

基于CiteSpace重金属生物可给性的文献计量分析

罗杨, 吴永贵, 段志斌, 谢荣

引用本文:

罗杨, 吴永贵, 段志斌, 等. 基于CiteSpace重金属生物可给性的文献计量分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 17-27.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0713>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

稻田重金属污染修复治理技术及效果文献计量分析

杜志鹏, 苏德纯

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2409-2417 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1128>

农田土壤重金属污染评价研究进展

王玉军, 吴同亮, 周东美, 陈怀满

农业环境科学学报. 2017, 36(12): 2365-2378 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1317>

基于文献计量的我国农地重金属研究热点分析

帅鸿, 欧阳迪庆, 陈玉成

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 688-695 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1477>

基于文献计量学分析2016年环境土壤学研究热点

吴同亮, 王玉军, 陈怀满, 周东美

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 205-215 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0128>

土壤镉和砷污染钝化修复材料及科学计量研究

李英, 朱司航, 商建英, 黄益宗

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2011-2022 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0601>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

罗 杨, 吴永贵, 段志斌, 等. 基于 CiteSpace 重金属生物可给性的文献计量分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 17-27.

LUO Yang, WU Yong-gui, DUAN Zhi-bin, et al. Bibliometric analysis of bioaccessibility of heavy metals based on CiteSpace[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(1): 17-27.

基于 CiteSpace 重金属生物可给性的文献计量分析

罗 杨¹, 吴永贵^{1,2,3*}, 段志斌¹, 谢 荣¹

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学应用生态研究所, 贵阳 550025; 3. 贵州省喀斯特环境生态工程研究中心, 贵阳 550025)

摘 要: 为了解国内外有关重金属生物可给性研究领域的主题演进、研究现状、研究进展及发展态势, 本文通过检索 2006—2018 年共 13 年 CNKI 与 Web of ScienceTM 核心合集数据库中有关重金属生物可给性的文献, 利用 CiteSpace 软件绘制关于重金属生物可给性研究的知识图谱, 并进行文献可视化分析。结果表明: 近 13 年来本研究领域中英文发文数量呈波动式增长态势, 且在 2011 年和 2016 年的发文数量出现小高峰。国际重金属生物可给性研究可分为 3 个发展阶段, 各个阶段研究热点不同, 当前研究热点为“土壤性质、大气灰尘、食物链、PM_{2.5}”; 国内重金属生物可给性研究主题集聚成 2 个阶段及 2 条演化路径, 其中 2006—2014 年为第一阶段, 主要研究路径为“重金属—化学形态/体外消化法—生物有效性/生物可给性—健康风险评价”; 2015—2018 年为第二阶段, 主要研究路径为“农田土壤—钝化剂(羟基磷灰石、过磷酸钙、腐植酸钾等)—体外消化模型—健康风险评价”, 且第二阶段已受到广泛关注。健康风险研究由单一环境介质、单一风险受体、小尺度的评价演化为多种风险源、食物链、大尺度的综合评价。欧美国家奠定了重金属生物可给性的研究基础, 中国起步较晚但发展迅速。

关键词: 重金属; 生物可给性; 健康风险评价; CiteSpace; 文献计量分析

中图分类号: X820.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2020)01-0017-11 doi:10.11654/jaes.2019-0713

Bibliometric analysis of bioaccessibility of heavy metals based on CiteSpace

LUO Yang¹, WU Yong-gui^{1,2,3,*}, DUAN Zhi-bin¹, XIE Rong¹

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Institute of Applied Ecology, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Karst Eco-Environmental Engineering Research Center of Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to understand the evolution, current status, and progress of research related to the bioaccessibility of heavy metals, in addition to the development of their trends in China and abroad, this study searched relevant literatures from the database of CNKI (China National Knowledge Infrastructure) and Web of ScienceTM Core Collection Database for the period of 2006—2018. CiteSpace software was used to draw a knowledge map of the bioaccessibility of heavy metals and to make a visual analysis of relevant literatures. The results showed the following. The number of Chinese and English publications on the topic experienced a fluctuating, increasing trend between 2006—2018, with a small peak in the number of publications occurring in 2011 and 2016. International research on the bioaccessibility of heavy metals could be divided into three development stages, whereby the research hotspots of each stage were different. The keywords soil properties, atmospheric dust, food chain, and PM_{2.5} were the current research hotspots. Domestic research was clustered into two stages and

收稿日期: 2019-06-27 录用日期: 2019-09-25

作者简介: 罗 杨(1996—), 男, 贵州凯里人, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生物地球化学。E-mail: yangluo546@163.com

*通信作者: 吴永贵 E-mail: ygwu72@126.com

基金项目: 国家自然科学基金—贵州省联合资助项目(U1612442); 国家自然科学基金项目(41663009); 贵州省国内生态学一流学科建设项目(GNYL(2017)007号); 国家重点研发计划项目(2018YFC1802602); 贵州省研究生教育创新计划项目(黔教合 YJSCXJH[2019]038)

Project supported: The Joint Funds of National Natural Science Foundation of China and Guizhou Province (U1612442); The National Natural Science Foundation of China (41663009); The Construction Project for First-class Ecology Discipline in Guizhou (GNYL(2017)007); The National Key R&D Projects of China (2018YFC1802602); The Project of Innovation in Postgraduate Education in Guizhou (YJSCXJH[2019]038)

two core evolution routes. The first stage of the main research route during the period from 2006—2014 was: heavy metals; chemical speciation/in vitro digestion; bioavailability/bioaccessibility; health risk assessment. The second stage of the main research route during the period from 2015—2018 was: farmland soil; passivation agent (e.g., hydroxyapatite, superphosphate, and potassium humate); in vitro digestion model; health risk assessment. This second stage had received extensive attention. The evaluation of health risk research had evolved from single environmental media, single risk receptor, and small-scale assessment to multiple risk sources, food chain, and large-scale comprehensive assessment. European and American countries laid the foundation for research in this field. China started late but had developed rapidly.

Keywords: heavy metals; bioavailability; health risk assessment; CiteSpace; bibliometric analysis

随着城市化与工业化进程的快速推进,由人类活动引起的环境污染问题愈发严重。环境中的重金属污染由于影响范围广、持续时间长、处置难度大等特点而易危及农业生产、生态安全、食品安全和公共健康,当不同环境介质中的重金属通过多途径暴露的方式进入人体后,将在胃肠道内经历消化过程,随人体血液循环累积到不同组织器官中,从而对人体产生“剂量-效应”关系,使人体健康受到潜在威胁。因此,分析环境介质中重金属元素与人体健康的关系备受关注。

