

基于文献计量学的土壤种子库研究进展分析^①

李国旗^{1,2}, 谢博勋^{1,2}, 解盛^{1,2}, 刘星^{1,2}, 张柯雨^{1,2}, 刘秉儒³, 石云^{1,2}

(1 宁夏大学西北土地退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021; 2 宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021; 3 北方民族大学生物科学与工程学院, 银川 750021)

摘要:为了把握土壤种子库在国内外的研究现状及研究前沿动态,客观反映各个国家、机构及研究者在该领域的影响力,本文基于文献计量学分析方法,对Web of Science数据库1999—2020年和中国知网数据库1983—2020年的研究成果进行了分析。结果表明:该领域的科研成果在国内外的发文趋势不同,国外期刊论文逐年上升,但国内论文自2009年以后开始下降。在发文量的国家排序中,美国排名第1,澳大利亚和中国分别位列第2和第3。国家间合作关系密切程度不大,相比较而言,美国的合作贡献量最大。中国科学院在该领域的发文量最多,总被引次数也最大,刊载该领域论文的外文期刊主要为《Plant Ecology》、《Journal of Vegetation Science》和《Applied Vegetation Science》,中文期刊主要为《生态学报》、《生态学杂志》和《植物生态学报》,该领域的文章在外文论文中主要集中在环境科学与生态学、生态学和植物科学3个学科,而国内主要集中在农业资源与环境、林学、生物学3个学科。目前,有关土壤种子库的研究主要集中在对种子库中种子本身特征、与地上植被的关系、土壤中种子持久性和在生态重建中的应用等研究上。有关土壤种子库的研究应积极探索新的科学问题,顾及更多研究领域,加强在解决实际问题中的作用,提高我国在该领域的科研水平和影响力;结合全球气候变化所带来的生态问题,加强国际间的研究合作关系,在全球尺度上利用土壤种子库反映生态变化,为解决生态问题提供决策参考。

关键词:土壤种子库; 文献计量分析; CiteSpace

中图分类号: Q948.1 **文献标志码:** A

Research Progress of Soil Seed Bank Based on Bibliometric Analysis

LI Guoqi^{1,2}, XIE Boxun^{1,2}, XIE Sheng^{1,2}, LIU Xing^{1,2}, ZHANG Keyu^{1,2}, LIU Bingru³, SHI Yun^{1,2}

(1 Key Laboratory for Restoration and Recovery of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3 College of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to grasp the research status and frontier trends of the soil seed bank at home and abroad, and objectively reflect the influences of various countries, institutions and researchers in this field, this article, based on bibliometric analysis, analyzed the related research results of Web of Science database from 1999 to 2020 and CNKI database from 1983 to 2020. The results showed that the trends of scientific research are different at home and abroad. Papers have increased year by year in foreign journals but have declined since 2009 at home. In the rankings of published documents countries, the United States ranks first while China ranks third. The degree of close cooperation between countries is relatively small. In comparison, the United States has the largest contribution to cooperation. The Chinese Academy of Sciences publishes the most articles and has the largest total citations. The main foreign journals that publish related papers are Plant Ecology, Journal of Vegetation Science and Applied Vegetation Science, and the main Chinese journals are Journal of Ecology, Journal of Ecology and Plant Ecology Journals. Papers in this field are mainly concentrated in the three disciplines of Environmental Science & Ecology, Ecology and Plant Science in foreign papers, while mainly concentrated in the three disciplines of Agricultural Resources & Environment, Forestry and Biology at home. At present, the research on soil seed banks mainly focuses on the characteristics of the seeds in the seed bank and their relationship with the aboveground vegetation, the seed persistence in soil and the application of ecological reconstruction. In the future, research on soil seed banks should actively

①基金项目: 中央引导地方科技创新项目和中国工程院院地合作项目(2021NXZD5)资助。

作者简介: 李国旗(1965—), 男, 宁夏平罗人, 博士, 研究员, 主要研究方向为植物生态学。E-mail:guoqilee@163.com

explore new scientific issues, take into account more research fields, strengthen the role in solving practical problems, and improve China's scientific research level and influence. Combining with the ecological problems brought about by global climate change, strengthen international research cooperation, use soil seed banks to reflect ecological changes on a global scale, and provide decision-making reference for ecological problems.

