

近年来土壤重金属研究知识图谱分析及关键主题述评^①

骆占斌¹, 马 静², 杨永均¹, 张绍良¹, 陈 浮^{1, 2*}

(1 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏徐州 221116; 2 中国矿业大学低碳能源研究院, 江苏徐州 221008)

摘 要: 土壤重金属污染问题一直都是环境科学的热点与前沿。为深刻了解国内外这一领域的关键主题及最新动态, 本文以 Web of Science 和 CNKI 期刊数据库检索的文献数据为样本, 以 CiteSpace 为分析平台, 从国家、机构、作者、研究热点等诸多方面, 对土壤重金属研究的现状及关键主题进行了可视化分析。结果表明, 国际上土壤重金属研究呈现多样化趋势, 并且中国占据核心地位; 关键主题集中于污染物来源与分布、污染评价及污染修复三大领域; 当前研究偏重于环境科学、农学、工程技术、化学、地质学、毒理学以及植物学的相关研究。预计未来土壤重金属研究将呈现国际化、多学科综合化、多技术协同化发展的趋势。

关键词: 土壤质量; 重金属污染; 知识图谱; 可视化分析

中图分类号: X53 **文献标识码:** A

重金属是土壤中一类具有潜在危害的物质, 在环境中表现出普遍性、隐蔽性、表聚性、累积性以及难以治理等重要特征, 可通过皮肤接触、大气扬尘、食物传递等途径进入人体, 威胁公众健康^[1-4]。采矿、冶金和农用化学物质大量的使用, 土壤环境中重金属累积与污染日趋严重, 致使“水俣病”^[5]、“骨疼病”^[6]、“镉大米”^[7]等事件频发。土壤重金属污染问题成为焦点, 并迅速发展为土壤科学的重要前沿领域。近些年国内外关于土壤重金属研究文献如雨后春笋, 既有特定案例分析, 又不乏整体区域研究。准确把握海量文献的关键主题及前沿焦点是科学进步的关键, 科学知识图谱计量可视化分析为我们提供了一种可行的方法^[8-9]。日前, 已有学者用该方法对土壤重金属污染研究文献进行了计量分析, 如张红侠等^[10]以 CNKI 为数据源, 对国内土壤重金属污染进行了文献计量比较; 赵庆玲等^[11]对 1990—2008 年之间 Web of Science 引文数据库收录的文献进行了计量分析。然而, 这些研究集中于 2010 年之前, 多聚焦于文献的外部特征分析。随着研究的不断深入, 近几年研究热点发生了漂移, 加之先前研究焦点发散, 相对缺乏更为深入的关键主题分析。因此, 为了准确把握近些年土壤重金属研究的关键主题和前沿领域, 本文采用

知识图谱可视化技术, 利用 Web of Science 和 CNKI 期刊数据库中相关的文献重构当前土壤重金属研究的状况与热点, 并尝试构建土壤重金属研究的关键主题框架, 以期为未来土壤重金属研究提供科学参考。

1 数据来源及处理

数据来源为 Web of Science 数据库和 CNKI 期刊数据库, 分别代表国际与国内土壤重金属研究最新成果。以土壤重金属为主题的研究文献较多, 为提高相应主题精确命中程度, 本研究采用组合检索进行定位, Web of Science 核心合集数据库中以“TS=(soil OR land OR farmland OR cropland) AND TS=(hazardous metal OR heavy metal OR metalloid OR metal OR trace element OR toxic metal) OR TS=(Pb NOT PB) OR TS=(Cd NOT CD) OR TS=(Cu NOT CU) OR TS=(Zn NOT ZN) OR TS=(Cr NOT CR) OR TS=(Sn NOT SN) OR TS=(Ni NOT NI) OR TS=(Sb NOT SB) OR TS=(Hg NOT HG) OR TS=(Bi NOT BI) OR TS=(Tl NOT TL) OR TS=(Mn NOT MN)”为检索字段, CNKI 核心期刊数据库中以“SU=(‘土壤’+‘农田’+‘场地’+‘耕地’)*(‘重金属’+‘类金属’+‘金属’+‘微量元素’+‘痕迹元素’+‘铜’+‘铅’+‘锌’+‘镉’+‘锰’+‘锡’+‘铬’+‘镍’+‘锑’+‘汞’+‘铋’+‘铊’)”为检索字段, 分别进行主题精确检索。两个数据库文献时间跨度均为

①基金项目: 国家自然科学基金项目(51474214)资助。

* 通讯作者(chenfu@cumt.edu.cn)

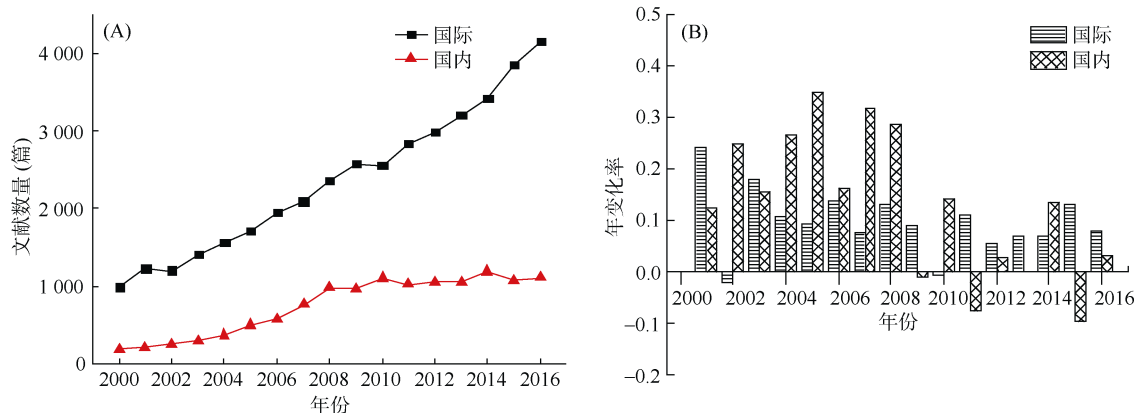
作者简介: 骆占斌(1991—), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要从事土壤污染及修复方面的研究。E-mail: lzb1991@cumt.edu.cn