健康风险评估作为对有毒有害物质因暴露而对人体健康产生潜在不良影响的特征性描述^[1],目前相关的评估方法主要是基于一些暴露风险评估模型,如USEPA模型、Monte Carlo模型、数学模拟、概率模型、剂量重建分析等技术估量环境中风险因子的暴露程度^[2]。随着监测手段和检测技术的发展,重金属在人体内的吸收转化行为成为健康风险评估中的研究重点,为了准确评估人体对环境中重金属的吸收状况,一般可用生物有效性(Bioavailability)和生物可给性(Bioaccessibility)两种指标进行评价。生物有效性通常是指污染物或营养物被人体吸收进入血液,在体内重新分布的含量^[3],一般通过临床试验或动物活体试验(In vivo)进行监测。生物可给性是指在模拟胃肠道环境条件下,介质中污染物或营养物溶解到消化液中的部分^[4],主要以人工模拟胃肠道物理化学环境为主的体外试验(In vitro)进行健康评价。由于In vivo方法存在试验周期长、费用高、动物个体间差异以及伦理方面等问题,在作为评估工具运用上受到了限制^[5-7]。而In vitro方法具有试验周期较短、操作方法简单、样品快速测定以及能够高度拟合In vivo方法的试验结果等优点^[8],近年来深受国内外研究学者的广泛关注^[9-10]。目前已有大量研究运用In vitro方法探究土壤^[11-13]、灰尘^[14-17]、食物^[17-20]、药物^[21-22]等不同介质中重金属元素在胃肠道阶段的生物可给性。面对重金

属生物可给性研究多学科交叉的海量文献,如何从多元、分时、动态角度出发,了解当前重金属生物可给性研究现状,探究国内外研究的前沿热点及演进脉络,需要对研究领域的科学文献进行信息挖掘。

文献计量学(Bibliometrics)被广泛用于文献情报分析,进而评价某领域科学发展现状及水平^[23-24]。因此,本文以重金属生物可给性相关的文献体系和文献计量特征为研究对象,基于2006—2018年CNKI(China National Knowledge Infrastructure,中国知识基础设施工程)期刊论文数据库与Web of Science™核心合集数据库中的文献资料,运用可视化分析软件CiteSpace,结合图形学、信息科学、统计学等学科理论与计量学引文、共现分析等研究方法,对重金属生物可给性相关研究文献进行图谱分析,旨在清晰地展示该研究领域主题演进、研究现状以及发展态势,以期对重金属生物可给性的相关研究提供理论参考及启示。

1 数据来源与统计方法

1.1 数据来源与筛选

本文数据样本选取2006—2018年共13年CNKI与Web of Science™核心合集数据库中的文献资料。利用CNKI高级检索功能,分别以“重金属”并“生物可给性”“生物可利用性”“生物可及性”及“In vitro”为主题、关键词和篇名进行检索,共获取中文文献216篇。同时,在Web of Science™核心合集数据库中选用基本检索方式,分别以“Heavy metals”and“Bioavailability”“Bioaccessibility”“In vitro”及“In vivo”为主题(TS)和标题(TI)进行检索,共获取英文文献1548篇。利用软件E-study和Endnote X9对以上1764篇文献逐条整理挑选,去除重复及与研究主题不符文献,最终确定中文文献92篇和英文文献458篇。

1.2 统计方法

自CiteSpace软件开发以来,借助知识图谱分析

学科热点在管理学^[25]、生态学^[26]、医学^[27]、环境科学^[28-29]等诸多学科中得到了广泛的应用。本文从CNKI和Web of ScienceTM核心合集数据库导出数据文本,导出CNKI数据文本格式为Refworks,Web of ScienceTM数据文本为txt全记录及UTF-8格式,文本统一命名为download_***。将中英文文献数据分别导入软件CiteSpace 5.4 R1,时间跨度为2006—2018年共13年,时间节点(Years Per Slice)设置为1年,节点类型(Node Type)进行相对应勾选,其余参数均为默认,得到国家发文量及合作关系、作者合作及共被引关系、关键词共现、突现性关键词等可视化图表。其中,数据文本还经过Excel 2010、CNKI数据库及Web of ScienceTM数据库自带的分析工具加工处理,同时利用文献计量在线分析平台协助处理。

2 结果分析

2.1 关于重金属生物可给性的发文量及年间变化趋势

发文数量及年际变化趋势可反映研究人员对本领域研究热点的关注程度和研究专题的动态变化^[30]。本文统计有关重金属生物可给性的中英文研究文献共550篇,如图1所示,在2006—2018期间关于重金属生物可给性的发文量呈波动式增长态势,且在2016年和2011年英文和中文发文量达到小高峰,增长率分别为240%和63.6%;特别在2013—2018年期间累计中英文发文量分别占统计年限总发文量的55.5%和72.7%,其主要原因可能是在2011年国务院颁布了《国家环境保护“十二五”规划》,该规划明确指出需要强化环境评价,减轻危害群众健康的环境风险,消除危害群众健康的环境隐患;同时在2017年环

境保护部也印发了《国家环境保护“十三五”环境与健康工作规划》,明确提出要严密防控重金属、危险废物、有毒有害化学品等重点领域环境风险,提升风险防控基础能力。这些政策有效地推动了科研人员对重金属生物可给性的研究工作,加快了本领域研究热度的提升。然而近两年中英文发文数量略有下降趋势,其原因可能是国外进入现有体外消化模拟方法的技术改进与创新阶段,而国内仍处于技术追踪与基础研究。

2.2 关于重金属生物可给性的主要研究力量

2.2.1 主要研究国家分析

一个国家的发文量一定程度上代表了在某领域研究的活跃程度^[24]。从Web of ScienceTM核心合集数据库中检索出中国、美国、加拿大、英国等国家发表有关重金属生物可给性研究的文献。在现有的基础数据上,按发文数量排序并筛选出排名前10名的国家,如表1所示,中国发文量排名第一(99篇),分别是英国和西班牙的2.2倍和2.7倍,可见我国在重金属生物可给性研究领域占有重要地位,同时也间接说明了关于重金属环境健康风险的研究已受到我国学者的广泛关注。国家的中介中心性(Intermediary centrality)是用来表示该国家在某研究领域的国际地位,由表1可知,中国发文量虽排名第一,但中介中心性较低,仅占英国和西班牙的1/3和6/17,表明中国在该研究领域虽比较活跃,但研究成果的国际影响力不高,应加强该领域的创新性研究。英国和西班牙发文量分别排第四和第五,其中介中心性排第一和第二,表明这两个国家在该研究领域发表的文章影响力较强。

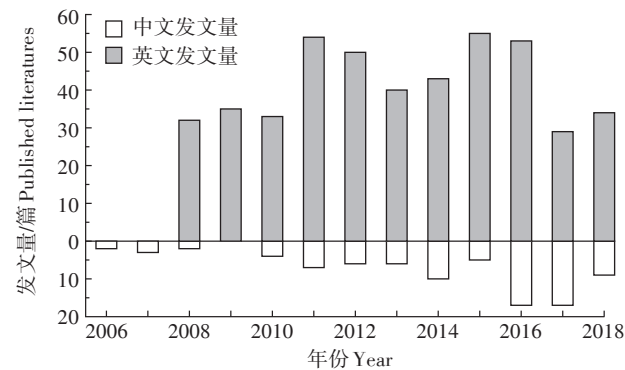


图1 CNKI和Web of ScienceTM数据库关于重金属生物可给性研究的发文量

Figure 1 The number of published papers on heavy metal bioaccessibility in CNKI and Web of ScienceTM database

表1 关于重金属生物可给性研究发文量前10的国家		
Table 1 Countries with top 10 on the publications of heavy metal bioaccessibility		
国家 Country	发文量/篇 Publications	中介中心性 Centrality
中国 China	99	0.12
美国 USA	76	0.32
加拿大 Canada	46	0.28
英国 England	45	0.36
西班牙 Spain	37	0.34
澳大利亚 Australia	33	0.24
法国 France	31	0.26
印度 India	21	0
葡萄牙 Portugal	13	0.25
巴西 Brazil	12	0.03