Key words: Soil seed bank; Bibliometric analysis; CiteSpace

土壤种子库是土壤和上层枯落物中所有有活力种子的总和^[1]。植物生长过程中, 成熟的种子最终会落到地面, 除少部分被动物摄食或衰老腐败外, 大部分种子将埋进土中, 组成土壤种子库^[2-3]。环境适宜时, 土壤中的种子将重新萌发, 补充群落物种。因此, 土壤种子库是生态系统恢复能力的一个重要组成部分, 是种群更新及演替的基础^[4], 同时也代表了许多植物组合的再生潜力^[5]。影响土壤种子库基本特征产生的因素很多, 如土壤理化性质(土壤孔隙度、容重和含水量)的改变会造成土壤种子库的分布发生改变, 林龄和树木总覆盖度会影响土壤种子库组成, 森林中林龄影响土壤种子库的种子密度和物种丰富度^[6]。不同海拔地区, 土壤种子库基本特征不同^[7-9]。不同植被演替阶段土壤种子库的组成和密度也不同^[10]。研究表明, 土壤的侵蚀使得土壤种子库逐渐深层化^[11]。放牧改变了土壤种子库的物种组成, 增加了土壤种子库与地上植被的区系相似性^[12]。围封增加了土壤种子库多年生物种的种子密度和物种丰富度, 降低了土壤种子库种子密度和物种丰富度的空间异质性^[13-15]。土壤种子库的研究在植被的自然恢复中起着重要的作用, 特别是在废弃的坡耕地和禁牧草地的演替早期^[16]。持久的土壤种子库使干旱漫滩的植被能够应对不可预测的洪水和干旱模式^[17-18]。同样, 通过排干高海拔地区湿地的水, 有助于土壤种子库的剩余种子成功地将湿地恢复成物种丰富的高寒草甸^[19]。

文献计量分析是科学文章在其各自研究领域中影响的定量度量^[20], 通过其相关分析, 能够客观反映该领域的学科基础、整体布局、研究热点及前沿趋势等相关问题^[21]。这种客观可视化的分析依赖于一些文献计量分析工具进行^[22-23]。文献计量在线分析平台及 CiteSpace(引文空间)两款工具在可视化综述中被广泛使用, 该工具能够对筛选得到的有影响力的论文、机构、期刊进行分析, 将关键词及文献引用情况可视化, 显示科学发展新趋势和新动态, 综合分析得到该领域的学科重点及研究方向^[21,24]。

针对全球气候变化所引起的生态环境问题, 土壤种子库为生态恢复及生态演替提供了研究方向。尽管已经开展了土壤种子库各个方面研究, 也取得了大

量成果, 但在国际范围内, 还没有土壤种子库相关研究文献统计分析的文章发表。因此, 本研究通过文献计量学的方法, 对 Web of Science 数据库及中国知网数据库中的“土壤种子库”的相关研究进行分析, 得出该领域的研究热点、现状及研究前沿动态, 明确该研究方向的现状及趋势, 旨在从宏观层面为研究者今后土壤种子库的工作提供决策参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文基于 Web of Science 数据库和中国知网数据库(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)进行分析。外文研究基于 Web of Science 核心数据库, 以关键词“soil seed bank”进行搜索, 选择文献类型为研究论文, 共收集 3 436 条检索结果, 检索起止时间为 1999—2020 年。中文研究在 CNKI 数据库上以“土壤种子库”为主题, 共搜索到 921 条记录, 其中期刊论文为 676 篇, 检索起止时间为 1983—2020 年。本文所有数据截止于 2020 年 7 月 1 日。

1.2 分析方法

1.2.1 文献计量方法 对于 Web of Science 检索结果利用“文献计量在线分析平台(<https://bibliometric.com/>)”进行分析。CNKI 数据利用其自带文献计量系统进行分析。

1.2.2 内容分析法 本研究利用 CiteSpace 软件进行分析, 主要对 Web of Science 数据库中的检索结果进行数据分析及可视化, 构建文献共被引网络。同时对 CNKI 数据库中的关键词也用 CiteSpace 进行分析, 本研究使用的软件版本为 CiteSpace 5.5.R2。

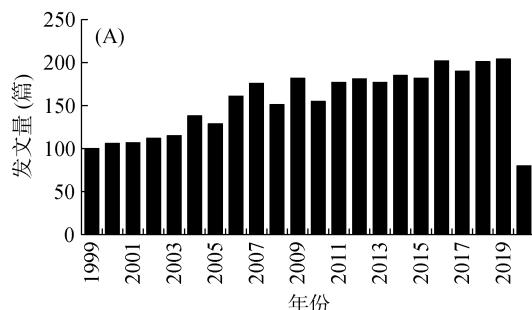
1.2.3 主要指标 本研究中主要分析的指标有发文量、被引用次数、研究前沿、研究热点及突变词 5 个方面。基于此反映相关国家、机构及研究者科研生产力水平, 反映载文期刊的文献认可程度和影响力水平, 了解该领域研究的发展趋势。

2 结果分析

2.1 文献产出时间序列

对文献的年产出量进行分析, 可发现某领域的客观

发展规律。结果显示,在 Web of Science 数据库中,1999—2020 年土壤种子库相关研究共计发表科研论文 3 436 篇。



(由于检索日期为 2020 年 7 月 1 日, 2020 年全年发文量在 CNKI 自带的计量系统中为预测值, 故在此只分析 1983—2019 年的发文量情况)