2000年1月到2016年12月。原始数据采用Excel软件进行统计,结合CiteSpace 3.9.R1软件^[9],分别对国内外发文数量、国家、机构、关键词、作者等建立知识图谱,总结土壤重金属研究热点与前沿领域。

2 土壤重金属研究文献知识图谱分析

2.1 文献概况

文献数量直接反映了科学知识量的变化^[12]。经检索及筛选,2000—2016年Web of Science核心合集数据库收录文献39 936篇,CNKI期刊核心数据库收录文献12 646篇,各年发文量如图1所示。从总体



(A. 2000—2016年各年国内外年总文献刊发情况; B. 国内外文献年刊发环比变化态势)

图1 国内外年发文量及变化情况

Fig.1 Total amounts and changes of domestic and foreign documents on soil heavy metals

1)国际文献知识图谱分析。从发文国别、机构、学科分类三方面对国际土壤重金属研究进行可视化分析。从图2A可知,中国、美国、西班牙、印度、法国、德国、意大利、英国、波兰、澳大利亚占国际文献的前十位。中国发文量为6 738篇,居世界首位,占全部的16.87%;美国发文量紧随其后,共计6 090篇,占全部的15.25%;国际化合作趋势明显加强。从图2B可知,中国科学院(2 023篇)、西班牙高等科学研究理事会(516篇)、浙江大学(499篇)、俄罗斯科学院(363篇)、加利福尼亚大学(329篇)、法国农业科学研究院(322篇)、美国地质勘探局(263篇)、中国科技大学(248篇)、北京师范大学(244篇)、法国科学研究中心(233篇)等研究机构发文量排名前十,占国际主导地位。尽管中国机构在该领域已具代表性,但国际机构文献引用率高,具有重要的影响力。跟踪主流机构研究成果不仅有助于掌握学科前沿,更有助于国际合作与交流。从图2C可知,土壤重金属研究文献主要集中于环境科学与生态学、农业、土壤科学和工程技术领域,既包含城市、采矿、污泥和农田土壤等环境本底值调查与评价的案例研究,又包含土壤重金

属的吸附解析、分布规律以及植物修复等理论研究。上来看,国内外土壤重金属相关文献呈递增趋势,受关注度逐年升高,国际关注度一直高于国内关注度;国际文献整体呈现线性增长态势,仅2002年和2010年略有下降,年均增长约10%;国内文献2008年前增长率较高,之后呈现较为平稳的增长趋势,并在2009年、2011年和2015年略有下降,年均增长约13%。

2.2 研究文献知识图谱分析

图2中圆形节点代表研究国家或机构,节点越大则该国家或机构的发文量越多;节点之间连线代表合作关系,连线的粗细代表合作密切程度,不同颜色的线代表不同的合作年份。

属的吸附解析、分布规律以及植物修复等理论研究。

2)国内文献知识图谱分析。从发文机构、作者、关键词三方面对国内文献进行可视化分析。由图2D可知,中科院是土壤重金属研究的核心力量,涵盖了南京土壤研究所、沈阳应用生态研究所、生态环境研究中心、地理科学与资源研究所等相关机构。与一些高校形成阵地交叉网络,如西北农林科技大学、西南大学、沈阳农业大学、湖南农业大学、南京农业大学、四川农业大学等相关高校。由图2E可知,发文量居前的作者为骆永明、南忠仁、周后星、廖柏寒、陈同斌、吴龙华、周东美等教授或团队。并且,2008年前文献更为集中,是形成土壤重金属研究的基础阶段,其后逐步分散化。随着时间的推移和研究的深入,各团队之间合作更为密切,但尚未形成普遍的交叉合作网络。由图2F可知,土壤修复、农田土壤重金属特征及污染评价是国内最为关注的三大方向。这些研究大都监测了不同区域、不同土地利用类型、不同处置方案下的土壤重金属污染特征,从宏观与微观不同层次上评价了土壤重金属污染状况,探索了土壤重金属污染植物、微生物、物理化学及多重组合修复途径。

