

DOI: 10.11766/trxb202207270413

胡鹏杰, 杜彦锫, 夏冰, 仇浩, 吴龙华, 骆永明. 基于 Web of Science 对土壤胶体影响重金属行为研究的计量分析[J]. 土壤学报, 2024, 61 (2): 445–455.

HU Pengjie, DU Yanpei, XIA Bing, QIU Hao, WU Longhua, LUO Yongming. Bibliometric Analysis of Research on Soil Colloids Affecting the Behavior of Heavy Metals Based on Web of Science [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61 (2): 445–455.

基于 Web of Science 对土壤胶体影响重金属行为研究的 计量分析^{*}

胡鹏杰¹, 杜彦锫^{1, 2}, 夏冰³, 仇浩⁴, 吴龙华^{1†}, 骆永明¹

(1. 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 安徽省生态环境科学研究院, 合肥 230071; 4. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240)

摘要: 为全面了解土壤胶体影响重金属行为方向的研究现状和前沿动态, 基于 Web of Science (WoS) 核心合集数据库, 利用 WoS 自带分析工具、HistCite 引文图谱分析软件、VOSviewer 和 Citespace 可视化分析软件对 1990—2021 年间土壤胶体影响重金属行为的文献进行了计量分析。结果表明, 在世界范围内该方向的发文量逐年稳步增长, 我国相关研究起步较晚, 但近些年呈现迅猛发展的势头。目前土壤胶体影响重金属行为研究发文量最多的国家和研究机构分别是美国和中国科学院, 发文量最高的期刊为 *Environmental Science & Technology*, 主要研究学科为环境科学与生态学的交叉学科。关键词聚类分析显示“土壤胶体颗粒粒径分级与重金属的形态分布”、“土壤胶体的释放、沉积及对重金属的吸附作用”和“土壤胶体颗粒的迁移机制与迁移模型研究”为主要的研究主题, 人工纳米颗粒在土壤中的行为、迁移转化以及生物有效性是现阶段的研究热点。利用场流分离技术结合单粒子电感耦合等离子体质谱等技术, 探讨土壤胶体与人工纳米颗粒之间发生的复杂相互作用及其对人工纳米颗粒迁移归趋与环境命运的影响, 是未来的主要研究方向。

关键词: 土壤胶体; 重金属; Web of Science; 文献计量分析

中图分类号: X53 文献标志码: A

Bibliometric Analysis of Research on Soil Colloids Affecting the Behavior of Heavy Metals Based on Web of Science

HU Pengjie¹, DU Yanpei^{1, 2}, XIA Bing³, QIU Hao⁴, WU Longhua^{1†}, LUO Yongming¹

(1. CAS Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Anhui Academy of Eco-Environmental Science Research, Hefei 230071, China; 4. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

* 国家自然科学基金项目(41977135, U2002210)和安徽省自然科学基金项目(200805MD107)共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41977135 and U2002210) and the Natural Science Foundation of Anhui Province, China (No.200805MD107)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lhwu@issas.ac.cn

作者简介: 胡鹏杰(1983—), 男, 山西交城人, 博士, 副研究员, 从事土壤重金属污染界面过程与治理修复研究。E-mail: pjhu@issas.ac.cn

收稿日期: 2022-07-27; 收到修改稿日期: 2022-11-30; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-01-19

Abstract: 【Objective】With the rapid development of industrialization and urbanization, heavy metal pollution in soil has attracted worldwide attention. Natural soil colloids, as well as engineered nanoparticles introduced into soil by direct or indirect pathways, play an important role in the migration and bioavailability of heavy metals. However, there is a lack of research on the current status and frontier trends of soil colloids' effect on the behavior of heavy metals. 【Method】Based on the Web of Science (WoS) core collection database, a bibliometric study on the effect of soil colloids on the behavior of heavy metals during 1990—2021 was carried out using analysis tools self-provided by WoS, HisCite citation analysis software, VOSviewer and Citespace visual analysis software. 【Result】Results indicated that the number of publications increased steadily year by year worldwide, with an average increase of two publications per year. The research in this field started late in China but it showed a momentum of rapid development in recent years which may be due to a series of important measures for soil pollution control implemented in China. The countries and research institutions with the most publications in this field were the United States and the Chinese Academy of Sciences, respectively. *Environmental Science & Technology* was the most published journal. The major subjects involved in this field were the intersection of environmental sciences and ecology. The results of keywords cluster analysis indicated that “particle size fractionation and heavy metal speciation distribution of soil colloids”, “release, deposition of soil colloids and adsorption of heavy metals” and “migration mechanism and migration model of soil colloids” were the dominating research topics. Also, the first dominating research topic tended to describe the state of distribution and morphology of heavy metals in soil with different particle sizes. Furthermore, the second and third dominating research topics tended to focus on the dynamic process of release, migration and deposition of soil colloids, the binding effect of soil colloids on heavy metals and their cooperative transport behavior. The current research hotspot involves the study of the behavior, migration, transformation and bioavailability of engineered nanoparticles in soil using advanced characterization techniques such as field flow-fractionation technology. 【Conclusion】These results provide important insights into the research direction, growing trend and research hotspots in the field of soil colloids affecting the behavior of heavy metals. In the future, it should be prioritized that the application of field-flow fractionation technology combined with single particle inductively coupled plasma mass spectrometry or other technologies to further study the complex interaction between soil colloids and engineering nanoparticles. Also, the influence on the migration and environmental fate of engineered nanoparticles is expected to be a future research direction.

