

Quantitative Analysis of Literatures Related to Nanotechnology in the Field of Environment

Xueqin Chen, Yuzhang Liu, Linchao Zheng, Chuanbo Zhang, Binbin Guo

School of River and Ocean Engineering, Chongqing
Email: 1024203687@qq.com, 1226044938@qq.com

Received: Mar. 4th, 2020; accepted: Mar. 25th, 2020; published: Apr. 1st, 2020

Abstract

Because of the unique nature of nanomaterials, the research on Nanomaterials in the field of environmental science at home and abroad is endless. In order to explore the hotspots and progress of nanotechnology in the field of environmental science, the research on nanotechnology from 2015 to 2019 was analyzed with the bibliometrics method by means of CiteSpace software. With the key word "Nano", 3005 articles related to environmental science were retrieved on "Web of Science". The results show that the research in recent five years mainly focuses on three aspects: "the performance and optimization", "the environmental effects" and "the application of nanotechnology". This study can reflect the current research hotspots and development directions of nanotechnology in the field of environmental science, and provide scientific references for readers.

Keywords

CiteSpace Software, Nano, Environmental Science, Metrological Analysis

环境领域内纳米技术相关文献计量分析

陈雪芹, 刘玉章, 郑林超, 张传波, 郭彬彬

重庆交通大学河海学院, 重庆
Email: 1024203687@qq.com, 1226044938@qq.com

收稿日期: 2020年3月4日; 录用日期: 2020年3月25日; 发布日期: 2020年4月1日

摘要

由于纳米材料性质的独特性, 国内外在环境科学领域对纳米材料的研究也是层出不穷。为了深入探究环

境科学领域纳米技术相关的研究热点与进展,利用文献计量学方法,结合CiteSpace软件,对2015~2019年国际环境科学领域纳米相关研究进行了分析。以“Nano”为关键词,在“Web of Science”上共检索环境科学相关文献3005篇。发文分析结果表明近五年研究主要集中在“纳米材料的性能与优化”“纳米材料的环境效应”以及“纳米技术的应用”三个方面。本研究可以反映现阶段纳米技术在环境科学领域内的研究热点及发展方向,为读者提供科学的参考。

关键词

CiteSpace软件, 纳米, 环境科学, 计量分析

Copyright © 2020 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

近年来,纳米技术高速发展,各种纳米材料层出不穷,同时纳米技术与多学科相结合,在工农业、物理学、化学、材料学、机械学乃至医疗领域等都有广泛的应用。世界各国纷纷意识到纳米科技在社会的经济发展、科学技术进步等方面的巨大潜力,并加大了对于纳米技术的研究强度。我国也于2003年成立国家纳米科学研究中心,在2006年将纳米科学与技术研究列为《国家中长期科学技术发展规划纲要》的四大重点学科之一。基于纳米材料性质的独特性,其在水处理(纳米吸附剂[1]、光催化剂[2]等)、大气污染治理(大气中甲醛的处理[3]、汽车尾气处理[4]、空气净化[5]等)、土壤污染修复(有机农药残留的降解[6]、重金属污染修复[7])、环境监测(纳米材料制造的化学传感器[8])等环境科学领域也有着广泛的应用。同时,纳米材料的环境行为,即环境中金属纳米粒子、有机物纳米粒子在水体、土壤、植物等环境介质中形态的变化、迁移的规律以及纳米颗粒生物毒性的防治也越来越受到研究人员的重视[9][10][11]。

文献计量法是以文献为研究对象,通过科学统计和分析展现其分布规律,从而预测某一学科领域的发展方向以及识别学术前沿[12]。从20世纪60年代至今,通过信息分析领域专家的不懈努力将进行文献计量研究的可视化呈现逐步完善[13][14][15],新兴信息可视化工具现今无论在国内还是国外都是一项日趋成熟的技术方法,加以CiteSpace、VOS Viewer等信息检索可视化工具的引入,文献计量法能对文本进行更深入的数据挖掘,例如直观而易于操作的绘制知识图谱,在最近几年通过利用信息检索可视化工具来研究某领域逐渐成为我国的一个研究热点[16]。本文所运用的CiteSpace软件是可运用共引分析对某一学科领域文献进行科学计量分析,得到参考意义极强的计量结果,其广泛应用于聚合算子分析[17]、医学发展趋势分析[18]、经济发展分析[19]等领域。本文以Web of Science (WOS)数据库文献为基础,利用CiteSpace软件提供的科学知识图谱的可视化技术对环境科学领域纳米相关文献进行科学计量分析,直观反映了2015~2019年国际上纳米技术相关研究的研究进展及研究热点。