2.2.2 主要研究机构分析

基于CiteSpace软件中Institution分析功能,对研究机构进行分析,并统计出国内外发文数量前10名的研究机构,见表2。在Web of Science™核心合集数据库中,中国机构占了2家,分别是中国科学院(排名第一)和南京大学(排名第六)。结合表1分析可知,中国在本领域的研究力量主要来源于这两个研究机构。英国地质调查局和南澳大利亚大学分别排名第二和第三,英国地质调查局对英国大部分地区土壤中重金属的含量进行调查,并在此基础上结合土壤性质进行回归模型分析,开发出重金属生物可给性的数据集,为评估人类健康风险提供数据指南,这可能是英国在本研究领域国际影响力较高的主要原因之一。从CNKI数据库中可以看出中国科学院生态环境研究中心发文量最多,其研究方法主要采用室内土壤培养法和体外消化试验,评估在不同农艺调控措施下降低人体对土壤重金属(As、Cu、Zn、Cd等)的吸收潜力,以期为污染场地修复评价提供理论依据。

2.2.3 作者发文量及作者共被引分析

高频次共被引作者通常对研究领域的理论和方法有创新,并对研究领域的发展有突出贡献^[31]。本领域国内外学者的合作图谱、发文数量和共被引频次结果统计见图2、表3和表4。分析图2可知,在国际上作者间的合作较为分散,多数作者倾向于与一组相对稳定的作者进行合作,每个合作团体通常有两个或两个以上的核心作者。在这些作者中,Wragg Joanna发文量最多(14篇),构成核心作者的最大集群。在统计的作者中仅发现一位中国学者,说明我国学者在本研究领域的国际活跃度不高。从表4可知,作者Ruby M V的共被引频次最高(189次),其次为Oomen A

G(156次)。Ruby M V在1992年较早地报道了重金属生物可给性^[32],在后续的研究中又考虑到人体消化过程中所需的环境条件,例如温度、pH、酶、微生物等,并在1996年提出了PBET法,发现此方法得出的试验结果与In vivo的试验结果有较好的相关性,为体外试验方法的应用和发展提供借鉴和参考。Oomen A G通过比较5种体外试验方法,研究了土壤污染物的生物可给性^[33],之后开发用于估算土壤污染物生物可给性的体外消化模型^[34],并结合Caco-2细胞模型探究污染物的生物可给性^[35]。Oomen A G研究介质较为广泛,并在试验方法上利用了细胞模型,这些可能是该作者高共被引的主要原因。

由国内作者发文量(表3)可知,崔岩山在本研究领域的发文量最多,其次是黄益宗。细读文章发现,崔岩山团队主要研究方向为重金属污染控制及其对人体健康风险,其《土壤中镉的生物可给性及其对人体的健康风险评估》^[36]一文被引次数高达89次,该文在对土壤中镉生物可给性研究的基础上,探讨土壤中镉生物可给性与土壤影响因素之间的相互关系以及无意摄入土壤镉对人体健康风险的系统研究。另外发现崔岩山与黄益宗同时出现在诸多文献中,说明中国科学院大学与农业农村部环境保护科研监测所之间的合作较为紧密。

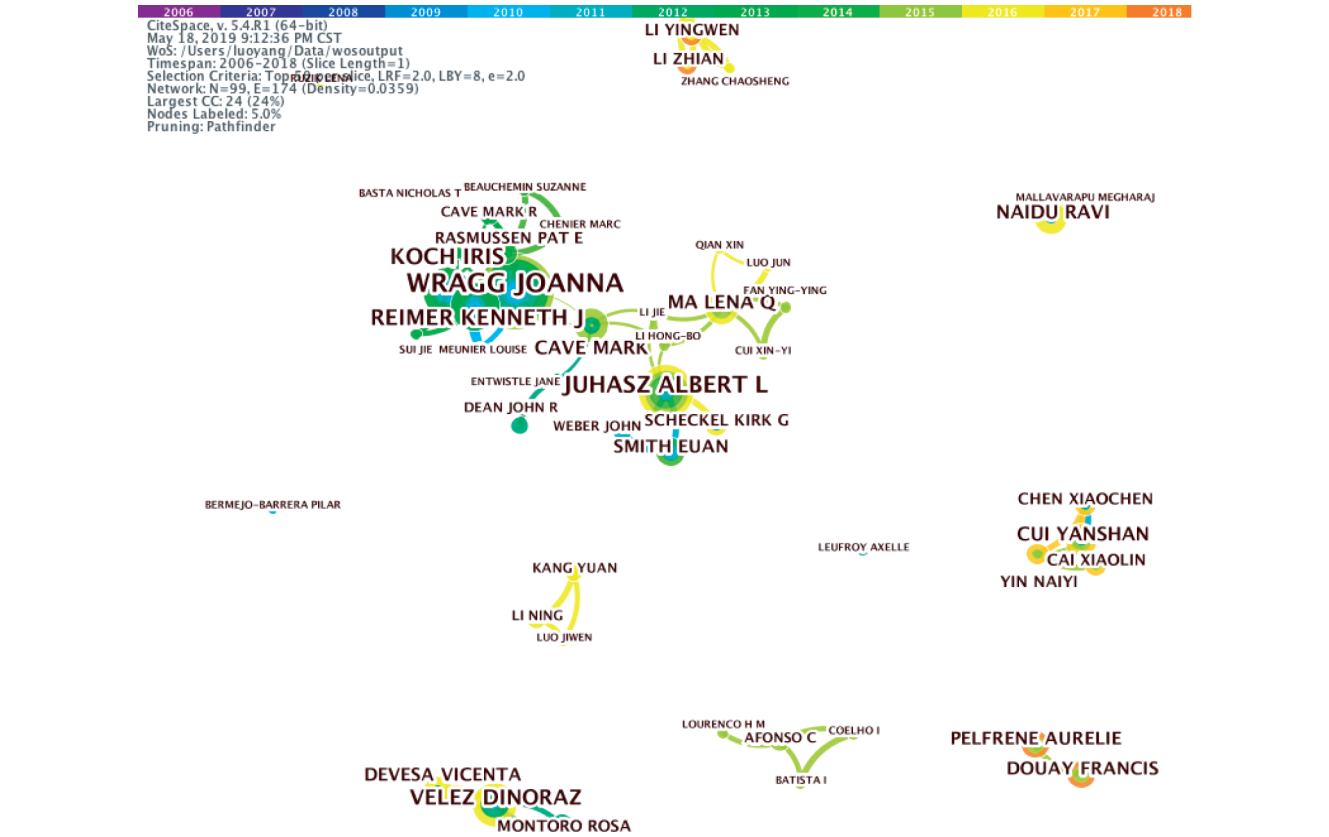
2.3 关于重金属生物可给性的研究热点和趋势

关键词是文献主要内容和研究主题的高度提炼,通过对高频关键词分析,可鉴别该领域的主要研究路径和热点^[37]。本文基于CiteSpace软件中Key word分析功能,对关键词进行分析,得到关键词共现网络图谱(图3和图4)及关键词分布表(表5)。关键词的中介中心性是测度节点在网络中重要性的一个指标,此

表2 关于重金属生物可给性研究发文量前10的机构

Table 2 Organization of top 10 on the publications of heavy metal bioaccessibility