Key words: Soil colloids; Heavy metals; Web of Science; Bibliometric analysis

随着工业化和城市化的迅猛发展，土壤重金属污染问题广为关注^[1]。2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》^[2]显示，我国土壤污染问题突出，以重金属为代表的无机污染物超标点位数占全部超标点位的82.8%，工业与农业生产和交通运输等是土壤重金属的主要来源^[3-4]。重金属在进入土壤后会发生迁移和转化，在优势流的作用下进入地下水或被植物吸收，最终危害人体健康。胶体作为土壤最活跃的部分^[5]，具有较大的比表面积以及较高的黏土矿物、金属氧化物和有机物含量，其对重金属具有较高的吸附容量和吸附能力，因而对重金属的迁移和生物有效性产生重要作用。

本文使用的“土壤胶体”一词为较宽泛概念，包括粒径介于1 nm至1 μm（或2 μm）的土壤黏粒以及由于人为原因进入土壤的人工纳米颗粒^[5]。一

方面，在优势流、大孔隙或裂缝的存在下，由于尺寸排阻效应的存在，土壤胶体可能会加速重金属的迁移^[6]；另一方面，土壤胶体通过吸附固定改变重金属的形态、价态，或与重金属发生络合作用形成络合物，进一步影响重金属的生物有效性。除天然土壤胶体外，人工纳米颗粒伴随着工程纳米材料的广泛应用大量进入土壤，成为土壤胶体的重要组成部分。土壤胶体/纳米颗粒由于具有表面能量过剩和热力学不稳定性等纳米级特殊性质，会增强其溶解性、氧化还原反应和活性氧自由基的生成^[7]，其在土壤中可能引发的潜在不良环境影响引起了广泛关注。在实际土壤环境中，人工纳米颗粒会与天然土壤胶体结合，影响其释放、迁移以及生物有效性。目前有关土壤胶体影响重金属行为的研究日益增多，但缺少对该方向研究现状及未来发展趋势的系

统梳理。

文献计量分析是基于历史出版物信息数据评价某领域发展现状并预测和识别未来研究趋势与热点的数学统计方法,以其客观定量分析的优点而被广泛应用^[8-9]。为明确土壤胶体影响重金属行为方向的研究布局和进展,本文通过文献计量分析方法,借助Web of Science(WoS)自带分析工具、HistCite引文图谱分析软件、VOSviewer和Citespace可视化分析软件,对WoS核心合集数据库1990—2021年土壤胶体影响重金属行为方向相关文献的发文量与年度变化趋势、主要研究力量、主要发文期刊、主要研究学科、研究热点和研究前沿等进行了分析,为该方向未来的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文数据来自科睿唯安(Clarivate Analytics)旗下的Web of Science(WoS)核心合集数据库。WoS核心数据库是用于追踪高质量研究的最具权威性的数据库,广泛应用于自然科学、工程技术、社会科学、艺术与人文等领域。采用高级检索,主题检索词为: TS=((soil*) AND (soil colloids*)) AND ("heavy metal*" OR Pb OR Cd OR Cu OR As OR Cr OR Hg)),时间跨度为1990—2021,所选文献类型为研究论文(Article)和综述(Review),检索时间为2022年4月20日。共检索出1 251篇文献,导入Histcite软件的文献1 251篇,涉及3 884位作者,297种期刊,43 269篇参考文献。

1.2 研究方法

利用WoS数据库自带的分析工具、Histcite引文分析软件、VOSviewer和Citespace文献可视化分析软件、Excel 2019和Origin 2021软件等对土壤胶体影响重金属行为研究方向的发文量与年度变化趋势、主要研究力量、主要发文期刊、主要研究学科、研究热点和研究前沿等进行文献计量分析。Histcite运用过程中的重要参数有:本地引用频次(Local citation score, LCS),用于表征文章在所研究领域的重要程度,LCS越高则说明该篇文章在该研究领域的影响力越高;文章总被引频次(Global citation score, GCS),表征文章在全世界广泛学术

领域的被关注程度;本地总被引频次(Total local citation score, TLCS)和总被引频次(Total global citation score, TGCS)则用于描述不同分类下所包含文章的LCS和GCS的总和。VOSviewer文献可视化分析软件用于绘制关键词共现网络,反映该领域的研究热点和方向。Citespace用于国家合作、学科共现以及研究热点的科学图谱绘制分析。本文使用的Citespace参数为中心性(Centrality),即体现某个节点在整个体系中的重要程度,中心性越强,重要性越高。

2 结果与讨论

2.1 发文量与年度变化趋势

发文量可一定程度上反映某一学术领域或方向的发展速度和发展程度。由1990—2021年土壤胶体影响重金属行为方向年度发文量(图1)可以看出,全球发文量虽在相邻年份间存在波动但整体呈现增长趋势,平均增长速率约为每年2篇,发文量于2021年达到81篇;与世界相比,我国在该方向的研究起步较晚,1990—2002年相关研究发文量基本处于空白阶段,2002—2010年开始缓慢增长但始终保持在较低水平,自2010年起,特别是2018年以来呈现明显的上升趋势。这与我国近些年来对土壤环境保护和土壤污染治理所推行的一系列重要举措有关:2014年生态环境部联合自然资源部发布《全国土壤

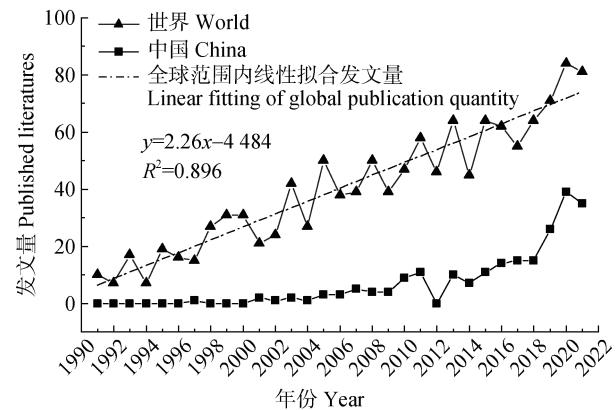


图1 1990—2021年土壤胶体影响重金属行为方向年度发文量及全球范围发文量增长模型

Fig. 1 Quantity of publications and publication growth model around the world on soil colloids affecting the behavior of heavy metals during 1990—2021

污染状况调查公报》，引起公众对土壤污染问题重视；2016年国务院《土壤污染防治行动计划》^[10]（简称“土十条”）的出台为我国土壤污染防治提出要求并指明方向；2019年《中华人民共和国土壤污染防治法》^[11]正式施行。在土壤重金属污染防治过程中，降低土壤重金属迁移性和生物有效性是研究重点，而土壤胶体在重金属迁移转化过程中扮演了重要角色。一方面，不可移动的黏土胶体通过强烈吸附重金属进而延缓重金属的运输，降低重金属的生物有效性^[12]；另一方面，由于尺寸排阻效应，土壤胶体会促进重金属的迁移^[6]。理清土壤胶体与重金属相互作用的机理可为我国土壤重金属污染防治工作提供科学指导。