2. 文献计量学工具

2.1. 国外文献计量工具

文献计量学以宏观数据研究为基础,其客观性、量化及模型化的特点被大多学科广泛使用,由于研究入门简单,在国外受到例如美国科学情报研究所和美国德雷克塞尔大学等机构的青睐[20],常见的文献计量分析可视化研究工具有Gaffield [21]开发的HistCite软件针对含有引文信息的文献题录数据,并按

照年找编排的重要文献、作者和期刊列表,能生成实时动态的引文编年图;Persson 编写的 Bibexcel 软件[22]可对数据库检索记录进行分析,能进行频次统计,能进行关键词与引文的共现查找并生成矩阵文件;Linton Freeman 编写 UCINET 软件[23]以网络结构分析方面功能为最重要的功能,可以进行中心度测量;美籍华人陈超美开发的 CiteSpace 软件等等。

2.2. 国内文献计量工具

在国内文献计量学研究最为积极的机构往往为众多高校,例如中国医科大学崔雷对文献共引分析等进行了研究并开发 Bicombo 书目共现分析系统[24] [25] [26] [27]。南京大学魏建香[28]研究文档聚类技术并构建学科交叉知识发现和可视化模型,开发了“VIK”,浙江大学刘启元等[29]开发了“文献题录信息统计分析工具(SATI)”对中西文数据中检索所得的题录进行加工转换、字段抽取、频次统计。

无论是国内还是国外,文献计量分析方法在数据处理方面均是以“简单精准分析”为目的,即围绕研究对象进行数据清洗和规范,保证数据质量。但是现有的文献计量分析可视化研究工具只能截面、静态、局部地表征研究对象的基础情况,不能从时段、动态、整体角度反映在某领域的研究前沿[30]。总结在文献计量分析应用中存在的问题主要集中在国外文献计量分析可视化研究工具未能很好的“本土化”所导致的的数据检索策略不当、图谱效果差等常见问题,以及国内文献计量分析可视化研究工具软件的应用层次较低,未能合理的开发运用高级功能。

根据 CiteSpace 软件发展历程来[31]看,从 2005 年 CiteSpace 软件引入试用期,到 2015 年起进入完善提升期,现已进入 2020 年,陈超美教授应用 JAVA 程序开发的可视化软件开发的 CiteSpace 软件通过上百次的技术改进,该软件数据处理能力不断增强,能较好的实现“本土化”可克服文献计量分析方法在数据处理方面以及成图过程中的常见问题,其主要功能是通过合作网络、共现网络、共被引网络和文献耦合等可视化功能展现和分析学科领域演化进程中的关键路径、转折点以及学科发展前沿[32]。因此本文利用 CiteSpace5.6.R2 版本对 WOS 中的文献进行分析,主要有发文量分析、文献共被引分析、关键词分析、合作关系分析、聚类分析等。

3. 材料与方法

3.1. 数据来源及软件参数设置

第一步 WOS 采集数据步骤如下:

选择 WOS 核心合集(数据来源真实完整),基本检索,以“Nano (纳米)”为主题词,自定义年份“2015~2019”;选择学科“Environment Sciences (环境科学)”,文章类型为“Article (期刊论文)”,检索到 3005 篇文献,并将文献保存为相应的格式。

第二步 CiteSpace 分析 WOS 中以 Nano 为主题词的操作步骤如下:

选择 CiteSpace 的数据去重功能,设置分析年限 2015~2019,所有的图谱均选择修剪方式 Pathfinder、Pruning Sliced Networks 和 Pruning the Merged Network。不同的图谱设置不同的 Top 值,余下设置均为默认,共得 3005 篇文献。

3.2. 知识图谱分析

关键词共现图中,每个节点表示一个关键词,节点大小表示关键词出现的频次,节点之间连线的粗细表示关键词共现强度的高低,即与两者共被引次数成比例,彼此间相邻的关键词表示他们经常出现在相同的文章中。图中节点年轮的颜色和厚度,表示关键词出现的时间和数量。年轮外色环越厚,表示该关键词中介中心性越高,说明该节点位于关键词网络较为中心的位置,是网络中各部分的过渡。关键词

