

基于WoS引文数据库对植物重金属转运蛋白研究文献的计量分析

何叶清¹, 何冠谿², 何腾兵^{1,2*}

¹贵州大学农学院, 贵州 贵阳

²贵州大学新农村发展研究院, 贵州 贵阳

Email: *hetengbing@163.com

收稿日期: 2021年7月3日; 录用日期: 2021年8月2日; 发布日期: 2021年8月12日

摘要

由于人类活动和地球化学演化, 重金属毒性已经成为植物和其他生物待解决的问题。本文基于Web of Science核心数据库中2008~2020年有关植物重金属转运蛋白的2423篇文献作为数据源, 利用Vosviewer对作者、国家(地区)和机构、期刊和被引期刊、作者和被引文献、关键词进行共引分析。结果表明, 全球范围内植物重金属转运基因领域文献发表数量呈不断增长趋势。中国、美国、印度等国家在植物转运重金属研究领域发文量较多, 具有较大的影响力。植物重金属转运蛋白研究主要集中在Science of the Total Environment、Ecotoxicology and Environmental Safety、PloS ONE、Environmental and Experimental Botany等学科领域, 具有显著的学科交叉性。以往对植物重金属转运体的研究主要集中在利用基因工程加强植物土壤重金属污染的修复, 目前, 转基因植物的安全性评价以及利用基因工程技术将植物重金属转运体异源表达到其他植物物种中是植物重金属转运体研究的重要前沿领域。

关键词

土壤, 重金属, 基因, 计量分析, Web of Science

A Quantitative Analysis of the Literature on Plant Heavy Metal Transporters Based on WoS Citation Database

Yeqing He¹, Guandi He², Tengbing He^{1,2*}

¹College of Agronomy, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²Institute of New Rural Development, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Email: *hetengbing@163.com

*通讯作者。

文章引用: 何叶清, 何冠谿, 何腾兵. 基于 WoS 引文数据库对植物重金属转运蛋白研究文献的计量分析[J]. 植物学研究, 2021, 10(5): 613-626. DOI: 10.12677/br.2021.105076

Abstract

Due to human activities and geochemical evolution, heavy metal toxicity has become a problem to be solved for plants and other organisms. In this paper, 2423 literatures on plant heavy metal transporters from 2008 to 2020 in the core database of Web of Science were used as data sources. VosViewer was used to conduct co-citation analysis among authors, countries (regions) and institutions, journals and cited journals, authors and cited literatures, and keywords. The results showed that the number of literatures published in the field of plant heavy metal transporters was increasing worldwide. China, the United States, India and other countries have published a large number of papers in the field of plant transport of heavy metals, which has a great influence. Plant heavy metal transporters are mainly studied in the fields of Science of the Total Environment, Ecotoxicology and Environmental Safety, PLoS ONE, Environmental and Experimental Botany and other subject areas, with significant discipline intersection. Previous studies of plant heavy metal transporter focused on strengthening plants using genetic engineering of soil heavy metal pollution repair, at present, the safety evaluation of transgenic plants and the use of genetic engineering technology will plant heavy metal transporter heterologous expression in other plant species is an important frontier research plant heavy metal transporter.

Keywords

Soil, Heavy Metals, Genes, Econometric Analysis, Web of Science

Copyright © 2021 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. 介绍

在自然界中,铜、锌、钴等重金属是植物生长发育所必需的微量元素,但当重金属含量超过一定临界值时,就会对植物产生毒害作用[1]。1983年,美国科学家 Chaney 等首次提出运用植物去除土壤中重金属污染物的设想,人们逐渐将重金属污染治理的研究重点转向了植物修复技术[2]。近年来,美国、法国等国家投入了大量资金进行植物修复的研究,植物修复的应用前景将越来越广阔。基因工程在植物修复中的应用为提高植物修复土壤重金属污染的效率提供了新的思路,强调了植物修复对重金属运输、储存和解毒的调控作用[3]。

重金属在植物体内的运输行为主要与重金属吸收蛋白有关,重金属吸收蛋白主要位于细胞的质膜中,其主要功能是将重金属从细胞膜外运输到细胞质中[4]。近年来,随着转录组的测序技术的发展,许多金属转运蛋白基因被鉴定,主要有锌铁调控蛋白(zinc-iron regulatory proteins, ZIP 家族蛋白)、黄色条纹样蛋白(yellow stripe-like, YSL 家族蛋白)、天然抗性相关巨噬细胞蛋白(natural-resistance-associated macrophage protein, Nramp 家族蛋白)等[5]。ZIP 基因家族成员在真核生物和原核生物中都可以运输多种金属,包括 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Co^{2+} 、和 Mn^{2+} , 其是否会增加谷物中有毒重金属的积累还有待进一步明确[6]。如今,随着 YSL 家族基因成员的相继发现,研究者逐渐认识到 YSL 家族基因不仅参与 Fe-PC 的转运,还可以转移其他重金属螯合物(Cu、Ni、Zn 等) [7]。然而,对亚细胞定位和基因表达模式的研究仍处于初

级阶段。NRAMP 家族是膜整合蛋白家族，位于细胞膜上，与重金属转运密切相关[8]。对植物 NRAMP 家族基因的研究仍处于初级阶段，植物中 NRAMP 家族基因的具体定位和响应机制仍有待验证[9]。前期研究表明，NRAMP 基因家族不仅能实现植物对金属离子的高效吸收和转运，还能提高植物的抗病性。因此，对该基因的进一步研究可能为植物修复土壤重金属提供新的思路[10]。这些家族的功能基因被不断的验证，但是其不同亚家族的基因没有被系统的验证，随着植物的进化会出现对不同重金属的结合发生变异表现在不同亚家族的分支，也会出现一些新的基因。例如氨基酸残基的金属结合位点的验证，牵涉冷冻电镜等技术手段，应加强国际和多学科交叉合作争取更多的基金支持。

目前，利用基因工程强化植物修复土壤重金属污染已成为广大学者研究的重点和热点[11]。建议后续研究可利用基因工程将相关功能基因导入目标植物中，使其在目标植物中高效表达，并在实际环境中进行植物生长应答机制的研究，从而更好地调控植物体内重金属含量的平衡关系，克服超富集植物与环境适应性差的不足。

2. 材料与方法

2.1. 数据来源

本文研究数据来源于 ISI Web of Knowledge 的 WoS 核心合集数据库。WoS 数据库为综合性数据库(包括 SCI、SSCI 和 A&HCI3 索引数据库)，收录了全球 256 个学科的 12000 多种高影响力学术期刊和超过 17 万的国际学术会议论[12]。以“((Gene) and (heavy metal) and (transport or transfer or transship or change or variety or variation or transformation))”为主题词进行检索，检索时间跨度为 2008~2021，文献类型为 Article 和 Review，检索时间为 2021 年 2 月 11 日，共检索出 2423 篇相关研究文献，共检索出 2423 篇相关研究文献，导入 HistCite 软件的文献共 2423 篇，涉及 10,585 位作者，652 种期刊，107,717 篇参考文献。