图 1 Web of Science(A)和 CNKI(B)数据库中土壤种子库相关研究发文量时间序列变化
Fig. 1 Temporal trend of number of publications associated with soil seed bank in Web of Science(A) and CNKI(B)

CNKI 的数据分析显示, 在 1983—2020 年的 47 年间, 发文量共为 921 篇, 首篇文章发表于 1983 年。国内“土壤种子库”的研究分为 3 个阶段: 1983—1999 年为发展停滞期, 17 年间共发表文章 17 篇, 年均发文量为 1 篇; 2000—2009 年为快速增长期, 发文量共 379 篇, 年均发文量 38 篓; 2010—2020 年为研究稳定期, 该时期内, 年发文量逐年递减。根据 CNKI 文献计量系统分析, 2009 年的发文量最大, 为 84 篓(图 1B)。

利用 Web of Science 数据库分析各国“土壤种子库”研究成果的影响力, 结果显示, 论文总量排名前 10 位的国家为美国、澳大利亚、中国、德国、西班牙、巴西、英国、法国、加拿大和阿根廷。其中前 6 个国家的发文量在 200 篓以上, 而美国的发文量为 783 篓, 占前 10 位国家总发文量的 30.71%, 与排名第二的澳大利亚相差 393 篓, 另外中国的相关研究论文为 316 篓, 占前 10 位国家总发文量的 11.19%, 总体研究有待深入。从年发文量上看, 1999—2018 年共 20 年时间中, 美国的发文量一直处于领先地位, 2019 年中国发文量首次超越美国(图 2)。

2.2 国家及合作关系

随着科技全球化的发展, 国际合作日渐普遍。通过文献计量在线分析平台对 Web of Science 的数据进行分析, 构建国家间的合作关系图(图 3), 从图 3A 中可看出, 各国在土壤种子库的研究中, 除美国、澳大利亚和中国外, 其余国家发文量少, 且与其他国家间的连线也较少。因此, 有关土壤种子库的研究虽然各国间有不同程度的合作, 但合作水平较低。根据分析结果, 美国的合作贡献率最大, 与中国和澳大利亚的合作关系较密切(图 3B)。中国的合作贡献率位居

篇, 年发文量呈现缓慢增长趋势。这 21 年年均发文量 155 篓, 其中 2019 年发文量最多, 为 202 篓(图 1A)。

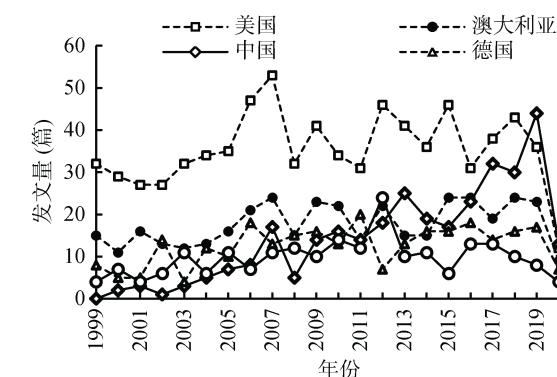
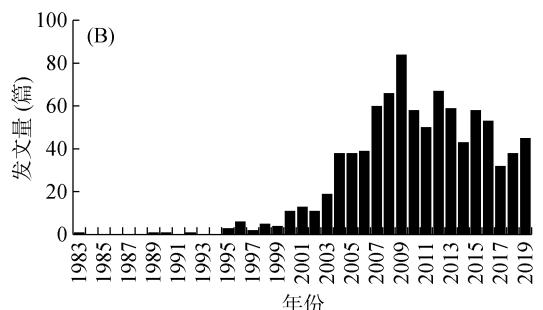