机构 Institution	英文发文量/篇 Publications	机构 Institution	中文发文量/篇 Publications
Chinese Academy of Sciences	46	中国科学院生态环境研究中心	9
British Geological Survey	19	农业农村部环境保护科研监测所	6
University of South Australia	15	中国科学院研究生院	5
CSIC	11	中国科学院大学资源与环境学院	5
Royal Military College of Canada	10	河北农业大学资源与环境科学学院	4
Nanjing University	10	西南大学资源环境学院	3
University Florida	9	广西大学轻工与食品工程学院	3
USEPA	8	广西壮族自治区环境监测中心站	3
University Newcastle	6	安徽师范大学国土资源与旅游学院	3
Cooperat Res Ctr Contaminat Assessment and Remediat	6	四川大学建筑与环境学院环境科学与工程系	3



节点大小代表作者的发文量,节点与节点之间的连线表明作者之间的合作
The node size represents the author's published volume, and the connection between the node and the node indicates cooperation between the authors

图2 Web of Science™数据库中作者合作图谱
Figure 2 Author collaboration map in the Web of Science™ database

表3 关于重金属生物可给性研究发文量前10的作者
Table 3 Author of top 10 on the publications of heavy metal bioaccessibility

作者 Author	英文 发文量/篇 Publications	中心度 Centrality	作者 Author	中文 发文量/篇 Publications	中心度 Centrality
Wragg Joanna	14	3.53	崔岩山	12	0.31
Juhasz Albert L	10	0	黄益宗	4	0.22
Koch Iris	9	3.15	尹乃毅	4	0
Reimer Kenneth J	9	3.15	武家园	2	0
Velez Dinoraz	8	0	李泽姣	2	0
Ma Lena Q	6	0	王晓飞	2	0
Cui YanShan	6	0	孙国新	2	0
Naidu Ravi	6	0	保琼莉	2	0
Cave Mark	6	0	闭向阳	2	0
Smith Euan	5	0	龚春生	2	0

类节点在网络中起到“沟通桥梁”的作用^[38]。本文按照中介中心性对图4、图5中的关键词进行筛选排序,从而可对本领域的研究路径及热点进行辨识。

在2006—2010年出现“淋巴细胞”“Caco-2细胞”

表4 Web of Science™数据库中作者共被引频次表
Table 4 The author cited in the Web of Science™ database

排名 Rank	作者 Author	共被引频次 Frequency	半衰期 Half-life
1	Ruby M V	189	5
2	Oomen A G	156	6
3	Juhasz A L	106	5
4	Wragg J	100	5
5	Rodriguez R R	87	4
6	Intawongse M	70	6
7	USEPA	58	7
8	Anonymous	57	4
9	Van de W	53	4
10	Denys S	53	5

等关键词,但关键词呈现出中介中心性较小且数量较少的特征。这表明在该阶段的研究主题侧重于结合细胞模型研究环境介质中重金属的生物有效性/生物可给性。例如,源自人体结肠癌细胞的Caco-2细胞,由于细胞形态学、标志酶的表达及渗透特性与人体小肠上皮细胞相似,被广泛应用于研究不同暴露场景下

多种重金属污染物的吸收、转运和代谢等机制^[39]。利用 Caco-2 细胞模型在重金属的转运与吸收方面的优点,将 Caco-2 细胞模型与体外消化试验测定的重金属生物可给性研究相结合,以此更加客观评估重金属对人体健康产生的风险。利用细胞模型结合体外测试方法模拟重金属的吸收转运代谢情况已成为该领域研究重点,但由于各类实验室组织细胞培养条件、培养方式和试验标准的不同,会导致在预测重金属的

渗透性试验数据上存在差异。因此,通过细胞培养过程的标准化和试验条件要求的标准化,可进一步提升细胞模型模拟重金属摄取、转运和代谢研究过程中的可贡献价值。

在 2011—2014 年间,重金属生物可给性研究侧重于膳食暴露评估。通过膳食途径进入人体的污染物,通常需要在胃肠道阶段经历消化过程,然后随血液循环累积到人体不同组织器官中,引起器官的组织

表 5 关于重金属生物可给性研究的关键词共现分布表

Table 5 Keywords co-occurrence distribution table for heavy metal bioaccessibility research

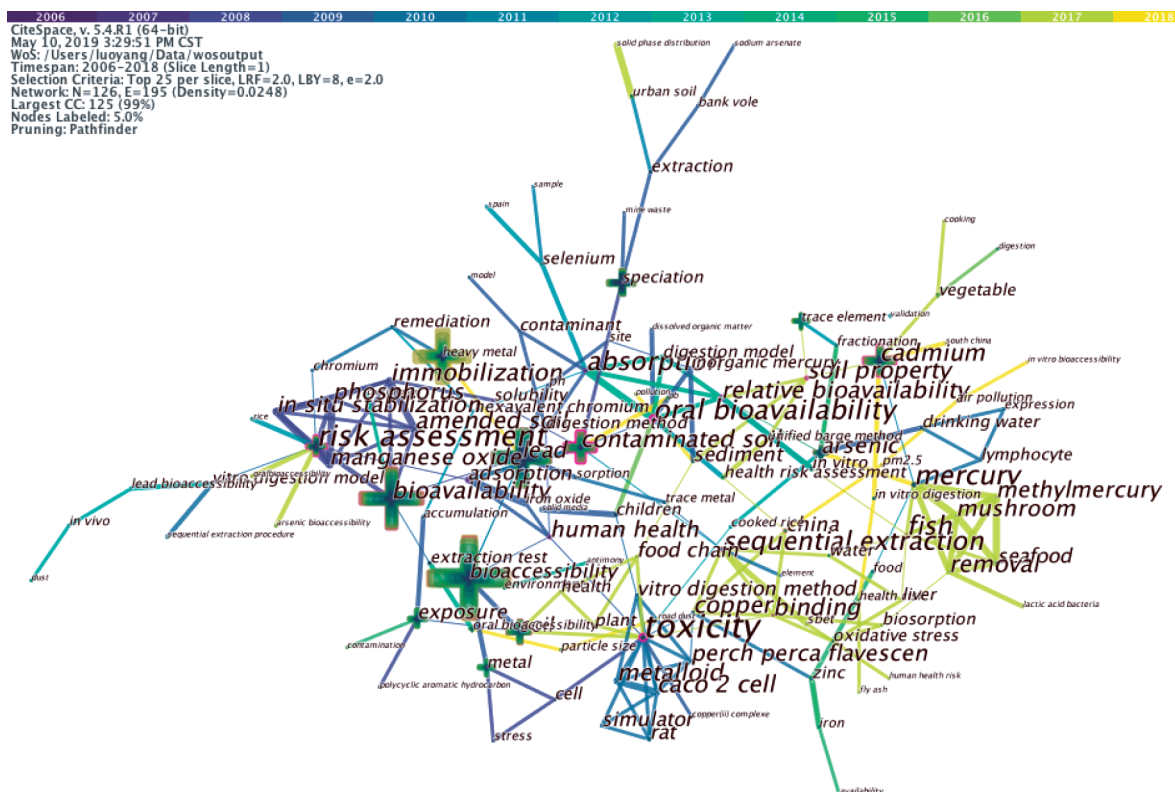
年份 Year	关键词(频次,中介中心性) Keywords (Frequency, Centrality)	年份 Year	关键词(频次,中介中心性) Keywords (Frequency, Centrality)
2006—2010	Lead (138, 0.43)	2015—2018	Binding (2, 0.16)
	Toxicity (26, 0.41)		China (17, 0.15)
	Bioavailability (149, 0.36)		Soil property (2, 0.14)
	Bioaccessibility (201, 0.27)		Fish (6, 0.08)
	Sequential extraction (38, 0.25)		PM _{2.5} (3, 0.06)
	Human health risk (31, 0.25)		Food chain (2, 0.04)
	Contaminated soil (88, 0.25)		Biosorption (2, 0.04)
	Cadmium (88, 0.25)		Arsenic bioaccessibility (7, 0.04)
	Speciation (70, 0.24)		Sbet (3, 0.03)
	Health risk assessment (21, 0.21)		Liver (2, 0.01)
	Mercury (18, 0.24)		Biochar (3, 0.01)
	Arsenic (55, 0.21)		Road dust (4, 0)
	Absorption (8, 0.18)		Plant (2, 0)
	Extraction test (31, 0.16)		In vitro bioaccessibility (3, 0)
	Copper (15, 0.16)		Human health risk (5, 0)
	Vitro digestion (18, 0.13)		Fly ash (2, 0)
	pH (2, 0.07)		Cooking (2, 0)
	Heavy metal (138, 0.06)	2006—2010	重金属 (39, 0.62)
	Oral bioaccessibility (10, 0.03)		土壤 (23, 0.42)
	Immobilization (2, 0.05)		生物可给性 (53, 0.29)
	Bank vole (2, 0.03)		生物有效性 (9, 0.21)
2011—2014	Lymphocyte (2, 0.02)	2011—2014	化学形态 (8, 0.11)
	Caco-2 cell (2, 0.01)		Pb (3, 0.05)
	Accumulation (8, 0.01)		健康风险评估 (16, 0.43)
	Rat (8, 0)		大米 (2, 0.05)
	Relative bioavailability (23, 0.2)	2015—2018	体外消化方法 (4, 0.11)
	Food (19, 0.12)		重金属污染 (3, 0.05)
	Cooked rice (3, 0.07)		Extraction test pbet (7, 0.15)
	Selenium (11, 0.06)		Jepidium sativum (1, 0.06)
	Lead bioaccessibility (3, 0.06)		农田土壤 (3, 0.12)
	In vitro digestion model (24, 0.06)		Usepa 模型 (1, 0.05)
	Oral bioaccessibility (22, 0.06)		羟基磷石灰 (2, 0.06)
	Particle size (6, 0.03)		
	Seafood (5, 0)		
	Rice (7, 0)		