2.2. 研究方法

利用 Web of Science 数据库自带的分析工具，HistCite 引文分析软件、VOSviewer 可视分析软件、Excel 软件，对 2008~2021 期间金属转运蛋白发文量随年度变换趋势、主要发文期刊、国家、机构、作者、关键词分析、研究热点等方面进行计量分析。History of Cite (HistCite)软件是由加菲尔德博士为主开发的一款引文图谱分析可视化软件，软件的操作过程简单，便于分析[13]。它的指标有 LCS (Local Citation Score)，即本地被引频次，表示在所属领域内的研究次数[14]。GCS (Global Citation Score)，即全文被引频次，表示这篇文章被整个 WoS 数据中所有文献被引用的次数[15]。TLCS (Total Local Citation Score)，即本地总被引频次数，表示在当前的数据集中，文献被引频次数之和[16]。如果一篇文献的 LCS 值很高，则表现为该文献在该研究领域里具有较高的影响力，很可能是其内容是在该领域具有开创性的文章[17]。GCS 值很高，代表这篇文献被世界上许多学者关注，有些引用这篇参考文献的文章也许与作者的研究方向没多大关系，但 GCS 还是会跟踪数据[18]。VOSviewer 知识图谱绘制工具是由 Nees Jan van Eck 和 Ludo Waltman 开发的一款免费为学者服务的软件[19]。它将图形信息和可视化理论与传统文献计量学中的词频共现技术相结合，在视觉显示特别是聚类方面具有独特的优势[20]。

3. 结果与讨论

3.1. 发文量及年度变化趋势

文献的发文量是衡量某研究领域的发展速度、程度和科研结果的重要指标[21]。为了科学认识金属转运蛋白国内外研究现状，本文将 Wob of Science 数据库中的相关文献 2008~2020 年间按照年度发文量进

行统计。由图 1 可知,自 2008 年以后关于植物金属转运基因的文献数量呈现不断上升趋势,尤其在 2020 年文献数量达到 351 篇。特别注意的是从 2014 年开始发文量呈快速增长态势,主要原因在于全球对植物修复技术和污染对策育种的兴起使植物积累和耐受重金属的分子机制逐渐开始重视[22]。其他国家发文量相比中国较少,且中国的相关文献发文量逐年递增,这说明了金属转运蛋白已经引起中国学者广泛的关注,同时也反应重金属污染问题在中国较为严重。

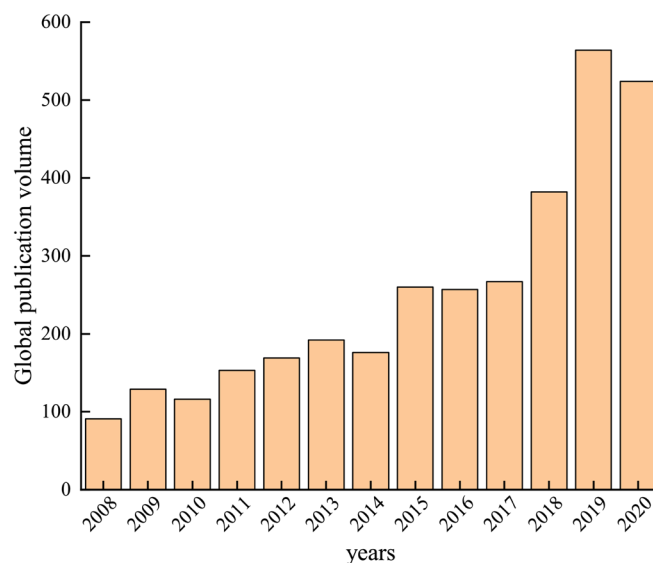


Figure 1. Annual release of heavy metal transporters in plants from 2008 to 2021
图 1. 2008~2021 年植物重金属转运蛋白年度发文量

3.2. 重要期刊来源

通过对研究领域发文量和被引频次的期刊分析,有助于科研人员准确找到该研究领域文献中 SCI 的核心期刊,有助于了解该研究领域的研究动向和发展状况[23]。影响因子(Impact Factor, IF)是美国科学情报研究所(ISI)的期刊引证报告(JCR)中的一项数据,指的是某一期刊的文章在特定年份或时期被引用的频率,是衡量学术期刊影响力的一个重要指标[24]。其计算方法是 IF 即某期刊前两年发(S, T)表的论文在统计当年(U)的被引用总次数 X (前两年总被引次数)除以该期刊在前两年(S, T)内发表的论文总数 Y (前两年总发文量) [25]。如表 1 所示,对 2008~2020 年土壤重金属转运进行检索,得知该领域共有 652 种期刊,根据期刊的发文量从高到低进行排序,发文量 TOP10 期刊如表 1 所示。10 种期刊主要来自美国(2)、英国(3)、荷兰(2)、瑞士(2)、德国(1)。发文量前三的期刊依次为 Science of The Total Environment、Ecotoxicology and Environmental Safety、Plos ONE 分别占所检索文献总数的 3.13%、3.09%、2.81%,表明这些期刊是研究人员的潜在投稿期刊。Science of The Total Environment 期刊的发文量虽然最高但其被引频次较低,而 Environmental and Experimental Boany、Environmental Pollution、Chemosphere 期刊的本地被引频次位居前三名,表明这些期刊在重金属转运影响力相对较大。在发文量排名前十的期刊中,2019 年影响因子最高的是 Journal of Hazardous Materials, 影响因子为 9.038, TCLS 位居第七(30 次)。然而,同样认可度和影响力相对较高的期刊 Aquatic Toicology、Plant Physiology and Biochemistry、Journal of Experimental Botany 发文量和本地被引频次均未进入前十,处于 11~30 之间的位次,一定程度上表明这些期刊在植物金属转运蛋白研究领域的关注程度相对有限,可能更加偏向其他侧重点。

Table 1. Top 10 Journal of heavy metal transporters in soil
表 1. 植物金属转运蛋白领域发文量排名前 10 的期刊