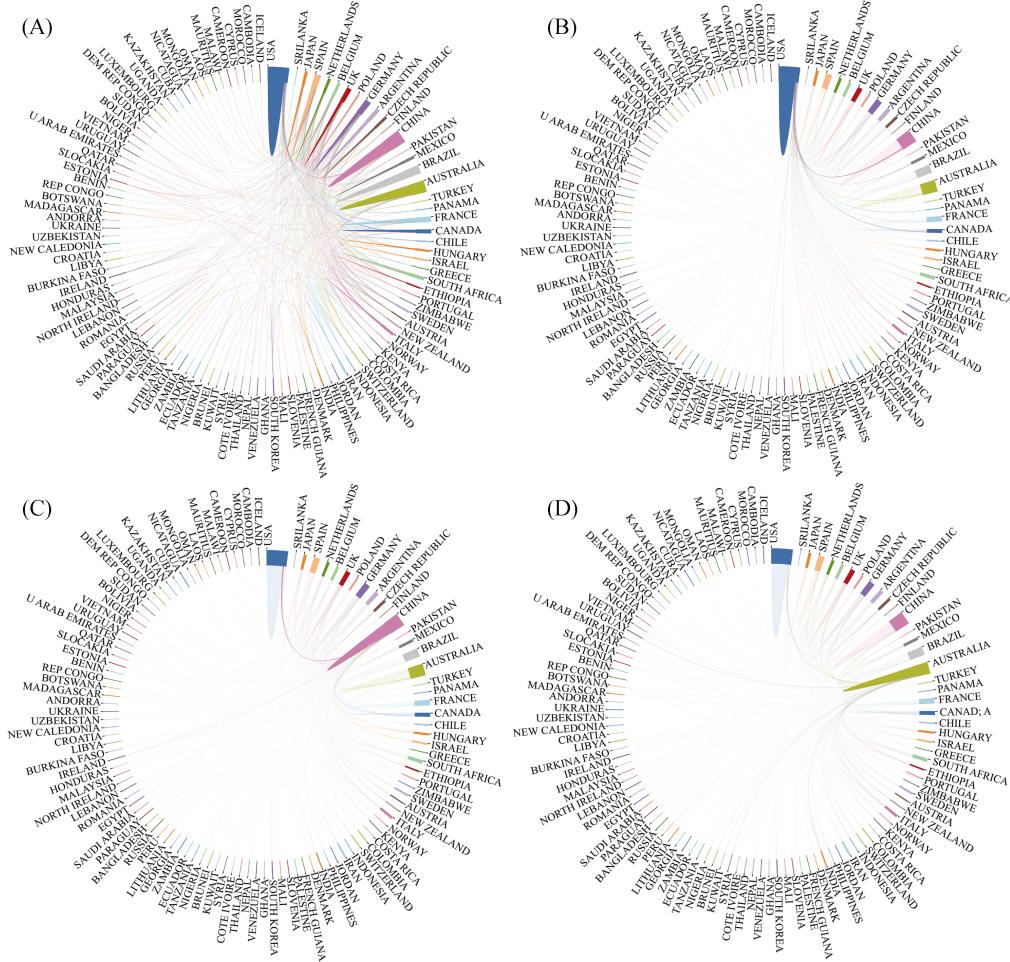
图 2 Web of Science 数据库中土壤种子库论文发表量居前 5 位的国家年发文趋势
Fig. 2 Tendencies of publications per year on soil seed bank of top 5 countries in Web of Science

第 2(图 3C), 之后是澳大利亚(图 3D)。这表明, 在该领域中, 国家间的合作还需要进一步加强。

2.3 研究机构的影响力排名

有关土壤种子库研究机构的影响力分析表明, 发文量前 10 位的机构中, 中国 2 个, 美国 3 个, 澳大利亚 2 个, 法国、墨西哥和荷兰各 1 个。从论文数量上看, 中国科学院的发文量最多, 共有 420 篓(含合著论文), 占前 10 位研究机构发文总量的 34%。在总被引次数方面, 中国科学院同样以 1 427 次位列第 1, 而肯塔基大学与法国农业科学研究院分别以 682 和 636 次排名第 2 和第 3。在第一作者总数上, 中国科学院以 140 位居榜首, 而在平均被引次数方面, 发文量前 10 位的机构中格罗宁根大学和法国农业科学研究院具有较高的被引次数(表 1)。

