

城市土壤重金属研究进展

——基于CiteSpace可视化分析

张果林*, 张颖倩, 黄颖尧, 莫声强, 牛建馨, 范义姣[#]

岭南师范学院地理科学学院, 广东 湛江

收稿日期: 2026年8月30日; 录用日期: 2026年9月30日; 发布日期: 2026年10月15日

摘要

城市化发展过程中, 重金属在土壤中过量富集会严重威胁城市的生态安全和人类的生命健康, 开展城市土壤重金属的现状与演化趋势研究可为城市土壤利用与保护提供关键数据支撑与决策依据。基于中国知网(CNKI)数据库中2000~2025年收录的1391篇文献, 运用CiteSpace软件对城市土壤重金属研究领域进行文献计量与可视化分析。研究结果发现: (1) 该领域发文量呈现萌芽-增长-波动-回落四阶段演变; (2) 重金属、城市土壤、污染评价、生态风险、空间分布、源解析、健康风险为长期核心关键词, 研究重心由污染分布调查转向溯源、风险评估与人居土壤安全管控; (3) 作者与机构合作网络呈局部集中、整体分散特征, 核心作者与机构空间分布不均, 跨区域协作较弱; (4) 我国城市土壤重金属研究在污染调查、风险评价、方法创新等方面取得显著进展, 但是在健康风险精细化评估、绿色修复技术、跨区域协作研究等方面有提升空间。通过分析城市土壤重金属领域可视化的进展和发展趋势, 为城市生态安全与土壤环境可持续发展提供坚实理论与技术支撑。

关键词

重金属污染, CiteSpace, 可视化, 污染评价, 城市土壤

Research Progress of Urban Soil Heavy Metals

—Based on CiteSpace Visualization Analysis

Guolin Zhang*, Yingqian Zhang, Yingyao Huang, Shengqiang Mo, Jianxin Niu, Yijiao Fan[#]

School of Geographical Sciences, Lingnan Normal University, Zhanjiang Guangdong

Received: August 30, 2026; accepted: September 30, 2026; published: October 15, 2026

*第一作者。

[#]通讯作者。

Abstract

During the urbanization process, excessive accumulation of heavy metals in soil poses a serious threat to urban ecological security and human health. Research into the current status and evolving trends of heavy metals in urban soil can provide critical data support and a basis for decision-making regarding the use and protection of urban soil. Based on 1391 papers collected in the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) database from 2000 to 2025, CiteSpace software was adopted to conduct bibliometric and visualized analysis on research concerning urban soil heavy metals. The results shown that: (1) The annual publication output of this field evolved through four stages: germination, rapid growth, fluctuation and decline. (2) Long-term core keywords include heavy metals, urban soil, pollution assessment, ecological risk, spatial distribution, source apportionment and health risk. The research focus has shifted from pollution distribution surveys to source identification, risk assessment and human settlement soil safety management. (3) The collaboration network of authors and research institutions presents a pattern of localized concentration with overall fragmentation. Core authors and institutions are unevenly distributed geographically, and cross-regional cooperation remains insufficient. (4) Domestic research on urban soil heavy metals has achieved remarkable advances in pollution surveys, risk evaluation and methodological innovation, whereas gaps still exist in refined health risk assessment, green remediation technologies and cross-regional collaborative research. This paper systematically analyzes the research progress and evolutionary trends of urban soil heavy metals via visual bibliometrics, offering solid theoretical and technical support for urban ecological security and the sustainable development of soil environments.

Keywords

Heavy Metal Pollution, CiteSpace, Visualization, Pollution Assessment, Urban Soil

Copyright © 2026 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

城市土壤是城市运转的关键自然资源，是城市陆地生态系统的物质基础[1]，其质量直接关系到生态安全、粮食安全与公众健康。随着全球工业化和城市的加速发展，城市土壤重金属污染已成为世界各国面临的重大环境问题之一。研究表明，频繁的人类活动会使重金属在城市土壤中不断富集，加之重金属难以自然降解，容易在生物中不断累积且具有生态毒性[2]，可通过食物链进入人体，引发多种健康风险，如心血管疾病、糖尿病及多种癌症等[3]。我国作为工业大国，城市土壤重金属污染问题尤为突出，尤其是在矿区、农田及城市工业区[4]。因此，开展城市土壤重金属污染评价与治理研究，对推动生态文明建设、保障国家可持续发展具有重要的现实意义。

近年来，随着环境科学与土壤学研究持续深入，国内外学者在城市土壤重金属污染的评价体系构建、污染源解析及治理与修复技术研发等方面都取得了较为显著的成果。例如，丁毅[5]等发现，经口摄入被识别为重金属进入人体的最主要方式，儿童受此类暴露影响的健康风险较成年人更为突出；并且通过空间格局的对比分析，发现重金属污染的地域分布特征主要受控于矿床所属类型；史雁冰等[6]指出采用联合修复策略能更有效应对矿区常见的复合型污染；孟烁瑶等[7]通过对河湟谷地农田的调研，揭示其重金

属污染主要源于城市工业与交通活动，并建议重点加强对砷、镉、镍等元素的源头管控；彭驰等[8]发现 Pb、Cd、Cu、Zn 等 4 种重金属含量在中国沿海城市和重工业发达城市相对较高。然而，该领域现有文献数量庞大、主题分布零散、研究方法多样，尚缺乏对整体发展脉络与趋势的系统性梳理。传统的文献综述方法往往难以客观、全面地反映学科的知识结构、研究热点与前沿方向[9]。

在此情况下，文献计量学与知识图谱分析方法依托量化统计与可视化呈现，能够有效揭示学科演进规律，辨识核心作者与研究机构，并探测领域内的研究热点与发展趋势[10]。CiteSpace 则可通过构建关键词共现网络、作者合作网络、机构合作网络等知识图谱，直观展示学科知识结构及其演进路径[8]。目前，已有学者利用 CiteSpace 对土壤甲烷[11]、土壤微塑料[12]、土壤磁学[13]等领域进行文献计量分析，取得了良好的分析效果。基于此本研究以中国知网数据库为基础，运用 CiteSpace 软件，对 2000 年至 2025 年期间发表的城市土壤重金属相关文献进行了系统的文献计量分析与知识图谱构建。通过可视化的方式呈现该领域的研究知识结构，旨在帮助研究人员直观把握城市土壤重金属污染研究的现状与发展动态。

2. 研究方法数据来源

2.1. 数据来源

在本研究中，选用较权威的、文献数量较多的中国知网(CNKI)作为检索数据库，利用高级检索输入主题“城市土壤重金属”精确匹配检索，共得检索结果 1435 条。选择 2000 年 1 月~2025 年 12 月期间的文献，涵盖了近 25 年的相关文献，剔除不相关文献、会议、报纸、广告及重复文献，最终整理文献 1391 篇，将整理出的文章以 Refworks 格式导出，以确保后续的分析。

2.2. 研究方法

本研究使用 CiteSpace 软件作为核心分析工具，使用的版本为 7.0.R0。CiteSpace 由陈超美博士研发，是一款基于 Java 平台的引文可视化分析工具，能够将大量的文献数据转化为直观的可视化图谱，展示研究内容的核心结构、热点主题和演化趋势[14]。同时配合 Excel 软件对相关文献的年度发表数量进行统计处理，对整理出的城市表土重金属文献进行发文量、关键词、合作作者、发文机构等进行分析和可视化。