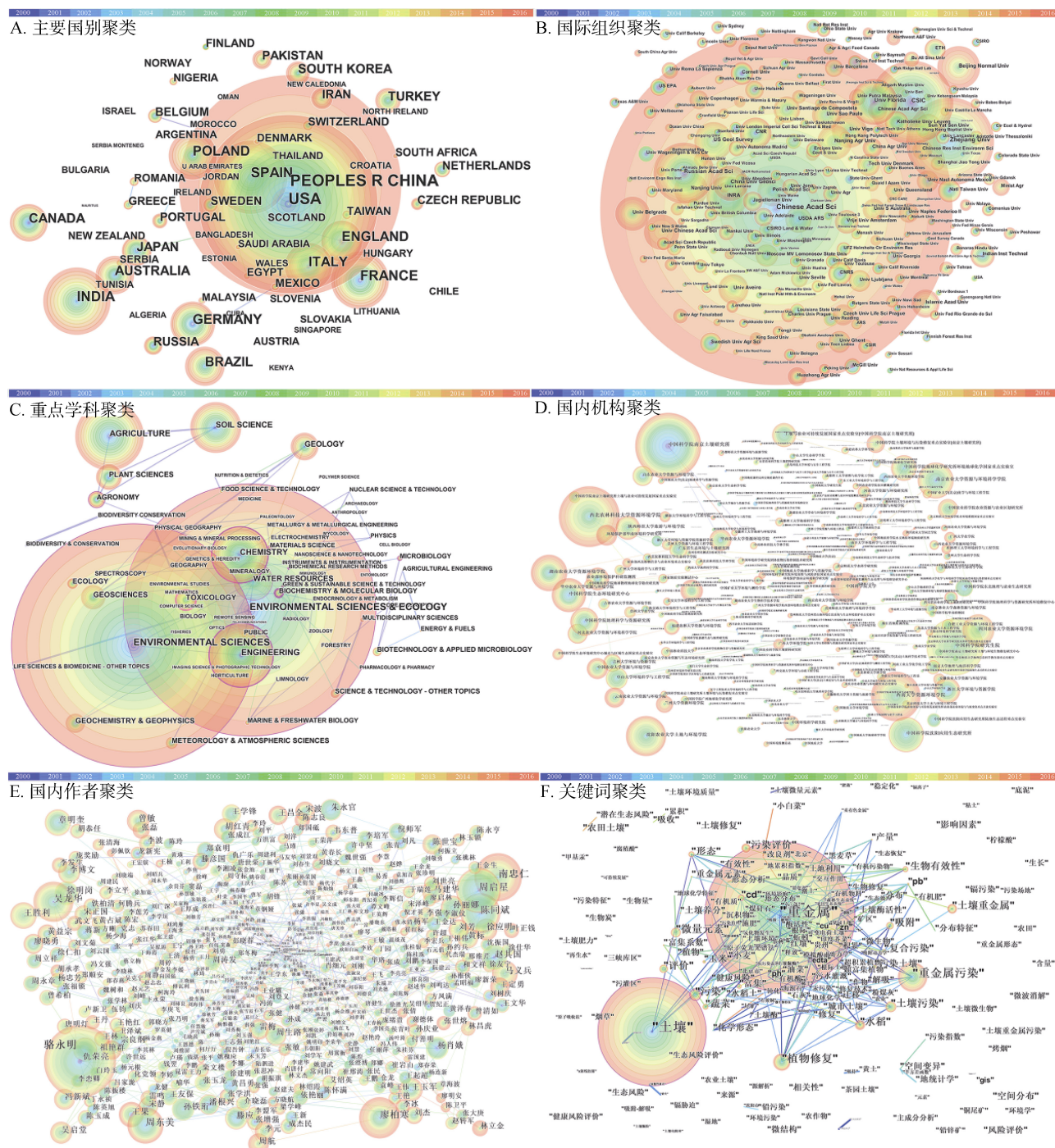


图 2 土壤重金属研究文献知识图谱

Fig. 2 Knowledge map of research on soil heavy metals

3 基于图谱分析的土壤重金属研究关键主题探究

结合知识图谱可视化结果及排名前十的关键词频统计结果(表 1), 我们认为当前土壤重金属研究主要集中于土壤重金属污染环境特征、风险评价及修复三大领域。图 3 显示了其关键主题架构。

3.1 土壤重金属污染环境特征

土壤重金属污染环境特征主要集中于源解析和分布两个方面研究。

1)源解析是控制土壤重金属污染的前置条件。通常采用扩散模型和受体模型, 目前源解析取得了丰富的成果^[13]。如燃煤电厂周边土壤 Hg 污染的主要途径是干湿沉降方式^[14-15]; 污灌农田受污染水源影响, 重

表 1 土壤重金属研究高频关键词分布
Table 1 Distribution of high frequency key-words of soil heavy metal research

序号	关键词	词频	中心度	序号	关键词	词频	中心度
1	重金属	3 550	0.15	1	Heavy-metals	9 699	0.14
2	土壤	2 594	0.10	2	Soil	6 497	0.02
3	重金属污染	778	0.07	3	Cadmium	5 864	0
5	植物修复	499	0.09	4	Heavy metals	5 539	0.04
4	微量元素	342	0.03	5	Soils	4 668	0
7	土壤污染	342	0.03	6	Lead	4 177	0
8	污染	339	0.10	7	Zinc	3 924	0.05
6	水稻	314	0.03	8	Copper	3 729	0.01
9	土壤重金属	300	0.01	9	Metals	3 663	0
10	污染评价	278	0	10	Accumulation	3 513	0.03