通过中国知网自带计量软件分析 CNKI 检索数据发现, 在国内, 发文量前 10 位的机构有中国科学院研究生院(52 篓)、西北农林科技大学(50 篓)、新疆



(USA: 美国; Sri Lanka: 斯里兰卡; Japan: 日本; Spain: 西班牙; Netherlands: 荷兰; Belgium: 比利时; UK: 英国; Poland: 波兰; Germany: 德国; Argentina: 阿根廷; Czech Republic: 捷克; Finland: 芬兰; China: 中国; Pakistan: 巴基斯坦; Mexico: 墨西哥; Brazil: 巴西; Australia: 澳大利亚; Turkey: 土耳其; Panama: 巴拿马; France: 法国; Canada: 加拿大; Chile: 智利; Hungary: 匈牙利; Israel: 以色列; Greece: 希腊; South Africa: 南非; Ethiopia: 埃塞俄比亚; Portugal: 葡萄牙; Zimbabwe: 津巴布韦; Sweden: 瑞典; Austria: 奥地利; New Zealand: 新西兰; Italy: 意大利; Norway: 挪威; Kenya: 肯尼亚; Costa Rica: 哥斯达黎加; Colombia: 哥伦比亚; Switzerland: 瑞士; Indonesia: 印度尼西亚; Iran: 伊朗; Jordan: 约旦; Philippines: 菲律宾; India: 印度; Denmark: 丹麦; French Guiana: 法属圭亚那; Palestine: 巴勒斯坦; Slovenia: 斯洛文尼亚; Mali: 马里; South Korea: 韩国; Ghana: 加纳; Venezuela: 委内瑞拉; Nepal: 尼泊尔; Thailand: 泰国; Cote Ivoire: 科特迪瓦; Syria: 叙利亚; Kuwait: 科威特; Brunei: 文莱; Nigeria: 尼日利亚; Tanzania: 坦桑尼亚; Ecuador: 厄瓜多尔; Zambia: 赞比亚; Georgia: 格鲁吉亚; Lithuania: 立陶宛; Peru: 秘鲁; Russia: 俄罗斯; Bangladesh: 孟加拉国; Paraguay: 巴拉圭; Saudi Arabia: 沙特阿拉伯; Egypt: 埃及; Romania: 罗马尼亚; Lebanon: 黎巴嫩; North Ireland: 北爱尔兰; Malaysia: 马来西亚; Honduras: 洪都拉斯; Ireland: 爱尔兰; Burkina Faso: 布基纳法索; Libya: 利比亚; Croatia: 克罗地亚; New Caledonia: 新喀里多尼亚; Uzbekistan: 乌兹别克斯坦; Ukraine: 乌克兰; Andorra: 安道尔; Madagascar: 马达加斯加; Botswana: 博茨瓦纳; Rep Congo: 刚果(布); Benin: 贝宁; Estonia: 爱沙尼亚; Slovakia: 斯洛伐克; Qatar: 卡塔尔; U Arab Emirates: 阿拉伯联合酋长国; Uruguay: 乌拉圭; Vietnam: 越南; Niger: 尼日尔; Bolivia: 玻利维亚; Sudan: 苏丹; Dem Rep Congo: 刚果(金); Luxembourg: 卢森堡; Uganda: 乌干达; Kazakhstan: 哈萨克斯坦; Cuba: 古巴; Nicaragua: 尼加拉瓜; Mongolia: 蒙古; Oman: 阿曼; Laos: 老挝; Mauritius: 毛里求斯; Malawi: 马拉维; Cameroon: 喀麦隆; Cyprus: 塞浦路斯; Morocco: 摩洛哥; Cambodia: 柬埔寨; Iceland: 冰岛)

图 3 土壤种子库论文发表国家间合作(A)及与美国(B)、中国(C)、澳大利亚(D)合作国家的网络关系
Fig. 3 Correlations of the countries (A) and corporations with the USA (B), China (C) and Australia(D) in soil seed bank

农业大学(41篇)、内蒙古农业大学(38篇)、北京林业大学(37篇)、中国科学院新疆生态与地理研究所(34篇)、兰州大学(31篇)、宁夏大学(24篇)、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所(23篇)、河北农业大学

(22篇)。除中国科学院和北京林业大学外, 中文期刊发文量前10位的机构大多集中在西北地区。我国西北地区气候干旱, 生态环境脆弱, 土壤种子库的研究在该地区的植被演替和生态恢复方面发挥着重要作用。

表1 Web of Science 数据库中土壤种子库发表论文数量前10位的研究机构统计
Table 1 Top 10 research institutions in published papers on soil seed bank in Web of Science

研究机构	所在国家	论文数量	总被引用次数	平均被引次数	一作总数	一作被引次数	一作平均被引次数
中国科学院	中国	420	1427	3.40	140	521	3.72
肯塔基大学	美国	170	682	4.01	20	80	4.00
西澳大学	澳大利亚	109	593	5.44	16	103	6.44
法国农业科学研究院	法国	84	636	7.57	23	164	7.13
昆士兰大学	澳大利亚	79	471	5.96	18	91	5.06
墨西哥自治大学	墨西哥	77	91	1.18	21	40	1.90
兰州大学	中国	75	273	3.64	31	190	6.13
美国农业部农业研究局	美国	73	318	4.36	24	114	4.75
格罗宁根大学	荷兰	67	729	10.88	20	268	13.40
伊利诺伊大学	美国	66	368	5.58	13	99	7.62

注: 该表中的机构论文数量包括国家及机构间的合著论文。

2.4 研究期刊排名

通过期刊排名确定其影响力,有助于研究者便捷选择欲查阅的期刊论文,方便研究成果的发表。结果表明,有关“土壤种子库”论文《Plant Ecology》的载文量位居榜首,共有154篇,《Journal of Vegetation Science》和《Applied Vegetation Science》分别以94篇和89篇位居第2和第3。在总被引用次数方面,《Plant

Ecology》、《Journal of Vegetation Science》和《Seed Science Research》3个期刊分别以高于500次的结果在载文量前10位的期刊中具有绝对优势。但总体来说,载文量前10位期刊平均被引次数的排名均不太高,最高的为《Seed Science Research》,平均被引次数也只有9.19次(表2)。因此,外文研究中有关土壤种子库的研究主要集中在有关生态学、植物学和草学相关的期刊上。

表2 Web of Science 数据库中土壤种子库论文载文量前10位的期刊统计
Table 2 Top 10 journals in publications on soil seed bank in Web of Science