3. 结果分析

3.1. 发文量时间分析

文献发表量的时序变化反映了研究领域发展轨迹，其中增长率变化和关键转折点的识别是评估领域成熟度的重要依据[15]。城市土壤重金属领域的文献产出呈现出阶段性演化特征，其发文量变化不仅反映了学科自身的发展轨迹，也耦合了中国城市化进程、环境政策演进与社会需求变迁。对城市土壤重金属 2000~2025 年发文数量的年度分布情况进行分析，发文数量在一定程度上反映了学术界对该研究领域的重视程度[16]，如图 1 所示。结合 CiteSpace 计量分析结果，可将这一历程划分为四个紧密衔接的阶段。

在 2000~2004 年是萌芽起步期，年均发文量不足 10 篇，整体处于低水平徘徊状态，2002 年仅产出 3 篇文献。在这一时期，国内城市环境研究的重心聚焦于水体污染和大气污染，对土壤重金属污染的系统性关注尚未形成，既缺乏全国性的监测网络支撑，也未形成稳定的研究范式，发文量偏低本质上反映了学科认知与研究条件的双重局限。

第二阶段为 2005~2012 年的快速增长期，发文量从 2005 年的 24 篇持续攀升至 2012 年的 82 篇峰值，年均增幅超过 30%。这一爆发式增长一方面源于中国进入城市化快速推进阶段，工业布局调整、交通网络扩张与城市功能转型带来的土壤重金属污染问题集中显现，成为制约城市生态安全与人居环境质量的突出矛盾[17]；另一方面，国务院在 2006 年颁布实施《中华人民共和国国民经济和社会发展

第十一个五年规划纲要》¹，指出开展全国土壤污染现状调查，综合治理土壤污染。以及 2011 年《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》²的出台，提出加强重金属污染综合治理，为相关研究提供了明确的政策导向，推动研究从零散调查转向系统性的污染现状解析、来源识别与风险评估。这个时期随着土壤研究领域的不断发展，基于不同的保护目的针对性对土壤进行研究[18] [19]，文献产出高速增加。

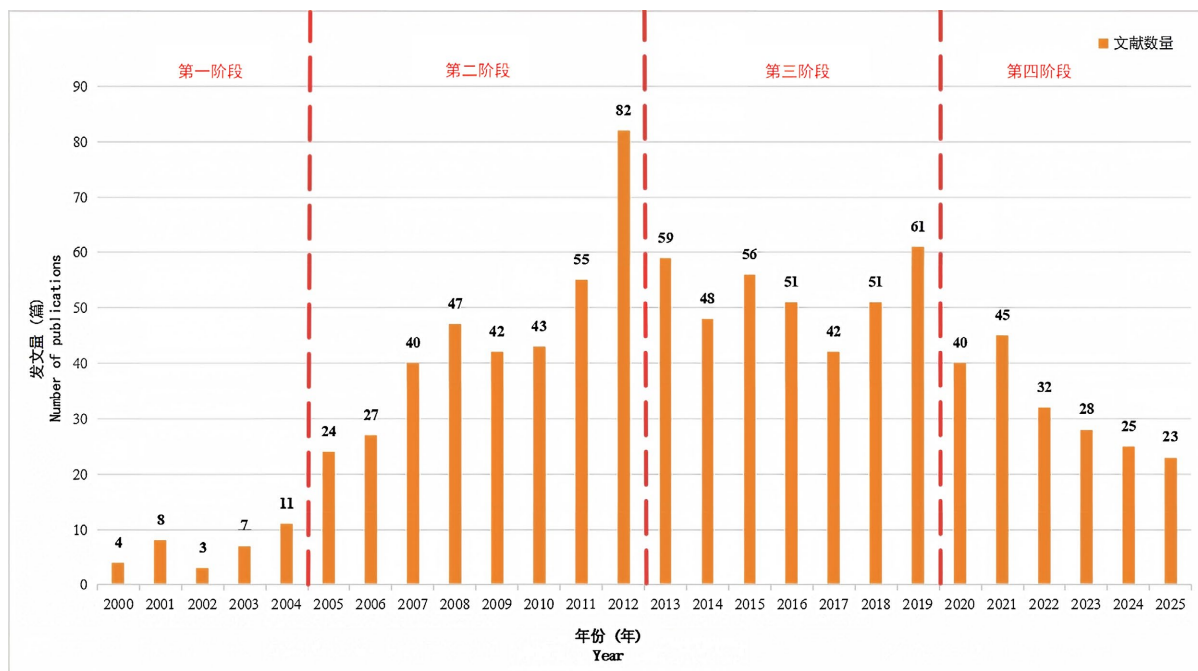


Figure 1. Number of publications per year in the field of urban soil heavy metals from 2000 to 2025

图 1. 2000~2025 年城市土壤重金属领域各年发文数量

第三阶段为 2013~2019 年的高位波动期，城市土壤重金属发文章数稳定在 40~61 篇的区间内，呈现出平台式波动特征，2019 年以 61 篇的发文章数形成次高峰。这一阶段标志着领域进入成熟发展阶段，研究热度虽未延续此前的爆发式增长，但始终维持在较高水平，研究继续深入，探究土壤重金属的影响因素，从机理层面开展研究[20]。2019 年的次高峰则与“污染防治攻坚战”的全面启动直接相关，国家对土壤污染防治的高度重视，推动了该领域的研究深化与成果产出。

第四阶段为 2020~2025 年的回落调整期，发文章数从 2020 年的 40 篇逐步回落至 2025 年的 23 篇，整体呈现缓慢下降趋势。这一变化并非研究热度的消退，而是领域发展进入转型调整阶段的集中体现。同时，随着《中华人民共和国土壤污染防治法》³的全面实施与土壤环境管理体系的完善，基础调查类研究的需求逐步被常态化监测体系替代，研究重心从“摸清底数”向“精准管控与修复”转型，也导致了发文章结构的调整与总量的回落。

3.2. 关键词突现分析

文章对 2000 年~2025 年国内土壤重金属研究文献进行突现词分析，共得到 25 个突现词，如图 2。关键词突现分析揭示特定时期内的学术焦点和发展趋势，Strength 指的是突现强度，Begin 标志着突现开始

¹https://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_268766.htm

²https://www.gov.cn/xinwen/201103/content_7044615.htm

³https://www.mee.gov.cn/ywz/fj/201809/t20180907_549845.shtml

的年份，End 表示突现终止年份[21]。从突现持续时间看，以下关键词突现时间持续到现在：源解析(突现强度 10.75，2017~2025 年)、来源解析(突现强度 9.08，2020~2025 年)、分布特征(突现强度 2.7，2017~2025 年)、健康风险(突现强度 4.91，2018~2025 年)、风险评价(突现强度 5.54，2020~2025 年)、城市公园(突现强度 3.8，2020~2025 年)。在快速城市化和工农业集约化发展的双重影响下，我国土壤重金属累积性污染问题日益突出[22] [23]。对于人类活动扰动下城市公园、工业用地、农田等各类功能区土壤出现的重金属污染问题，国家予以高度重视[24]。重金属可通过多种暴露途径产生环境迁移，对生态系统稳定与人群健康构成潜在威胁[25]。研究者通过综合分析土壤重金属的空间分布特征、污染来源以及开展定量风险评价，为制定分区分类、精准施策的土壤污染防治与治理策略提供了坚实的科学依据。这部分关键词的突现与政策背景息息相关，其中《土壤污染防治行动计划》⁴、《土壤污染源头防控行动计划》⁵等国家政策明确指出：开展环境风险评估，防控土壤污染源头是有效的防治途径，这在国家层面上引导了研究者的研究方向。