在短时间内跃迁的现象，强调突变性。通过对关键词突变性的考察，可得知特定时间内的研究热点。

4. 关键词分析

关键词是文章的核心，是作者对文章主题进行提炼之后产生的代表性词汇，本文利用 CiteSpace 软件对导出数据进行关键词分析，可以探索该领域的研究方向和热点。

4.1. 关键词分析

关键词分析能够反映 2015~2020 年该领域研究的热点核心领域。具体关键词关系以及聚类表如图 1~图 2 和表 1 所示。“ZnO Nanoparticle (氧化锌纳米颗粒)”和“Titanium Dioxide Nanoparticle (二氧化钛纳米颗粒)”则表示，在各种纳米颗粒中，对(氧化锌纳米颗粒、二氧化钛纳米颗粒的研究最为广泛。如 Oskoei 等[33]研究了氧化锌纳米颗粒在紫外光(ZnO/UV)照射下对腐殖酸添加剂的快速去除和吸附，两级光催化是最佳方法，在光催化 30 分钟内，去除腐殖质添加量达到 98.95%以上；Wu [34]等以二氧化钛纳米粒子为研究对象探索其亲代转移对斑马鱼后代 MCLR 诱导的发育毒性影响。

关键词“Adsorption (吸收)”“Toxicity (毒性)”“Performance (行为)”均为纳米颗粒的特性。通过文献梳理不难发现，对纳米颗粒特性的研究一直是纳米有关研究的热点。纳米颗粒的吸附性和毒性对环境的影响显著，因此在环境科学领域中，纳米材料吸附性与毒性研究显得尤为重要。关于吸附性的研究繁多，Azadi 等[35]证明磁性纳米颗粒对化学需氧量(COD)的吸附能力高达 149 mg/g，这为废水中 COD 的处理提供了新的思路。纳米材料的毒性则表现在纳米尺寸下的物质易进入人体影响人体健康(如二氧化硅纳米颗粒对人类心血管健康的不利影响[36]、特定纳米颗粒对动植物生长发育抑制毒害作用(如纳米银颗粒抑制植物生长[37]、纳米硫化镉对大鼠肾脏毒害作用[38])等方面。Minchenko 等[39]研究了单壁碳纳米管(SWCNT)对正常人星形胶质细胞(NHA/TS)免疫反应、凋亡和细胞增殖相关基因亚群表达可能造成抑制作用。Li 等[40]阐明了表面活性剂的存在会加强纳米 TiO_2 和 Cd^{2+} 的复合毒性，并提出了其潜在的影响机制，这对于控制纳米材料危害性具有重要意义。