载文期刊	载文量		总被引频次		平均被引频次	
	总数	排名	频次	排名	频次	排名
Plant Ecology	153	1	1 041	1	6.80	32
Journal of Vegetation Science	94	2	844	2	8.98	16
Applied Vegetation Science	89	3	565	5	6.35	38
Restoration Ecology	85	4	429	8	5.05	52
Weed Science	84	5	555	6	6.61	35
Journal of Arid Environments	80	6	482	7	6.03	40
Forest Ecology and Management	75	7	229	17	3.05	101
Seed Science Research	70	8	643	4	9.19	15
Ecological Engineering	63	9	273	17	4.33	70
Austral Ecology	55	10	366	9	6.65	34

国内的研究中载文量前10位的期刊有:《生态学报》(48篇)、《生态学杂志》(26篇)、《植物生态学报》(26篇)、《应用生态学报》(22篇)、《生态环境学报》(21篇)、《西北农林科技大学学报》(21篇)、《草业学报》(20篇)、《内蒙古农业大学学报》(16篇)、《水土保持通报》(15篇)、《安徽农业科学》(14篇)。即国内与“土壤种子库”相关的论文主要发表在生态学科的杂志上。

2.5 学科分布

通过CiteSpace对Web of Science国际文献检索

结果的学科分布分析,得到了41个节点,193条连线,其中环境科学与生态学排名第1,生态学和植物科学分别位居第2和第3(图4)。排名前10位的学科中理科共有5个,占50%,农学有3个,占30%,其余的为多学科综合研究,占20%;从学科层次来看,基础科学占50%,技术科学占30%,无工程学科(表3)。在CNKI数据库的国内文献中,论文主要集中在农业资源与环境、林学、生物学、草学、植物保护和生态学6个学科,其中理学有2个,而农学有4个。

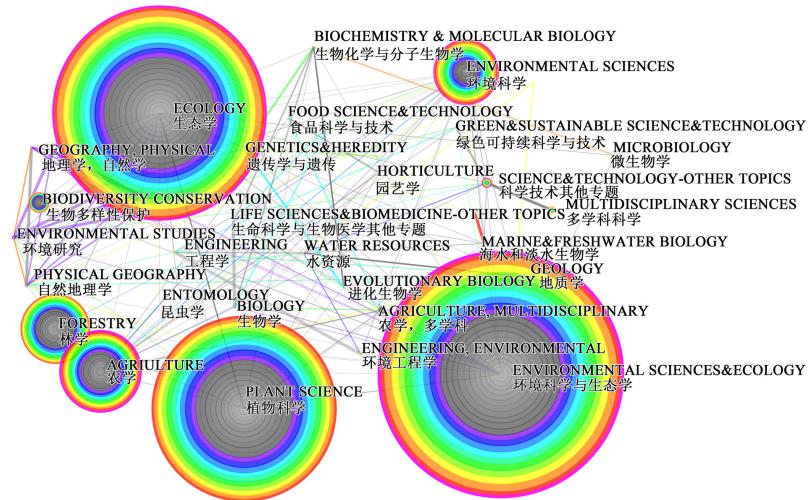


图 4 Web of Science 数据库中土壤种子库研究文献的主要学科分布
Fig. 4 Distribution of subject categories for soil seed bank in Web of Science

表 3 Web of Science 数据库中土壤种子库研究排名前 10 位的学科分布情况
Table 3 Top 10 of subject areas for soil seed bank in Web of Science

序号	学科领域	频次	学科类别	学科层次	序号	学科领域	频次	学科类别	学科层次
1	环境科学/生态学	1 785	理学	基础科学	6	环境科学	531	理学	基础科学
2	生态学	1 580	理学	基础科学	7	生物多样性保护	219	理学	技术科学
3	植物科学	1 392	理学	基础科学	8	多学科农业	142	-	-
4	农学	622	农学	技术科学	9	土壤学	120	农学	基础科学
5	林学	586	农学	技术科学	10	科学技术其他专题	100	-	-

注：表中的“频次”为 Web of Science 数据库中土壤种子库研究论文在排名前 10 位的学科中的出现次数。

2.6 国内外不同生境的土壤种子库研究

首先基于上文 2.3 节中研究机构影响力排名, 以第一作者所在机构再筛选文献。从 Web of Science 中获得文献共 157 篇, 其中中国科学院发文 67 篇, 兰州大学发文 17 篇, 共计 84 篇; 从 CNKI 数据库中筛选出文献共 183 篇, 可见, 我国的研究占绝大多数。

Web of Science 数据库中的 73 篇国外研究论文按照其研究对象进行分类, 其中农田的研究文献最多(19 篇), 湿地次之(11 篇), 草地和林地分别为 9 篇和 8 篇。在基于农田的研究中, 有关杂草防治^[25]的论文最多达 14 篇, 有关湿地的论文共有 7 篇, 主要揭示湿地土壤种子库与地上植被的关系, 以及不同环境变化或干扰下湿地植物种类和土壤种子库的动态变化, 如 Matthews 等^[26]研究了在洪水对湿地中补充树木生存的影响。而在草地和林地研究中, 其研究内容较为分散, 包括用土壤种子库揭示群落演替过程, 以及如生物入侵^[27]及动物^[28]、刈割等干扰下土壤种子库的变化。

