ] 熊 雄, 李艳霞, 韩 杰, 等. 堆肥腐殖质的形成和变化及其对重金属有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6): 2137 – 2142.
- [ 9 ] 王 俊. 腐殖酸对砷在土壤中的形态转化和生物有效性的影响研究 [D]; 西南大学, 2017.
- [ 10 ] 王 娟, 苏德纯. 基于文献计量的小麦玉米重金属污染农田修复治理技术及效果分析[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(3): 493 – 500.
- [ 11 ] 杜志鹏, 苏德纯. 稻田重金属污染修复治理技术及效果文献计量分析[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(11): 2409 – 2417.
- [ 12 ] 王成尘, 田 稳, 马娇阳, 等. 2000 ~ 2021年农田土壤污染领域研究进展与前沿分析[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(2): 186 – 201.
- [ 13 ] 张 宁, 张 盛, 杨海超, 等. 粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析[J]. *环境科学*, 2019, 40(12): 5581 – 5592.
- [ 14 ] Tipping E, Rieuwerts J, Pan G, et al. The solid-solution partitioning of heavy metals (Cu, Zn, Cd, Pb) in upland soils of England and Wales[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 125(2): 213 – 225.
- [ 15 ] Karami N, Clemente R, Moreno-Jimenez E, et al. Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 191(1 – 3): 41 – 48.
- [ 16 ] Van Gestel C A M, Mol S. The influence of soil characteristics on cadmium toxicity for *Folsomia candida* (Collembola: isotomidae)[J]. *Pedobiologia*, 2003, 47(4): 387 – 395.
- [ 17 ] Vermeulen F, Van Den Brink N W, D'have H, et al. Habitat type-based bioaccumulation and risk assessment of metal and As contamination in earthworms, beetles and woodlice[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(11): 3098 – 3105.
- [ 18 ] Lu A X, Zhang S Z, Shan X Q. Time effect on the fractionation of heavy metals in soils[J]. *Geoderma*, 2005, 125(3-4): 225 – 234.
- [ 19 ] Ma Y B, Lombi E, Nolan A L, et al. Short-term natural attenuation of copper in soils: Effects of time, temperature, and soil characteristics[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, 25(3): 652 – 658.
- [ 20 ] Ahmad M, Rajapaksha A U, Lim J E, et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review[J]. *Chemosphere*, 2014, 99: 19 – 33.
- [ 21 ] Zhao F J, Ma Y, Zhu Y G, et al. Soil Contamination in China: Current Status and Mitigation Strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2): 750 – 759.
- [ 22 ] Lu K P, Yang X, Gielen G, et al. Effect of bamboo and rice straw biochars on the mobility and redistribution of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 186: 285 – 292.
- [ 23 ] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace-metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844 – 851.
- [ 24 ] Antoniadis V, Levizou E, Shaheen S M, et al. Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation-A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 171: 621 – 645.
- [ 25 ] Palansooriya K N, Shaheen S M, Chen S S, et al. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review[J]. *Environment International*, 2020, 134: 105046.
- [ 26 ] Xue W J, Huang D L, Zeng G M, et al. Nanoscale zero-valent iron coated with rhamnolipid as an effective stabilizer for immobilization of Cd and Pb in river sediments[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 341: 381 – 389.
- [ 27 ] Shahid M, Dumat C, Khalid S, et al. Cadmium Bioavailability, Uptake, Toxicity and Detoxification in Soil-Plant System [M]//DEVOOGT P. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. New York; Springer. 2017: 73-137.
- [ 28 ] Ming L L, Jin L, Li J, et al. PM2.5 in the Yangtze River Delta, China: Chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 223: 200 – 212.
- [ 29 ] Kushwaha A, Hans N, Kumar S, et al. A critical review on speciation, mobilization and toxicity of lead in soil microbe-plant system and bioremediation strategies[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 147: 1035 – 1045.
- [ 30 ] Sharma B, Sarkar A, Singh P, et al. Agricultural utilization of biosolids: A review on potential effects on soil and plant grown[J]. *Waste Manage*, 2017, 64: 117 – 132.
- [ 31 ] Yuan P, Wang J Q, Pan Y J, et al. Review of biochar for the management of contaminated soil: Preparation, application and prospect[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 659: 473 – 490.
- [ 32 ] 李廷强, 杨肖娥. 土壤中水溶性有机质及其对重金属化学与生物行为的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, (6): 1083 – 1087.
- [ 33 ] 余贵芬, 蒋 新, 孙 磊, 等. 有机物质对土壤镉有效性的影响研究综述[J]. *生态学报*, 2002, (5): 770 – 776.
- [ 34 ] Parthasarathy P, Asok M, Ranjan R K, et al. Bioavailability and risk assessment of trace metals in sediments of a high-altitude eutrophic lake, Ooty, Tamil Nadu, India[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(15): 18616 – 18631.
- [ 35 ] 胡 文. 土壤—植物系统中重金属的生物有效性及其影响因素的研究 [D]; 北京林业大学, 2008.
- [ 36 ] Ma X L, Zuo H, Tian M J, et al. Assessment of heavy metals contamination in sediments from three adjacent regions of the Yellow River using metal chemical fractions and multivariate analysis techniques[J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 264 – 272.
- [ 37 ] Chang C Y, Xu X H, Liu C P, et al. Heavy metal accumulation in balsam pear and cowpea related to the geochemical factors of variable-charge soils in the Pearl River Delta, South China[J].

