

DOI: 10.5846/stxb202007131828

肖鹏飞, 吴德东. 全球植物修复研究文献计量分析. 生态学报, 2021, 41(21): 8685-8695.

全球植物修复研究文献计量分析

肖鹏飞*, 吴德东

东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040

摘要:为及时跟踪全球及中国植物修复技术的研究现状及发展趋势,以便为该研究领域的科研工作者及决策者提供参考,运用文献计量学方法,利用 Web of Science 核心数据库对 2003—2020 年间发表的全球植物修复研究文献进行了统计分析。全球植物修复的研究文献呈快速增长趋势,其中中国、美国和印度三国的总发文量和总被引频次均位居世界前三位,中国的发文量已经超过全球总发文量的三分之一,但中国的篇均被引频次较低。中国与美国、巴基斯坦、澳大利亚等国家在植物修复方面展开了广泛的国际交流与合作。比利时学者 Vangronsveld 在发文量等各项指标均占据世界首位,中国有 5 名学者发文量进入世界前 10 名,其中杨肖娥、骆永明、周启星等是学术影响力较大的国内作者。高质量论文主要发表在欧美国家主办的环境类期刊。我国植物修复研究虽然发展较快,但缺乏有国际影响力的核心成果,在研究创新性和发文质量上还有待提升。利用 VOSviewer 可视化软件分析了世界和中国发文的高频关键词,并根据聚类分析结果将当前植物修复研究分为 5 个不同的研究方向。此外,利用 CiteSpace 软件分析了植物修复研究在不同时期的突现关键词,最后总结了目前植物修复的研究热点和未来的研究方向。
关键词:植物修复;文献计量学;发文量;被引频次;聚类分析;突现检测

植物修复是利用自然生长植物或遗传工程培育植物所具有的吸收、稳定、降解、根滤、挥发等作用机理,现场去除污染土壤、水体中的重金属、有机物等污染物,或通过改变污染物的生物可利用性以降低其生物毒性,最终达到修复污染环境的目的^[1-2]。植物修复作为一种相对新兴的土壤污染治理技术,因其具有成本低、不破坏土壤结构、不引起二次污染、应用范围广等优点,被认为在重金属污染土壤治理方面有广阔的应用潜力和发展前景^[3-5]。近 20 年来,国内外植物修复的理论及应用研究发展势头迅猛,各国学者从超积累植物的筛选、修复的机制/过程、修复效率的强化措施以及在污染环境中的应用等方面展开了深入的研究,高水平研究成果产出日益增多^[6-10]。

文献计量分析以文献体系及其计量特征为研究对象,采用数学和统计学的方法研究文献的分布结构、数量关系及变化规律,进而分析、评价和预测科学技术的发展特征和规律,已广泛应用于农业、生态、环境、经济等各个科学领域^[11-14]。国内少数学者已经利用文献计量学方法对重金属污染修复技术的研究现状和趋势展开了分析^[15-18]。然而,目前很少有人大的时间尺度上收集并总结全球及国内植物修复研究的系统数据^[19]。国内外植物修复领域的研究热点、研究前沿及未来的发展趋势等尚不明朗,因此有必要针对十几年来植物修复的研究进行梳理,以获取国内外植物修复研究领域的发展动态。本文利用文献计量学方法对 2003—2020 年间全球发表的植物修复研究领域的文献进行量化分析,以便更好地帮助国内学者及时跟踪植物修复技术在世界范围内的研究现状与发展趋势,了解中国植物修复研究领域的世界学术地位以及与世界一流水平的差距,为加强我国植物修复技术的理论与应用研究提供参考依据。

基金项目:黑龙江省自然科学基金项目(LH2019D002);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572017CA08)

收稿日期:2020-07-13; **网络出版日期:**2021-07-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xpfawd@nefu.edu.cn

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文所有数据均来源于 Web of Science (WoS) 数据库核心合集。以 TS = (Phytoremediation OR Phytoextraction OR Phytovolatilization OR Phytostabilization) 作为检索式,检索的文献类型包括 Article 和 Review 两种,排除其他文献类型,共检索到 2003—2020 年的英文文献 13168 篇,其中 Article 和 Review 各有 12289 和 879 篇,分别占 93.32% 和 6.68%。以此作为分析样本进行后续的归类计量统计分析,文中所有数据的提取日期为 2020 年 12 月 8 日。

1.2 研究方法

利用文献计量学方法对文献进行量化分析。出版物的发表数量使用 Excel 2007 进行分析,并采用多项式模型预测其增长趋势。使用 WoS 平台自带的在线统计分析功能收集国家、期刊、作者的发文量、总被引频次、篇均被引频次、H 指数、期刊影响因子等信息。从 WoS 核心数据库下载筛选文献的 txt 格式文本,按需求将其导入至 VOSviewer 1.6.15 可视化软件进行关键词的共现网络分析和聚类分析,而 CiteSpace 软件则用以分析突现关键词,以揭示植物修复研究的热点以及趋势。若一篇文献由多个国家的作者合作完成, WoS 平台会将这些信息自动算入该国家的数据中,会导致一定程度的数据重合,但对研究发展趋势的总体分析不会产生明显影响。

1.3 主要指标

本文从文献的数量和质量两个维度出发,采用发文量、被引频次、H 指数和高被引论文等指标进行分析。发文量即论文的产出篇数,是衡量科研生产能力的重要指标;被引频次是指该统计项目的论文或某篇论文被其他论文作为参考文献的次数,包括总被引频次和篇均被引频次,反映出论文在该领域的价值和被同行所关注的程度;H 指数是指相关统计项目在一定时间内所发表的文章至少有 h 篇文献至少被引用了 h 次,该指标已被广泛用于评估该项目在一定时期内的学术产出数量与质量^[20-21]。