形态和新陈代谢的变化,从而对人体产生毒理效应^[1]。美国和欧盟在这方面的研究一直处于前沿,已建立属于本国人群的膳食暴露评估模型,国内研究者应从中国污染物暴露情况、人群特征、生活习惯等方面入手,尽快建立适用于中国人群的膳食暴露评估模型,更加准确的反映中国人群的环境健康风险。

在2015—2018年间,“中国”作为新的关键词出现且频次(17)及中介中心性(0.15)较高,表明近年来中国在该领域表现较为活跃。关键词“食物链”体现出学者对本领域研究逐渐转向宏观、系统的角度,从污染源-污染暴露途径-污染物最终受体这一整体出发,探究污染物释放-转运-转化机理,通过对食物链途径的有效控制,减轻人体在不同暴露途径下的环境健康风险。环境介质也进一步扩展到“PM_{2.5}、道路灰尘、飞灰”等,间接地说明随着工业的快速发展,大气污染日益严重^[40],大气悬浮颗粒中重金属的生物可给性也成为国内外研究热点。

结合3个阶段的关键词共现分析,发现关键词“铅”贯穿整个研究阶段,主要原因可能是人类和工业等活动能产生大量的铅元素进入到环境中,而铅具有溶解度小、不易降解等特性,容易滞留在环境介质中对生态环境及人体健康构成巨大的潜在风险,故在分析阶段对重金属铅的研究偏多。近年来,对于砷污染的研究也逐渐增多,这可能是由于多个国家发生了较大的砷污染事件^[41-46],而我国也是受砷污染最为严重的国家之一^[47-48]。砷能在人类的肝肾器官当中积累,特别是在人体毛发与指甲中积存,在长时间作用下,人体容易出现砷中毒现象。大多数文献^[49-52]利用In vitro方法研究砷的生物可给性及探究不同物质对砷生物可给性的影响,通过HI(总非致癌风险指数)和TCR(总致癌风险指数)评估重金属砷的潜在风险,避免爆发大面积的砷中毒事件。

相较于国外,国内关于重金属生物可给性研究起步较晚。从关键词共现图谱(图4)来看,节点与节点



紫色外圈表示中心度,厚度与中心度大小成正比;连线颜色表示年限;节点大小与关键词出现频次成正比。

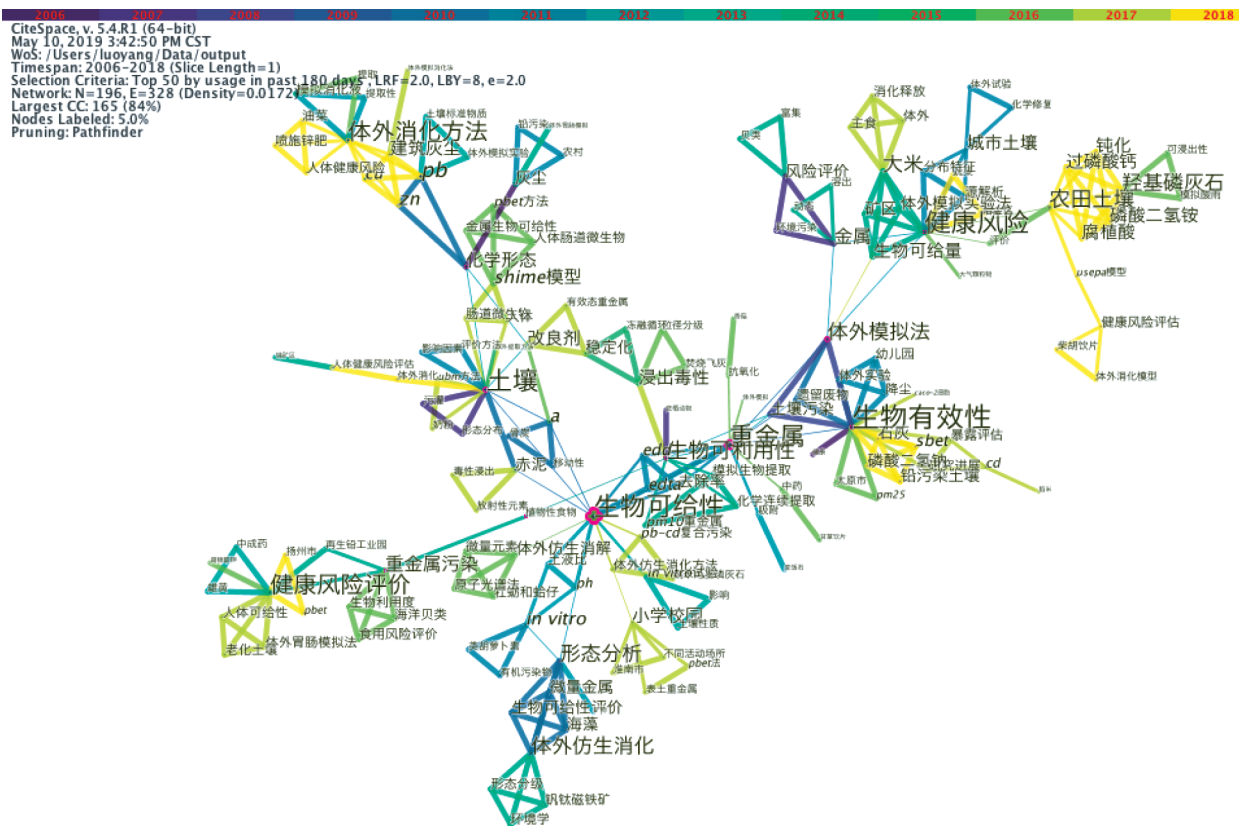
CiteSpace设置:Node Types 设置为key word;Selection Criteria设置为Top=25;其他均为默认设置