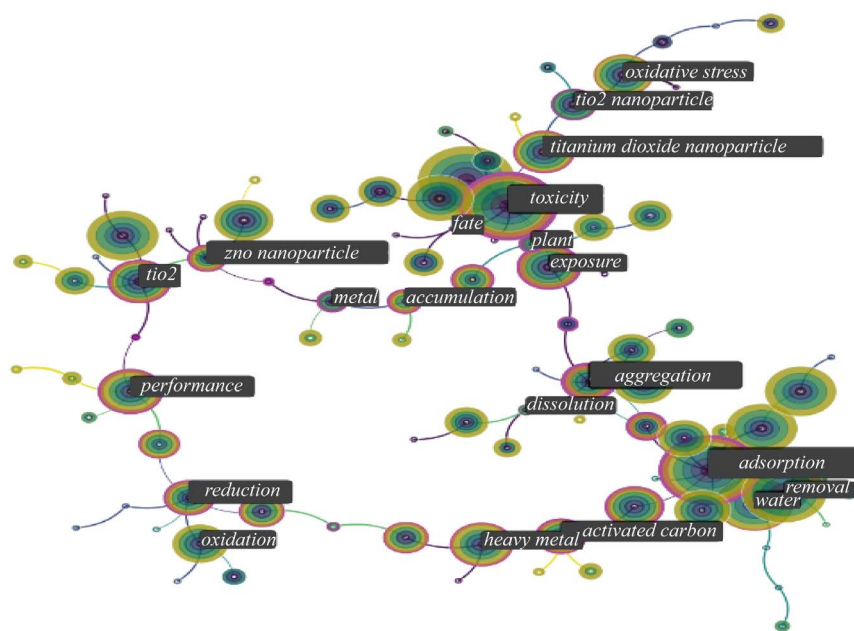


Figure 1. Keyword cluster diagram
图 1. 关键词聚类图

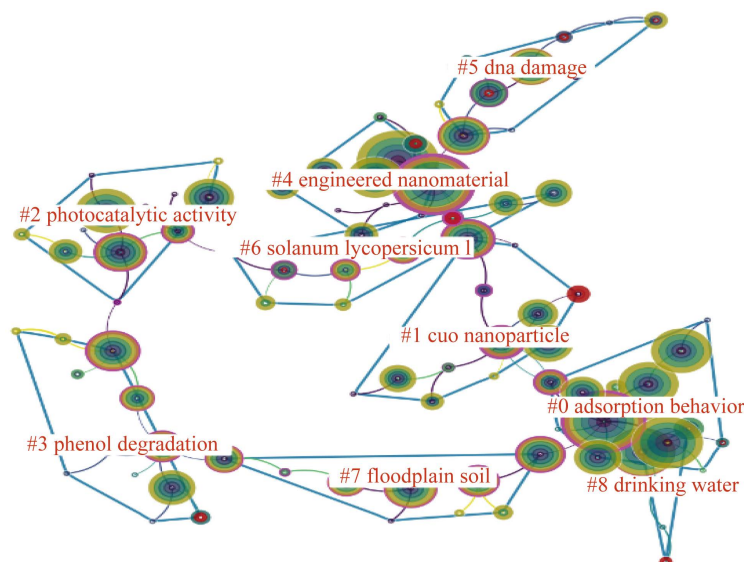


Figure 2. Keyword diagram

图 2. 关键词图

Table 1. Keyword clustering

表 1. 关键词聚类

聚类 ID	Keywords	关键词
0	Adsorption behavior	吸收行为
1	CuO nanoparticles	纳米氧化铜
2	Photocatalytic activity	光催化
3	Phenol degradation	苯酚降解、
4	Engineered nanomaterial	工程纳米材料
5	DNA damage	DNA 损伤
6	Solanum lycopersicum	/
7	Floodplain soil	洪水区土壤
8	Drinking water	饮用水

“Removal (去除)” “Water (水)” “Drinking Water (饮用水)” “Degradation (降解)” “Heavy Metal (重金属)” “Aggregation (积累)” “Photocatalytic Activity (光催化)” 等几个关键词关联性很强, 联合可见国际上对于环境纳米有关研究关注点较多集中于废水中污染物的去除。Rain 等[6]的研究涉及利用纳米颗粒去除和降解有机氯农药的策略, 即利用各种纳米颗粒(如二氧化钛和铁等)作为吸附剂和光催化剂降解有机氯农药; Zou 等[41]人的研究表明 NZVI(纳米零价铁)材料具有较强的重金属离子去除能力, 在环境污染治理中发挥着重要作用。

关键词 “Oxidative Stress (氧化应激)” “DNA Damage (DNA 损伤)” 也是研究热点之一。氧化应激是自由基在体内产生的一种负面作用, 被认为是导致衰老和疾病的一个重要因素。某些纳米材料(如纳米银颗粒[37])进入生物体会导致生物体本身产生氧化应激作用, 这可以看作是纳米材料生物毒性的一种。El-Nekeety 等[42]学者的研究评估了有机改性纳米蒙脱土(OMNM)对健康风险和氧化应激的潜在作用, 其对解决镰刀菌毒素产生的健康风险问题提供了帮助。

4.2. 突发关键词分析

突发关键词根据年度时间变化展示出该年度期间的不同的研究重点，体现出相关学者在相关领域研究方向的变化。

从图3可知，在2015~2016年度，“Impact (影响)”“Titanium Dioxide Nanoparticle (二氧化钛纳米颗粒)”“Cytotoxicity (细胞毒性)”“Metal (金属)”可知，在纳米材料飞速发展的同时，研究者们也注意到了基础纳米材料如(纳米二氧化钛)的生态安全性影响。Christie M 等[43]人发现纳米二氧化钛在光催化过程中更容易产生有害物质RS，该有害物质对细胞有明显的损害作用。除此之外，Mamta 等[44]发现纳米银对洋葱根尖细胞除了细胞毒性外，还可以造成基因毒性，穿透植物系统，破坏有丝分裂阶段，导致染色体变异。也有研究表明，利用电解法制备的最小纳米粒子对S549和HeLa两种细胞毒性作用较低[45]。为进一步预测和测试纳米材料导致的生态安全性，Tomasz [46]通过建立了17种不同类型的金属氧化物纳米颗粒对大肠杆菌的细胞毒性模型(QSAR方法)，能够可靠地预测细胞毒性。