2 结果与分析

2.1 总发文量及增长趋势

发文量随年份的变化在一定程度上反映了相关研究领域的发展速度。图 1 显示了世界和中国每年发表的植物修复方面的论文数量及增长趋势。2003 年的世界发文量仅为 264 篇,随后植物修复相关文献以每年几十篇的幅度逐年增加,而在 2014 年以后则每年增加上百篇,至 2019 年的发文量已经达到 1439 篇,比 2018

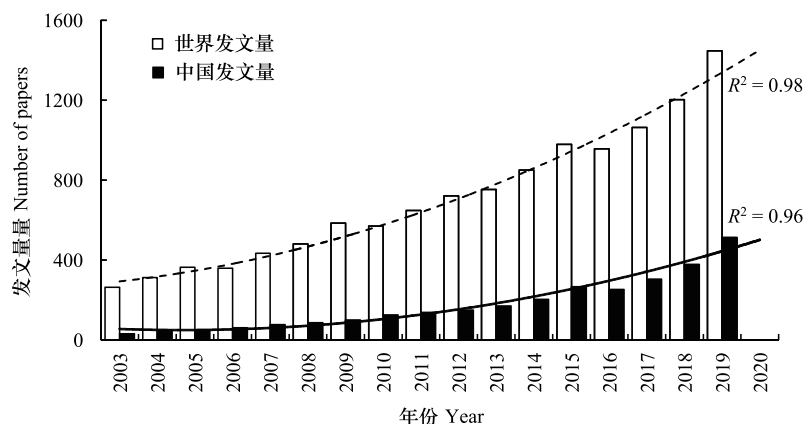


图 1 植物修复研究的发文量及增长趋势

Fig.1 The number and growth trend of papers published on phytoremediation research

年的发文量增加了 255 篇,表明植物修复研究已经成为当下全球专家学者关注的焦点。从国内学者的发文量来看,2003 年的发文量仅 30 篇,占世界当年总发文量的 11.36%,2010 年该比例上升至 21.93%,而 2019 年中国发文量已经达到了 512 篇,超过世界总发文量的三分之一,表明国内学者对植物修复研究的重视程度和对成果的贡献均在不断增加。用多项式趋势线模拟了世界和中国在发表年份与文献发表数量之间的关系,其趋势线模型拟合结果良好,决定系数 R^2 分别为 0.98 和 0.96,可以准确地预测植物修复领域发文量的增加趋势,预计 2020 年世界和中国发文量将分别接近 1600 和 600 篇(图 1)。实际上,截止至 2020 年 12 月 8 日,WoS 核心数据库收录的世界和中国当年的实际发文量分别为 1412 篇和 507 篇。考虑全球 COVID-19 疫情的影响,预计 2020 年及 2021 年的文献增长速率可能会有所减缓。

2.2 文献被引频次分析

被引频次能客观反应文献在该领域的引用价值和重视程度,被引频次越高表明该研究在相关领域的科学交流中的影响力和地位越高^[22]。从图 2 可见,2012 年之前世界总被引频次变化不大,每年的总被引频次均在两万上下,年被引频次高峰出现在 2009 年,达到 26481 次,2013 年后总被引频次逐年下降。中国发文的总被引频次没有出现明显的随年份而下降的情况,尤其在 2004 年至 2017 年间相差不大,均在 4000 上下波动,最高为 2015 年的 4764 次。从篇均被引频次上看,早期年份尽管发文量不多,但篇均被引频次较高,如 2003 年世界和中国的篇均引用分别达到最高的 72.77 和 81.29 次,2006 年仍分别可达到 55 次和 65 次以上,表明早期的论文受到更多的关注。随后由于发文量的增加,篇均被引频次随年份缓慢下降。中国和世界在篇均被引频次上看没有明显的差别,在 2006 年以前甚至高于世界的篇均被引频次,表明国内发文的影响力与全球的平均水平相当。

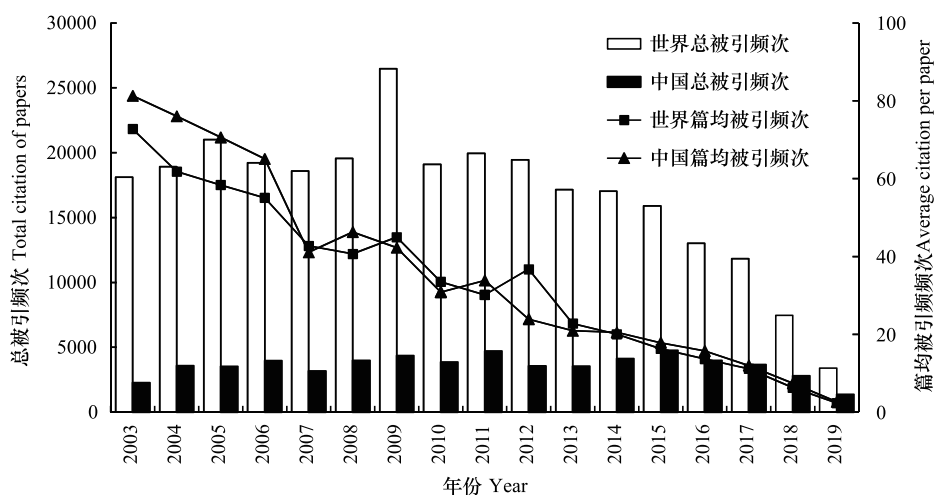


图 2 世界和中国的植物修复研究发文的被引情况

Fig.2 Citation of phytoremediation papers in the world and China

2.3 高发文国家及国际合作

分析各国家的总发文量可反映出各国家在某研究领域的科研生产力。通过对 WoS 核心数据库进行检索发现,共有 110 个国家发表了植物修复相关的论文,其中发文量排名前 10 的国家如表 1 所示。中国发文量为 3451 篇,占总发文量的 26.21%,接近第 2 名美国(1827 篇)的两倍,说明植物修复在国内的研究热度不断提升,也体现出国内应用植物修复污染环境方面的迫切需求。印度以 1210 的发文量位列第 3 位。其它国家之间的发文量比较接近。中、美、印三国的总被引频次同样位居前三位,分别达到了 69383、63138 和 33818 次。然而,中国发文的篇均被引频次仅为 20.11,不仅远低于美国(34.56)、德国(36.62)和澳大利亚(33.54),甚至低于印度(27.95)和巴基斯坦(25.36),仅排在发文量前 10 国家的第 9 位。此外,中国发文的 H 指数(99)也