The purple outer circle indicates the center degree, and the thickness is proportional to the center degree; the line color indicates the age; the node size is proportional to the frequency of occurrence of the key word. CiteSpace settings: Node Types sets as key word;

Selection Criteria sets as Top=25; others are default settings

图3 Web of Science™数据库中关于重金属生物可给性关键词的共现网络图谱

Figure 3 Co-occurrence network map of heavy metal bioaccessibility key words in Web of Science™ database



由于CNKI获取的文献资料较少,故阈值增大。CiteSpace设置:Node Types 设置为key word;Term Type 设置为Noun Phrases;

Selection Criteria 设置为Top=100, Top=100%, g-index 设置为k=100;其他均为默认设置

Since CNKI has less literatures, the threshold increases. CiteSpace settings: Node Types sets as key word; Term Type sets as Noun Phrases;

Selection Criteria sets as Top=100, Top=100%, g-index sets as k=100; others are default settings

图4 CNKI数据库中关于重金属生物可给性关键词的共现网络图谱

Figure 4 Co-occurrence network map of heavy metal bioaccessibility keywords in CNKI database

之间的连线颜色较为鲜艳,说明在近几年衍生出的研究热点较多。将重金属生物可给性研究主题集聚成两个阶段和两条演化路径。以2015年为两阶段的分界点,2006—2014年为第一阶段,研究内容较少,主要研究路径为“重金属-化学形态/体外消化法-生物有效性/生物可给性-健康风险评价”;2015—2018年为第二阶段,该阶段研究内容较为丰富,主要研究路径为“农田土壤-钝化剂(羟基磷灰石、过磷酸钙、腐植酸钾等)-体外消化模型-健康风险评价”,该路径探究钝化剂对重金属生物可给性的影响^[53-54],腐植酸钾可以与重金属发生络合反应,降低重金属的生物有效性,抑制重金属向农产品体内迁移;水不溶性(磷酸盐岩、磷灰石等)含磷材料可以将重金属固定在土壤中,降低重金属的迁移性和生物可给性。从关键词共现图谱线条的颜色上看,第二阶段为该领域的研究前沿及热点。

突变词是指短时间内使用频率骤增的关键词,可

以表征研究前沿的发展趋势。通过对关键词突变性的分析,可以了解研究热点的动态变化。因CNKI数据库中收集到的文献数量较少,关键词频次达不到CiteSpace突现性要求,故对国内文献不做关键词突现性分析。从英文文献的突变性关键词来看(图5),该领域研究呈现出多元化特征,通过进一步的文献梳理,可以总结出以下3个阶段性前沿分析,一是生物可给性的试验方法对比,包括吸附、白鼠、体外消化模型、体外生物可给性等关键词;二是健康风险评价的暴露评估,包括食品、灰尘、土壤、沸水等关键词;三是健康风险评价的潜在风险分析,包括潜在风险、毒性、微量元素等关键词。

随着监测手段和试验技术的不断完善,利用人体生物可给性的体外模拟方法,对重金属在人群胃肠系统中消化吸收研究起到一定的推动作用。但随着研究的深入,该项工作目前仍存在一些局限性,尽管目前国际上已发展演化出十余种体外模拟方法,然而不

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2006—2018
adsorptio	2006	4.087 1	2008	2010	
trace metal	2006	3.360 8	2008	2011	
drinking water	2006	2.776 4	2009	2010	
arsenic concentration	2006	2.776 4	2009	2010	
mercury	2006	4.395 4	2010	2012	
copper	2006	3.075 6	2010	2012	
rat	2006	3.490 6	2010	2012	
food	2006	3.192 6	2011	2013	
toxic element	2006	3.253 9	2011	2012	
extraction	2006	3.375	2011	2012	
zinc	2006	3.024 8	2012	2015	
toxicity	2006	3.462 9	2012	2014	
iron	2006	3.247 4	2012	2015	
trace element	2006	3.484 4	2012	2016	
human health risk assessment	2006	4.376 9	2013	2015	
vitro bioaccessibility	2006	4.499 7	2013	2016	
dust	2006	3.178 6	2013	2015	
bioaccessible fraction	2006	3.714 5	2014	2015	
metal bioaccessibility	2006	4.308 1	2014	2016	
vitro digestion method	2006	3.996 2	2014	2016	
particle size	2006	2.678 6	2014	2015	
China	2006	3.157 6	2015	2018	
health risk	2006	6.512 1	2015	2018	
potential risk	2006	2.954 9	2016	2018	
sequential extracton procedure	2006	2.664 7	2016	2018	

研究时间段 2006—2018 年,每个小矩形代表时间 1 年,红色较粗小矩形表示突现年份

Study period is 2006—2018, each small rectangle represents 1 year, red thicker small rectangle indicates the year of emergence

图 5 Web of ScienceTM 数据库中关于重金属生物可给性的关键词共现网络突现词

Figure 5 Emergent keywords co-occurrence network for heavy metal bioaccessibility in Web of ScienceTM database

同试验方法对同一类型污染物样品的模拟结果存在差异,这与试验过程中处理方式和参数设置的差异性有关。因此需要建立不同环境介质中不同重金属的人体生物可给性的国际通用的标准测试方法。此外,由于不同人群活动方式和生理机能的差异,导致其消化吸收重金属量与人体可耐受量存在较大差别,需要进一步加强不同模拟试验方法的适用性研究,以为重金属人体健康风险评估提供更科学的依据。

3 结论

(1)在过去 13 年里,关于重金属生物可给性研究的发文数量呈波动式增长态势,这表明研究人员对该领域的关注度越来越高。我国在所有国家中发文数量最多,表明在该研究领域表现最为活跃。

(2)通过关键词共现分析发现,本研究领域在国际上可分为 3 个阶段:2006—2010 年研究主题侧重于细胞模型,2011—2014 年研究侧重于膳食暴露评估,2015—2018 年研究趋势变化为系统地分析污染物释放-转运-转化过程,环境介质也进一步扩大到大气、

灰层、PM_{2.5} 等。

(3)相较于国外,国内关于该领域的研究起步较晚,研究趋势大体分为两个研究阶段及两条研究路径。2006—2014 年为第一阶段,主要研究路径为“重金属-化学形态/体外消化法-生物可给性/生物有效性-健康风险评价”;2015—2018 年为第二阶段,该阶段的研究路径为“农田土壤-钝化剂(羟基磷灰石、过磷酸钙、腐植酸钾等)-体外消化模型-健康风险评价”,第二阶段为本领域的研究前沿及热点。