突现图谱通过探测特定时间段内关键词频次的变化率，来揭示某一研究领域在不同发展阶段的热点主题与前沿方向的动态变迁[26]。综合突现强度与持续时间来看，土壤重金属的多源污染溯源、不同暴露途径的健康风险评估、以及城市人居环境土壤的风险管控，将成为未来该领域的重点研究方向。



Figure 2. Keyword emergence map of soil heavy metal pollution from 2000 to 2025
图 2. 2000~2025 年土壤重金属污染关键词突现图谱

3.3. 关键词时间线图谱分析

关键词时间线图体现出聚类的时间跨度以及聚类之间的关联程度[21]。利用关键词分析 2000~2025 年土壤重金属污染的相关文献，绘制出关键词聚类共线时间线图谱，如图 3，图谱 Q 值为 0.8348，S 值为

⁴https://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm
⁵<https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/202411/W020241108374545579545.pdf>

0.933, 说明聚类结果高度可信[27]。关键词节点大小与关键词在本数据集中的累计出现频次正相关, 节点越大代表该主题在领域内的整体影响力越强[28]。

我国城市土壤重金属污染研究呈现出明显阶段演进特征, 主要分为以下三个阶段。

(1) 2000~2004 年为发展早期, 在该阶段主要出现“重金属”、“土壤”、“城市土壤”、“农田土壤”关键词, “化学形态”等方法虽已零星出现, 但节点强度低、整体影响力有限。该时期以区域现状调查为主。如杨苏才等对兰州市表层土壤 Cu、Zn、Pb 开展含量测定与污染评价, 通过分析交通尾气、工业活动、绿化带对重金属累积的影响来初步溯源, 属于典型的通过现状简单归因模式[29]。

(2) 2005~2012 年为方法体系成熟期, 主要的关键词“化学形态”、“地统计学方法”在领域内的影响力逐渐增强, 2008 年丁海霞等[30]以金昌市郊农田表层土壤为对象, 在含量测定基础上引入相关性分析与因子分析识别污染源, 并开展潜在生态风险评估, 说明对于土壤重金属污染的研究方法在不断发展成熟。除此之外, 在图谱中还出现了“上海”“北京”“开封”等城市名称, 说明该阶段土壤重金属污染研究以大城市为主要的研究对象。

(3) 2013 年至今为前沿聚焦期, “源解析(来源解析)”、“因子分析”、“城市公园”、“污染评价”等关键词集中爆发, 表明研究转向定量溯源, 追溯污染源头, 贯彻国家“污染源头防控”的土壤污染治理治理策略。以吴文伟等《城市工业地块土壤重金属污染风险评价与源解析》为例[31], 该研究选取上海市金山区 25 个再开发利用行业地块, 测定 Cd、Pb、Cu、Ni、Hg、As 六种重金属含量, 综合运用地累积指数、内梅罗综合污染指数与潜在生态风险指数开展污染评价, 并采用绝对主成分-多元线性回归(APCS-MLR)模型进行定量来源解析。充分体现了我国环境科学研究的政策驱动特征。

从初期污染现状摸底, 到中期研究方法成熟完善, 再到后期源解析与污染评价成为研究热点, 各阶段研究重心存在明显差异, 但始终围绕土壤重金属污染治理展开, 土壤修复仍是该领域长期不变的核心研究方向。

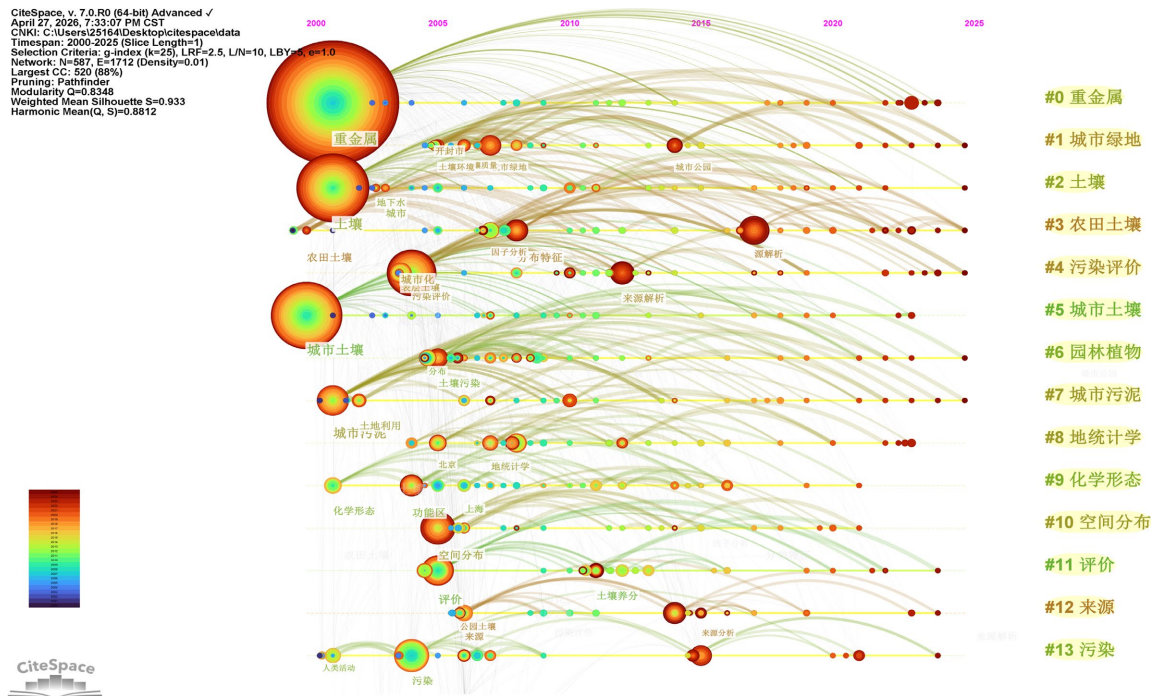


Figure 3. Timeline of soil heavy metal pollution keywords from 2000 to 2025

图 3. 2000~2025 年土壤重金属污染关键词时间线图

3.4. 关键词分析

3.4.1. 关键词共现分析

关键词的频率分析是研究与给定领域相关联的热点话题和发展的关键[32]。关键词共现能够反映研究主题间的关联强度，可以显现出该领域的学者所关注的研究方向[33]，通过分析高频共现关键词，可精准挖掘领域研究热点与主题关联特征。关键词为研究者提供了宏观和微观的研究角度，并且通过分析高频共现关键词，可精准挖掘领域研究热点与主题关联特征[14]。关键词共现图的核心是“关联关系”，用关键词(节点)，连线(共现)，线的粗细、长度(共现的强度)直观表现出这些关键词经常一起出现，体现出关键词之间的联系强度和互动紧密性。