2.2 主要研究力量

2.2.1 发文国家分析 在特定研究领域的发文数量一定程度上可反映一个国家在该领域的学术影响力和科研实力，发文量随时间的变化可反映一个国家对该领域的关注程度。表1展示的是土壤胶体影响重金属行为方向发文量前十国家的发文量和被引频次。1990—2021年，美国发表了354篇文章，且本地总被引频次最多（984次），显示出美国在该方向所占据的主导地位；我国发文量位居世界第二，显示出我国研究者对该方向较高的关注程度，但我国的篇均本地总被引频次（1.18）与美国等欧美国家差距较大，且低于世界平均水平（该方向世界篇均本地总被引频次为2.25），这反映出我国虽然在土壤胶体影响重金属行为研究方向发文量方面存在一定的竞争力，但面临着“大而不强”的问题，今后还有很长的路要走。

利用Citespace对土壤胶体影响重金属行为方向重要发文国家之间的相互合作关系图谱进行了绘制（图2）。国家之间的连线代表该方向国家合作程度。由图2可知，不同国家之间呈现出复杂深入的合作关系，体现了该方向研究国际化的特点。美国中心灰色圈层最大，说明美国在该方向起步最早。美国是最早进行土壤污染防治立法的国家，其早在20世纪30年代和80年代就分别出台了《土壤保护法》和《超级基金法》，为土壤污染的防控治理提供了法律依据，促进了土壤胶体影响重金属方向的研究发展。我国中心灰色圈层占比较小，体现出我国在该方向发展起步较晚，发表的文章大多集中在近10年。我国于2019年正式施行了《中华人

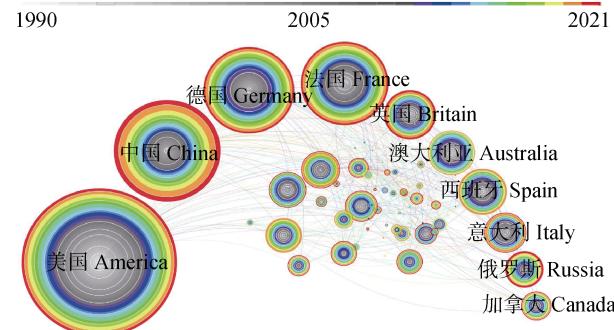
共和国土壤污染防治法》^[11]，在国家的大力支持下，土壤胶体影响重金属行为方向研究有望得到新的突破。

表1 1990—2021年土壤胶体影响重金属行为方向发文量排名前10国家

Table 1 Top 10 countries of publications on soil colloids affecting the behavior of heavy metals during 1990—2021

国家 Country	发文量 Records	发文量 TLCS TLCSPR TGCS TGCSPR			
		TLCS	TLCSPR	TGCS	TGCSPR
美国 America	354	984	2.78	16 173	45.69
中国 China	218	257	1.18	3 784	17.36
德国 Germany	148	350	2.36	5 808	39.24
法国 France	131	437	3.34	4 295	32.79
英国 Britain	64	169	2.64	4 981	77.83
澳大利亚 Australia	60	153	2.55	4 625	77.08
西班牙 Spain	56	61	1.09	1 448	25.86
意大利 Italy	51	29	0.57	1 420	27.84
俄罗斯 Russia	49	129	2.63	1 030	21.02
加拿大 Canada	44	35	0.80	1 785	40.57
全部 All	1 251	2 816	2.25	47 322	37.83

注：TLCS：本地总被引频次；TLCSPR：篇均本地总被引频次；TGCS：总被引频次；TGCSPR：篇均总被引频次。下同。
Note: TLCS: Total local citation score; TLCSPR: Total local citation score per record; TGCS: Total global citation score; TGCSPR: Total global citation score per record. The same as below.



注：不同颜色代表不同年份，由1990年至2021年，颜色由灰色逐渐转向红色。不同颜色圆环的面积反映不同年份发文量的多少。下同。
Note: Different colors represent different years. From 1990 to 2021, the color gradually shifted from gray to red. The area of different colored rings reflects the number of published papers in different years. The same as below.

图2 1990—2021年土壤胶体影响重金属行为方向国家合作关系图谱

Fig. 2 National cooperation network map on soil colloids affecting the behavior of heavy metals during 1990—2021

2.2.2 重要研究机构分析 根据 Histcite 引文分析软件的结果, 土壤胶体影响重金属行为方向研究论文共涉及 1 266 家研究机构, 对发文量排名前 10 的研究机构进行分析(表 2), 可以看出, 我国有中国科学院、浙江大学和华中农业大学三家单位位列前 10 研究机构, 其中中国科学院共发表了 60 篇文章, 遥遥领先, 显示其在该方向较高的学术活跃度。在本地总被引频

次方面, 美国农业部农业研究所以 105 次位居第一, 中国科学院以 93 次位居第二, 显示出较强的学术影响力, 但在篇均总被引频次方面, 中国科学院 (1.55 次/篇) 远远落后于美国农业部农业研究所 (5.25 次/篇), 且低于该方向世界平均水平 (2.25 次/篇)。中国科学院作为我国科研机构的代表, 在提高学术论文质量方面仍与欧美国家研究机构有着一定差距。

表 2 1990—2021 年土壤胶体影响重金属行为方向发文量排名前 10 研究机构

Table 2 Top 10 institutes of publications on soil colloids affecting the behavior of heavy metals during 1990—2021

机构 Institution	发文量 Records	TLCS	TLCSPR	TGCS	TGCSPR
中国科学院 Chinese Academy of Sciences	60	93	1.55	1 386	23.10
俄罗斯科学院 Russian Academy of Sciences	27	57	2.11	489	18.11
浙江大学 Zhejiang University	25	61	2.44	396	15.84
西班牙高等科学研究委员会 Spanish Higher Council for Scientific Research	21	36	1.71	732	34.86
佛罗里达大学 University of Florida	20	76	3.80	676	33.80
美国农业部农业研究所 United States Department of Agriculture Agricultural Research Service	20	105	5.25	1 244	62.20
奥胡斯大学 Aarhus University	18	33	1.83	400	22.22
法国国家科学研究中心 French National Center for Scientific Research	17	68	4.00	870	51.18
华中农业大学 Huazhong Agricultural University	17	24	1.41	544	32.00
德国尤里希研究中心 Forschungszentrum Juelich	16	52	3.25	319	19.94
全部 all	1251	2816	2.25	47322	37.83