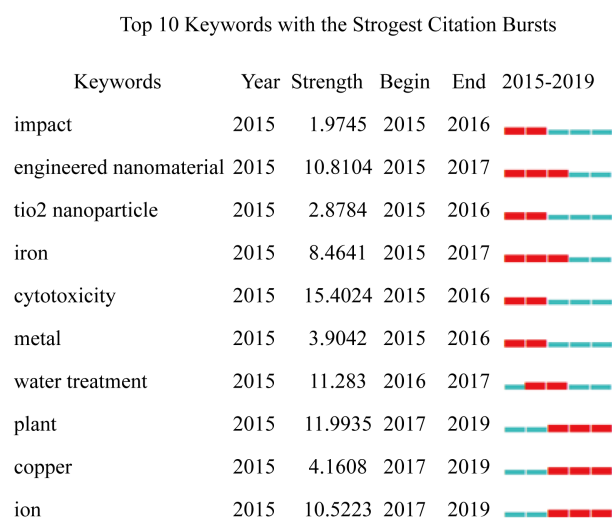


Figure 3. Sudden keywords

图3. 突发关键词

2015~2017年度关键词，“Iron (铁)”“Engineered Nanomaterial (工程纳米粒子)”两个关键词作为其研究热点。可以体现出研究者们开始注重对金属纳米粒子和工程纳米粒子的研究，例如shen 等[47]报道，磁铁矿(Fe_3O_4)纳米颗粒(8nm)对污染物的去除能力比大颗粒物(50 nm)高出7倍。Likodimos 等[48]将纳米工程二氧化钛催化剂与纳滤膜相结合用于降解水中毒性污染物，实现了纳米工程材料在实际应用中的作用。

2016~2017年度，“Water treatment (水处理)”成为研究热点。再结合2017~2019年度关键词，“Plant (工厂)”以及“Copper (铜)”“Ion (离子)”作为其研究热点，可以看出，近两年的研究热点为废水处理厂的水处理技术，随着纳米技术的不断发展对水处理的技术革新是有着一定的实际意义[49]，在Christian [50]比较CuO或ZnO纳米颗粒与相应的微粒在沙基质中的行为，以有无小麦生长作为指标，发现纳米颗粒的行为具有相似性，根毒性越大，颗粒越小，可以说明纳米颗粒的尺寸与行为存在着一定的关系的基础上。研究者们开始对废水处理进行进一步的探索，Likodimos 等[48]将具有光催化活性的纳米复合膜用于降解水中毒性污染物，实现了纳米工程材料的可持续性和水处理生物经济有效性。Chen 等[51]研制了一种新型的有机污染物降解复合反应器，其中纳米二氧化钛作为光催化剂产生空穴电子对，在污水处理降解有机染料过程中提高了降解效率。

2014~2016年度关键词,“Size(尺寸)”和“Behavior(行为)”代表了两个研究热点,说明目前纳米材料是基于纳米材料的尺径(如小尺寸效应、量子尺寸),和行为进行研究的。研究显示,纳米粒子的尺寸具有双面性,一方面对环境有害,根据尺寸的不同具有不同特征的生态毒性[52],如不同尺寸的纳米银诱导小鼠细胞损伤能力不同[51];另一方面则相反,在环境治理当中起着有利作用,根据 Shen 等[47]报道,磁铁矿(Fe_3O_4)纳米颗粒(8 nm)对污染物的去除能力比大颗粒物(50 nm)高出7倍。另外,研究表明利用原位聚合法制备的聚苯胺纳米 TiO_2 涂层具有良好的抗腐蚀性,且该抗腐蚀性 with 纳米尺寸有着密切的关系[53]。

5. 结论与展望

5.1. 结论

本文应用 CiteSpace 软件,以“Nano”为主题词,对 WOS 的数据进行文献计量,分析了国际该领域的发展趋势、关键词等,能相对直观地展示近五年来在环境科学领域纳米技术的整体发展水平,有效地反映出该领域研究关注的热点问题。从环境科学领域纳米相关研究的聚类 and 关键词分析来看,近年来,国际环境科学领域纳米相关的研究主要集中在“纳米材料的性能与优化”“纳米材料的环境效应”以及“纳米技术的应用”三个方面。

5.2. 展望

经文献计量研究分析可得,目前环境科学领域纳米材料的相关研究已经取得较大进展,且纳米材料具有宽阔的实际应用前景,通过以上综述,对该领域的未来发展和接下来的研究重点工作总结了如下:

1) 进一步研究纳米材料的生态安全性,提高纳米材料在环境治理与修复当中的稳定性,以及模拟纳米材料进入环境中的迁移转化机制,重点关注纳米材料的生态安全性和风险评估。