期刊名称 Journals	发文量 Records/篇	占比 Proportion/%	TLCS1)	TGCS2)	IF (2019)	IF (5Year)	出版国 Country
Science of the total environment	76	3.13	42	718	6.551	6.419	荷兰
Ecotoxicology and environmental safety	75	3.09	43	931	4.872	4.967	美国
PLoS ONE	68	2.81	0	1958	2.74	3.227	美国
Environmental science and pollution research	66	2.72	45	1161	3.056	3.306	德国
Chemosphere	63	2.60	77	1325	5.778	5.705	英国
Frontiers in microbiology	62	2.56	0	797	4.236	4.927	瑞士
Environmental pollution	47	1.93	87	796	6.793	6.939	英国
Frontiers in plant science	46	1.90	0	998	4.402	5.207	瑞士
Journal of hazardous materials	38	1.57	30	634	9.038	8.512	荷兰
Environmental and experimental botany	35	1.44	102	1233	4.027	4.744	英国

3.3. 主要研究力量

3.3.1. 发文国家分析

论文被 WoS 数据库收录的发文量和被引频次数能够反映一个国家整体的科研水平[25]。目前,全世界共有 92 个国家发表了有关植物金属转运蛋白的研究论文,论文发表数量前十位的国家是中国、美国、印度、德国、意大利、韩国、英国、法国、西班牙、日本,这十个国家的发文量之和为 2189 篇,占总量的 90.34%。其中中国的发文量排名第一,共 856 篇,远远领先于其他国家,占发文量的 35.33%,其他国家占全世界剩的 9.66% (表 2),在一定程度上表明了中国在该领域在全世界的重要地位,但同时也暴露出中国土壤重金属污染问题的严峻。从文献的总被引频次来看中国植物金属转运蛋白研究引频次数最高,但均篇被引频次低于该领域全球平均水平。这说明中国的科研人员近几年来在重视发文数量的同时应更加注重论文的质量。

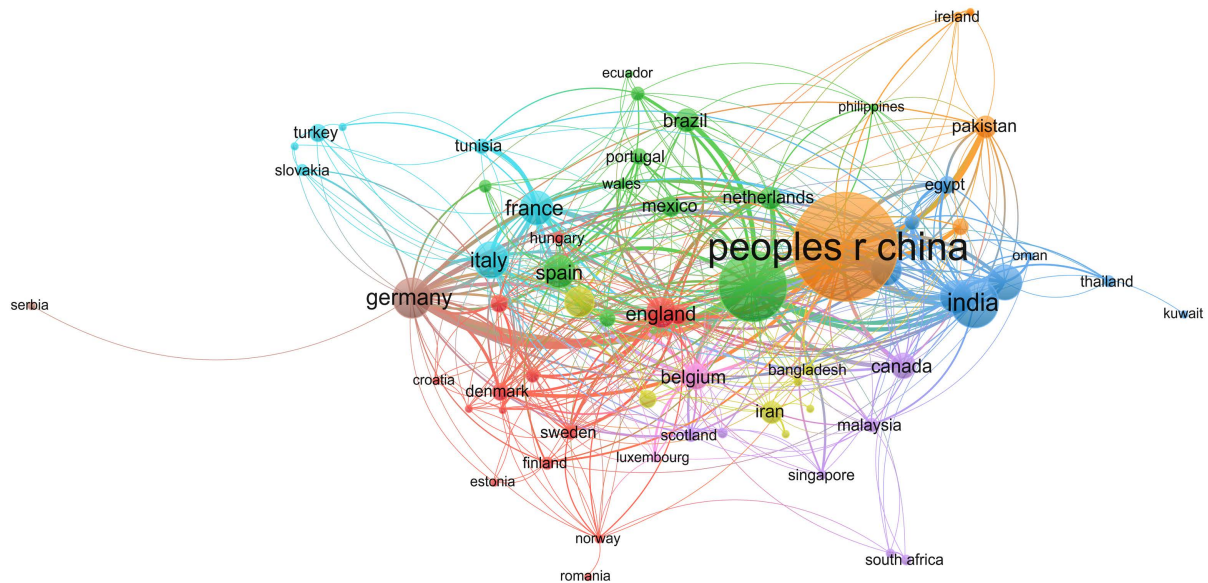
图 2 是 2008~2020 植物金属转运蛋白领域重要发文国家及之间相互合作关系图,图中圆圈大小表示发文量,可以看出中国的发文量高于其他国家,连线距离越短表示国家之间合作程度越密切,从图中可以看出 44 个国家共同致力于研究该领域,其中,中国与 31 个国家之间都有密切的合作。根据机构地址,652 份与植物重金属转运蛋白有关的出版物确定了 57 个国家。图 3 显示了这些出版物按国家分列的地理分布情况。出版物的数量在地图上用一种渐变颜色表示,即颜色越深,出版物的数量就越大。

Table 2. Countries ranked Top 10 in the number of studies on heavy metal transporters in plant
表 2. 植物金属转运蛋白研究发文量排名 TOP10 的国家

国家 Country	发文量 Records/篇	占比 Proportion%	TLCS	TGCS
中国 China	856	35.33	954	14213
美国 USA	378	15.60	470	13469
印度 India	203	8.38	163	4081
德国 Germany	138	5.70	419	6280

Continued

意大利 Italy	115	4.75	121	2146
韩国 South Korea	108	4.46	115	2881
英国 UK	103	4.25	158	3825
法国 France	102	4.21	169	3741
西班牙 Spain	93	3.84	38	2559
日本 Japan	91	3.76	355	4168



注: Weights = Documents; 圆圈大小表示国家发文量; 不同颜色代表不同聚类, 共 5 个聚类; 共有 1093 条连线, 此图仅显示 371 条连线。

Figure 2. Map of important publishing countries and their cooperation relationship in the field of plant metal transporters from 2008 to 2021

图 2. 2008~2021 年植物金属转运蛋白领域重要发文国家及相互间合作关系图谱

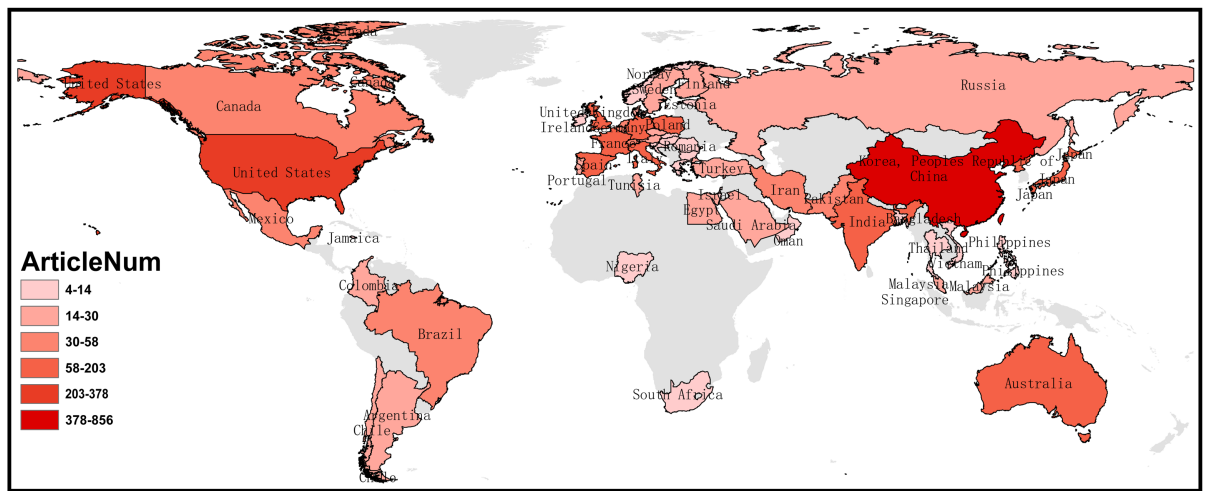


Figure 3. Distribution of plant heavy metal transporters in published countries from 2008 to 2021