2.3 主要发文期刊

对研究领域发文期刊进行文献计量分析, 可有效帮助研究者确定该领域的核心期刊。影响因子 (influence factor, IF) 是用于期刊定量评价的重要指标, 期刊影响因子越高, 通常可以说明其整体学术水平越高。土壤胶体影响重金属行为方向共有 297 种期刊, 发文量排名前 10 的期刊如表 3 所示, 其中前三的期刊和对应影响因子 (2020 年) 为: *Environmental Science & Technology* (ES&T, 9.028)、*Science of the Total Environment* (7.963) 和 *Chemosphere* (7.086), 三者均为环境领域影响力较高的期刊。ES&T 作为环境领域知名度最高的期刊之一, 收录了土壤胶体影响重金属行为方向 73 篇文章, 其本地总被引频次和总被引频次均占据绝对优势, 证明其在该方向发挥了主导作用, 也反映了

土壤胶体影响重金属行为研究是环境领域的研究热点。

2.4 学科共现分析

利用 Citespace 对土壤胶体影响重金属行为方向发表的文章进行学科共现分析, 绘制了该方向主要学科共现分析图谱及前十学科的频率和中心性 (图 3)。该方向相关学科分布比较广泛, 以环境科学和生态学交叉学科为主 (生态环境科学和环境科学), 向其他学科延伸。化学和工程学外圈红色较大, 显示出较快的发展速度。各学科之间密集的连线表明土壤胶体影响重金属行为方向各学科呈现相互交融、联系紧密的特点。此外, 虽然化学和工程学发文量分居第 4、5 位, 但二者的中心性排名前二, 且远高于其他学科, 这表明化学和工程学发挥了其他学科之间相互联系的桥梁作用, 是该方向学科之间交融联系的重要枢纽。

表3 1990—2021年土壤胶体影响重金属行为方向发文量排名前10期刊

Table 3 Top 10 journals of publications on soil colloids affecting the behavior of heavy metals during 1990—2021

期刊名称 Journals	发文量 Records	TLCS	TGCS	影响因子(5年)		出版国 Country
				IF(5 Years)	IF(2020)	
<i>Environmental Science & Technology</i>	73	422	5 496	9.922	9.028	美国
<i>Science of the Total Environment</i>	58	87	1 286	7.842	7.963	荷兰
<i>Chemosphere</i>	50	57	1 424	6.956	7.086	英国
<i>Geochimica et Cosmochimica Acta</i>	41	171	2 048	5.497	5.010	美国
<i>Geoderma</i>	39	91	1 263	6.183	6.114	荷兰
<i>Colloids and Surfaces A:</i>	35	74	844	4.039	4.539	荷兰
<i>Physicochemical and Engineering Aspects</i>						
<i>Journal of Environmental Quality</i>	34	121	1 539	3.309	2.751	美国
<i>Chemical Geology</i>	27	105	1 078	4.426	4.015	荷兰
<i>Vadose Zone Journal</i>	27	118	1 169	3.426	3.289	美国
<i>Environmental Pollution</i>	25	61	611	8.350	8.071	英国

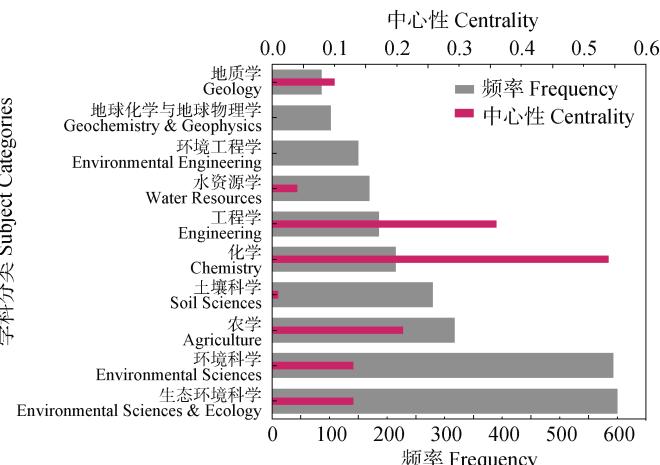
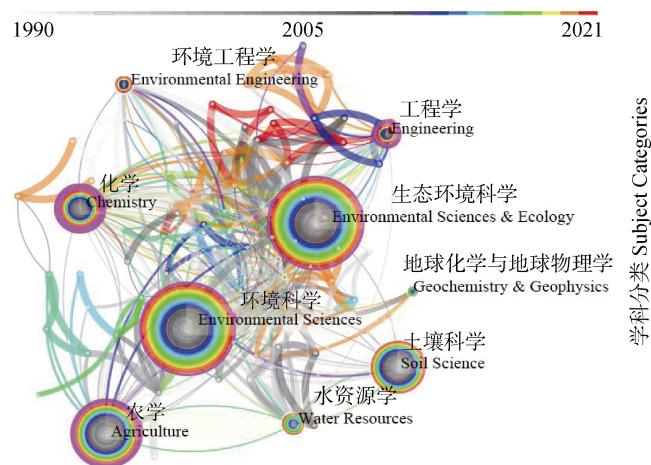


图3 1990—2021年土壤胶体影响重金属行为方向主要学科共现分析

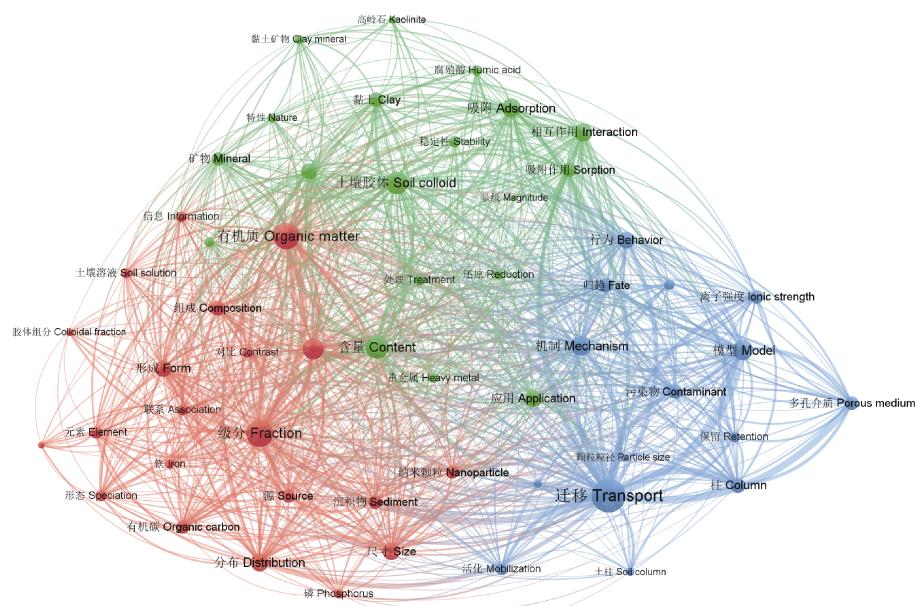
Fig. 3 Subject category network on soil colloids affecting the behavior of heavy metals during 1990—2021