注：本表仅显示国内国际研究文献中关键词排名前十的词频及关键词。

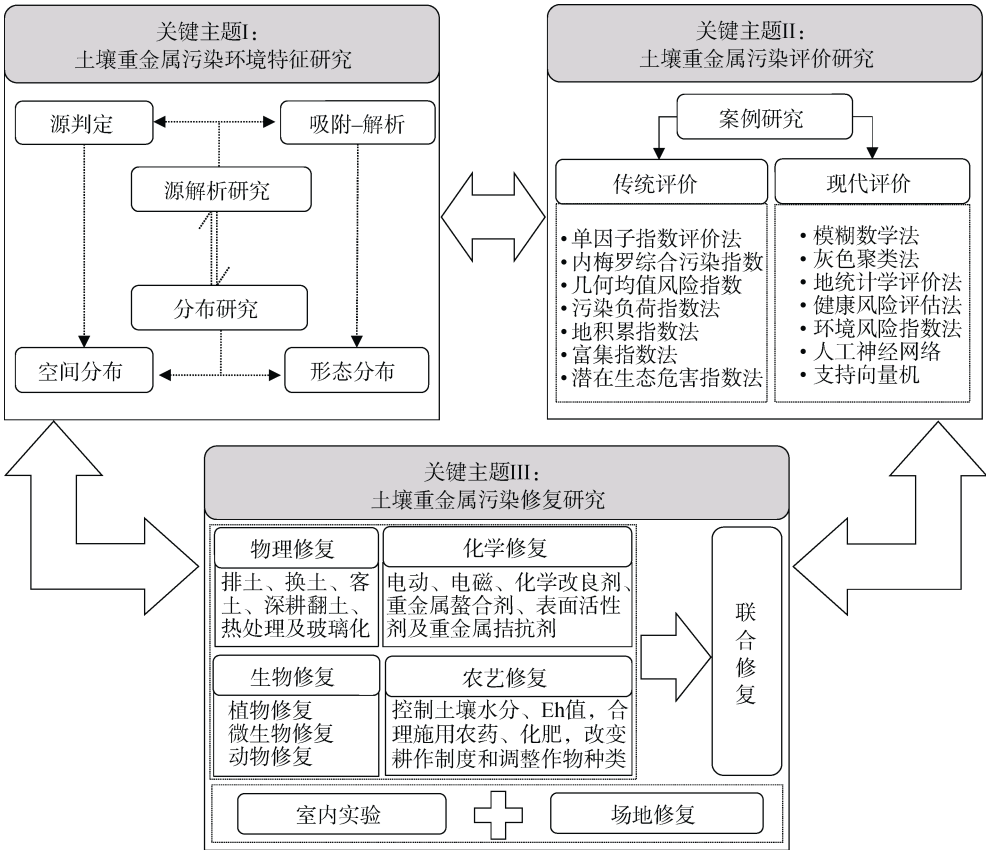


图 3 土壤重金属研究关键主题架构
Fig. 3 Framework diagram on research hotspots of soil heavy metals

金属含量多超警戒值，并逐年增高^[16-18]；污泥的不当施用也会导致土壤重金属含量增加，且幅度与污泥中重金属含量、施用量及土壤管理有关^[19-20]；一些含有重金属的农药长期使用也会造成不同程度的重金属污染^[21]；长期使用化肥可促进土壤 Cd 降低、Pb 增加^[22]；农用地膜(含有 Cd、Pb 等热稳定剂)的大面积使用增加了土壤重金属污染的概率^[23]。固废堆积或处理过

程中也极易产生土壤重金属污染^[24]。如矸石山、尾矿碴、建筑废弃物等因日晒、雨淋向周边土壤、水体呈辐射状、漏斗状扩散。综上所述，重金属主要通过大气沉降、污水排放、人为施用和固废处置不当等途径进入土壤环境，长期积累。单一污染可能有多种源头，同时，一种源头也可能造成多种重金属污染。

2)土壤重金属空间分布研究最为广泛，但空白区

域仍很多。空间分布研究集中于特定点位及不同土地利用方式,前者关注特定区域土壤环境中重金属浓度及其空间特征,如香港城市公园重金属浓度高于郊区公园浓度^[25],哈尔滨市不同绿地土壤重金属浓度由重到轻的顺序依次为工业区绿地>市区公路两旁绿地>松花江沿岸绿地>城市公园绿地>农业用地>森林与苗圃绿地^[26]。后者关注不同土地利用方式下土壤重金属浓度空间变化,如我国农田重金属表现出明显的区域特征,西南地区土壤重金属含量高,其他地区相对较低。且农田土壤中 Pb 和 Cd 的含量明显高于自然背景值^[27];南方矿区土壤重金属污染远高于北方矿区^[28]。进一步分析表明,空间分异包含垂直与水平的差异。垂直分异源于利用方式和淋洗,如京郊不同利用方式下菜地重金属含量最高,且重金属浓度随土壤深度增加呈现递减趋势^[29]。水平分异源于历史差异和处置方式,如污灌历史、距灌渠远近等对污灌农田土壤重金属空间分布呈决定性作用^[16],一般可采用半方差函数模型、克里格最优插值法开展模拟^[30]。上海城郊土壤中 Cr、Mn 呈岛状,Cu、Pb、Zn 呈多岛或带状分布,证实了工业和交通是上海城郊土壤重金属空间水平分异的决定因素^[31]。此外,土壤环境中重金属的结合形态决定其活性及降解的难易程度。一般采用 Tessier 连续提取法和 BCR 连续提取法区分,Tessier 连续提取法将土壤环境中重金属划分为 5 种结合形态^[32],BCR 连续提取法将土壤环境中重金属划分为 4 种结合形态^[33]。例如,对淮南煤矿复垦区土壤重金属采用 Tessier 连续提取法分析表明,Zn、Ni 和 Cr 主要呈残渣态,而 Mn 和 Pb 则主要以铁锰氧化态存在^[34];而采用 BCR 连续提取法对工业污泥分析显示大部分重金属呈可氧化态^[35]。

3.2 土壤重金属污染评价

污染评价是当前研究的活跃领域,涉及评价方法与阈值。经过多年的实践应用,已形成了一系列经典的评价方法,如单因子指数评价法^[36]、内梅罗综合污染指数法^[37]、几何均值风险指数^[38]、污染负荷指数法^[39]、地积累指数法^[40]、富集指数法^[41]、Hankanson 潜在生态危害指数法^[42]。但受重金属污染的复杂性以及评价的人为判断影响,传统的方法已不能满足实际需求,近几年模糊数学法^[43]、灰色聚类法^[44]、基于 GIS 的地统计学评价法^[45]、健康风险评估法^[46]、环境风险指数法^[47]、人工神经网络评价^[48]以及支持向量机(SVM)^[49]等方法被成功移植到土壤重金属污染评价中,评价研究已从单一评价向综合或系统评价过渡,从污染程度向环境风险-人类健康风险转变,