图 3. 2008~2021 年植物重金属转运蛋白领域发文国家区域分布情况

3.3.2. 重要研究机构分析

该领域研究论文共涉及 2562 个研究机构，并主要在科研机构 and 高校，发文量 TOP20 的研究机构如表 3 所示。其中中国科学院发文量和本地被引频次较高，说明了中国科学院在植物金属转运蛋白领域做出的突出贡献。图 4 表示 2008~2021 间重要机构的合作关系图，在这个分析中，线的厚度反映了机构之间合作的频率。其中中国科学院与诺丁汉大学、墨尔本大学、东北师范大学、浙江大学等 96 个研究结构均有合作，而目前国内外合作交流偏少的应该主动参加相关领域的学术会议和活动提高发文质量和影响力。

Table 3. Research institutions ranked Top 20 in the field of heavy metal transport genes in plant

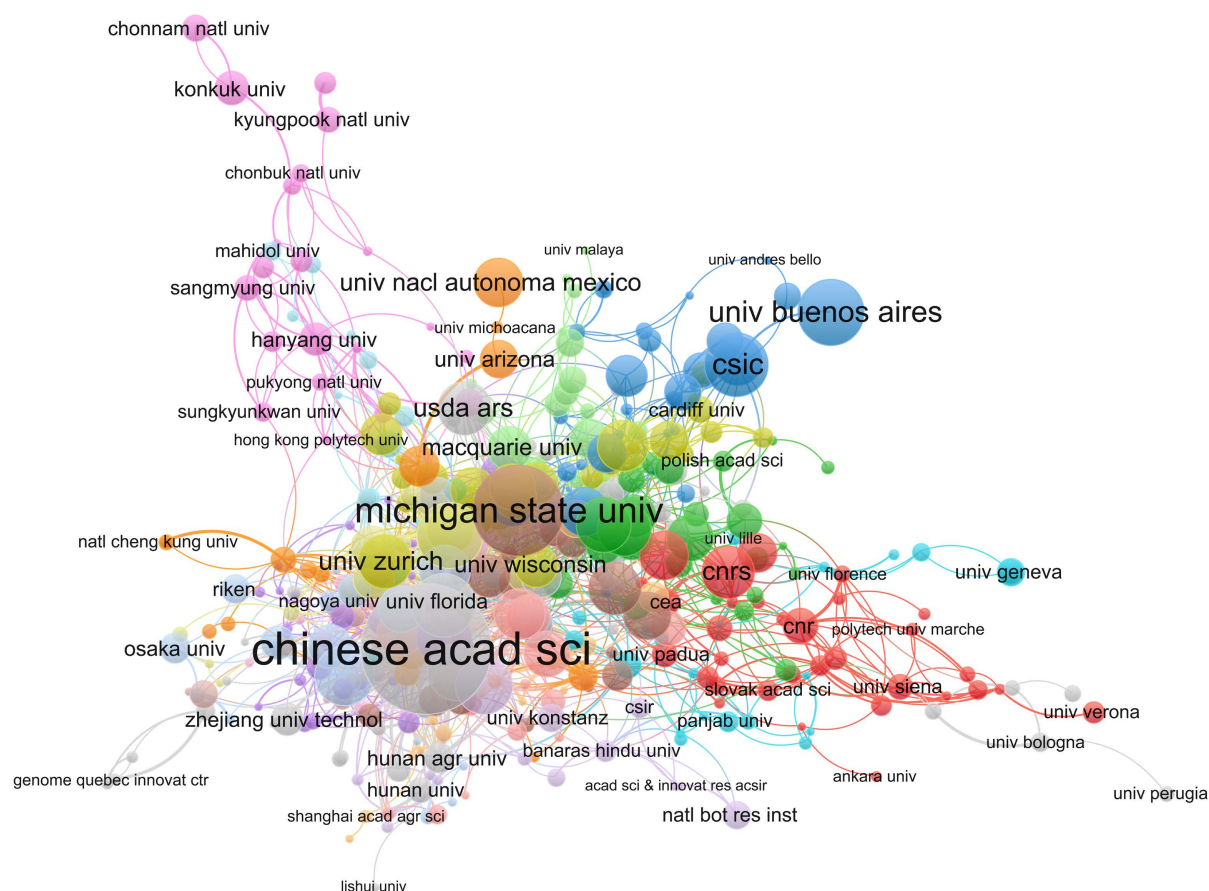
表 3. 植物金属转运蛋白领域发文量排名 Top 20 的研究机构

机构 Institution	中文名 Chinese name	发文量 Records/篇	占比 Proportion%	TLCS	TGCS
Chinese Acad Sci	中国科学院	149	6.15	330	3855
Univ Chinese Acad Sci	中国科学院大学	54	2.23	107	838
Zhejiang univ	浙江大学	51	2.10	37	1022
Nanjing Agr Univ	南京农业大学	43	1.77	55	782
Northwest A&F Univ	西北农林科技大学	31	1.28	49	567
CSIC	最高科研理事会	26	1.07	9	1028
Sichuan Agr Univ	四川农业大学	25	1.03	32	241
Russian Acad Sci	俄罗斯科学院	22	0.91	13	346
Southwest Univ	西南大学	19	0.78	18	125
Univ Melbourne	墨尔本大学	18	1.03	58	443
CNRS	法国国家科学研究中心	17	0.70	59	729
peKing Univ	北京大学	17	0.70	27	479
South China Agr Univ	华南农业大学	17	0.70	6	205
Sun Yat-sen Univ	中山大学	17	0.70	16	299
Tsinghua Univ	清华大学	17	0.70	44	325
Univ Copenhagen	哥本哈根大学	17	0.70	24	632
Univ Calif Berkeley	加州大学伯克利分校	17	0.70	31	1100
Vrije univ Amsterdam	阿姆斯特丹大学	16	0.66	42	694
Cornell Univ	康奈尔大学	15	0.62	97	856
King saud Univ	沙特阿拉伯国王大学	15	0.62	10	224