低于美国(111),排在第2位。近十几年来我国学者在植物修复领域做了大量的科学研究,在总发文量和总被引频次上排名世界第一,但篇均被引频次明显偏低,表明国内的研究成果在全球范围内的受关注度及影响力仍然不高,在整体研究质量和创新性上还有待进一步提升。

表 1 发文量前 10 的国家统计
Table 1 Top 10 countries in number of paper published

排名 Rank	国家 Country	发文量 Number of papers	总被引 Total citation	篇均被引 Average citation	H 指数 H-index
1	中国	3451	69383	20.11	99
2	美国	1827	63138	34.56	111
3	印度	1210	33818	27.95	85
4	西班牙	728	19106	26.24	65
5	意大利	645	17515	27.16	66
6	法国	631	16836	26.68	58
7	巴基斯坦	570	14456	25.36	57
8	波兰	556	8342	15	43
9	德国	491	17981	36.62	67
10	澳大利亚	484	16232	33.54	62

使用 VOSviewer 软件对发文国家进行共现网络分析,可以了解不同国家之间在植物修复研究领域的合作关系。选择国家发文量为 100 以上,连接数为 100,共得到的 36 个主要发文国家(节点)间的共现关系图(图 3)。国家间的连接线条越粗,代表两国间合作发文数量越多,即合作越紧密。美国和中国是两个最大的

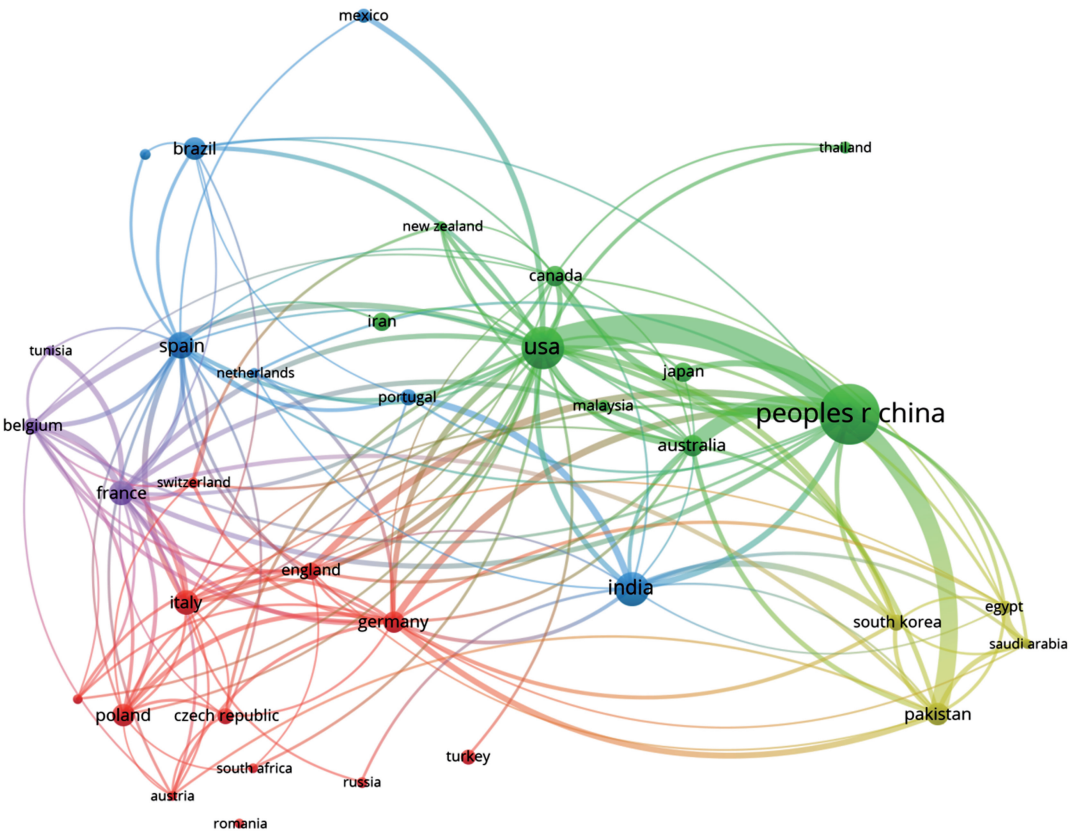


图 3 不同国家开展植物修复研究的共现关系图谱
Fig.3 Co-occurrence network visualization map of countries in phytoremediation research

网络节点,尤其美国位于共现关系图谱的中心连接点,即和其他发文国家的联系最为紧密,几乎与所有主要发文国家都有合作关系。在整个合作网络中,中美之间的线条最粗,表明两国是全球植物修复研究领域最大的合作体系。此外,中国与澳大利亚、巴基斯坦、德国、英国、加拿大、日本等国家之间均开展了较多的合作研究。近年来中国的“走出去,请进来”的研究战略让国内学者有更多的机会与国外高水平机构和学者进行交流与合作,也使得国内植物修复研究更够紧跟国际研究前沿^[23]。但也要看到,国内植物修复研究的国际合作程度和美国还有差距,与意大利、西班牙、巴西、瑞士、伊朗、土耳其、俄罗斯等主要发文国的合作研究仍有上升的空间。