2) 纳米材料因为有很多独特的特性,易于功能化,研究者们可以根据物质本身的性质和合成机理,通过表面功能化和修饰纳米材料等各种新型的手段来设计具有所需的附加功能的工程纳米材料,从而达到在环境治理与修复当中,降解或吸附各种污染物。同时还应关注利用绿色化学或者工业化方法生产纳米材料,减少环境污染和减低生产成本等问题。

3) 目前大部分研究的纳米材料都是室内研究,是由于现研究的功能化纳米材料有待进一步提高效率和可用性,可以从验证研究从室内研究到室外研究的优化条件,模拟各种环境条件并加以的优化改性,从而达到纳米材料的功能的成熟化使其具有实际应用的价值和促进实际应用的发展。

基金项目

重庆交通大学大学生创新创业训练计划项目(编号:201810618048)。

参考文献

- [1] Aslani, H., Kosari, T.E., Naseri, S., *et al.* (2018) Hexavalent Chromium Removal from Aqueous Solution Using Functionalized Chitosan as a Novel Nano-Adsorbent: Modeling and Optimization, Kinetic, Isotherm, and Thermodynamic Studies, and Toxicity Testing. *Environment Science and Pollution Research*, **25**, 20154-20168. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2023-1>
- [2] Reddy, P.A.K., Reddy, P.V.L., Kwon, E., *et al.* (2016) Recent Advances in Photocatalytic Treatment of Pollutants in Aqueous Media. *Environment International*, **91**, 94-103. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.02.012>
- [3] Rezaee, A., Rangkooy, H., Khavanin, A., *et al.* (2014) High Photocatalytic Decomposition of the Air Pollutant Formaldehyde Using Nano-ZnO on Bone Char. *Environment Chemistry Letters*, **12**, 353-357. <https://doi.org/10.1007/s10311-014-0453-7>
- [4] Chen, M., Jin, L.S., Liu, Y.H., *et al.* (2014) Decomposition of NO in Automobile Exhaust by Plasma-Photocatalysis Synergy. *Environment Science and Pollution Research*, **21**, 1242-1247. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2021-2>