利用 CiteSpace 对重金属污染土壤修复研究领域文献关键词进行分析。研究以“重金属”、“城市土壤”、“土壤”为主题词，用 CiteSpace 软件进行关键词共现分析，并将其可视化，得到关键词共现图谱，如图 4 所示。本图谱 N = 587, E = 1712, Density = 0.01, N 为节点数，本图谱共纳入了 587 个关键词节点，其中出现次数较高的关键词在图中显示为较大的节点，E 为边数，这些关键词共形成了 1712 条关联关系，Density 为计算得出的网络密度，网络密度偏低，关键词之间的整体关联不算特别紧密，反映研究主题多元但整体关联度中等。通过对关键词共现网络节点信息进一步分析发现，重金属、土壤、城市土壤、污染评价、生态风险、空间分布、农田土壤、化学形态为 2000~2025 年间的高频核心关键词，是领域长期研究焦点。土壤、污染评价、生态风险节点居中，承担主题桥梁作用，连接基础特征研究与风险管控研究。

关键词的中心度强度表征其中介功能及影响程度，若关键词的中心度超过 0.1 的节点则被称为关键节点，其重要程度较高。2000~2025 年为一个时间段，从图中可以看出最大的关键节点是重金属，其次是土壤和城市土壤，从中心性来看，重金属(中心性 > 1.0)、土壤(中心性 > 0.9)、污染评价(中心性 > 0.7)位居前列，表明上述主题在领域知识网络中占据关键位置。随着工业、农业的高速发展，重金属土壤

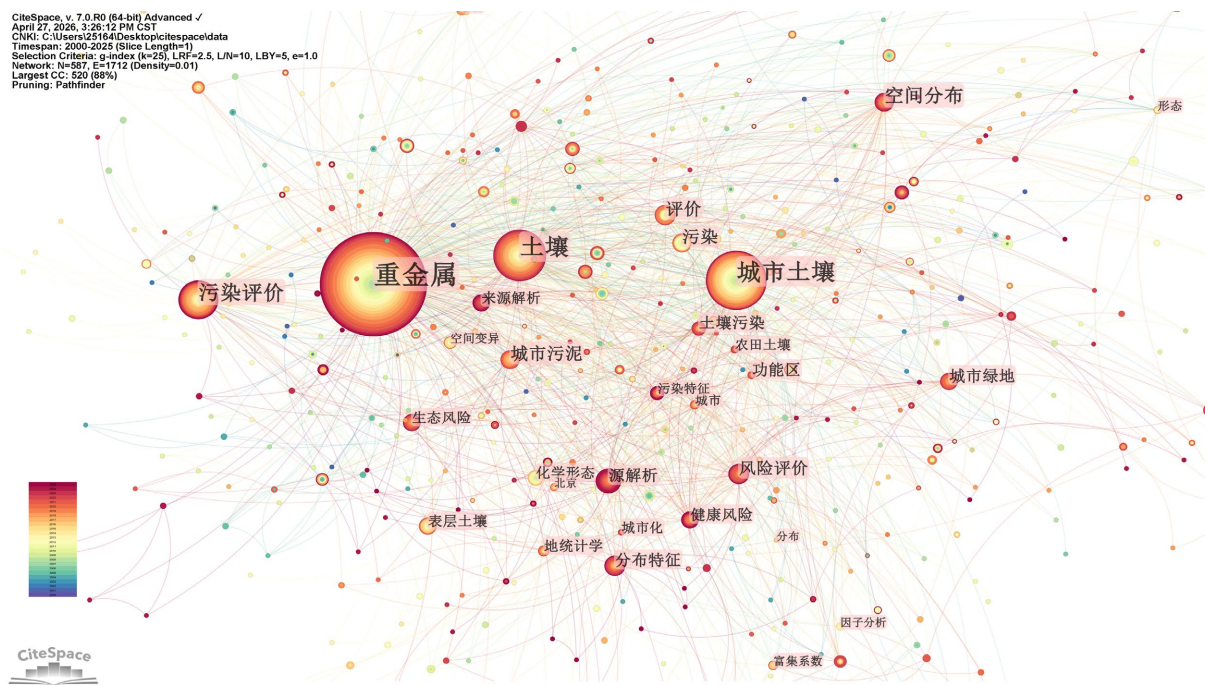


Figure 4. Co-occurrence map of urban soil heavy metal keywords from 2000 to 2025

图 4. 2000~2025 年城市土壤重金属关键词共现图谱

污染问题日益严重。重金属通过各种途径进入环境中,例如矿山开采、农田灌溉等进入土壤,重金属很容易吸附在颗粒物中,最常积聚在表层沉积物中对土壤造成严重污染[34],而且重金属具有易积累、难分解的特征,一旦超过了土壤承载力就会造成严重的土壤污染,因此重金属研究、土壤、污染评价成为研究的主要方向。

高频关键词间连线密集程度表明,重金属-土壤-污染评价-生态风险-空间分布形成稳定关联闭环链,是该领域最主流的研究路径;农田土壤-化学形态-生物有效性与城市土壤-来源解析-风险评价形成了另外两大分支脉络,分别对应粮食安全导向与城市环境导向的研究体系。整体共现结构显示,领域已形成污染特征-来源识别-风险评价-修复管控的完整研究链条。

3.4.2. 关键词聚类分析

通过对关键词进行聚类分析后绘制关键词聚类图谱,并通过模块值(Q值)和平均轮廓值(S值)判定图谱绘制效果[35],以展示关键词之间的强聚类性。关键词的中心度强度表征其中介功能及影响程度,若关键词的中心度超过0.1的节点称为关键节点,表明该关键词具有较强的中介属性,其重要程度较高。 $Q \geq 0.3$ 表明聚类结构显著, $S \geq 0.7$ 表明聚类可信[36]。本图谱模块度 $Q = 0.8348 > 0.3$,聚类结构划分清晰,不同研究方向之间边界明确;平均轮廓值 $S = 0.9339 > 0.7$,关键词间的紧密程度反映了聚类强度。聚类内部同质性高,关键词关联紧密,主题一致性极高,结果高度可信。2000~2025年聚类图谱如图5所示,共形成20个稳定聚类[37],规模与影响力靠前的聚类依次为:#0 重金属、#1 城市绿地、#2 土壤、#3 农田土壤、#4 污染评价、#5 城市土壤、#6 园林植物、#7 城市污泥、#8 地统计学、#9 化学形态、#10 空间分布、#14 风险评价、#19 土壤改良。其中,农田土壤重金属污染领域为研究重点,农田土壤重金属污染问题日益严重,为了解决问题,研究方向和研究热点每年都在变化,研究方向向纵深发展。研究前期围绕重金属、农田土壤、污染评价、空间分布等开展[37],近年来研究更关注土壤改良、土壤修复、健康风险方面,修复污染土壤和健康管理。