2.4 高发文期刊

全球共有 1100 多家期刊发表过植物修复方面的论文,其中发文量前 10 的期刊的发文总数占世界发文总数的 38.60%(表 2)。International Journal of Phytoremediation(IJP)以 1194 的发文量成为发表植物修复研究成果最多的期刊,其次为 Environmental Science and Pollution Research(ESPR)和 Chemosphere,分别发表了 878 和 740 篇论文,其他期刊的发文数均未超过 400。从总被引频次上看,排在前三位的分别是 Chemosphere(27677)、Environmental Pollution(EP,18432)和 Journal of Hazardous Materials(JHM,17293)。篇均被引频次在前 10 期刊中相差较大,发文量前两位的 IJP 和 ESPR 的篇均被引频次仅为 13.42 和 13.81,排在前三位的 EP、JHM 和 Plant and Soil 分别为 51.49、46.24 和 40.33。而 H 指数最高的分别为 Chemosphere、EP 和 JHM 的 81、77 和 65。以上分析可见,尽管 IJP 和 ESPR 具有最高的发文量,但 Chemosphere、EP、JHM、Plant and Soil 等具有高影响因子的 Q1 期刊的篇均被引频次和 H 指数更高,是发表植物修复研究成果最具学术权威性的国际期刊,也更容易受到各国学者的关注。同时也要注意,我国学者在植物修复研究的发文量虽然最多,但其绝大多数成果均发表在荷兰、美国、英国等国外期刊上,暴露出国内期刊缺乏国际认可度和影响力不足的问题,今后还需进一步提高国内期刊质量,努力打造具有国际品牌效应的高水平期刊。

表 2 发文量前 10 的期刊统计
Table 2 Top 10 journals in number of paper published

排名 Rank	出版物 Journal	影响因子 Influencing factors	发文量 Number of papers	占比 Percentage/%	总被引 Total citation	篇均被引 Average citation	H 指数 H-index
1	International Journal of Phytoremediation	2.528 (Q2)	1194	9.07	16020	13.42	49
2	Environmental Science and Pollution Research	3.056 (Q2)	878	6.67	12121	13.81	45
3	Chemosphere	5.778 (Q1)	740	5.62	27677	37.4	81
4	Science of the Total Environment	6.551 (Q1)	387	2.94	11159	28.83	49
5	Ecotoxicology and Environmental Safety	4.872 (Q1)	384	2.92	7101	18.49	41
6	Journal of Hazardous Materials	9.038 (Q1)	374	2.84	17293	46.24	65
7	Environmental Pollution	6.793 (Q1)	358	2.72	18432	51.49	77
8	Water Air and Soil Pollution	1.9 (Q3)	301	2.29	6068	20.16	36
9	Plant and Soil	3.299 (Q1)	245	1.86	9880	40.33	51
10	Ecological Engineering	3.512 (Q1)	222	1.69	4889	22.02	37

2.5 高发文作者

全球 28000 多名学者为植物修复方面的研究做出了贡献。发文量前 10 的作者见表 3,其中有 5 名学者来自中国,3 名学者来自巴基斯坦,比利时有 2 名学者。来自比利时 Hasselt 大学的 Vangronsveld 以 116 篇的发文量占据榜首,同时在总被引频次(6900)、篇均被引频次(59.48)和 H 指数(44)上均遥遥领先其他作者,展现出在植物修复研究领域绝对的优势和影响力。浙江大学的杨肖娥与中国科学院的骆永明分别以 101 和 99 篇的发文量位列第 2、3 位。杨肖娥(3685)和南开大学的周启星(3590)则分列总被引频次的 2、3 名;而周启星以 57.9 的篇均被引频次排在第 2 位。分析还发现,多位高发文作者来自同一研究机构,如来自中国科学院的骆永明、吴龙华和 Christie,来自比利时的 Vangronsveld 和 Weyens,以及来自巴基斯坦的 Ali 和 Rizwan,他们作

为合作者发表了较多的成果,体现出密切的合作关系。

表 3 发文章前 10 的作者统计
Table 3 Top 10 authors in number of paper published

排名 Rank	第一作者 First author	机构 Institution	发文章 Number of papers	总被引 Total citation	篇均被引 Average citation	H 指数 H-index
1	Vangronsvelt J	Hasselt University (Belgium)	116	6900	59.48	44
2	Yang XE	Zhejiang University (China)	101	3685	36.49	32
3	Luo YM	Chinese Academy of Sciences (China)	99	3117	31.48	30
4	Ali S	Government College University Faisalabad (Pakistan)	85	2827	33.26	28
5	Christie P	Chinese Academy of Sciences (China)	79	2349	29.73	29
6	Wu LH	Chinese Academy of Sciences (China)	65	1407	21.65	21
7	Rizwan M	Government College University Faisalabad (Pakistan)	64	1605	25.08	20
8	Zhou QX	Nankai University (China)	62	3590	57.9	30
9	Afzal M	Pakistan Institute of Engineering Applied Science (Pakistan)	60	1981	33.02	24
10	Weyens N	Hasselt University (Belgium)	60	3293	54.88	28

2.6 高被引论文

目前的研究评价体系中,论文的被引频次越来越多地被用作衡量论文重要性的指标。分析本领域高被引论文,可以追踪本学科领域的研究热点和发展趋势,为进一步的研究工作提供指导^[23]。在植物修复研究的前 10 篇高被引论文中,综述和研究论文分别有 7 篇和 3 篇,发表在 2003—2014 年间(表 4)。按照第一作者的国籍,有 3 篇来自美国,2 篇来自印度,巴基斯坦、德国、英国、奥地利和澳大利亚各 1 篇。被引频次前 3 位的论文均为综述,其中印度学者 Haritash 于 2009 年发表的文献的被引频次达到了 1472 次,该作者从微生物、酶、堆肥、湿地和植物修复等几个方面对 PAHs 的生物降解特性及影响因素进行了全面的阐述^[24]。巴基斯坦学者 Ali 发表的论文以 1276 的总被引频次排在第 2 位,介绍了重金属污染植物修复的背景、概念和发展趋势。