在 Web of Science 和 CNKI 数据库的检索结果中, 共有 267 篇国内研究论文, 按研究对象划分, 草地研究最多, 有 65 篇, 沙地第 2, 有 58 篇, 林地排

名第 3(42 篇)。草地的研究可进一步分为荒漠草地、典型草地和高寒草地 3 个部分, 荒漠草地以西北地区为主, 研究在不同自然条件和人为干扰^[15,29]下, 荒漠草原的土壤种子库的动态变化, 以及部分植物土壤种子库对荒漠草原生物多样性维持的作用^[30]。典型草地的研究主要集中在自然条件及放牧等干扰对土壤种子库的影响, 并利用土壤种子库来确定其群落演替阶段。高寒草地的研究主要涉及放牧对其的影响。沙地的研究主要集中在内蒙古科尔沁和阿拉善地区、新疆的古尔班通古特及浑善达克地区, 包括对原生地和恢复条件下土壤种子库特征的研究, 以及一些沙漠物种的种子繁殖动态对土壤种子库的影响。林地的研究在各个地区均有所涉及, 主要集中在土壤种子库与林分更新的相关性上, 少部分也涉及一些环境因素及干扰对土壤种子库及林分的影响。除了对特定生态系统类型的研究, 国内研究机构同样对一些植物种群的种子库动态变化做了研究, 共有 12 篇文献, 研究植物涉及林地、草地及湿地 3 个生态系统, 以入侵植物、优势种和特有种为主。

2.7 高被引频次论文

发表的研究成果的影响力及学术价值的衡量离

不开被引次数,因此为了获得该领域具有影响力的文章,采用CiteSpace进行文献共被引分析,排除无法追溯题目的论文,对可查的文献进行分析,共获得1 450个节点和6 644条连线(图5)。其中Bossuyt和Honray^[31]在2008年发表在《Journal of Vegetation Science》上的文章被引用频次最高,该文章通过1990—2006年间有关植物种子库的相关研究数据,对4种群落的特征进行了分析,结果发现,不同群落种子库与地上植被的相似性程度不同,因此得出结论认为仅仅依靠土壤种子库进行生态恢复的想法不可行。另外Bekker等^[32]1998年发表在《Functional Ecology》上的文章也有较高的被引用频次,文章通过研究阐明

了欧洲地区土壤中种子大小、形状和分布与种子寿命的相关性。文献被引用频次排名第3的是Thompson等^[33]于1998年发表在《Journal of Ecology》上的文章,该文章研究了欧洲西北地区植物区系土壤中种子的持久性与生态环境的关系,得出种子持久性并不总是与种子大小有关,还有一些生理上的因素;同时说明在许多生境中,种子被埋藏的可能性与种子的大小和形状有着密切关系。在近期的研究论文中,被引用频次较高的是Long等^[34]2015年发表于《Biological Reviews》上的一篇文章,其通过一个模型探讨了影响种子持久性的生态学因素,通过该模型可预测种子在所在环境中的持续时间(表4)。

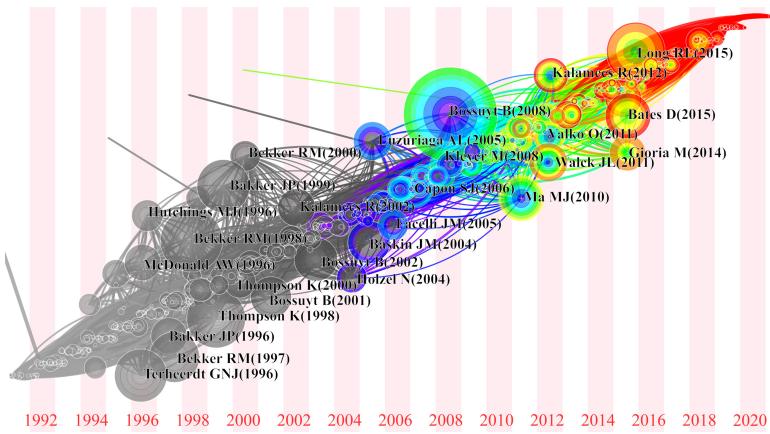


图5 Web of Science数据库中研究文献被引用时区视图

Fig. 5 Time-zone view of cited references in Web of Science

而在国内的研究中,被引频次较高的文献有于顺利和蒋高明^[35]2003年以“土壤种子库的研究进展及若干研究热点”为题发表在《植物生态学报》上的文章,该文章论述了土壤种子库的研究进展,提出相关的研究热点问题主要集中在土壤种子库的研究方法、分类、时空布局、与地上植被的相关性及土壤种子库