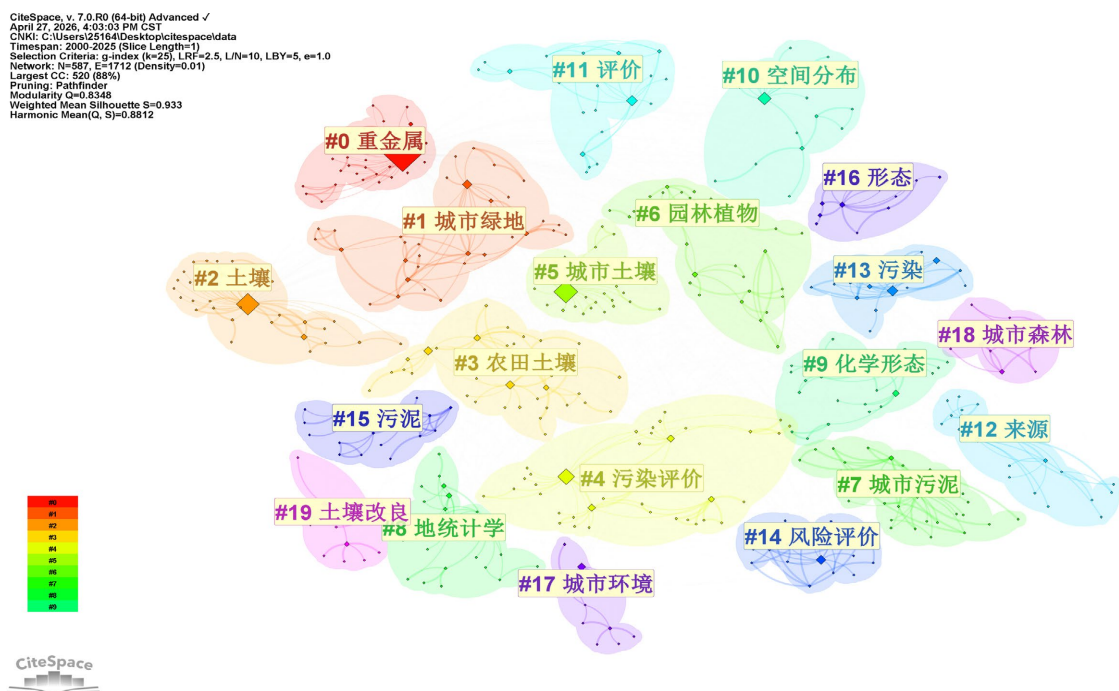


Figure 5. Urban soil heavy metal keyword cluster map from 2000 to 2025

图 5. 2000~2025 年城市土壤重金属关键词聚类图谱

#0 重金属、#2 土壤、#3 农田土壤、#4 污染评价为早期大型聚类，构成基础框架，聚焦农田重金属污染调查与评价方法构建；#5 城市土壤、#8 地统计学、#9 化学形态、#10 空间分布为中期扩张聚类，推动研究由定性描述转向定量与空间化；#1 城市绿地、#6 园林植物、#7 城市污泥、#14 风险评价、#19 土壤改良为近期新兴聚类，代表研究重心向城市生态、植物修复、污泥资源化、健康风险、土壤改良迁移。

聚类间关联特征表明，#0 重金属为核心聚类，与#2、#3、#4、#5、#10、#14、#19 均存在强交叉，贯穿全领域；#4 污染评价与#14 风险评价高度融合，共同构成评价体系；#3 农田土壤与#19 土壤改良形成“污染-修复”链条；#1 城市绿地、#5 城市土壤、#17 城市环境、#18 城市森林形成城市环境研究集群。研究热点不再呈现出相对集中的趋势，呈现出多元化、分散化的发展趋势，表明该领域发展也在不断发展完善。整体聚类演化清晰呈现出基础调查-方法突破-评价深化-修复应用的四阶段演进路径，并且呈现出技术手段不断更新[38]、研究内容日益综合、学科交叉融合日益加深的特点。

整体而言，我国土壤重金属污染领域的研究体系已趋于完善，研究热点和未来发展的需求高度契合，未来可加强健康管理、风险评价和修复技术的实际应用，为土壤环境保护提供更有力的支撑。

3.5. 文献作者群体分析

作者合作网络的本质是从被引文献的所有参考文献中抽取第一作者进行共被引分析[39]。作者共现分析有助于识别出一个学科或领域的核心作者群及其之间的合作强度和互引关系[40]，借助 CiteSpace 对发文作者进行分析统计，得到作者合作网络图谱，如图 6，图谱共 691 个节点，670 条连线，但网络密度仅为 0.0028，呈现出典型的“整体分散、局部集中”特征合作关系较为分散，未形成高度紧密的学术共同体，最大合作集群仅包含 28 位作者，占全部节点的 4%。节点大小代表发文量，高产作者中，李小平[41]以 10 篇居首，王继文、刘敏、刘玉燕、郭平等各 8 篇次之，反映出核心研究群体规模明显偏小。节点颜色对应发文时间，龚子同、张甘霖、卢瑛等作者的节点偏蓝绿，是领域的早期开拓者；而陈景辉、李小平、陈秀端等作者的节点偏橙红，是近年的活跃研究者。以李小平、卢新卫为中心的红色集群是当前合作最活跃的团队，而早期以龚子同、张甘霖为核心的蓝绿色团队则奠定了领域研究基础。

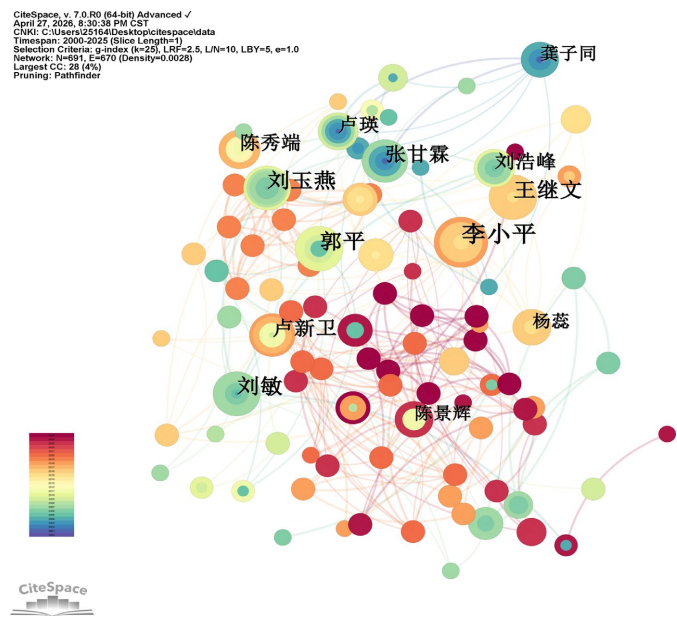


Figure 6. Co-authorship network of urban soil heavy metal papers from 2000 to 2025
图 6. 2000~2025 年城市土壤重金属发文作者共现图

整体来看,该领域作者合作呈现“小团队内部紧密、跨团队交流松散”的特征,研究存在明显的代际交替,部分作者仍处于独立研究状态。这种碎片化的合作格局,与土壤重金属研究作为多学科交叉领域的内在属性密切相关[42]。土壤重金属研究的合作网络建设仍有较大提升空间。

3.6. 文献发文机构分析

对检索结果的发文机构进行分析,从 CiteSpace 中得到如图 7 所示图谱,其中节点数 466 个,连线 210 条,网络密度仅为 0.0019,表明土壤重金属研究机构间的学术联系整体较弱,合作网络尚不紧密。