- [5] Asadi, S., Hassan, M., Nadiri, A., *et al.* (2014) Artificial Intelligence Modeling to Evaluate Field Performance of Photocatalytic Asphalt Pavement for Ambient Air Purification. *Environment Science and Pollution Research*, **21**, 8847-8857. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2821-z>
- [6] Rani, M., Shanker, U. and Jassal, V. (2017) Recent Strategies for Removal and Degradation of Persistent & Toxic Organochlorine Pesticides Using Nanoparticles: A Review. *Journal of Environmental Management*, **190**, 208-222. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.068>
- [7] Liang, S.X., Ding, L., Shen, S.G., *et al.* (2018) Assessment of the Remediation Effect of Nano-Hydroxyapatite in Exogenous Pb-Contaminated Soil Using Toxicity Characteristic Leaching Procedure and Soil Enzyme Activities. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **101**, 250-256. <https://doi.org/10.1007/s00128-018-2390-9>
- [8] Aravind, A., Sebastian, M. and Mathew, B. (2018) Green Synthesized Unmodified Silver Nanoparticles as a Multi-Sensor for Cr(III) Ions. *Environment Science-Water Research & Technology*, **4**, 1531-1542. <https://doi.org/10.1039/C8EW00374B>
- [9] Gong, Y.Y., Tang, J.C. and Zhao, D.Y. (2016) Application of Iron Sulfide Particles for Groundwater and Soil Remediation: A Review. *Water Research*, **89**, 309-320. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.063>
- [10] 杨新萍, 赵方杰. 植物对纳米颗粒的吸收、转运及毒性效应[J]. 环境科学, 2013, 34(11): 4495-4502.
- [11] Lofrano, G., Carotenuto, M., Libralato, G., *et al.* (2016) Polymer Functionalized Nanocomposites for Metals Removal from Water and Wastewater: An Overview. *Water Research*, **92**, 22-37. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.033>
- [12] 王伟. 文献计量法在技术预见中的应用[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [13] 周萍, Loet Leydesdorff, 武夷山. 中国科技期刊引文环境的可视化[J]. 中国科技期刊研究, 2005, 16(6): 773-780.
- [14] 金碧辉, Loet Leydesdorff, 孙海荣, 等. 中国科技期刊引文网络: 国际影响和国内影响分析[J]. 中国科技期刊研究, 2005, 16(2): 141-146.
- [15] Leydesdorff, L. and Bihui, J. (2004) Mapping the Chinese Science Citation Database. *Proceedings of the 67th ASIS & T Annual Meeting*, Vol. 41, 488-495. <https://doi.org/10.1002/meet.1450410157>
- [16] 杨思洛, 韩瑞珍. 国外知识图谱绘制的方法与工具分析[J]. 图书情报知识, 2012(6): 101-109.
- [17] Yu, D.J. (2015) A Scientometrics Review on Aggregation Operator Research. *Scientometrics*, **105**, 115-133. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1695-2>
- [18] Chen, C.M., Dubin, R. and Kim, M.C. (2014) Emerging Trends and New Developments in Regenerative Medicine: A Scientometric Update (2000-2014). *Expert Opinion on Biological Therapy*, **14**, 1295-1317. <https://doi.org/10.1517/14712598.2014.920813>
- [19] Song, J.B., Zhang, H.L. and Dong, W.L. (2016) A Review of Emerging Trends in Global PPP Research: Analysis and Visualization. *Scientometrics*, **107**, 1111-1147. <https://doi.org/10.1007/s11192-016-1918-1>
- [20] Rousseau, R. 引用分析——关于被引分析的反向思考[C]//中国科学学与科技政策研究会. 第六届科学计量学与大学评价国际研讨会论文集. 武汉, 2010: 6. <https://wenku.baidu.com/view/2468412b5a8102d276a22f23.html>
- [21] Gaffield, E. (1995) Citation Indexes for Science: A New Dimension in Documentation through the Association of Ideas. *Science*, **122**, 108-111. <https://doi.org/10.1126/science.122.3159.108>
- [22] 姜春林, 陈玉光. CSSCI 数据导入 Bibexcel 实现共现矩阵的方法及实证研究[J]. 图书馆杂志, 2010, 29(4): 58-63.
- [23] 刘军. 整体网分析讲义——UCINET 软件实用指南[M]. 北京: 汉语大词典出版社, 2009.
- [24] 崔雷, 郑华川. 关于从 MEDLINE 数据库中进行知识抽取和挖掘的研究进展[J]. 情报学报, 2003, 22(4): 425-433.
- [25] 崔雷. 专题文献高被引论文的时间分布与同被引聚类分析[J]. 情报学报, 1995, 14(1): 54-61.
- [26] 崔雷. 专题文献高被引论文的连续同被引聚类分析[J]. 情报理论与实践, 1996, 15(1): 46-48.
- [27] 崔雷, 胡海荣, 李纪宾. 文献数据库中书目信息共现挖掘系统的开发[J]. 现代图书情报技术, 2008(8): 70-75.
- [28] 魏建香. 学科交叉知识发现及可视化[M]. 南京: 南京大学出版社, 2011.
- [29] 刘启元, 叶鹰. 文献题录信息挖掘技术方法及其软件 SATI 的实现——以中外图书情报学为例[J]. 信息资源管理学报, 2012(1): 50-58.
- [30] 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.
- [31] 刘光阳. CiteSpace 国内应用的传播轨迹[J]. 情报、信息与共享, 2017(176): 60-74.
- [32] 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.
- [33] Oskoei, V., Dehghani, M.H., Nazmara, S., *et al.* (2016) Removal of Humic Acid from Aqueous Solution Using UV/ZnO Nano-Photocatalysis and Adsorption. *Journal of Molecular Liquids*, **213**, 374-380.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.07.052>