2.5 研究热点与前沿分析

2.5.1 研究热点聚类分析

利用 VOSviewer 文献可视化分析软件对 1990—2021 年土壤胶体影响重金属行为方向的文献进行关键词分析,绘制关键词共现网络(图 4),反映该方向的研究热点和方向。共现网络中圆圈的大小代表关键词重要性的高低,圆圈越大说明关键词出现频次越高,在该方向越重要。共现网络圆圈的不同颜色则代表了关键词所属的不同聚类。由图 4 可知,关键词网络划分为三个聚类,

分别代表“土壤胶体颗粒粒径分级与重金属的形态分布”、“土壤胶体的释放、沉积及对重金属的吸附作用”和“土壤胶体颗粒的迁移机制与迁移模型研究”,其中,“土壤胶体颗粒粒径分级与重金属的形态分布”倾向于重金属在不同粒径土壤组分分布和形态的状态描述,而“土壤胶体的释放、沉积及对重金属的吸附作用”和“土壤胶体颗粒的迁移机制与迁移模型研究”则主要关注土壤胶体颗粒的释放、迁移和沉积行为,以及对重金属的结合作用和协同运移行为。



注：节点表示关键词；节点大小表示关键词出现的次数；关键词参数阙值设置为 50，即关键词至少出现 50 次，此图显示 55 个节点；不同颜色代表不同聚类。Note: Nodes represent keywords; The node size represents the number of occurrences of keywords; The threshold value of keyword parameters is set to 50, that is, keywords appear at least 50 times; Different colors represent different clusters.

图 4 1990—2021 年土壤胶体影响重金属行为方向研究热点分布

Fig. 4 Distribution of hotspots on soil colloids affecting the behavior of heavy metals during 1990—2021

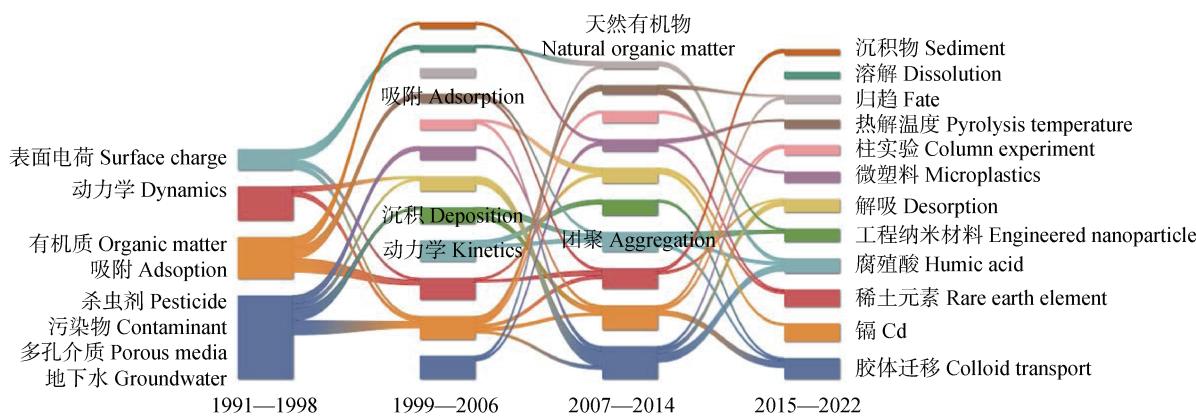
粒径是区分溶质、胶体和颗粒物的重要指标，是表征土壤胶体生物地球化学过程的重要参数。土壤胶体粒径影响重金属分布，通常，随着土壤颗粒粒径的减小，颗粒比表面积增大，金属氧化物、有机质和黏土矿物等有效成分含量增加，更多的重金属会积累在土壤细颗粒中^[13]。Tang 等^[14]发现铜 (Cu) 和镉 (Cd) 的浓度随着土壤颗粒尺寸的减小而趋于增加，并且与土壤有机碳的含量高度相关。Löv 等^[15]发现在受试的四种土壤中有超过 30% 的铅 (Pb) 分布于颗粒和胶体态 (>10 kDa) 中，而砷和锑则主要存在于真正溶解部分 (<10 kDa)。土壤不同粒径组分金属氧化物、有机质和黏土矿物含量不同，对重金属的吸附、沉淀等作用有所差异，导致重金属在不同土壤粒径中的形态也会发生改变，进而影响重金属的生物有效性^[13]。Landrot 和 Khaokaew^[16]研究发现土壤细颗粒中与腐殖酸结合的 Pb 含量显著高于原土。Li 等^[17]研究发现小于 1 μm 土壤组分的铅、铬、铜等重金属迁移性和生物可给性均高于其他粒径组分。粒径通过影响土壤胶体对重金属的吸附作用，进而影响了重金属的迁移行为和环境风险。

土壤水文地质和水化学条件的变化在土壤胶体的释放、形成、迁移和沉积过程发挥重要作用。Tosco 等^[18]发现 pH 增大可显著提高水合氧化铁纳米颗粒与石英之间相互作用势垒高度，提高氧化铁纳米颗粒的稳定性，促进其释放迁移；而离子强度的增加屏蔽了水合氧化铁纳米颗粒与石英之间的排斥力，水合氧化铁纳米颗粒沉积增强。土壤胶体作为重金属的重要载体和吸附剂，其行为在土壤重金属的活化迁移过程中扮演重要角色。土壤胶体颗粒既可通过吸附和共沉淀过程抑制重金属和放射性核素的运输，也可在尺寸排阻效应影响下，通过胶体协同运输大大增强其在土壤、非饱和带、含水层和地表水中的扩散迁移^[19]。Bao 等^[20]研究发现猪粪中小于 0.2 μm 的有机胶体可以加速 Cu 通过多孔介质。Zhou 等^[21]研究发现在饱和柱实验中胶体协同运输是 Cu 迁移的主要机制，胶体态 Cu 浓度占比超过 90%，而溶解态的 Cu 则贡献很小。Halienna 等^[22]研究发现钍 (Th) 在地下砂质沉积物饱和柱中的迁移主要以溶解态形式为主。土壤胶体促进重金属迁移，一方面取决于重金属在溶液、胶体和固相介质之间的分