表 4 植物修复研究的高被引论文
Table 4 Higher cited papers on phytoremediation

排名 Rank	题目 Title	文章类型 Paper type	第一作者 First author	出版物 Journal	总被引 Total citation	时间 Time
1	Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): A review	Review	Haritash AK (India)	Journal of Hazardous Materials	1472	2009
2	Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications	Review	Ali H (Pakistan)	Chemosphere	1276	2013
3	Phytoremediation	Review	Pilon-Smits E (USA)	Annual Review of Plant Biology	1203	2005
4	Defining the core Arabidopsis thaliana root microbiome	Article	Lundberg DS (USA)	Nature	1059	2012
5	Chromium toxicity in plants	Review	Shanker AK (India)	Environmental International	1025	2005
6	Revealing structure and assembly cues for Arabidopsis root-inhabiting bacterial microbiota	Article	Bulgarelli D (Germany)	Nature	892	2012
7	Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site	Article	Yoon J (USA)	Science of the Total Environment	817	2006
8	Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization	Review	Compant S (Austria)	Soil Biology & Biochemistry	780	2010
9	Remediation of heavy metal (loid)s contaminated soils-To mobilize or to immobilize?	Review	Bolan N (Australia)	Journal of Hazardous Materials	770	2014
10	Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees-a review	Review	Pulford ID (UK)	Environment International	764	2003

势^[25]。排在第3位的是美国学者 Pilio-Smits 发表的文献,被引频次为 1203 次,综述了适用于各种有机和无机污染物的不同植物修复技术,以及最适合的植物种类^[26]。被引频次最高的两篇研究论文均发表在 2012 年的 Nature 上,美国学者 Lundberg 和德国学者 Bulgarelli 的论文分别被引 1059 和 892 次,他们均聚焦于超积累植物拟南芥的根际微生物,对根际菌群的定殖机制展开了深入的研究^[27-28]。其他高被引论文的内容包括修复植物对重金属的积累、重金属对植物的毒性、内生细菌促进植物生长等几个方面。值得思考的是,前 10 篇高被引论文中没有来自中国的第一作者,国内作者仅作为一篇高被引论文的合作者^[29]。浙江大学的 He 发表的综述文献“Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment”以 714 次的被引频次位列第 12 位^[30]。可见作为植物修复领域发文量最多的国家,我国在产出具有高影响力研究成果方面与国际顶尖成果间差距明显,缺乏有国际影响力的核心论文和核心作者,与研究成果“量”的突破相比,更需要“质”的提升。

2.7 关键词分析

2.7.1 高频关键词

高频关键词分析可以反映出近十几年来植物修复相关领域的研究热点。利用 VOSviewer 软件从所有文献中提取出共 29050 个关键词,其中出现 10 次和 100 次以上的关键词分别有 1889 和 224 个,大量的关键词体现出植物修复研究领域的广泛以及研究焦点上的差异。对相同含义的关键词进行归类处理后,世界发文中出现频次排在前 10 的关键词依次是植物修复、重金属、植物提取、镉、生物修复、植物稳定、铅、砷、超积累植物和根际;而中国发文的前 10 关键词依次是植物修复、镉、重金属、植物提取、超积累植物、积累、耐受性、铅、根际和砷(图 4)。总体上看,国内外学者在植物修复研究中关注的焦点仍以重金属类污染物为主,尤其是镉、铅

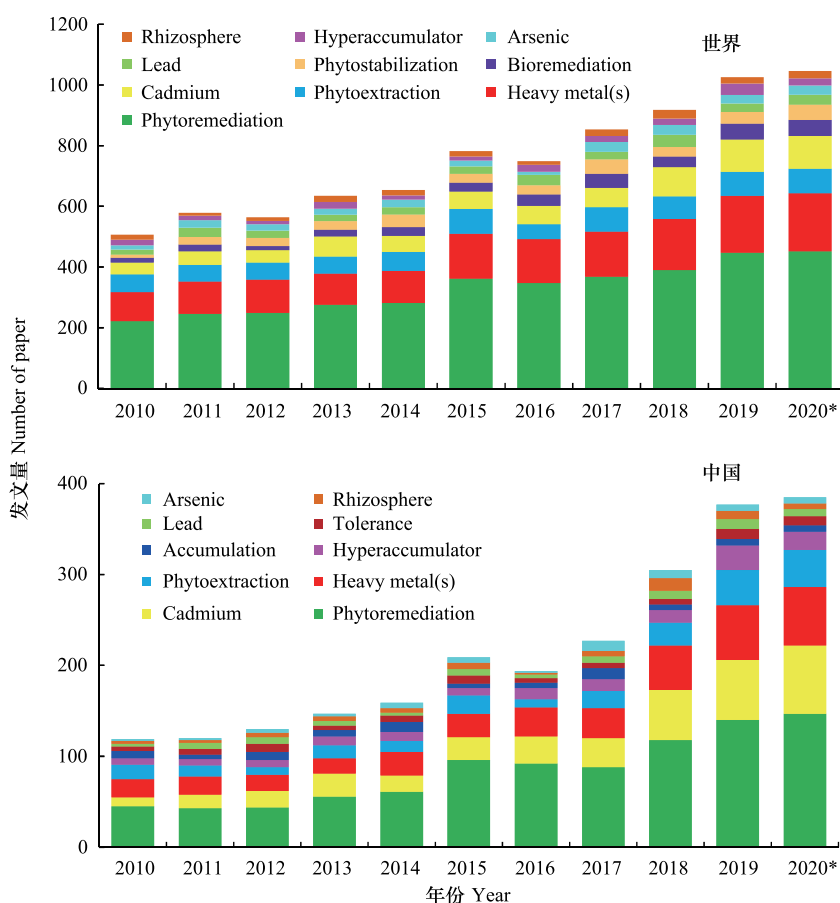


图 4 2010—2020 年世界和中国发文的前 10 关键词出现频次

Fig.4 Frequency of Top 10 keywords in word and China from 2010 to 2020

* 2020 年的数据截止至 2020 年 12 月 8 日

和砷。但高频关键词在世界和中国发文中的排名也有所差异,如镉在中国发文的关键词排名高于世界,位列第 2 位,说明镉是我国土壤植物修复研究的主要目标污染物,也反映出我国镉污染土壤修复的迫切性和受关注度^[31-32]。在几种植物修复类型中,我国更注重植物提取(吸收)方面的研究,而世界上除了植物提取外,对植物稳定技术的关注度也比较高^[33]。此外,超积累植物和耐受性这两个关键词在中国的排名也明显高于世界,超积累植物是决定植物修复效率的关键因素,这也表明筛选具有耐受性强的超积累植物是我国植物修复研究的重要关注方向^[34-35]。