- Environment Sci-Process Impacts*, 2014, 16(7): 1790 – 1798.
- [ 38 ] Chen W, Habibul N, Liu X Y, et al. FTIR and Synchronous Fluorescence Heterospectral Two-Dimensional Correlation Analyses on the Binding Characteristics of Copper onto Dissolved Organic Matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(4): 2052 – 2058.
- [ 39 ] He K, Zhang J, Zeng Y. Knowledge domain and emerging trends of agricultural waste management in the field of social science: A scientometric review[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 670: 236 – 244.
- [ 40 ] Muena V, Gonzalez I, Neaman A. Effects of liming and nitrogen fertilization on the development of *Oenothera affinis* in a soil affected by copper mining[J]. *Revista De La Ciencia Del Suelo Y Nutricion Vegetal*, 2010, 10(2): 102 – 114.
- [ 41 ] Fang W, Wei Y H, Liu J G. Comparative characterization of sewage sludge compost and soil: Heavy metal leaching characteristics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 310: 1 – 10.
- [ 42 ] Zhao B Z, Maeda M, Zhang J B, et al. Accumulation and chemical fractionation of heavy metals in andisols after a different, 6-year fertilization management[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2006, 13(2): 90 – 97.
- [ 43 ] Saviozzi A, Levi-Minzi R, Cardelli R, et al. Biological activity in Cu-contaminated soils: A laboratory experiment[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2006, 15(6): 477 – 483.
- [ 44 ] Wang G M, Zhou L X. Application of Green Manure and Pig Manure to Cd-Contaminated Paddy Soil Increases the Risk of Cd Uptake by Rice and Cd Downward Migration into Groundwater: Field Micro-Plot Trials[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2017, 228(1): 15.
- [ 45 ] Meng J, Liang S J, Tao M M, et al. Chemical speciation and risk assessment of Cu and Zn in biochars derived from co-pyrolysis of pig manure with rice straw[J]. *Chemosphere*, 2018, 200: 344 – 50.
- [ 46 ] Wang L X, Liu H T, Prasher S O, et al. Effect of inorganic additives (rock phosphate, PR and boron waste, BW) on the passivation of Cu, Zn during pig manure composting[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 7.
- [ 47 ] Pelfrene A, Waterlot C, Mazzuca M, et al. Assessing Cd, Pb, Zn human bioaccessibility in smelter-contaminated agricultural topsoils (northern France)[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2011, 33(5): 477 – 493.
- [ 48 ] Coutinho I B, De Souza C D B, Lima E S A, et al. Roles of Soil Organic Matter and Humic Substance Structure in Cu and Pb Adsorption in Histosols[J]. *Soil & Sediment Contamination*, 2021, 30(2): 148 – 162.
- [ 49 ] Wang J W, Liu T, Sun W L, et al. Bioavailable metal(loid)s and physicochemical features co-mediating microbial communities at combined metal(loid) pollution sites[J]. *Chemosphere*, 2020, 260: 127619.
- [ 50 ] Abuchacra P F F, Aguiar V M C, Abuchacra R C, et al. Assessment of bioavailability and potential toxicity of Cu, Zn and Pb, a case study in Jurujuba Sound, Rio de Janeiro, Brazil[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 100(1): 414 – 425.
- [ 51 ] Guan J N, Wang J, Pan H, et al. Heavy metals in Yinma River sediment in a major Phaeozems zone, Northeast China: Distribution, chemical fraction, contamination assessment and source apportionment[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 12231.
- [ 52 ] Martins M V A, Silva F, Laut L L M, et al. Response of Benthic Foraminifera to Organic Matter Quantity and Quality and Bioavailable Concentrations of Metals in Aveiro Lagoon (Portugal)[J]. *PLoS One*, 2015, 10(2): e0118077.
- [ 53 ] Awad M, Liu Z Z, Skalicky M, et al. Fractionation of Heavy Metals in Multi-Contaminated Soil Treated with Biochar Using the Sequential Extraction Procedure[J]. *Biomolecules*, 2021, 11(3): 448.
- [ 54 ] Negrin V L, Idaszkin Y L, Domini C, et al. Soil metal pollution assessment in *Sarcocornia* salt marshes in a South American estuary[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 166: 448.