配，另一方面，水文地质和水化学条件在该过程中也发挥重要作用。

2.5.2 研究热点时间演变分析 使用 Citespace 自带软件 Alluvial Diagram Generator 绘制了土壤胶体影响重金属行为方向的关键词冲积图，即研究热点时间演变分析图（图 5）。该图展示的是该方向关键词结构变化的一个子集，其他影响较小、前后关联不大的关键词已被忽略。每 8 年的关键词共词网络重要性集群均占据一列，通过流线连接之前和未

来年份的集群。每一列中的每个小方块分别代表该时间段内的关键词字段簇，方块的高度反映了该关键词字段簇的引用次数，引用次数越多，方块高度越高。可以看出，过去 32 年来土壤胶体影响重金属行为方向的重大结构变化。在 1999—2006 年间土壤胶体吸附和沉积动力学研究的基础上，演变出了 2007—2014 年间天然有机质和土壤胶体团聚的相关研究，并对近年来工程纳米材料的快速发展和广泛应用起了重要作用。



注：不同颜色方块代表不同类别的关键词字段簇；方块的高度反映了该关键词字段簇的引用次数，引用次数越多，方块高度越高。
Note: Blocks with different colors represent keyword clusters of different categories; The height of blocks reflects the number of citations for keyword cluster and the height of the blocks increases with the number of citations.

图 5 1990—2021 年土壤胶体影响重金属行为方向研究热点时间演变图

Fig. 5 The evolution mapping of hotspots on soil colloids affecting the behavior of heavy metals during 1990—2021

2.5.3 前沿分析 突现性关键词是指突然出现且引用频率很高的词汇，一定程度上代表了一个学科领域的研究前沿和热点。通过 Citespace 突发检测算法可对引起学术界共同兴趣的突现性关键词进行检测与呈现，采用突现强度代表该关键词的热度，突现强度越高，说明该关键词受关注程度越高。本文使用 Citespace 软件提取了土壤胶体影响重金属行为研究方向突现强度前十的关键词（图 6）。根据关键词出现和热度衰退的年份可以大致分为 1990s—2010s 和 2010s—2020s 两个阶段。第一阶段关键词大多在 2000 年之前突现，并于 2010 年之前衰退。第二阶段三个关键词分别为：纳米颗粒、场流分离和银 (Ag) 纳米颗粒，说明近十年来土壤胶体影响重金属行为方向的主要研究热点对象为人工纳米颗粒，主要新兴技术手段为场流分离技术。

由于纳米材料在提高产品性能方面具有无可争议的强大功能，纳米技术的应用越来越普遍。例如，

Ag 纳米材料具有抗菌、抗真菌和部分抗病毒的特性，在服装、化妆品等产品中得到了广泛应用；氧化铜 (CuO) 纳米颗粒在番茄和茄子幼苗叶片上喷施可有效抑制疾病并提高产量^[23]。土壤被认为是工程纳米材料的主要汇，工程纳米材料通过直接（如纳米农药喷施）或间接（如干湿沉降和污水、污泥还田）方式进入土壤^[24]。考虑到工程纳米材料对环境和人体健康的潜在不良影响，其进入土壤后的行为与归趋成为当前的研究热点。

与天然土壤胶体类似，工程纳米材料对重金属同样具有良好的吸附性能，会与重金属发生协同作用，进而改变重金属的生物有效性^[25]或进行长距离协同迁移^[26]。Zhang 等^[27]研究发现二氧化钛 (TiO₂) 纳米颗粒提高了 Cd 的生物毒性。方婧等^[26]研究发现在有机质含量较低的灰褐土和潮土中，TiO₂ 纳米颗粒使 Cu 在土壤中的迁移能力分别增强了 8 432 倍和 32 倍。工程纳米材料进入土壤后其释放迁移受到



图 6 1990—2021 年土壤胶体影响重金属行为方向研究关键词突现分析

Fig. 6 Burst analysis of keywords on soil colloids affecting the behavior of heavy metals during 1990—2021

表面物理化学性质、土壤溶液化学和系统流体动力学控制。同时，天然土壤胶体对工程纳米颗粒有很强的亲和力，发生结合作用形成异质聚集体，进而影响人工纳米颗粒的释放、迁移以及生物利用度^[28]。但土壤胶体在工程纳米材料释放迁移过程中发挥的作用仍存在争议。通常，土壤黏粒胶体保留在多孔介质中，会降低工程纳米材料的迁移性^[29]。例如，有研究发现，土壤有机质和黏粒胶体是金/铂纳米颗粒最重要的吸附剂，有机质和黏粒胶体含量的升高会降低纳米颗粒的流动性^[29]。但 Cai 等^[30]研究发现，悬浮液中膨润土和 TiO₂ 纳米颗粒共存会促进 TiO₂ 纳米颗粒的输运，这主要归结于黏土促进运输机制。由于纳米材料的存在及与本体截然不同的非典型表面结构和反应性，可能会促进溶解、氧化还原反应以及活性氧的产生，工程纳米材料进入土壤后可能存在特异性的生物效应^[7]。作为防晒霜、化妆品和涂料的重要成分，氧化锌 (ZnO) 纳米颗粒近年来被大量应用，其最终会伴随着污水处理和污泥还田进入土壤。ZnO 纳米颗粒进入土壤后产生的生物毒性可归因于纳米颗粒本身产生的纳米特异性毒性或溶解释放的重金属离子，或者两者皆存在。Heggelund 等^[31]研究发现，ZnO 纳米颗粒基于孔隙水浓度的半最大效应浓度 (EC₅₀) 低于溶解态的 ZnCl₂，这可能归结于 ZnO 纳米颗粒表面局部高浓度的溶解态 Zn、诱导产生活性氧等造成的纳米特异性毒性，以及 ZnO 纳米颗粒内化作用引起的潜在毒性。因此，纳米颗粒在暴露介质中的溶解行为对于评估其生物效应至关重要。