3.4. 经典文献分析

本文以 LCS 为标准对排名前十的文献进行统计分析，发现前十的发表文献年份集中在 2008~2013 年，其中被引频次最高的是综述文章，原因在于综述文章对所研究的问题进行归纳、分析、总结，为进一步从事科学研究和论文写作打下了坚实的基础。如瑞典作者 Kumpiene J 发表的“Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments-A review” (被引频次最高)，总结分析了植物修复技术对土壤 As、Cr、Cu、Pb 和 Zn 污染的修复，对前人的研究成果进行了高度的概括和总结。如表 4 所示，被引频次前十的文献中有 3 篇来自 Proceedings The National Academy of Science of The United States of America 期刊，可见该期刊在该学术领域具有非常重要地位和影响力。利用 HistCite 对研究文献进行引文编年图分析，通过软件中 Graph Maker 功能，可以表达该研究领域文献之间相互引证的关系，绘制出某个研究领域的研究历史轨迹、发展规律和 future 趋势[26]。以 LCS count 为条件，设置节点数为 30，可绘制出植物金属转运

蛋白研究文献的引文编年图，从而洞察某个领域的发展脉络。图 5 显示该领域影响力最高的 30 篇文献的发表时间、发展历程和互引关系。编号 59 的文献被引次数最高，其次是编号 301、编号 331 和编号 629。



注: Weights = Documents; 圆圈大小表示机构发文量, 不同颜色代表不同聚类, 共 26 个聚类; 共有 1928 条连线。

Figure 4. Map of important research institutions and their cooperative relationships in the field of plant metal transporters from 2008 to 2021

图 4. 2008~2021 年植物金属转运蛋白领域重要研究机构及相互间合作关系图谱

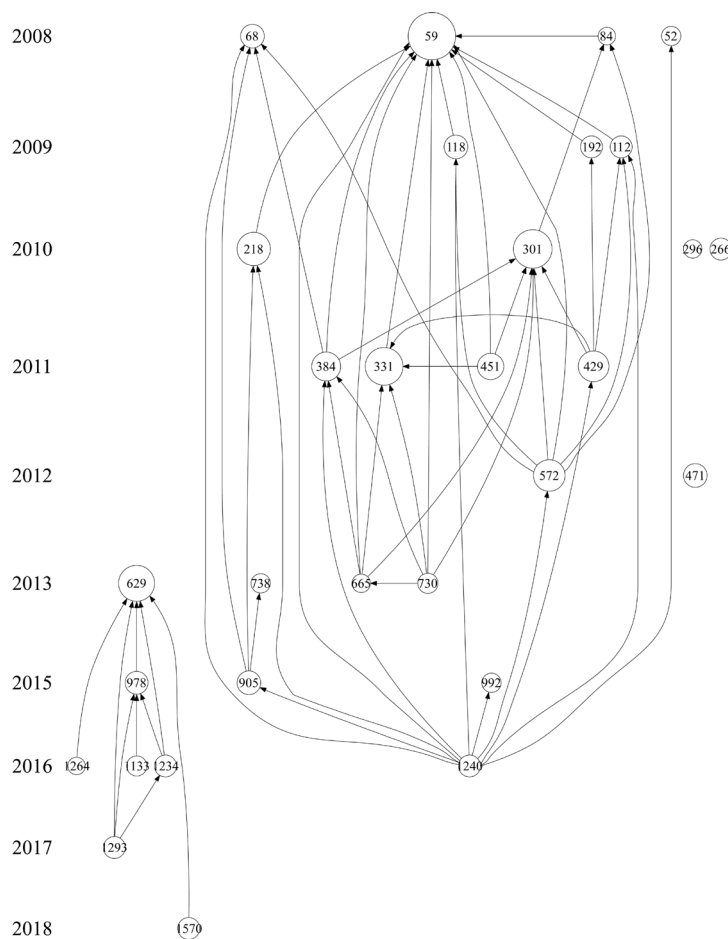
Table 4. Top 10 journals in the field of plant metal transporters

表 4. 植物金属转运蛋白领域发文量排名 Top 10 的期刊

Number	Thesis topic	Year	Journal	Author	LCS	GCS
59	Evolution of metal hyperaccumulation required cis-regulatory changes and triplication of HMA4	2008	Nature	Hanikenne M	92	482
301	Gene limiting cadmium accumulation in rice	2010	Proceedings The National Academy of Science of The United States of America	Ueno D	63	359
331	OsHMA3,aP-1B-type of ATPase affects root-to-shoot cadmium translocation in rice by mediating efflux into vacuoles	2011	New Phytologist	Miyadate H	58	248
629	Diverse and abundant antibiotic resistance genes in Chinese swine farms	2013	Proceedings the National Academy of Sciences of The United States of America	Zhu YG	54	954

Continued

218	Metal Hyperaccumulation in Plants	2010	Annual Review of Plant Biology	Kramer U	47	634
572	Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms	2012	Environment and Experimental Botany	Gallego SM	41	565
429	The OsNRAMP1 iron transporter is involved in Cd accumulation in rice	2011	Journal of Experimental Botany	Takahashi R	39	252
384	Elevated expression of TcHMA3 plays a key role in the extreme Cd tolerance in a Cd-hyperaccumulating ecotype of <i>Thlaspi caerulescens</i>	2011	Plant Journal	Ueno D	34	144
451	Low-affinity cation transporter(OsLCT1) regulates cadmium transport into rice grains	2011	Proceedings The National Academy of Sciences of The United States America	Kamiya T	28	191
471	Molecular characterization of a rice metal tolerance protein, OsMTP1	2012	Plant Cell Reports	Yuan LY	24	65