图中圆形的节点代表研究机构,圆圈和字体越大表明机构发文量越多。节点间的连线表示研究机构之间的交流合作,连线越粗表明机构合作发文量越多[43],颜色由蓝到红对应研究时间从早期到近期。核心研究力量高度集中,中国科学院大学为网络的绝对中心,节点规模最大且颜色偏红,是该领域发文量最高、近年间研究活跃度最强的机构,以其为核心形成了辐射状的合作集群;吉林大学环境与资源学院为另一核心节点,发文量仅次于中科院大学,节点颜色偏绿,体现了该机构自研究中后期起持续稳定的产出;中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室、中国环境科学研究院、广东工业大学环境科学与工程学院等为重要次级节点,其中中科院生态环境研究中心节点偏红,显示其近年研究活跃度较高,与中科院大学形成了紧密的所内合作关系。

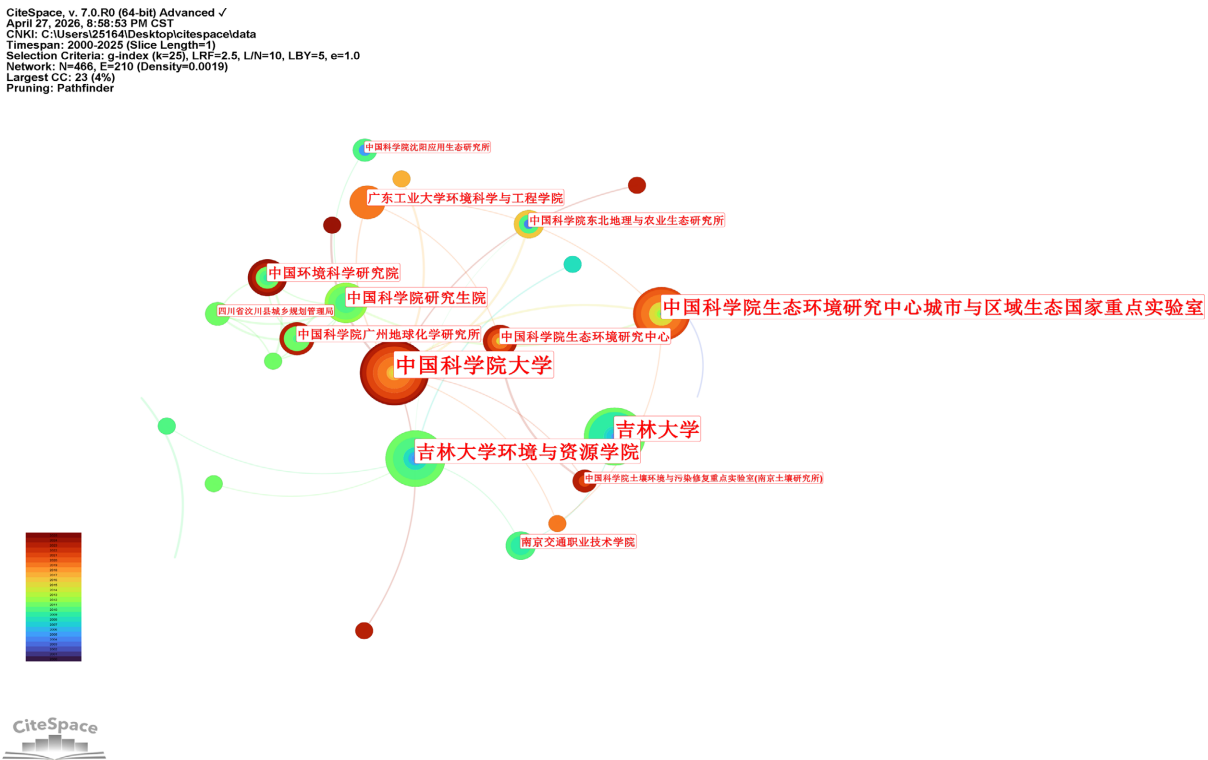


Figure 7. Co-occurrence map of organisations publishing on urban soil heavy metals from 2000 to 2025
图 7. 2000~2025 年城市土壤重金属发文机构共现图

从区域角度上看,土壤重金属研究机构的分布并不均衡,主要集中在北京、吉林、上海、贵州、陕西等地。这些地区或拥有雄厚的科研资源(如北京的中国科学院系统),或面临着较为突出的土壤环境问题(如西南喀斯特地区、东北老工业基地),研究需求与科研力量在地域上呈现一定的正相关性[44]。不同区域和机构共同的研究需求与研究目的促使跨区域、跨机构合作的进行,跨机构合作大多数发生在中科院

体系机构内部，虽然其在空间上分布较为分散，但通过学术界内的学术会议和项目协作形成了密集的关系网络。而中科院机构体系与其他高校以及除中科院机构体系外的其他高校之间的联系却相对薄弱，高校虽建有许多研究中心、协同创新中心等平台，为科研工作的进行奠定了平台基础[45]，可关于有组织科研协同体建设的研究表明，多方主体在体系建设、资源分配与成果共享等方面仍存在显著问题[46]。为此，一方面需要推进机构间深度交叉与资源的系统整合；另一方面，则需要政府统筹布局、优化科研资源配置，多方共同聚焦国家重大战略与地方发展现实需求[47]，从而打通合作障碍，加强机构与高校间的深度互联。

按照发文量排序，6 篇及以上的发文机构如表 1 所示，共有 27 所。其中中国科学院大学出现频率

Table 1. Top 27 institutions in research publications from 2000 to 2025
表 1. 2000~2025 年研究发文量前 27 的机构

序号	发文量(篇)	发文机构
1	16	中国科学院大学
2	13	吉林大学
3	12	贵州师范大学地理与环境科学学院
4	12	吉林大学环境与资源学院
5	12	陕西师范大学旅游与环境学院
6	12	上海师范大学
7	11	兰州大学
8	11	北京林业大学
9	11	中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室
10	11	华东师范大学
11	9	四川农业大学
12	8	东北林业大学
13	7	浙江大学
14	7	中国矿业大学
15	7	上海交通大学
16	7	中国科学院南京土壤研究所
17	7	南京农业大学
18	7	中国地质大学(北京)
19	6	上海师范大学地理系
20	6	中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所
21	6	河南大学资源与环境研究所
22	6	河南大学
23	6	中南林业科技大学
24	6	中国科学院研究生院
25	6	中南大学
26	6	青海大学农牧学院
27	6	华中农业大学

最高,达 16 篇,是土壤重金属领域发文最多的机构,其次是吉林大学,有 13 篇,贵州师范大学地理与环境科学学院、吉林大学环境与资源学院、陕西师范大学旅游与环境学院、上海师范大学均产出 12 篇。发文数量在 10 篇以上的机构共 10 所,构成了该领域持续产出成果的核心群体。

4. 讨论

目前土壤重金属污染的综述类文献多集中于研究方法、影响因素、修复技术、生物可给性等针对某一方面的分析[48]。随着城市化的发展,城市作为重要的人居环境以及城市的居住环境健康安全愈发重要[49][50],但是目前关于城市人居场景土壤重金属污染领域的系统性综述稀缺且更新滞后[51],无法及时地、系统地对该领域的最新研究成果进行整理归纳。为此,本研究利用 CiteSpace7.0.R0 可视化分析软件结合文献计量法,对 2000~2025 年间 CNKI 数据库中收录的 1391 篇城市土壤重金属相关文献进行了系统梳理。通过对发文量时序演变、关键词突现与聚类、以及作者机构合作网络的深入分析,揭示了该领域在过去 25 年中的知识结构演化路径,为后续研究者快速把握领域前沿、确定研究选题提供参考。国内已有相关文献计量研究可为本研究的分析思路提供借鉴[52]。