推动了污染评价的发展。如葛康等^[50]采用基于集对分析与三角模糊数耦合评价模型评估土壤重金属污染,其过程直观、计算简便、结果客观合理;符娟林等^[51]利用 GIS 技术研究发现土壤重金属污染具有显著的空间分异特征;李静等^[52]研究铅锌矿区土壤重金属污染时发现 Pb 对儿童的健康风险更高,大约是成人的 3 倍;李晓婷等^[49]对比了内梅罗综合污染指数、Hakanson 指数和 SVM 3 种方法,认为 SVM 有较为严格的数学基础,泛化能力较好,具体实现过程简单,降低了人的主观判断对于结果的影响,评价结果更加符合实际情况。但是,由于土壤重金属污染状况的整体性加剧,污染评价结果往往较高。这是由于我国目前标准的制定主要参照美国 and 欧盟的相关标准指数,未考虑到我国的具体生产力水平。随着对重金属污染评价的认识深入,强化环境标准,确立以保障人体健康的核心地位的重金属环境标准迫在眉睫^[53]。

3.3 土壤重金属污染修复

随“土十条”的贯彻执行,重金属污染修复已成为土壤修复的重中之重^[54]。目前主要修复技术可归纳入物理修复、化学修复、生物修复、农艺修复 4 方面。

1)物理修复,包含排土、换土、去表土、客土和深耕翻土等工程措施修复,热处理及玻璃化修复技术。如李荣华等^[55]采用原位挖掘-异位固化-客土回填法等工程措施修复陕西某关闭冶炼厂周边污染土壤,效果良好;Navarro 等^[56]利用太阳能热解处理土壤 Hg 污染,低中温对 Hg 的去除率分别为 4.5%~76%和 41.3%~87%。Wei 等^[57]在 300~900 °C 不同条件下研究 Cu 在矿物上的热固定机理,将 Cu(OH)₂ 转化为可溶性差、不易被洗脱的 CuO 并固定在矿物表面,从而降低其环境风险。

2)化学修复,包含电动修复、电磁修复、化学改良剂修复、重金属螯合剂修复、表面活性剂修复以及重金属拮抗剂修复技术。如张丽洁等^[58]利用糠醛渣、磷矿粉、风化煤 3 种添加剂降低了土壤有效态重金属的含量;陈杰等^[59]利用磷酸二氢钾、碳酸钙、硅酸钠、自制草木灰和自制生物质炭 5 种钝化剂修复 Cu 污染土壤,土壤中大量交换态 Cu 被转化为残渣态;Karim 和 Khan^[60]采用电动和水动结合方法修复重金属污染,100 h 后土壤中约 97% 的重金属被成功去除。

3)生物修复,包含植物修复、微生物修复和动物修复技术。植物修复技术应用最为广泛^[61],主要体现在 3 方面。第一,利用植物根系分泌物改变土壤根

际环境,促成 Cr、Hg、As 价态和结合形态变化,从而降低重金属的移动性和生物毒性^[62]。第二,利用植物吸收易气化金属 Hg 和 Se 等并化为气态物质,释放到大气中,修复重金属污染土壤^[63]。研究表明,拟南芥可以将有机汞和无机汞盐转化为气态单质汞^[64],杨麻可将土壤中 3 价硒转化为低毒的甲基硒挥发降解^[65]。第三,利用植物对重金属超富集,实现土壤中重金属提取。如海州香薷对 Cu^[66-67]、东南景天对 Cd/Zn^[68-69]、蜈蚣草对 As^[70-71]、商陆对 Mn^[72-73]、印度芥菜对 Pb^[74]的超富集。微生物修复是利用微生物积累、吸附和转化作用^[75]。其中,细菌、真菌和藻类等均能吸附一定量的重金属离子^[76]。但土壤微生物群落复杂,大田环境对菌株存活和变异严重限制了特异菌株的降解效能^[77]。动物修复技术是利用土壤动物群直接吸收、转化和分解或间接改善土壤理化性来促进植物或微生物生长从而修复土壤重金属污染^[78],这方面对蚯蚓关注最多,蚯蚓对 Cd^[79]、Pb^[80]具有极强的富集能力,能够有效改善土壤环境^[81]。

4)农艺修复,指的是通过控制土壤水分,调节土壤 Eh 值,化肥、有机肥和农药的合理施用^[82],改变耕作制度和调整作物种类等措施^[83]来改善污染的土壤环境。田间实验表明,不同农艺管理措施不仅对土壤质地、结构、肥力有着重要的影响,而且对植物的生长、发育状况,农产品可食部位的产量和品质的提高,以及土壤重金属在作物体内的吸收、累积均有着重要的影响^[84]。

总体而言,当前修复技术的侧重各有不同。物理、化学修复往往用于场地修复,多为异位修复,对大面积轻度污染的农田土壤修复并不具备优势。生物修复是原位修复的最佳途径,但超富集植物或特异菌株的筛选是一个重大挑战,转基因技术或许是一条切实可行的有效途径^[85]。农艺修复虽然二次污染小,并且可以通过控制水分、改变种植品种等农艺措施来降低土壤和作物可食部位的重金属含量,但在谷壳和米糠中重金属仍严重超标^[86]。总体来看,单一修复往往受技术特点所限,效果不佳。因此,联合修复技术已经成为土壤重金属污染修复的研究前沿^[78, 87-89]。值得注意的是,联合修复不单单是修复技术的联合应用,更有对复合污染的联合降解。