- [34] Wu, Q., *et al.* (2018) Parental Transfer of Titanium Dioxide Nanoparticle Aggravated MCLR-Induced Developmental Toxicity in Zebrafish Offspring. *Environmental Science-Nano*, **5**, 2952-2965. <https://doi.org/10.1039/C8EN00865E>
- [35] Azadi, F., Karimi-Jashni, A. and Zerafat, M.M. (2018) Green Synthesis and Optimization of Nano-Magnetite Using *Persicaria bistorta* Root Extract and Its Application for Rosewater Distillation Wastewater Treatment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **165**, 467-475. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.032>
- [36] Zhou, F.R., Liao, F., Chen, L.Y., *et al.* (2019) The Size-Dependent Genotoxicity and Oxidative Stress of Silica Nanoparticles on Endothelial Cells. *Environmental Science and Pollution Research*, **26**, 1911-1920. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3695-2>
- [37] Lee, Y.H., Cheng, F.Y., Chiu, H.W., *et al.* (2014) Cytotoxicity, Oxidative Stress, Apoptosis and the Autophagic Effects of Silver Nanoparticles in Mouse Embryonic Fibroblasts. *Biomaterials*, **35**, 4706-4715. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2014.02.021>
- [38] Rana, K., Verma, Y., Rani, V., *et al.* (2018) Renal Toxicity of Nanoparticles of Cadmium Sulphide in Rat. *Chemosphere*, **193**, 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.011>
- [39] Minchenko, O.H., Tsymbal, D.O., Minchenko, D.O., *et al.* (2018) Single-Walled Carbon Nanotubes Affect the Expression of Genes Associated with Immune Response in Normal Human Astrocytes. *Toxicology in Vitro*, **52**, 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2018.06.011>
- [40] Li, M., Pei, J.C., Tang, X.M., *et al.* (2018) Effects of Surfactants on the Combined Toxicity of TiO₂ Nanoparticles and Cadmium to *Escherichia coli*. *Journal of Environmental Sciences*, **74**, 126-133. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.02.016>
- [41] Zou, Y.D., Wang, X.X., Khan, A., *et al.* (2016) Environmental Remediation and Application of Nanoscale Zero-Valent Iron and Its Composites for the Removal of Heavy Metal Ions: A Review. *Environmental Science & Echnology*, **50**, 7290-7304. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01897>
- [42] El-Nekeety, A.A., El-Kady, A.A., Abdel-Wahhab, K.G., *et al.* (2017) Reduction of Individual or Combined Toxicity of Fumonisin B-1 and Zearalenone via Dietary Inclusion of Organo-Modified Nano-Montmorillonite in Rats. *Environmental Science and Pollution Research*, **24**, 20770-20783. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9721-y>
- [43] Sayes, C.M., Wahi, R., Kurian, P., *et al.* (2006) Correlating Nanoscale Titania Structure with Toxicity: A Cytotoxicity and Inflammatory Response Study with Human Dermal Fibroblasts and Human Lung Epithelial Cells. *Toxicological Sciences*, **92**, 174-185. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfj197>
- [44] Kumari, M., Mukherjee, A. and Chandrasekaran, N. (2009) Genotoxicity of Silver Nanoparticles in *Allium cepa*. *Science of the Total Environment*, **407**, 5243-5246. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.06.024>
- [45] Nordin, N., Samad, W.Z., Kardia, E., *et al.* (2018) Controlled Release Electrochemical Synthesis and Cytotoxicity Study of Copper(II) Nanoparticles in Copper(II) Decanoate Complex. *World Scientific*, **13**, 1-14. <https://doi.org/10.1142/S1793292018500480>
- [46] Puzyn, T., Rasulev, B., Gajewicz, A., *et al.* (2011) Using Nano-QSAR to Predict the Cytotoxicity of Metal Oxide Nanoparticles. *Nature Nanotechnology*, **6**, 175-178. <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.10>
- [47] Shen, Y.F., Tang, J. and Nie, Z.H. (2009) Tailoring Size and Structural Distortion of Fe₃O₄ Nanoparticles for the Purification of Contaminated Water. *Bioresource Technology*, **100**, 4139-4146. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.04.004>
- [48] Likodimos, V. and Dionysiou, D.D. (2010) Clean Water: Water Detoxification Using Innovative Photocatalysts. *Environmental Science and Biotechnology*, **9**, 87-94. <https://doi.org/10.1007/s11157-010-9201-z>
- [49] Richard, D. and Owen, H.R. (2008) The Ecotoxicology of Nanoparticles and Nanomaterials: Current Status, Knowledge Gaps, Challenges, and Future Needs. *Ecotoxicology*, **17**, 315-325. <https://doi.org/10.1007/s10646-008-0206-0>
- [50] Dimkpa, C.O., Latta, D.E., McLean, J.E., *et al.* (2013) Fate of CuO and ZnO Nano- and Microparticles in the Plant Environment. *Environmental Science & Technology*, **47**, 4734-4742. <https://doi.org/10.1021/es304736y>
- [51] Chen, J.S., Liu, M.C., Zhang, L., *et al.* (2003) Application of Nano TiO₂ towards Polluted Water Treatment Combined with Electro-Photochemical Method. *Water Research*, **37**, 3815-3820. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00332-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00332-4)
- [52] Chong, M.N., Jin, B., Christopher, W.K. and Saint, C.C. (2010) Recent Developments in Photocatalytic Water Treatment Technology: A Review. *Water Research*, **44**, 2997-3027. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039>
- [53] Radhakrishnan, S., Siju, C.R., Mahanta, D., Patil, S., *et al.* (2008) Conducting Polyaniline-Nano-TiO₂ Composites for Smart Corrosion Resistant Coatings. *Electrochimica Acta*, **54**, 1249-1254. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.08.069>