国内城市土壤重金属研究主要呈现出以下特征:一是研究热点从早期的污染现状调查,逐步转向多源污染溯源、健康风险评价与城市人居环境土壤管控,尤其聚焦经口摄入、皮肤接触、呼吸吸入等多途径暴露下重金属对居民健康构成的潜在风险,重点关注城市公园、居民区等与居民日常生活密切相关的功能区域。这一研究热点的转变,反映了研究从关注污染特征向关注人居环境健康的延伸,契合健康中国战略的需求;二是学术合作网络呈现“整体分散、局部集中”格局,未形成跨团队紧密协作的学术共同体。这可能与土壤重金属污染具有显著的区域异质性有关[53],不同地区的成土母质、产业结构、城市化进程与污染来源差异极大[54],导致研究多以“本地案例”为核心,研究目标聚焦于解决区域特定问题。研究力量局部集中能让科研团队长期聚焦本地土壤重金属污染,积累区域基础数据,弥补大尺度调查的人力物力局限[55];但数据分散难共享,易产生低水平重复,制约跨区域整合研究与重大原创成果产出[56];三是发文时序分四阶段演化,与我国城市化节奏和土壤污染管控环境政策相匹配[57],依次为“萌芽起步-快速增长-高位波动-回落调整”四个阶段。

需要客观指出的是,本研究在数据源的选取上存在明确的研究边界。考虑到本研究的核心定位是系统梳理我国城市土壤重金属领域的研究现状与演进脉络,中国知网(CNKI)作为国内收录中文核心期刊、硕博学位论文等最全面的权威数据库,能够较好地满足本研究的核心分析需求。但仅依靠 CNKI 无法覆盖全球城市土壤重金属前沿,本研究未能系统纳入 Web of Science、Scopus 等主流外文数据库,因此对国际研究前沿的呈现尚不够全面,单一数据库会造成全球研究图景残缺[58]。未来研究可进一步拓展文献检索范围,整合多源中外文数据库开展对比分析,系统梳理国内外研究的异同与演进差异,从而获得对城市土壤重金属领域全球发展态势更为完整和深入的认识。

5. 总结与展望

本文基于 CiteSpace 知识图谱对 2000~2025 年 CNKI 数据库中城市土壤重金属领域 1391 篇核心文献进行计量分析,系统揭示该领域的知识结构、研究热点、发文作者、发文机构以及演化趋势。结果表明,该领域的发文量呈现萌芽起步-快速增长-高位波动-回落调整四个阶段。关键词分析显示,重金属、城市土壤、污染评价、生态风险、空间分布、源解析、健康风险为长期研究核心,研究重心由污染现状调查、污染分布逐步转向污染溯源、风险评估、人居环境土壤安全管控。发文作者与发文机构合作网络呈现局部集中、整体分散的特征,核心作者有李小平、王继文、刘敏等,核心机构集中于中国科学院大学、吉林大学以及中科院相关院所,在空间上分布不均衡,跨区域学术协作较弱,科研力量区域差异显著,

领域已形成污染特征－来源分析－风险评价－修复管控的研究链条，呈现地理学、环境科学、土壤学、生态学等多学科交叉融合。

在大方向的研究框架里，城市土壤重金属空间分布、污染源解析、风险评价等仍是研究的主流方向。面向人居环境健康、土壤环境生态安全和精细化管理要求，未来研究需要关注一下方向。

健康风险与生态安全研究。加强多源复合污染驱动机制研究，综合运用空间模型、机器学习、同位素示踪、地统计学等方法，完善不同城市功能区土壤重金属累计规律，并实现污染源定量解析与贡献区分。

绿色修复技术与工程化应用研究。研发高效、低成本、环境友好的植物－微生物联合修复、土壤改良等技术，强化修复材料的高效性、长期性与安全性，推动污染土壤资源化利用与技术成果落地应用。

智慧监测与协同治理研究。构建全国城市土壤重金属检测与大数据平台，融合遥感、物联网与 AI 实现动态监测，加强跨区域、跨机构合作，提升城市群的土壤污染协同防治能力。

综合以上，我国城市土壤重金属研究在污染调查、风险评价、方法创新等方面取得显著进展，研究体系日趋完善，但是在健康风险精细化评估、绿色修复技术、跨区域协作研究等方面有提升空间。后续研究应立足我国土壤污染防治相关部署与人居健康需求，强化方法创新、技术突破与合作交流，不断提升城市土壤重金属污染防治的科学化、精准化，为城市生态安全与土壤环境可持续发展提供坚实理论与技术支撑。

基金项目

岭南师范学院人才专项项目(ZL2521)资助。

参考文献

- [1] 乔保娟. 城市土壤的生态服务功能演变与城市生态环境保护研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(3): 173-175.
- [2] 尹元松, 张光旭, 徐一宸. 微探土壤重金属污染的来源与危害及修复技术[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(16): 161-163.
- [3] 吕阳, 廖育林, 范美蓉. 农用地土壤重金属污染成因、危害及修复策略[J]. 农村科学实验, 2025(16): 64-66.
- [4] 王倩. 长江口及其邻近海域 Cu、Mo 的地球化学行为研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- [5] 丁毅, 陈思思, 李激. 我国硫铁矿及其典型伴生矿区域土壤重金属浓度的时空分布与健康风险评估[J/OL]. 环境工程, 2026: 1-17. <https://link.cnki.net/urlid/11.2097.X.20260525.1647.004>, 2026-08-20.
- [6] 史雁冰, 刘冰权, 李淑梅, 等. 金属矿区土壤重金属污染生态风险评价及修复技术[J]. 中国地质, 2026, 53(2): 551-574.
- [7] 孟烁瑶, 梁育杰, 靳芙蓉, 等. 河湟谷地农田土壤重金属分布及人群健康风险评价——以西宁市为例[J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(6): 2121-2131.
- [8] 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 等. 中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 1-10.
- [9] 隋春明, 逢金辉. 基于 CiteSpaceIII 的我国创新管理知识图谱分析[J]. 图书情报工作, 2017, 61(S1): 99-107.
- [10] Liu, Z., Feng, T., Wei, W., Tan, M., Li, Z., Wang, H., et al. (2025) The Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Mineralization in Bibliometric Analysis and a Review. *Ecological Frontiers*, 45, 1546-1556. <https://doi.org/10.1016/j.ecofro.2025.07.008>
- [11] 宁婉妤, 吴春生, 杨光辉, 等. 基于 CiteSpace 的土壤甲烷研究热点可视化分析[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(21): 244-252.
- [12] 刘玉成, 邵泽强, 张晋京, 等. 基于 CiteSpace 的土壤微塑料研究趋势与热点分析[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(21): 225-231.
- [13] 代林玉, 肖时珍, 邵治钦, 等. 基于 CiteSpace 的国内土壤磁学文献计量分析[J]. 生态科学, 2022, 41(5): 63-71.
- [14] 韩增林, 李彬, 张坤领, 等. 基于 CiteSpace 中国海洋经济研究的知识图谱分析[J]. 地理科学, 2016, 36(5): 643-652.
- [15] 魏丹, 崔福星, 李虹, 等. 基于 CiteSpace 的土壤动物研究现状与热点分析[J]. 中国农学通报, 2025, 41(29): 137-