4 结论与展望

本文通过建立土壤重金属研究共现关系聚类图谱,以可视化手段分析了近年来国内外土壤重金属研

究的主要国家、组织、学科、机构以及作者的分布和合作情况,并构建了其研究的关键主题框架。知识图谱分析表明,土壤重金属问题引起了各国学者的普遍关注,合作研究的国际化趋势越来越明显,多学科多技术综合化态势也逐渐形成;我国也已经成为国际上土壤重金属研究最重要的科研力量之一。并且,对土壤重金属研究的关键主题述评发现,土壤重金属研究的内涵不断扩展,从对重金属在土壤环境中的源解析和分布特征研究到对重金属污染土壤的评价,再发展到重金属污染的修复技术,研究脉络清晰,时代特征明显。土壤重金属研究的一系列成果为土壤修复工作开展提供了理论支撑与实践指导。

今后土壤重金属的研究应从以下几个方面考虑:积极开展国际合作与技术交流,开展跨区域跨国界的研究,努力构建全球土壤重金属污染识别图;鼓励环境科学、农学、化学、地质学、材料学和工程技术等不同学科学者联合开发新型土壤重金属污染快速检测及绿色降解技术,并借鉴各学科方法完善污染修复后评价体系;从分子层面,深入挖掘土壤重金属污染的主控环境驱动要素,探究其与酶活性、特征微生物的相互作用机理;积极开发重金属污染土壤联合修复技术,继续寻找、筛选培育优良的超富集植物,并结合应用分子生物学技术和基因工程技术,从室内研究到大田实验,提高修复效率并降低成本。

参考文献:

- [1] Rajkumar M, Prasad M N V, Freitas H, et al. Biotechnological applications of serpentine bacteria for phytoremediation of trace metals[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2009, 29(2): 120-130
- [2] Cai Q, Long M L, Zhu M, et al. Food chain transfer of cadmium and lead to cattle in a lead-zinc smelter in Guizhou, China[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(11): 3078-3082
- [3] Ferreira-Baptista L, Miguel E D. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropical urban environment[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(25): 4501-4512
- [4] Wenzel W W, Unterbrunner R, Sommer P, et al. Chelate-assisted phytoextraction using canola (*Brassica napus* L.) in outdoors pot and lysimeter experiments[J]. Plant and Soil, 2003, 249(1): 83-96
- [5] Harada M. Minamata disease: Methylmercury poisoning in Japan caused by environmental pollution[J]. Critical Reviews in Toxicology, 1995, 25(1): 1-24
- [6] Mercadante S. Malignant bone pain: Pathophysiology and treatment[J]. Pain, 1997, 69(1): 1-18

- [7] Takijima Y, Katsumi F. Cadmium contamination of soils and rice plants caused by zinc mining[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1973, 19(1): 29–38
- [8] Chen C. CiteSpace: A practical guide for mapping scientific literature[M]. New York: Nova Science Publishers, 2016
- [9] 李杰, 陈超美. Citespace: 科技文本挖掘及可视化[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2016
- [10] 张红侠, 高利峰, 李睿康. 基于文献计量的国内土壤重金属污染研究[J]. *现代农业科技*, 2013(16): 346–347, 349
- [11] 赵庆龄. 基于文献计量的土壤重金属污染国际比较研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010
- [12] Liu S, Chen C, Ding K, et al. Literature retrieval based on citation context[J]. *Scientometrics*, 2014, 101(2): 1293–1307
- [13] 张长波, 骆永明, 吴龙华. 土壤污染物源解析方法及其应用研究进展[J]. *土壤*, 2007, 39(2): 190–195
- [14] 司徒高华, 王飞儿, 何云峰, 等. 燃煤电厂周边土壤中汞的分布和累积研究进展[J]. *土壤*, 2016, 48(3): 419–428
- [15] 方凤满, 杨丁, 汪琳琳, 等. 芜湖燃煤电厂周边土壤中砷汞的分布特征研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 109–113
- [16] Liu W, Zhao J, Ouyang Z, et al. Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China[J]. *Environment International*, 2005, 31(6): 805–812
- [17] 韩晋仙, 马建华, 魏林衡. 污灌对潮土重金属含量及分布的影响——以开封市化肥河污灌区为例[J]. *土壤*, 2006, 38(3): 292–297
- [18] 张乃明, 陈建军, 常晓冰. 污灌区土壤重金属累积影响因素研究[J]. *土壤*, 2002, 34(2): 90–93
- [19] Fuentes A, Lloréns M, Sáez J, et al. Simple and sequential extractions of heavy metals from different sewage sludges[J]. *Chemosphere*, 2004, 54(8): 1039–1047
- [20] 乔显亮, 骆永明, 吴胜春. 污泥的土地利用及其环境影响[J]. *土壤*, 2000, 32(2): 79–85
- [21] Huang S S, Liao Q L, Hua M, et al. Survey of heavy metal pollution and assessment of agricultural soil in Yangzhong district, Jiangsu Province, China[J]. *Chemosphere*, 2007, 67(11): 2148–2155
- [22] 谭长银, 吴龙华, 骆永明, 等. 不同肥料长期施用下稻田镉、铅、铜、锌元素总量及有效态的变化[J]. *土壤学报*, 2009, 46(3): 412–418
- [23] Li F, Yuan J, Sheng G D. Altered transfer of heavy metals from soil to Chinese cabbage with film mulching[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 77: 1–6
- [24] Ogundiran O O, Afolabi T A. Assessment of the physicochemical parameters and heavy metals toxicity of leachates from municipal solid waste open dumpsite[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2008, 5(2): 243–250
- [25] Li X, Poon C S, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(11): 1361–1368
- [26] 卢德亮, 乔璐, 陈立新, 等. 哈尔滨市市区绿地土壤重金属污染特征及植物富集[J]. *林业科学*, 2012, 48(8): 16–24
- [27] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(2): 692–703
- [28] Li Z, Ma Z, van der Kuijp T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468: 843–853
- [29] 马智宏, 王纪华, 陆安祥, 等. 京郊不同剖面土壤重金属的分布与迁移[J]. *河北农业大学学报*, 2007, 30(6): 11–15
- [30] 张长波, 李志博, 姚春霞, 等. 污染场地土壤重金属含量的空间变异特征及其污染源识别指示意义[J]. *土壤*, 2006, 38(5): 525–533
- [31] 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(2): 599–605
- [32] 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
- [33] Nemati K, Bakar N K A, Abas M R, et al. Speciation of heavy metals by modified BCR sequential extraction procedure in different depths of sediments from Sungai Buloh, Selangor, Malaysia[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 192(1): 402–410
- [34] 江培龙, 方凤满, 张杰琼, 等. 淮南煤矿复垦区土壤重金属形态分布及污染评价[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(5): 178–182
- [35] 马利民, 陈玲, 吕彦, 等. 污泥土地利用对土壤中重金属形态的影响[J]. *生态环境*, 2004, 13(2): 151–153
- [36] Li W, Zhang X, Wu B, et al. A comparative analysis of environmental quality assessment methods for heavy metal-contaminated soils[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(3): 344–352
- [37] Esmaeili A, Moore F, Keshavarzi B, et al. A geochemical survey of heavy metals in agricultural and background soils of the Isfahan industrial zone, Iran[J]. *Catena*, 2014, 121: 88–98
- [38] Sun Y, Zhou Q, Xie X, et al. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1/2/3): 455–462
- [39] 骆占斌, 陈浮, 张旺园, 等. 再生铅厂土壤重金属污染及健康风险评价[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(4): 197–204
- [40] 史贵涛, 陈振楼, 许世远, 等. 上海市区公园表层土壤铅含量及其污染评价[J]. *土壤*, 2006, 38(3): 287–291
- [41] 刘敬勇, 常向阳, 涂湘林, 等. 富集指数法在硫酸冶炼堆渣场周围土壤铊污染评价中的应用[J]. *土壤*, 2008, 40(6): 939–944
- [42] 岳荣, 史锐, 张红. 土壤中重金属累积特征及生态风险评价——以乌拉特后旗有色金属冶炼企业集中区为例[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 314–321
- [43] 翟航, 卢文喜, 杨威, 等. 模糊数学和污染指数法在土壤重金属污染中的应用[J]. *土壤*, 2008, 40(2): 212–215