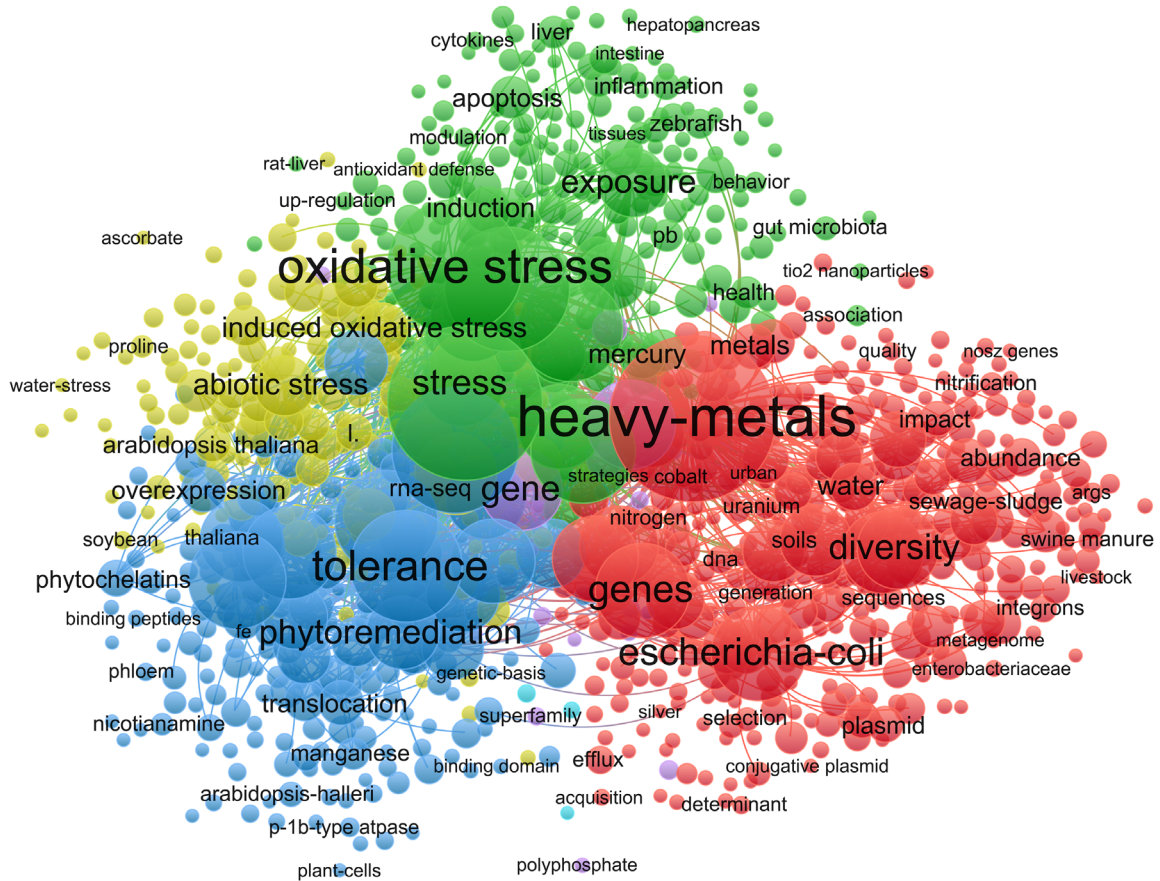


注：图中左侧一列是文献发表年份，与年份平行的圆圈代表当年发表的文献，其中圆圈中的数字为文献编号，圆圈大小可分析文献被引频次(圆圈越大表示被引次数越多)，它与 LCS 值成正比，通过圆圈之间的箭头分析文献间的引用关系。

Figure 5. Citation analysis diagram of important journals in the field of plant metal transporters from 2008 to 2018
图 5. 2008~2018 年植物金属转运蛋白领域重要期刊引文分析图

3.5. 关键词共现网络

关键词可以反映出该文章的主要研究方向，关键词出现的频次可以反映该研究领域的成果数以及该研究领域的研究热点和方向[27]。通过引文网络分析 Vosviewer 对该研究领域的关键词出现频次 > 12 的进行统计分析，如图 6 所示，可以得出，本研究的主题是重金属(hheavy-metals)，并在该研究领域占据了重要的地位，排名前6的关键词依次为heavy-metals、oxidative stress、tolerance、escherichia coli、genes、phytoremediation。这一时期的完整性管理热点可能是由于在过去 150 年里，全球重金属污染水平增加了 4000 多倍[28]。在全球范围内，越来越多区域的区域重金属含量超出重金属范围内，导致了环境质量和生态系统健康状态恶化，环境问题在世界上越来越受到重视[29]。为进一步了解研究关键词的动态变化，我们对 2008~2011、2012~2015 和 2016~2019 年最热关键词的演变进行了评估(图 7(A)、图 7(B)和图 7(C))。与 2008~2011 年相比，2016~2019 年最热关键词“重金属”出现频率更高。表明重金属毒性已经成为植物和其他生物必须要解决的问题。研究重金属转运体对植物体内金属稳态的影响以及对人类健康和植物修复具有重要意义[30]。近年来，国内外研究人员普遍关注植物对重金属的有效吸收和积累在体内的胁迫反应依赖于植物的刺激和通讯信号通路[31]。在这个复杂的信号和反应网络中，大量的转运蛋白和通道蛋白是促进基因表达、代谢、封闭和调节溶质生理反应的核心[32]。在外来重金属侵害条件下，植物本身也不会坐以待毙，它会对重金属产生相应的耐性和解毒机制，而金属转运蛋白在维持植物体内的金属平衡起着重要的作用[33]。



注: Weights = Occurrences; 节点表示关键词; 节点大小表示关键词出现的次数; 关键词参数阈值为 12, 即关键词至少出现 12 次; 不同颜色代表不同聚类, 共 23,169 条连线, 此图仅显示 12,994 条连线。

Figure 6. Co-occurrence networks of key keywords in the field of plant metal transporters from 2008 to 2021
图 6. 2008~2021 年植物金属转运蛋白领域重要关键词共现网络关系图谱