2.7.2 聚类分析

根据关键词之间紧密关联的程度,可将其分类成不同的集群,同一个集群中的关键词共现频次高,能共同反映出某一个相近的研究领域。本研究基于 VOSviewer 软件对出现 100 次以上的关键词进行共被现聚类分析,其网络可视化图谱见图 5。207 个关键词被分为 5 个聚类,聚类 1(红色)拥有最多的 63 个关键词,包括积累、植物、镉、生长、忍耐、毒性、响应、代谢、氧化应激、超积累植物、拟南芥、砷等。这个聚类主要包括超积累植物的筛选及修复机制、有害重金属对植物生长及生理代谢的毒性作用、植物产生的生理响应及忍耐机制等方面的关键词^[36-37]。聚类 2(绿色)共 59 个关键词,主要有植物提取、重金属、金属、铅、铜、锌、形态、污染土壤、修复、植物固定、EDTA、有机酸及生物有效性等。这个聚类主要反映了植物去除污染土壤中典型重金属的方法及强化措施等,如植物通过提取吸收去除土壤中的金属,或通过根际的固定作用改变金属形态,添加 EDTA 或有机酸改变金属的生物有效性等^[38-39]。本研究所检索到的所有文献中有 74.8% (9580 篇) 的文献的主题词包括“soil”,表明与污染水体的修复相比,污染土壤尤其是重金属污染土壤的植物修复受到了更广泛的关注。

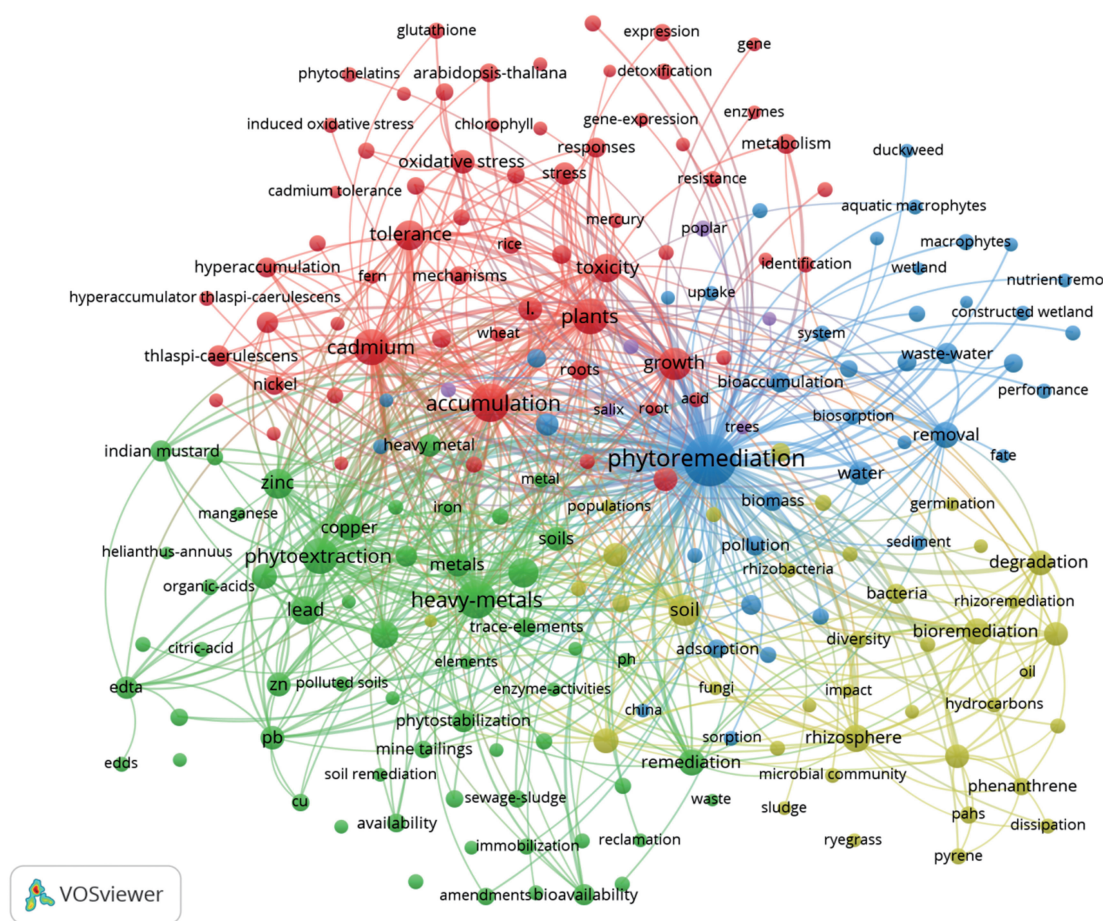


图 5 植物修复研究关键词共现网络可视化图谱

Fig.5 Co-occurrence network visualization map of keywords from phytoremediation research