参考文献:

- [1] 和君强,刘代欢,邓 林,等. 农田土壤镉生物有效性及暴露评估研究进展[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(6): 69-82.
HE Jun-qiang, LIU Dai-huan, DENG Lin, et al. Bioavailability and exposure assessment of cadmium in farmland soil: A review[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, 12(6): 69-82.
- [2] 刘 蕊,张 辉,勾 昕,等. 健康风险评估方法在中国重金属污染中的应用及暴露评估模型的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1239-1244.
LIU Rui, ZHANG Hui, GOU Xin, et al. Approaches of health risk assessment for heavy metals applied in China and advance in exposure assessment models: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(7): 1239-1244.
- [3] Ruby M V, Schoof R, Brattin W, et al. Advances in evaluating the oral bioavailability of inorganics in soil for use in human health risk assessment[J]. *Environmental Science Technology*, 1999, 33(21): 3697-3705.
- [4] 付 瑾,崔岩山. 食物中营养物质及污染物的生物可给性研究进展[J]. 生态毒理学报, 2011, 6(2): 113-120.
FU Jin, CUI Yan-shan. Advances in bioaccessibility of nutrients and pollutants in food[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2011, 6(2): 113-120.
- [5] Kulp K S, Fortson S L, Knize M G, et al. An in vitro model system to predict the bioaccessibility of heterocyclic amines from a cooked meat matrix[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2004, 41(12): 1701-1710.
- [6] Intawongse M, Dean J R. Use of the physiologically-based extraction test to assess the oral bioaccessibility of metals in vegetable plants grown in contaminated soil[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152(1): 60-72.
- [7] Li H B, Cui X Y, Li K, et al. Assessment of in vitro lead bioaccessibility in house dust and its relationship to in vivo lead relative bioavailability[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8548-8555.
- [8] 付 瑾,崔岩山. In vitro 系统评价胃肠液 pH 及土液比对铅、镉、砷生物可给性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 245-251.
FU Jin, CUI Yan-shan. In vitro model system to evaluate the influence of pH and soil-gastric/intestinal juices ratio on bioaccessibility of Pb, Cd and As in two typical contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2): 245-251.
- [9] 崔岩山,陈晓晨,付 瑾. 污染土壤中铅、砷的生物可给性研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 480-486.
CUI Yan-shan, CHEN Xiao-chen, FU Jin. Progress in study of bioac-

- cessibility of lead and arsenic in contaminated soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(2):480-486.
- [10] 徐 笠, 陆安祥, 王纪华, 等. 食物中重金属的生物可给性和生物有效性的研究方法和应用进展[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(1):89-97.
- XU Li, LU An-xiang, WANG Ji-hua, et al. Research methods and applications of bioaccessibility and bioavailability of heavy metals in food[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, 12(1):89-97.
- [11] 尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 等. 应用SHIME模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(6):2353-2358.
- YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, et al. Effects of human gut microbiota on bioaccessibility of soil Cd, Cr and Ni using SHIME model[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(6):2353-2358.
- [12] Rodrigues S M, Cruz N, Carvalho L, et al. Evaluation of a single extraction test to estimate the human oral bioaccessibility of potentially toxic elements in soils: Towards more robust risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635:188-202.
- [13] Wang P F, Yin N Y, Cai X L, et al. Nutritional status affects the bioaccessibility and speciation of arsenic from soils in a simulator of the human intestinal microbial ecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644:815-821.
- [14] Li H B, Li J, Juhasz A L, et al. Correlation of in vivo relative bioavailability to in vitro bioaccessibility for arsenic in household dust from China and its implication for human exposure assessment[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 48(23):13652-13659.
- [15] Bi X Y, Li Z G, Sun G Y, et al. In vitro bioaccessibility of lead in surface dust and implications for human exposure: A comparative study between industrial area and urban district[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 297:191-197.
- [16] Cheng Z, Chen L J, Li H H, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metals exposure via household dust from urban area in Chengdu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619:621-629.
- [17] Huang H, Jiang Y, Xu X Y, et al. In vitro bioaccessibility and health risk assessment of heavy metals in atmospheric particulate matters from three different functional areas of Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610:546-554.
- [18] Calatayud M, Bralatei E, Feldmann J, et al. Transformation of arsenic species during in vitro gastrointestinal digestion of vegetables[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(49):12164-12170.
- [19] 兰砥中, 雷 鸣, 周 爽, 等. 体外模拟实验法评价湘南某矿区大米中重金属的人体健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10):1897-1903.
- LAN Di-zhong, LEI Ming, ZHOU Shuang, et al. Health risk assessment of heavy metals in rice grains from a mining-impacted area in south Hunan by in vitro simulation method[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10):1897-1903.
- [20] Gong Y, Nunes Luis M, Greenfield Ben K, et al. Bioaccessibility-corrected risk assessment of urban dietary methylmercury exposure via fish and rice consumption in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630:222-230.
- [21] Jayawardene I, Saper R, Lupoli N, et al. Determination of in vitro bioaccessibility of Pb, As, Cd and Hg in selected traditional Indian medicines[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2010, 25(8):1275-1282.
- [22] 褚卓栋, 柳晓娟, 赵全利, 等. 含雄黄的中成药中砷的生物可给性及其初步风险评价[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(2):238-243.
- CHU Zhuo-dong, LIU Xiao-juan, ZHAO Quan-li, et al. Bioaccessibility and preliminary risk assessment of arsenic in Chinese patent medicines containing realgar[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, 8(2):238-243.
- [23] 陆 伟, 钱 坤, 唐祥彬. 文献下载频次与被引频次的相关性研究: 以图书情报领域为例[J]. 情报科学, 2016, 34(1):3-8.
- LU Wei, QIAN Kun, TANG Xiang-bin. Correlation analysis between document citation frequency and download frequency[J]. *Information Science*, 2016, 34(1):3-8.
- [24] 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.
- DU Zhi-peng, SU De-chun. Bibliometric analysis of the effects of heavy metal pollution remediation technologies on paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11):2409-2417.
- [25] Zhu J, Hua W J. Visualizing the knowledge domain of sustainable development research between 1987 and 2015: A bibliometric analysis [J]. *Scientometrics*, 2017, 110(2):893-914.
- [26] 张 波, 曲建升, 王金平. 国际生态学研究发展态势文献计量分析 [J]. 生态环境学报, 2011, 20(4):786-792.
- ZHANG Bo, QU Jian-sheng, WANG Jin-ping. A bibliometrical analysis of competitive situation in international ecological research[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4):786-792.
- [27] 詹丽玉, 练 勤, 韩布新. 1992—2017年中文论文中 Mental Health 的五个中文译词的 CiteSpace 可视化分析[J]. 中国心理卫生杂志, 2018, 32(7):583-588.
- ZHAN Li-yu, LIAN Qin, HAN Bu-xin. Visualization analysis of the five Chinese terms translated from mental health by CiteSpace[J]. *Chinese Mental Health Journal*, 2018, 32(7):583-588.
- [28] 赵庆龄, 张乃弟, 路文如. 土壤重金属污染研究回顾与展望 II——基于三大学科的研究热点与前沿分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(7):102-106, 137.
- ZHAO Qing-ling, ZHANG Nai-di, LU Wen-ru. Research review and prospect on soil heavy metals pollution II: Research focus and analysis based on three major disciplines[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(7):102-106, 137.
- [29] 李文斌, 李 雅, 邓红艳, 等. 有机、重金属污染物同时吸附的前沿态势文献计量分析[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12):2177-2184.
- LI Wen-bin, LI Ya, DENG Hong-yan, et al. A bibliometrical analysis of the exploration research of simultaneous adsorption of organic pollutants and heavy metal ions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(12):2177-2184.
- [30] 帅 鸿, 欧阳迪庆, 陈玉成. 基于文献计量的我国农地重金属研究热点分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4):688-695.
- SHUAI Hong, OUYANG Di-qing, CHEN Yu-cheng. Hotspot issues of heavy metals in China's farmland based on bibliometrics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4):688-695.