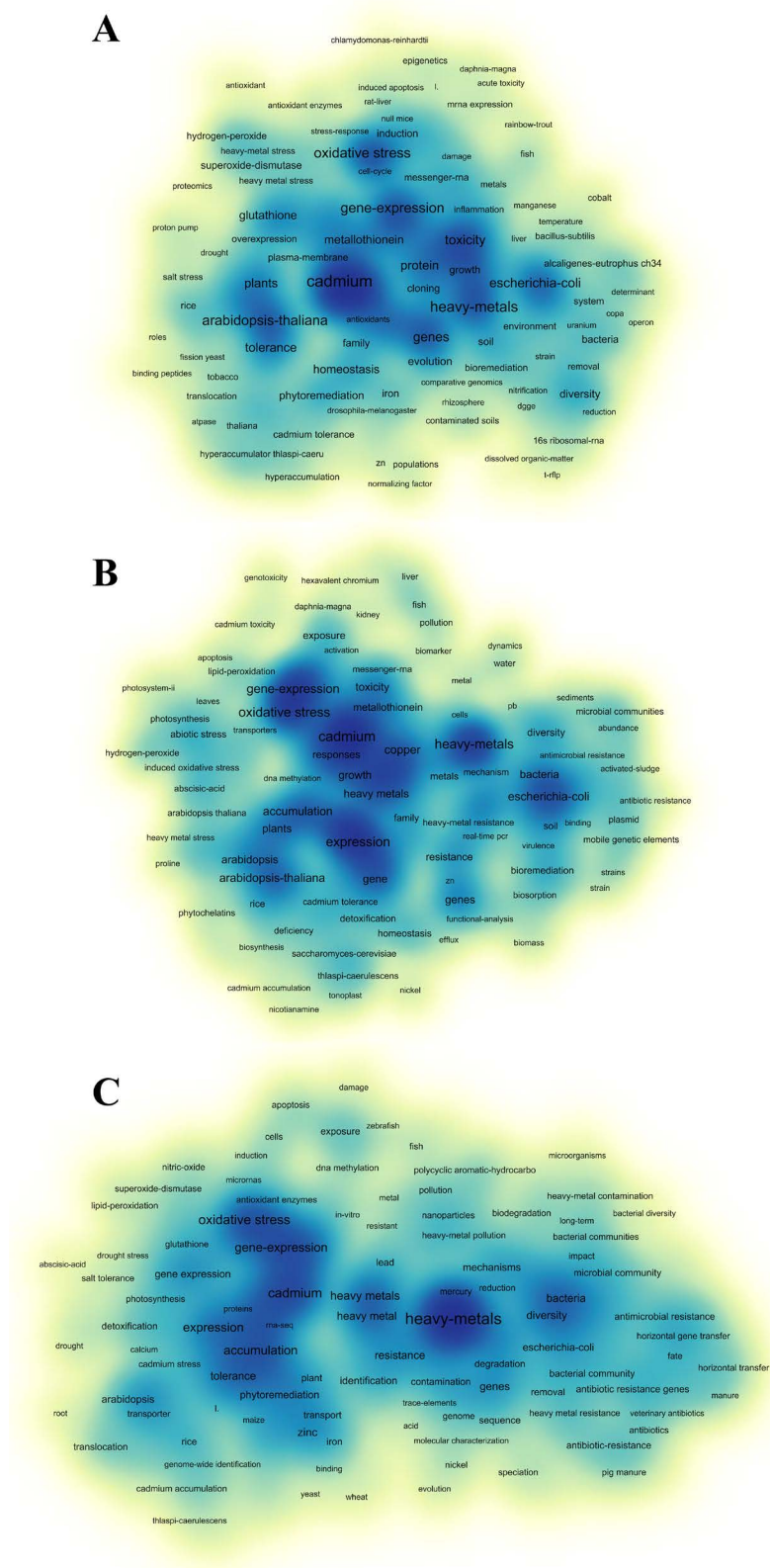


Figure 7. Research topics in WoS over time in the field of plant metal transporters: (A) 2008~2011; (B) 2012~2015; (C) 2016~2020

图 7. 关于 WoS 中研究课题随着时间的推移在植物金属转运蛋白领域: (A) 2008~2011; (B) 2012~2015; (C) 2016~2020

4. 结论和展望

本次研究显示, 全球范围内对植物重金属转运蛋白的研究和关注度总体上呈上升趋势。欧美国家在该领域研究较早, 且研究成果影响力较大; 重要的研究结构有中国科学院、俄罗斯科学院、墨尔本大学等。植物重金属转运蛋白领域的论文主要发表在 *Science of the Total Environment*、*Ecotoxicology and Environmental Safety*、*PloS ONE*、*Environmental and Experimental Botany* 等期刊上。跨学科交叉研究成为重金属研究的方向。

国际上关于植物重金属转运蛋白基础理论方面的研究已相对成熟, 经典文献较多且各时间段内研究热点层出不穷, 形成了较为广泛的知识理论体系。寻找和发掘耐受重金属毒害且调控重金属超量积累的关键基因并阐明其作用机理已成为广大学者当今研究的重点和热点。而超富集植物的筛选和加深对重金属形态及其相互转化机理的研究是近年来关注度较高的研究方向。通过分析金属胁迫相关的植物蛋白, 为提高植物金属胁迫抗性制定生物技术策略提供依据。生物化学和组学分析为开发应激反应蛋白的巨大潜力提供了必要的深入研究。最后, 可以研究具有高耐受性的植物物种, 并将它们的一些基因转移到其他植物, 如农作物, 以提高它们对金属的抗性。大多数植物在被金属污染的土壤和水中不能有效地生长。最终, 一些植物进化出了特定的分子和生理过程来承受金属胁迫。在基因和蛋白质水平上的不同研究已经确定了调节金属耐受性的机制。识别正确蛋白质功能的一些基本实体是蛋白质折叠和蛋白质间的相互作用。因此, 使用蛋白质组学的研究为识别和表征控制金属解毒的蛋白质阵列以及研究涉及蛋白质网络的通路提供了前所未有的分析深度。

基金项目

贵州省科技厅基础条件平台建设项目: 贵州省山地畜禽养殖污染控制与资源化检测基础条件平台, 黔科合平台人才[2019]5701 号。贵州省科技厅科研机构服务企业行动计划项目: 养殖污染控制与废弃物无害化资源化利用技术推广, 黔科合服企[2018]4007(006)。

参考文献

- [1] Der, K.V., Kok, C.J. and Stevens, L.H. (2004) Compositions Comprising Lignosulfonates for Crop Protection and Crop Improvement. Patent No. WO/2004/067699.
- [2] Comis, D. (1996) Green Remediation: Using Plants to Clean the Soil. *Journal of Soil & Water Conservation*, **51**, 184-187.
- [3] 杨茹月, 李彤彤, 杨天华, 李艳平, 刘慧, 王雷, 等. 植物基因工程修复土壤重金属污染研究进展[J]. *环境科学研究*, 32(8): 1294-1303.
- [4] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟. 超积累植物吸收重金属的生理及分子机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(1): 8-15.
- [5] Howlader, J., Robin, A., Natarajan, S., Biswas, M.K., Sumi, K., Song, C.Y., *et al.* (2020) Transcriptome Analysis by RNA-Seq Reveals Genes Related to Plant Height in Two Sets of Parent-Hybrid Combinations in Easter Lily (*Lilium longiflorum*). *Scientific Reports*, **10**, Article No. 9082. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65909-x>
- [6] Korshunova, Y.O., Eide, D., Clark, W.G., Guerinot, M.L. and Pakrasi, H.B. (1999) The IRT1 Protein from Arabidopsis Thaliana Is a Metal Transporter with a Broad Substrate Range. *Plant Molecular Biology*, **40**, 37-44. <https://doi.org/10.1023/A:1026438615520>
- [7] Curie, C., Cassin, G., Couch, D., Divol, F., Higuchi, K., Jean, M.L., *et al.* (2009) Metal Movement within the Plant: Contribution of Nicotianamine and Yellow Stripe 1-Like Transporters. *Annals of Botany*, **103**, 1-11. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn207>
- [8] Zhang, Y., He, L., Zong, H.-Y. and Cai, G.-B. (2021) A Membrane-Associated Metalloprotease of *Schistosoma japonicum* Structurally Related to the FACE-1/Ste24p Protease Family. *Molecular and Biochemical Parasitology*, **233**, Article ID: 111220. <https://doi.org/10.1016/j.molbiopara.2019.111220>
- [9] Chen, Y., Zhao, X., Li, G., Kumar, S., Sun, Z., Li, Y., Guo, W., Yang, J. and Hou, H. (2021) Genome-Wide Identification of the Nramp Gene Family in *Spirodela polyrhiza* and Expression Analysis under Cadmium Stress. *International*