- [44] 张松滨, 宋静. 土壤重金属污染的灰色模糊评价[J]. 干旱环境监测, 2002, 16(1): 31–33
- [45] 夏敏, 赵炳梓, 张佳宝. 基于 GIS 的黄淮海平原典型潮土区土壤重金属积累研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 684–692
- [46] 杨敏, 滕应, 任文杰, 等. 石门雄黄矿周边农田土壤重金属污染及健康风险评估[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1172–1178
- [47] Rapant S, Kordik J. An environmental risk assessment map of the Slovak Republic: Application of data from geochemical atlases[J]. Environmental Geology, 2003, 44(4): 400–407
- [48] 杨娟, 王昌全, 李冰, 等. 基于 BP 神经网络的城市边缘带土壤重金属污染预测——以成都平原土壤 Cd 为例[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 430–436
- [49] Liu Y, Wang H, Zhang H, et al. A comprehensive support vector machine-based classification model for soil quality assessment[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 19–26
- [50] 葛康, 汪明武, 陈光怡. 基于集对分析与三角模糊数耦合的土壤重金属污染评价模型[J]. 土壤, 2011, 43(2): 216–220
- [51] 符娟林, 章明奎, 厉仁安. 基于 GIS 的杭州市居民区土壤重金属污染现状及空间分异研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 575–578
- [52] 李静, 俞天明, 周洁, 等. 铅锌矿区及周边土壤铅、锌、镉、铜的污染健康风险评估[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2327–2330
- [53] 狄一安, 杨勇杰, 肖臣, 等. 我国重金属环境标准发展对策[J]. 环境与可持续发展, 2013, 38(6): 34–37
- [54] 骆永明, 滕应, 过园. 土壤修复——新兴的土壤科学分支学科[J]. 土壤, 2005, 37(3): 230–235
- [55] 李荣华, 冯静, 李晓龙, 等. 陕西某关闭冶炼厂土壤重金属污染评价与工程修复[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 223–228
- [56] Navarro A, Cañadas I, Martinez D, et al. Application of solar thermal desorption to remediation of mercury-contaminated soils[J]. Solar Energy, 2009, 83(8): 1405–1414
- [57] Wei Y L, Yang Y W, Cheng N. Study of thermally immobilized Cu in analogue minerals of contaminated soils[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(2): 416–421
- [58] 张丽洁, 张瑜, 刘德辉. 土壤重金属复合污染的化学固定修复研究[J]. 土壤, 2009, 41(3): 420–424
- [59] 陈杰, 宋靖珂, 张晶, 等. 不同钝化剂对铜污染土壤原位钝化修复[J]. 土壤, 2016, 48(4): 742–747
- [60] Karim M A, Khan L I. Removal of heavy metals from sandy soil using CEHIXM process[J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, 81(1): 83–102
- [61] Ali H, Khan E, Sajad M A. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications[J]. Chemosphere, 2013, 91(7): 869–881
- [62] Wu G, Kang H, Zhang X, et al. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: Issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174(1): 1–8
- [63] 翁添富, 高建培, 易锋, 等. 土壤重金属污染生物修复技术研究进展[J]. 科技导报, 2009, 27(4): 93–97
- [64] Meagher R B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2000, 3(2): 153–162
- [65] Bañuelos G S, Ajwa H A, Mackey B, et al. Evaluation of different plant species used for phytoremediation of high soil selenium[J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26(3): 639–646
- [66] Li M, Xiong Z, Liu H, et al. Copper-induced alteration in sucrose partitioning and its relationship to the root growth of two *Elsholtzia haichowensis* Sun populations[J]. International Journal of Phytoremediation, 2016, 18(10): 966–976
- [67] 唐明灯, 胡锋, 吴龙华, 等. 香薷属植物在重金属修复中的应用进展[J]. 土壤, 2008, 40(5): 698–705
- [68] Yu P, Yuan J, Zhang H, et al. Engineering metal-binding sites of bacterial CusF to enhance Zn/Cd accumulation and resistance by subcellular targeting[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 302: 275–285
- [69] 毕德, 吴龙华, 骆永明, 等. 浙江典型铅锌矿废弃地优势植物调查及其重金属含量研究[J]. 土壤, 2006, 38(5): 591–597
- [70] Trotta A, Falaschi P, Cornara L, et al. Arbuscular mycorrhizae increase the arsenic translocation factor in the As hyperaccumulating fern *Pteris vittata* L. [J]. Chemosphere, 2006, 65(1): 74–81
- [71] 潘志明, 邓天龙. 砷污染土壤的蜈蚣草修复研究进展[J]. 土壤, 2007, 39(3): 341–346
- [72] Liu P, Tang X, Gong C, et al. Manganese tolerance and accumulation in six Mn hyperaccumulators or accumulators[J]. Plant and Soil, 2010, 335(1/2): 385–395
- [73] 薛生国, 陈英旭, 骆永明, 等. 商陆(*Phytolacca acinosa* Roxb.)的锰耐性和超积累[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 889–895
- [74] Blaylock M J, Salt D E, Dushenkov S, et al. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents[J]. Environmental Science and Technology, 1997, 31(3): 860–865
- [75] 滕应, 骆永明, 李振高. 污染土壤的微生物修复原理与技术进展[J]. 土壤, 2007, 39(4): 497–502
- [76] 薛高尚, 胡丽娟, 田云, 等. 微生物修复技术在重金属污染治理中的研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(11): 266–271
- [77] 钱春香, 王明明, 许燕波. 土壤重金属污染现状及微生物修复技术研究进展[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(3): 669–674
- [78] Yao Z, Li J, Xie H, et al. Review on remediation technologies of soil contaminated by heavy metals[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 16: 722–729
- [79] Yu X, Cheng J, Wong M H. Earthworm-mycorrhiza interaction on Cd uptake and growth of ryegrass[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(2): 195–201