- [31] 祝 薇, 向雪琴, 侯丽朋, 等. 基于CiteSpace软件的生态风险知识图谱分析[J]. 生态学报, 2018, 38(12):4504-4515.
- ZHU Wei, XIANG Xue-qin, HOU Li-peng, et al. Knowledge mapping analysis of ecological risk research based on CiteSpace[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12):4504-4515.
- [32] Ruby M V, Davis A, Kempton J H, et al. Lead bioavailability: Dissolution kinetics under simulated gastric conditions[J]. *Environmental Science and Technology*, 1992, 26(6):1242-1248.
- [33] Oomen A G, Hack A, Minekus M, et al. Comparison of five in vitro digestion models to study the bioaccessibility of soil contaminants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(15):3326-3334.
- [34] Oomen A G, Rempelberg C J M, Bruil M A, et al. Development of an in vitro digestion model for estimating the bioaccessibility of soil contaminants[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, 44(3):281-287.
- [35] Oomen A G, Tolls J, Kruidenier M, et al. Availability of polychlorinated biphenyls (PCBs) and lindane for uptake by intestinal Caco-2 cells [J]. *Environ Health Perspect*, 2001, 109(7):731-737.
- [36] 崔岩山, 陈晓晨. 土壤中镉的生物可给性及其对人体的健康风险评估[J]. 环境科学, 2010, 31(2):403-408.
- CUI Yan-shan, CHEN Xiao-chen. Bioaccessibility of soil cadmium and its health risk assessment[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(2):403-408.
- [37] 秦晓楠, 卢小丽, 武春友. 国内生态安全研究知识图谱——基于CiteSpace的计量分析[J]. 生态学报, 2014, 34(13):3693-3703.
- QIN Xiao-nan, LU Xiao-li, WU Chun-you. The knowledge mapping of domestic ecological security research: Bibliometric analysis based on CiteSpace[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13):3693-3703.
- [38] 陈超美(著), 陈 悦(译), 侯剑华(译), 等. CiteSpace II: 科学文献中新趋势与新动态的识别与可视化[J]. 情报学报, 2009, 28(3):401-421.
- CHEN Chao-mei, CHEN Yue, HOU Jian-hua, et al. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature[J]. *Journal of the China Society for Scientific and Technical Information*, 2009, 28(3):401-421.
- [39] 王振洲, 崔岩山, 张震南, 等. Caco-2细胞模型评估金属人体生物有效性的研究进展[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(6):1027-1034.
- WANG Zhen-zhou, CUI Yan-shan, ZHANG Zhen-nan, et al. Evaluation on the human bioavailability of metals using Caco-2 cell model: A review[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2014, 9(6):1027-1034.
- [40] 赵 朕, 罗小三, 索 晨, 等. 大气PM_{2.5}中重金属研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2017, 34(3):273-277.
- ZHAO Zhen, LUO Xiao-san, SUO Chen, et al. Research advance on heavy metals in atmospheric PM_{2.5}[J]. *Journal of Environment and Health*, 2017, 34(3):273-277.
- [41] Deba P S, Kunnath S S. Arsenic poisoning in West Bengal[J]. *Science*, 1996, 274(5291):1287-1288.
- [42] Nickson R, McArthur J, Burgess W, et al. Arsenic poisoning of Bangladesh groundwater[J]. *Nature*, 1998, 395(6700):338.
- [43] Chowdhury T R, Basu G K, Mandal B K. Arsenic poisoning in the Ganges delta[J]. *Nature*, 1999, 401(6753):545-546.
- [44] Karim M M. Arsenic in groundwater and health problems in Bangladesh[J]. *Water Research*, 2000, 34:304-310.
- [45] Christen K. The arsenic threat worsens[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(13):286A-291A.
- [46] Pandey P K, Yadav S, Nair S, et al. Arsenic contamination of the environment: A new perspective from central-east India[J]. *Environment International*, 2002, 28(4):235-245.
- [47] 肖细元, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 中国主要含As矿产资源的区域分布与As污染问题[J]. 地理研究, 2008, 27(1):201-212.
- XIAO Xi-yuan, CHEN Tong-bin, LIAO Xiao-yong, et al. Regional distribution of arsenic contained minerals and arsenic pollution in China[J]. *Geographical Research*, 2008, 27(1):201-212.
- [48] Rodriguez-Lado L, Sun G F, Berg M, et al. Groundwater arsenic contamination throughout China[J]. *Science*, 2013, 341(6148):866-868.
- [49] 冯 凯, 鲍建国, 孔淑琼, 等. SBRC体外模拟法对含砷矿物生物可给性的研究[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(11):33-43.
- FENG Kai, BAO Jian-guo, KONG Shu-qiong, et al. Bioaccessibility of arsenic bearing minerals using in vitro extraction method of SBRC [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(11):33-43.
- [50] 王 俊, 王青清, 魏世强. 腐植酸对土壤砷化学形态及生物可给性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6):1124-1132.
- WANG Jun, WANG Qing-qing, WEI Shi-qiang. Chemical speciation and bioaccessibility of arsenate in soil as influenced by humic acids [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6):1124-1132.
- [51] 钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 等. 利用in vitro方法研究不同铁矿对土壤砷生物可给性的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(3):1201-1208.
- ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, et al. Effect of different iron minerals on bioaccessibility of soil arsenic using in vitro methods[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(3):1201-1208.
- [52] 王振洲, 崔岩山, 张震南, 等. 生菜和油菜中砷的生物可给性及其对人体的健康风险评估[J]. 中国科学院大学学报, 2015, 32(6):735-742.
- WANG Zhen-zhou, CUI Yan-shan, ZHANG Zhen-nan, et al. Bioaccessibility of arsenic in lettuce and rape and its health risk assessment [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 32(6):735-742.
- [53] 苏彬彬, 崔红标, 樊恒亮, 等. 改良剂对铜镉污染土壤的修复效果及健康风险评估[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(5):446-452.
- SU Bin-bin, CUI Hong-biao, FAN Heng-liang, et al. Long-term immediate effect of three amendments on polluted soil near Guixi smelter and health risk assessment[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(5):446-452.
- [54] 刘 苗, 朱宇恩, 李海龙, 等. 腐植酸钾对土壤铅化学形态、生物可给性及健康风险的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(1):17-22.
- LIU Miao, ZHU Yu-en, LI Hai-long, et al. Effect of potassium humate on chemical fractionation, bioaccessibility and the health risk assessment of lead (Pb) in soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(1):17-22.