## Research Hotspots and Trends of Organic Matter Affecting Bioavailability of Heavy Metals in Soil based on Bibliometrics Analysis

ZHANG Meng-yan<sup>1,2</sup>, WANG Cheng-chen<sup>1,2</sup>, ZONG Da-peng<sup>1,2</sup>, TIAN Wen<sup>1,2</sup>,  
XIE Yu-mei<sup>1,2</sup>, XIANG Ping<sup>1,2\*</sup>

(1. *Yunnan Innovative Research Team of Environmental Pollution, Food Safety and Human Health, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China*; 2. *Institute of Environmental Remediation and Human Health, School of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China*)

**Abstract:** [Objective] The influence of organic matter on bioavailability of heavy metals in soil is needed to be understood. [Method] Based on CNKI and the Web of Science databank, the main research structure, common foundation, hotspots and trends of organic matter affecting heavy metal bioavailability in soil were analyzed via Citespace software. [Result] The results showed that Chinese research institutes, represented by the Chinese Academy of Sciences, have made great contributions to this research field, with accounting for 31.8% publications. Most of the relevant literature was published in international journals such as Science of the Total Environment and Chemosphere. According to the analysis of WoS data, there are three main aspects of this study: (1) The form of heavy metals has a great influence on their bioavailability. (2) The plant absorption and the animal accumulation of heavy metals are closely related to organic matter and its environmental factors. (3) The interaction such as dissolution-precipitation and oxidation-reduction between organic matter and heavy metal is a mechanism affecting the transformation of heavy metals and their bioavailability. [Conclusion] Based on the analysis of key words, 11 kinds of hotspots were obtained in this field. The interaction between different sources of organic matter and heavy metals is focused in the solid phase and liquid phase system, and the mechanism and relevant application of heavy metal activation or immobilization. Given the key words, the “rice” “biochar” “remediation” are the current international research hotspots.

**Key words:** Organic matter; Heavy metal; Bioavailability; Citespace; Visual analysis; Bibliometrics

[责任编辑: 刘轶飞]