- Journal of Molecular Sciences*, **22**, 6414.
- [10] 黎积誉. 拟南芥金属转运蛋白 NRAMPs 的结构与功能研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [11] 徐剑锋, 王雷, 熊瑛, 席北斗, 张列宇, 毛旭辉, 等. 土壤重金属污染强化植物修复技术研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2017, 7(3): 366-373.
- [12] 诸平, 史传龙. SCI(E)、SSCI、A&HCI 收录中国期刊的最新统计结果分析[J]. 宝鸡文理学院学报: 自然科学版, 2012, 32(2): 70-84.
- [13] Leydesdorff, L., Thor, A. and Bornmann, L. (2017) Further Steps in Integrating the Platforms of WoS and Scopus: Historiography with HistCite™ and Main-Path Analysis. *Profesional De La Información*, **26**, 662-671. <https://doi.org/10.3145/epi.2017.jul.10>
- [14] Nelhans, G. (2008) From GISystems to GIScience—A Theory of Science Approach to the Study of an Emerging Science.
- [15] Smith, J.R., Washington, A.R., Morrison, S.D. and Gottlieb, L.J. (2018) Assessing Patient Satisfaction among Transgender Individuals Seeking Medical Services. *Annals of Plastic Surgery*, **81**, 725-729. <https://doi.org/10.1097/SAP.0000000000001582>
- [16] Tamburini, A., Pitò, P., Cipollina, A. and Ciofalo, M. (2013) A Thermochromic Liquid Crystals Image Analysis Technique to Investigate Temperature Polarization in Spacer-Filled Channels for Membrane Distillation. *Journal of Membrane Science*, **447**, 260-273. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.06.043>
- [17] 汪勤俭, 耿鹏, 郭建秀, 冷怀明. 基于文献计量学试析我国医科大学学报学术影响力及其对策[J]. 中国科技期刊研究. 2012, 23(5): 779-783.
- [18] Shah, S.H.H., Lei, S., Ali, M., Micale, G., Doronin, D. and Hussain, S.T. (2019) Prosumption: Bibliometric Analysis Using HistCite and VOSviewer. *Kybernetes*, **49**, 1020-1045.
- [19] Vaneck, N. and Waltman, L. (2010) Software Survey: VOSviewer, A Computer Program for Bibliometric Mapping. *Scientometrics*, **84**, 523-538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- [20] Han, X. (2020) A Visual Analysis of the Research on the Use of Mobile Phones by College Students Based on VOSviewer. *International Journal of Education and Management Engineering (IJEME)*, **10**, 10-16. <https://doi.org/10.5815/ijeme.2020.06.02>
- [21] 翁翕, 黄宏雄. 通过文献的统计分析探索科研发展的某些规律[J]. 情报学刊. 1986, 7(3): 25-28.
- [22] Shi, W., Zhan.g, Y., Chen, S., Polle, A., Rennenberg, H. and Luo, Z.-B. (2018) Physiological and Molecular Mechanisms of Heavy Metal Accumulation in Nonmycorrhizal versus Mycorrhizal Plants. *Plant, Cell & Environment*, **42**, 1087-1103. <https://doi.org/10.1111/pce.13471>
- [23] 张明, 方永才. 对 JCR2002 中 SCI 期刊主要指标的分析[J]. 中国科技期刊研究, 2004, 15(3): 257-261.
- [24] Cangas, A.J., Fuentes, M. and Linares, J. (2006) Factor de Impacto de las Publicaciones españolas de psicología Utilizando un Amplio Rango de Revistas Fuente. *International Journal of Psychology & Psychological Therapy*, **6**, 417-424.
- [25] 范文田. 《世界隧道》1999 年的即年指标及其在全国科技期刊中的位置[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(4): 32.
- [26] Yang, C., Wang, X., Tang, X., Wang, R. and Bao, X. (2020) Stem-Cell Research of Parkinson Disease: Bibliometric Analysis of Research Productivity from 1999 to 2018. *World Neurosurgery*, **134**, e405-e411. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.10.087>
- [27] 郭文姣, 欧阳昭连, 李阳, 郭柯磊, 杜然然, 池慧, 等. 应用共词分析法揭示生物医学工程领域的研究主题[J]. 中国生物医学工程学报. 2012, 31(4): 545-551.
- [28] Golden, N.H., Warner, S.E. and Coffey, M.J. (2016) A Review and Assessment of Spent Lead Ammunition and Its Exposure and Effects to Scavenging Birds in the United States. In: de Voogt, W., *Reviews of Environmental Contamination & Toxicology*, Vol. 237, Springer, Cham, 123-191. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23573-8_6
- [29] Suman, J., Uhlik, O., Viktorova, J. and Macek, T. (2018) Phytoextraction of Heavy Metals: A Promising Tool for Clean-Up of Polluted Environment? *Frontiers in Plant Science*, **9**, Article No. 1476. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01476>
- [30] Xiang, S., Feng, S., Zhang, Y., Tan, J., Liang, S. and Chai, T. (2015) The N-Terminal Degenerated Metal-Binding Domain Is Involved in the Heavy Metal Transport Activity of TaHMA2. *Plant Cell Reports*, **34**, 1615-1628. <https://doi.org/10.1007/s00299-015-1813-x>
- [31] Schützendübel, A. and Polle, A. (2002) Plant Responses to Abiotic Stresses: Heavy Metal-Induced Oxidative Stress and Protection by Mycorrhization. *Journal of Experimental Botany*, **53**, 1351-1365. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.372.1351>
- [32] 秦利军, 宋拉拉, 赵丹, 赵德刚. 超量表达烟草高亲和钾离子转运体蛋白基因(NtHAK1)提高烟草盐胁迫能力[J].

农业生物技术学报, 2015, 23(12): 1576-1587.

- [33] Urek, G., Wiewióra, B., Rybka, K. and Prokopiuk, K. (2021) Different Response of Perennial Ryegrass—*Epichlo* Endophyte Symbiota to the Elevated Concentration of Heavy Metals in Soil. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-615695/v1>