聚类 3(蓝色)共 41 个关键词,包括植物修复、去除、水、废水、生物积累、氮、磷、人工湿地、生物量、污染、吸附等。近年来,水体中污染物的植物修复也引起了研究者的关注,包括利用水生植物吸收富营养化水体中的氮磷污染物,或利用人工湿地等生态工程措施处理各类废水等方面的研究,这可能代表了这一领域的一个新的研究趋势^[40-41]。聚类 4(黄色)共 38 个关键词,包括土壤、生物修复、降解、根际、根际修复、多环芳烃、菲、细菌、内生细菌、多样性、碳氢化合物、微生物群落等,这部分集中了植物根际修复方面研究的关键词,如根际微生物群落及多样性的研究,根际细菌对多环芳烃等碳氢化合物的生物降解研究等^[42-43]。聚类 5(紫色)仅包括生物质生产量、重金属积累、杨树、柳属、乔木和柳树共 6 个关键词,相比于生物量较小、积累量受限的草本植物,柳树、杨树等乔木树种具有生物量大、生长速度快、重金属积累能力强等特点,同时具有良好的环境适应性和景观特性,是进行污染环境修复的良好植物资源^[44-45]。

2.7.3 突现词检测

通过找出总出现频次虽不高但在某些年份却集中出现的关键词,可以更加全面、准确地分析植物修复研究在不同时期研究热点和研究前沿。本文进一步采用 CiteSpace 可视化软件对 2008—2020 年间的文献中的关键词进行突现检测,共筛选出跨越 2 年以上的主要突现关键词 26 个(图 6)。其中,2010 年之前便已开始出现的突现强度大的关键词有污泥、超积累、芥菜、印度芥菜、遏蓝菜、代谢、植物螯合素、杨树等,且这些突现关键词相关领域的研究热度持续时间较长,其中超积累这一关键词的突现时间跨度最大,这一阶段对印度芥菜和遏蓝菜等模式植物对重金属的超积累特性及机制的研究持续成为研究热点^[46]。2012 年之后可利用性、植物毒性、铬等成为强度较高的突现关键词。而改良、污染、矿山尾矿、光合作用、多样性、氮、微生物群落等陆续成为 2016—2018 年间开始突现且强度较高的关键词,且突现年份均已经跨越 3 年以上,且其研究热度一致持续到 2020 年,并可能成为未来一段时间的研究趋势,这也意味着植物修复研究已经扩展到了更广阔的领域。随着近几年植物修复研究的进一步深化,一些新的研究热点也不断涌现^[47-50]。

3 结论与展望

为了揭示全球植物修复领域的研究现状与发展趋势,对 WoS 核心数据库中 2003—2020 年间发表的植物修复研究领域的文献进行计量学分析。全世界范围内发表的植物修复研究的论文数量逐年增加,其中中国发文量呈现快速增长的趋势,年度发文量已经超过世界的三分之一。中国、美国和印度的发文量、总被引频次和 H 指数位居世界前 3,但中国的篇均被引频次低于其他主要发文国家。植物修复研究成果主要发表在 IJP、ESPR 和 Chemosphere 等国外高水平期刊上。来自中国科学院、浙江大学和南开大学的 5 名中国学者进入世界发文量前 10,是国内在植物修复领域的主要研究力量。高频关键词的分析表明,国内外研究主要集中在重金属污染的植物修复方面,镉污染、超积累植物和耐受性等关键词在国内关注度更高;高频关键词主要被聚类为植物修复机制及重金属对植物生长的影响、重金属污染土壤的植物修复、污染水体的植物修复、污染土壤的根际微生物修复以及高生物量超积累植物的筛选等几个研究方向。通过不同年份突现关键词的分析提出了近年来植物修复技术的研究热点。总体上看,全球植物修复技术研究呈快速发展的趋势,而我国的植物修复研究体现出发展速度快、成果产出多、国际合作水平高、整体实力突出的特点,但在文献质量上未能与数量增长同步提升,尤其在产出具有高影响力研究成果方面与国际间尚存差距,缺乏有国际关注度和创新性的核心成果,亟待由“量”向“质”的飞跃。

总体上看,植物修复这一生态友好型技术经近 30 年的发展已经取得了很大的成就。植物修复技术的理论研究最终是要面向工程应用,尽管目前多数研究工作还停留在实验室阶段,但在国内外已经有一些植物修复被推广应用于污染土壤修复的实例,而且可以预见该技术具有光明的应用前景和不可阻挡的发展趋势,今后应从以下几个方面开展重点研究:(1)继续调查、寻找更多的生长快、生物量高的超积累植物,并加强现有超积累植物的育种和驯化;(2)加强复合型修复植物的筛选工作,这对于复合污染土壤的修复具有重要意义;(3)应用分子生物学和基因工程技术,构建具有高耐受性和超富集性状的基因工程植物;(4)深化植物-微生