- [80] Dai J, Becquer T, Rouiller J H, et al. Heavy metal accumulation by two earthworm species and its relationship to total and DTPA-extractable metals in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(1): 91–98
- [81] Chan K Y. An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity—implications for functioning in soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 57(4): 179–191
- [82] Puschenreiter M, Horak O, Friesl W, et al. Low-cost agricultural measures to reduce heavy metal transfer into the food chain—a review[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2005, 51(1): 1–11
- [83] Tang Y, Deng T, Wu Q, et al. Designing cropping systems for metal-contaminated sites: A review[J]. *Pedosphere*, 2012, 22(4): 470–488
- [84] 蒋玉根. 农艺措施对降低污染土壤重金属活性的影响[J]. *土壤*, 2002, 34(3): 145–148
- [85] 李长阁, 于涛, 傅桦, 等. 转基因植物修复重金属污染土壤研究进展[J]. *土壤*, 2007, 39(2): 181–189
- [86] 蒋玉根. 农艺措施对降低污染土壤重金属活性的影响[J]. *土壤*, 2002, 34(3): 145–148
- [87] 孙婷婷, 徐磊, 周静, 等. 羟基磷灰石-植物联合修复对 Cu/Cd 污染植物根际土壤微生物群落的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(5): 946–953
- [88] Paz-Ferreiro J, Lu H, Fu S, et al. Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: A review[J]. *Solid Earth*, 2014, 5(1): 65–75
- [89] 周静, 崔红标, 梁家妮, 等. 重金属污染土壤修复技术的选择和面临的问题——以江铜贵冶九牛岗土壤修复示范工程项目为例[J]. *土壤*, 2015, 47(2): 283–288

Knowledge Map Analysis and Key Themes of Research on Soil Heavy Metals in Recent Years

LUO Zhanbin¹, MA Jing², YANG Yongjun¹, ZHANG Shaoliang¹, CHEN Fu^{1,2*}

(1 *School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China*; 2 *Low Carbon Energy Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China*)

Abstract: Soil heavy metal pollution has always been the hotspot and frontier of environmental science. In order to understand the key topics and frontier dynamics of international and domestic research on soil heavy metal pollution, we collect the data from Web of Science and CNKI. Dividing the domestic and international research perspectives by CiteSpace which is a platform designed for clustering analysis. Focused on the authors, the research hotspots, the status quo and hotspots of the research field, and then constructed the research hotspot framework. The results showed that the research trend in soil heavy metals is internationalization. Interestingly, the most core research institutions and scholars are in China, and most of the correlation studies are focused on source/distribution, pollution evaluation, and restoration. Moreover, those studies could be assigned to Ecological environment science, Agriculture, Engineering, Chemistry, Geology, Toxicology and Botany. Furthermore, the study of soil heavy metals will be still in the trend of internationalization, multidisciplinary integration and multi-technology synergetic development in the future.

Key words: Soil quality; Heavy metal pollution; Knowledge map; Visualization research