近年来，土壤胶体影响重金属研究领域的热门技术是场流分离技术。其中，非对称流场流分离技术 (Asymmetric flow field-flow fractionation, AF4)

应用最为广泛。AF4 可用于分离和测定复杂与多分散体系中 1 nm~10 μm 尺度范围内胶体颗粒，具有分离条件温和、对样品颗粒损伤小、可与多种检测器联用的优点^[32]。场流分离技术同样存在一定问题，在颗粒分离过程中，场流分离系统通道内会发生过载效应、颗粒-通道壁的相互作用等干扰^[33]。上述干扰会阻碍场流分离技术谱峰的解释，并限制其在环境领域的应用，因此需要与其他灵敏的光谱或光学粒径测量技术进行联用^[33]。Regelink 等^[34]利用 AF4 对土壤胶体进行了分级，结合 X 射线吸收光谱对胶体铁的存在形态进行研究，发现胶体铁以游离铁 (氢) 氧化物纳米颗粒、与黏土矿物结合的铁 (氢) 氧化物以及黏土矿物中的铁三种形式存在。Makselon 等^[35]利用非对称流场流分离结合紫外/可见光光谱以及电感耦合等离子体质谱 (AF4-UV/Vis-ICP-MS) 分析了 Ag 纳米颗粒与土壤之间的关系，发现 Ag 纳米颗粒在土壤中具有持久性，并与土壤胶体 (主要由铝、铁、硅和有机质组成) 有关。目前，考虑到土壤环境的高浓度天然胶体背景，AF4 在土壤胶体领域的应用仍比较少。而单粒子电感耦合等离子体质谱 (Single particle inductively coupled plasma mass spectrometry, spICP-MS) 可以逐个检测强烈稀释样品中的颗粒，其尖峰信号的强度与一个粒子所检测元素的原子数量成正比，因此适用于检测极低浓度的人工纳米颗粒，并提供单个颗粒的定量信息^[36]。未来，AF4 与 spICP-MS 等特定检测器的联用有望为表征土壤金属纳米颗粒的尺寸分布及元素浓度与形态等提供技术支持^[36]。

目前，天然胶体和人工纳米颗粒之间相互作用的研究主要集中于水体环境或基质相对简单的体系。在实际土壤环境中，类型丰富、数量庞大的土

壤胶体与人工纳米颗粒之间发生的复杂相互作用以及对人工纳米颗粒迁移归趋与环境命运的影响有待进一步深入研究。

3 结 论

近30年来,世界范围内对土壤胶体影响重金属行为方向的关注程度日益升高,发文量呈现逐年升高趋势。美国在该方向起步最早,发文量最高,我国虽起步较晚,但近些年呈现迅猛发展势头。中国科学院是我国发文量最高的研究机构,在该方向具有较高的学术活跃度。土壤胶体影响重金属行为方向的文章主要发表在 *ES&T*、*Science of the Total Environment* 和 *Chemosphere* 等期刊上,其中 *ES&T* 的发文量和被引频次均占据绝对优势,显示出其在该方向的较高影响力。土壤胶体影响重金属行为方向涉及的学科分布广泛,以环境科学和生态学的交叉学科为主,向其他学科延伸,各学科之间联系紧密;化学和工程学中介中心性较高,是该领域学科之间交融联系的重要枢纽。土壤胶体影响重金属行为方向主要的研究主题为“土壤胶体颗粒粒径分级与重金属的形态分布”、“土壤胶体的释放、沉积及对重金属的吸附作用”和“土壤胶体颗粒的迁移机制与迁移模型研究”,粒径作为表征土壤胶体生物地球化学过程的重要参数,是研究过程中需重点关注的影响因素。胶体-重金属协同运输是土壤重金属迁移的重要机制。土壤胶体影响重金属行为方向现阶段的研究热点对象为人工纳米颗粒,热点技术为场流分离技术,研究热点内容是人工纳米颗粒在土壤中的行为、迁移转化与生物有效性,以及天然土壤胶体对于工程纳米材料归宿的影响。场流分离技术联合 spICP-MS 等相关技术有望在土壤胶体影响重金属领域得到广泛应用。

参考文献 (References)

- [1] Dai Q Q, Xu M J, Zhuang S Y, et al. Study on factors influencing heavy metal of farmland soils based on geographical detector in Fengqiu County[J]. Soils, 2022, 54 (3): 564—571. [戴倩倩, 徐梦洁, 庄舜尧, 等. 基于地理探测器的封丘县农田土壤重金属分布影响因素研究[J]. 土壤, 2022, 54 (3): 564—571.]
- [2] Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. National soil pollution survey bulletin[R]. [2014-04-17]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm. [环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. [2014-04-17]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm.]
- [3] Liu G N, Liu X H. A review on the impact of soil colloids on heavy metal transport[J]. Environmental Chemistry, 2013, 32 (7): 1308—1317. [刘冠男, 刘新会. 土壤胶体对重金属迁移行为的影响[J]. 环境化学, 2013, 32 (7): 1308—1317.]
- [4] Zhang M Y, Yin W, Wang Y, et al. Research progress on the environmental behavior of heavy metals in soil tracing by stable isotopes[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (5): 1215—1227. [张妙月, 尹威, 王毅, 等. 稳定同位素示踪土壤中重金属环境行为的研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59 (5): 1215—1227.]
- [5] Mu S S, Qing C L. Environmental edaphology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1993. [牟树森, 青长乐. 环境土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1993.]
- [6] Sen T K, Khilar K C. Review on subsurface colloids and colloid-associated contaminant transport in saturated porous media[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2006, 119 (2/3): 71—96.
- [7] Auffan M, Rose J, Bottero J Y, et al. Towards a definition of inorganic nanoparticles from an environmental, health and safety perspective[J]. Nature Nanotechnology, 2009, 4 (10): 634—641.
- [8] Liu X M, Zhao J, Xu J M. Research on immobilization of heavy metals in contaminated agricultural soils—Bibliometric analysis based on Web of Science database[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (2): 445—455. [刘杏梅, 赵健, 徐建明. 污染农田土壤的重金属钝化技术研究——基于 Web of Science 数据库的计量分析[J]. 土壤学报, 2021, 58 (2): 445—455.]
- [9] Shi F Y, Zhang F B, Yang M Y. Research hotspots and progress of soil organic carbon mineralization based on bibliometrics method[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (2): 381—392. [史方颖, 张风宝, 杨明义. 基于文献计量分析的土壤有机碳矿化研究进展与热点[J]. 土壤学报, 2022, 59 (2): 381—392.]
- [10] State Council of the People's Republic of China. Soil pollution prevention and control action plan[Z]. [2016-05-31]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm. [中华人民共和国国务院. 土壤污染防治行动计划[Z]. [2016-05-31]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm.]
- [11] Standing Committee of the National People's Congress. Law of the People's Republic of China on the prevention and control of soil pollution[Z]. [2018-08-31]. <http://lawdb.cncourt.org/show.php?fid=150893>. [全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国土壤污染防治法[Z]. [2018-08-31]. <http://lawdb.cncourt.org/show.php?fid=150893>.]
- [12] Won J, Burns S E. Role of immobile kaolinite colloids in the transport of heavy metals[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52 (5): 2735—2741.