- [15] 闫淑兰, 赵秀红, 罗启仕. 基于文献计量的重金属固化稳定化修复技术发展动态研究. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 229-238.
- [16] 吴永红, 靳少非. 基于 CiteSpace 的重金属污染土壤修复研究文献计量分析. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 454-461.
- [17] 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. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2409-2417.
- [18] 吕凯, 张彩丽. 中国土壤重金属污染修复研究的文献计量分析. 农学学报, 2017, 7(5): 56-59, 95-95.
- [19] Li C, Ji X H, Luo X G. Phytoremediation of heavy metal pollution: a bibliometric and scientometric analysis from 1989 to 2018. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(23): 4755.
- [20] Bornmann L, Daniel H D. Does the *h*-index for ranking of scientists really work? Scientometrics, 2005, 65(3): 391-392.
- [21] Thelwall M. The influence of highly cited papers on field normalised indicators. Scientometrics, 2019, 118(2): 519-537.
- [22] Leimu R, Koricheva J. What determines the citation frequency of ecological papers? Trends in Ecology & Evolution, 2005, 20(1): 28-32.
- [23] 高懋芳, 邱建军, 刘三超, 刘宏斌, 王立刚, 逢焕成. 基于文献计量的农业面源污染研究发展态势分析. 中国农业科学, 2014, 47(6): 1140-1150.
- [24] Haritash A K, Kaushik C P. Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): a review. Journal of Hazardous Materials, 2009, 169(1/3): 1-15.
- [25] Ali H, Khan E, Sajad M A. Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications. Chemosphere, 2013, 91(7): 869-881.
- [26] Pilon-Smits E. Phytoremediation. Annual Review of Plant Biology, 2005, 56: 15-39.
- [27] Lundberg D S, Lebeis S L, Paredes S H, Yourstone S, Gehring J, Malfatti S, Tremblay J, Engelbrektson A, Kunin V, del Rio T G, Edgar R C, Eickhorst T, Ley R E, Hugenholtz P, Tringe S G, Dangl J L. Defining the core *Arabidopsis thaliana* root microbiome. Nature, 2012, 488(7409): 86-90.
- [28] Bulgarelli D, Rott M, Schlaeppi K, van Themaat E V L, Ahmadinejad N, Assenza F, Rauf P, Huettel B, Reinhardt R, Schmelzer E, Peplies J, Gloeckner F O, Amann R, Eickhorst T, Schulze-Lefert P. Revealing structure and assembly cues for *Arabidopsis* root-inhabiting bacterial microbiota. Nature, 2012, 488(7409): 91-95.
- [29] Yoon J, Cao X D, Zhou Q X, Ma L Q. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. Science of the Total Environment, 2006, 368(2/3): 456-464.
- [30] He Z L, Yang X E, Stoffella P J. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2005, 19(2/3): 125-140.
- [31] Li X, Zhang X M, Yang Y, Li B Q, Wu Y S, Sun H, Yang Y P. Cadmium accumulation characteristics in turnip landraces from China and assessment of their phytoremediation potential for contaminated soils. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 1862.
- [32] Zeng H Y, Chen L H, Zhou X H, Zeng Q R. Cadmium accumulation in winter crops and the assessment of paddy soil phytoremediation in southern China. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(17): 17173-17182.
- [33] Wang X, Chen C, Wang J L. Cadmium phytoextraction from loam soil in tropical southern China by *Sorghum bicolor*. International Journal of Phytoremediation, 2017, 19(6): 572-578.
- [34] Li J T, Gurajala H K, Wu L H, van der Ent A, Qiu R L, Baker A J M, Tang Y T, Yang X E, Shu W S. Hyperaccumulator plants from China: a synthesis of the current state of knowledge. Environmental Science & Technology, 2018, 52(21): 11980-11994.
- [35] Cui L W, Zhao J T, Chen J Y, Zhang W, Gao Y X, Li B, Li Y F. Translocation and transformation of selenium in hyperaccumulator plant *Cardamine ensiensis* from Enshi, Hubei, China. Plant and Soil, 2018, 425(1/2): 577-588.
- [36] Gupta D K, Huang H G, Corpas F J. Lead tolerance in plants: strategies for phytoremediation. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(4): 2150-2161.
- [37] Tauqeer H M, Ali S, Rizwan M, Ali Q, Saeed R, Iftikhar U, Ahmad R, Farid M, Abbasi G H. Phytoremediation of heavy metals by *Alternanthera bettzickiana*: growth and physiological response. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 126: 138-146.
- [38] Meers E, Ruttens A, Hopgood M J, Samson D, Tack F M G. Comparison of EDTA and EDDS as potential soil amendments for enhanced phytoextraction of heavy metals. Chemosphere, 2005, 58(8): 1011-1022.
- [39] Bhargava A, Carmona F F, Bhargava M, Srivastava S. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. Journal of Environmental Management, 2012, 105: 103-120.
- [40] Jeevanantham S, Saravanan A, Hemavathy R V, Kumar P S, Yaashikaa P R, Yuvaraj D. Removal of toxic pollutants from water environment by phytoremediation: a survey on application and future prospects. Environmental Technology & Innovation, 2019, 13: 264-276.
- [41] Huang L F, Zhuo J F, Guo W D, Spencer R G M, Zhang Z Y, Xu J. Tracing organic matter removal in polluted coastal waters via floating bed phytoremediation. Marine Pollution Bulletin, 2013, 71(1/2): 74-82.
- [42] Wu Q, Wang X F, Li Y, Zhao H B, Sen P. Response of Rhizosphere bacterial diversity to phytoremediation of Ni contaminated sediments. Ecological Engineering, 2014, 73: 311-318.
- [43] Joner E J, Leyval C. Rhizosphere gradients of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dissipation in two industrial soils and the impact of arbuscular mycorrhiza. Environmental Science & Technology, 2003, 37(11): 2371-2375.
- [44] Yadav R, Arora P, Kumar S, Chaudhury A. Perspectives for genetic engineering of poplars for enhanced phytoremediation abilities. Ecotoxicology, 2010, 19(8): 1574-1588.
- [45] Yu X Z, Zhou P H, Yang Y M. The potential for phytoremediation of iron cyanide complex by willows. Ecotoxicology, 2006, 15(5): 461-467.
- [46] Li H, Jiang M, Che L, Nie L, Yang Z M. *BjHO-1* is involved in the detoxification of heavy metal in India mustard (*Brassica juncea*). Biometals, 2012, 25(6): 1269-1279.
- [47] Chen C, Wang X, Wang J L. Phytoremediation of cadmium-contaminated soil by *Sorghum bicolor* and the variation of microbial community. Chemosphere, 2019, 235: 985-994.
- [48] Glenn E P, Jordan F, Waugh W J. Phytoremediation of a nitrogen-contaminated desert soil by native shrubs and microbial processes. Land Degradation & Development, 2017, 28(1): 361-369.
- [49] Huang Y P, Xi Y, Gan L, Johnson D, Wu Y H, Ren D, Liu H G. Effects of lead and cadmium on photosynthesis in *Amaranthus spinosus* and assessment of phytoremediation potential. International Journal of Phytoremediation, 2019, 21(10): 1041-1049.
- [50] Wang L, Ji B, Hu Y H, Liu R Q, Sun W. A review on in situ phytoremediation of mine tailings. Chemosphere, 2017, 184: 594-600.