- 145.
- [16] 邹丽娜, 林志健, 张冰, 等. 基于 CiteSpace 的临床中药学研究的可视化分析[J]. 中医教育, 2021, 40(1): 18-22.
- [17] 杨佳佳, 刘红, 梁洪力. 科技发展与老年人社会参与政策研究——基于 1999 年以来国家层面政策文本量化分析[J]. 科技促进发展, 2020, 16(8): 883-890.
- [18] 陈世宝, 王萌, 李杉杉, 等. 中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 35-41.
- [19] 王玉军, 陈能场, 刘存, 等. 土壤重金属污染防治的有效措施: 土壤负载容量管控法——献给 2015 “国际土壤年”[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4): 613-618.
- [20] 黄奕航, 朱琳芳, 戈子轩, 等. 基于 CiteSpace 分析近 30 年土壤重金属阈值研究趋势及热点[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(11): 2443-2454.
- [21] 李小菊, 余军霞, 马强强, 等. 风化壳淋积型稀土尾矿中氨氮的处理: 基于 CiteSpace 的图谱分析[J]. 矿冶工程, 2026, 46(2): 156-162+170.
- [22] 岳志娟. 生物修复技术在园林土壤重金属污染中的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2025, 50(12): 98-103.
- [23] 张永帅, 荣玉伟, 李付全, 等. 山东省临沭县北部农用地土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. 山东国土资源, 2023, 39(12): 49-56.
- [24] 赵陈龙, 周世跃, 陶燕蓝. 某铜尾矿堆渣场重金属污染特征与风险评价[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025(5): 181-193.
- [25] 陈子万, 许晶, 侯召雷, 等. 基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价[J]. 环境科学, 2023, 44(1): 405-414.
- [26] 卢锐敏. 国际外科医疗纠纷研究及对我国法医学研究的启发——基于文献计量学的可视化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国政法大学, 2022.
- [27] 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.
- [28] 郭文斌. 亲子关系研究的热点领域构成及主题分布[J]. 西北师大学报(社会科学版), 2017, 54(6): 133-139.
- [29] 杨苏才, 曾静静, 王胜利, 等. 兰州市表层土壤 Cu、Zn、Pb 污染评价及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2004(S2): 28-31.
- [30] 丁海霞, 南忠仁, 刘晓文, 等. 金昌市郊农田土壤重金属的污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2183-2188.
- [31] 吴文伟, 沈城, 沙晨燕, 等. 城市工业地块土壤重金属污染风险评价与源解析[J]. 生态环境学报, 2024, 33(5): 791-801.
- [32] 董淑龙, 马姜明, 曹蕊, 等. 基于 CiteSpace 的中国湿地分类研究知识图谱可视化分析[J]. 湿地科学与管理, 2022, 18(6): 52-57.
- [33] 彭鸽, 等. 基于 CiteSpace 的重金属源解析热点与趋势研究[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(1): 72-77.
- [34] 杨笑萌, 刘操, 任少东. 基于文献计量学的重金属生态风险评估研究进展[J]. 绿色科技, 2025, 27(2): 213-219.
- [35] 李焱秋, 曹乐, 吴邦利, 等. 喀斯特土壤水文研究进展——基于 CiteSpace 的文献可视化分析[J]. 中国水土保持, 2025(11): 30-37.
- [36] 罗子恒, 张海林, 白伟, 等. 基于 CiteSpace 的绿肥影响土壤有机碳研究概况与热点分析[J]. 中南农业科技, 2025, 46(11): 218-227.
- [37] 王维维, 王良元, 徐宗黎, 等. 基于 CiteSpace 对近 10 年国内农田土壤重金属污染研究热点及趋势分析[J]. 广东化工, 2025, 52(23): 55-58.
- [38] 冀雨璇, 邹文秀, 韩晓增, 等. 土壤有机质组分研究进展——基于 CiteSpace 的可视化分析[J]. 土壤与作物, 2026, 15(1): 101-118.
- [39] 张阳, 王梓凝, 任梓旭, 等. 土壤重金属形态分析的研究进展[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2025, 43(2): 133-140.
- [40] 胡泽文, 孙建军, 武夷山. 国内知识图谱应用研究综述[J]. 图书情报工作, 2013, 57(3): 131-137+84.
- [41] 李小平, 徐长林, 刘献宇, 等. 宝鸡城市土壤重金属生物活性与环境风险[J]. 环境科学学报, 2015, 35(4): 1241-1249.
- [42] 骆占斌, 马静, 杨永均, 等. 近年来土壤重金属研究知识图谱分析及关键主题述评[J]. 土壤, 2019, 51(4): 760-768.
- [43] 张晓晴, 李雅, 魏珊, 等. 基于 CiteSpace 土壤重金属污染防治的知识图谱研究[J]. 中国农学通报, 2022, 38(4):

- 133-143.
- [44] 李玉文, 王粟, 崔晓阳. 东北老工业基地不同土地利用类型土壤重金属污染特点[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(3): 118-122.
- [45] 潘玉腾. 高校实施有组织科研的问题解构与路径建构[J]. 中国高等教育, 2022(Z3): 12-14.
- [46] 赵立雨, 朱白雪, 高冬祺. 高校有组织科研: 内涵、难点堵点与化解对策[J]. 科技进步与对策, 2024, 41(16): 150-160.
- [47] 周春娟, 温优华. 面向有组织科研的学术共同体学术发表体系优化[J/OL]. 四川轻化工大学学报(社会科学版), 2026, 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/51.1793.C.20260713.0936.004>, 2026-09-30.
- [48] Tang, S., Wang, C., Song, J., Ihenetu, S.C. and Li, G. (2024) Advances in Studies on Heavy Metals in Urban Soil: A Bibliometric Analysis. *Sustainability*, **16**, Article No. 860. <https://doi.org/10.3390/su16020860>
- [49] 谢天, 侯鹰, 陈卫平, 等. 城市化对土壤生态环境的影响研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1154-1164.
- [50] 徐国良, 文雅, 蔡少燕, 等. 城市表层土壤对生态健康影响研究述评[J]. 地理研究, 2019, 38(12): 2941-2956.
- [51] 王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 等. 城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望[J]. 环境科学, 2024, 45(5): 2926-2938.
- [52] 黄伟华, 王萍. 基于 Citespace 的土壤重金属污染评价研究文献计量分析[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(18): 206-213.
- [53] 蔡倩. 长株潭绿心地区六种植被类型土壤重金属的分布规律及其影响因素[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2025.
- [54] 骆永明, 滕应. 我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 145-152.
- [55] 石航源, 王鹏, 郑家桐, 等. 中国省域土壤重金属空间分布特征及分区管控对策[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 4706-4716.
- [56] 姬慧, 赵红润, 银超慧, 等. 中国农用地土壤重金属污染分区管治研究[J]. 农学学报, 2025, 15(5): 62-71.
- [57] 刘瑞平, 宋志晓, 崔轩, 等. 我国土壤环境管理政策进展与展望[J]. 中国环境管理, 2021, 13(5): 93-100.
- [58] 包婕, 江峰, 马嘉伟, 等. 城市绿地土壤研究文献的 CiteSpace 可视化分析[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(3): 685-694.