- [13] Zhang H, Luo Y, Makino T, et al. The heavy metal partition in size-fractions of the fine particles in agricultural soils contaminated by waste water and smelter dust[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 248/249: 303—312.
- [14] Tang Z Y, Wu L H, Luo Y M, et al. Size fractionation and characterization of nanocolloidal particles in soils[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, 31(1): 1—10.
- [15] Löv Å, Larsbo M, Sjöstedt C, et al. Evaluating the ability of standardised leaching tests to predict metal (loid) leaching from intact soil columns using size-based elemental fractionation[J]. *Chemosphere*, 2019, 222: 453—460.
- [16] Landrot G, Khaokaew S. Lead speciation and association with organic matter in various particle-size fractions of contaminated soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52 (12): 6780—6788.
- [17] Li X, Yan X, Wu T, et al. Risks and phyto-uptake of micro-nano size particulates bound with potentially toxic metals in Pb-contaminated alkaline soil(NW China): The role of particle size fractions[J]. *Chemosphere*, 2021, 272: 129508.
- [18] Tosco T, Bosch J, Meckenstock R U, et al. Transport of ferrihydrite nanoparticles in saturated porous media: Role of ionic strength and flow rate[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46 (7): 4008—4015.
- [19] Hochella M F Jr, Mogk D W, Ranville J, et al. Natural, incidental, and engineered nanomaterials and their impacts on the earth system[J]. *Science*, 2019, 363 (6434): eaau8299.
- [20] Bao Q, Lin Q, Tian G, et al. Copper distribution in water-dispersible colloids of swine manure and its transport through quartz sand[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186 (2/3): 1660—1666.
- [21] Zhou D M, Wang D J, Cang L, et al. Transport and re-entrainment of soil colloids in saturated packed column: Effects of pH and ionic strength[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11 (3): 491—503.
- [22] Haliena B, Zheng H, Melson N, et al. Decreased salinity and actinide mobility: Colloid-facilitated transport or pH change?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50 (2): 625—632.
- [23] Elmer W H, White J C. The use of metallic oxide nanoparticles to enhance growth of tomatoes and eggplants in disease infested soil or soilless medium[J]. *Environmental Science-Nano*, 2016, 3 (5): 1072—1079.
- [24] Zhao J, Tang J, Dang T H. Influence of biofilms and soil minerals on transport of engineered nanoparticles in saturated porous media[J]. *Soils*, 2022, 54(3): 610—618. [赵军, 唐骏, 党廷辉. 生物膜和土壤矿物对人工纳米颗粒在饱和多孔介质传输的影响[J]. 土壤, 2022, 54 (3): 610—618.]
- [25] Cao J L, Feng Y Z, Lin X G. Review of researches on influences of engineered nanomaterials on plant-microorganisms[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (1): 1—11. [曹际玲, 冯有智, 林先贵. 人工纳米材料对植物—微生物影响的研究进展[J]. 土壤学报, 2016, 53 (1): 1—11.]
- [26] Fang J, Zhou Y P, Wen B. Effect of titania dioxide nanoparticles on transport of copper in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (3): 549—556. [方婧, 周艳萍, 温蓓. 二氧化钛纳米颗粒对铜在土壤中迁移的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48 (3): 549—556.]
- [27] Zhang X, Sun H, Zhang Z, et al. Enhanced bioaccumulation of cadmium in carp in the presence of titanium dioxide nanoparticles[J]. *Chemosphere*, 2007, 67 (1): 160—166.
- [28] Labille J, Harns C, Bottero J Y, et al. Heteroaggregation of titanium dioxide nanoparticles with natural clay colloids[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49 (11): 6608—6616.
- [29] Reith F, Cornelis G. Effect of soil properties on gold- and platinum nanoparticle mobility[J]. *Chemical Geology*, 2017, 466: 446—453.
- [30] Cai L, Tong M, Wang X, et al. Influence of clay particles on the transport and retention of titanium dioxide nanoparticles in quartz sand[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48 (13): 7323—7332.
- [31] Heggelund L R, Diez-Ortiz M, Loft S, et al. Soil pH effects on the comparative toxicity of dissolved zinc, non-nano and nano ZnO to the earthworm *Eisenia fetida*[J]. *Nanotoxicology*, 2014, 8 (5): 559—572.
- [32] Stolpe B, Guo L, Shiller A M, et al. Abundance, size distributions and trace-element binding of organic and iron-rich nanocolloids in alaskan rivers, as revealed by field-flow fractionation and ICP-MS[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 105: 221—239.
- [33] Baalousha M, Kammer F V D, Motelica-Heino M, et al. Natural sample fractionation by F1FFF-MALLS-TEM: Sample stabilization, preparation, pre-concentration and fractionation[J]. *Journal of Chromatography A*, 2005, 1093 (1/2): 156—166.
- [34] Regelink I C, Voegelin A, Weng L P, et al. Characterization of colloidal Fe from soils using field-flow fractionation and Fe K-edge X-ray absorption spectroscopy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48 (8): 4307—4316.
- [35] Makselon J, Siebers N, Meier F, et al. Role of rain intensity and soil colloids in the retention of surfactant-stabilized silver nanoparticles in soil[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 1027—1034.
- [36] Schaumann G E, Philippe A, Bundschuh M, et al. Understanding the fate and biological effects of Ag- and TiO₂-nanoparticles in the environment: The quest for advanced analytics and interdisciplinary concepts[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 535: 3—19.

(责任编辑: 陈荣府)