的动态等问题上。另外,杨跃军等^[36]2001年发表在《应用生态学报》上的文章也有较高的引用次数,该文章以“森林土壤种子库与天然更新”为题,论述了森林土壤种子库的特点,分析了森林种子库对天然更新的影响,并提出了森林种子库的研究方向及研究方法(表4)。

表4 Web of Science 和 CNKI 数据库中土壤种子库研究排名前10位的高被引频次论文分布情况
Table 4 Top 10 of references with high citation for soil seed bank in CNKI and Web of Science

Web of Science 数据库					CNKI 数据库				
序号	作者	年份	期刊来源	被引频次	序号	作者	年份	期刊来源	被引频次
1	Bossuyt B	2008	Journal of Vegetation Science	79	1	于顺利等	2003	植物生态学报	334
2	Bekker RM	1998	Functional Ecology	52	2	杨跃军等	2001	应用生态学报	262
3	Thompson K	1998	Journal of Ecology	49	3	刘志民等	2003	应用生态学报	222
4	Long RL	2015	Biological Reviews	47	4	张志权等	1996	生态学杂志	212
5	Bakker JP	1999	Trends in Ecology & Evolution	44	5	安村青等	1996	植物生态学报	202
6	Terheerdt GNJ	1996	Functional Ecology	44	6	张志权等	2001	植物生态学报	182
7	Bekker RM	1997	Journal of Applied Ecology	42	7	熊利民等	1992	植物生态学报	168
8	Bates D	2015	Journal of Statistical Software	40	8	唐勇等	1999	应用生态学报	165
9	Ma MJ	2010	Flora	38	9	张玲等	2004	生态学杂志	151
10	Bossuyt B	2002	Plant Ecology	36	10	周先叶等	2000	植物生态学报	134

2.8 研究前沿趋势分析

利用 CiteSpace 对检索结果中的关键词与出现频次及年份的关系构建研究前沿时区视图，并结合突变词分析获得土壤种子库相关研究的未来发展方向，通过对 Web of Science 数据分析，得到了 218 个节点，2 338 条连线(图 6A)，其中出现频次前 10 位的关键词为“种子库(seed bank)”“发芽(germination)”“植被(vegetation)”“土壤(soil)”“动力学(dynamics)”“土壤种子库(soil seed bank)”“种子散布(seed dispersal)”“重建(restoration)”“多样性(diversity)”和“草地(grassland)”。通过关键词的出现频次可以看出，有关

图 6 Web of Science(A)和 CNKI(B)数据库中土壤种子库研究前沿时区视图

Fig. 6 Zone views of soil seed bank research frontier in Web of Science(A) and CNKI(B)

通过对 Web of Science 的检索结果进行突变词分析发现, 突变词“predation(捕食)”和“seed rain(种子雨)”的持续时间最长, 均持续了 11 年时间(图 7)。结合前沿时区视图可得出, 有关土壤种子库的研究主要集中在种子库中种子持久性及种子散布的相关研究上。

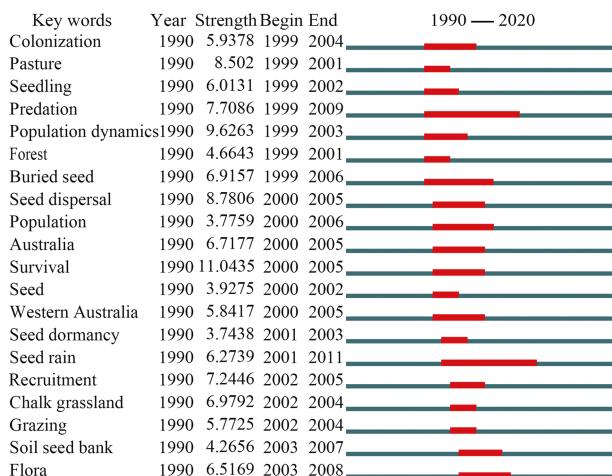
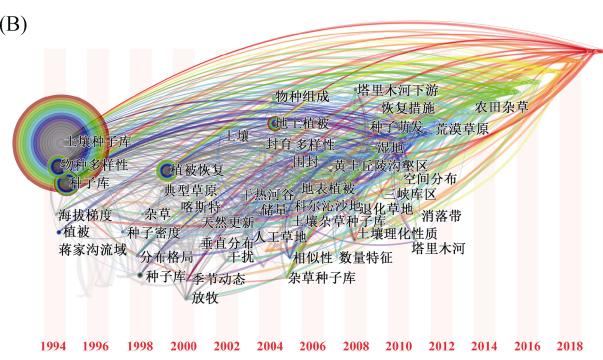


图 7 Web of Science 土壤种子库研究引用
频次突增关键词

Fig. 7 Keywords with strongest citation bursts of soil seed bank in Web of Science

植物种子库的研究主要集中在对种子库中种子本身特征、与地上植被的关系、种子库中种子持久性和在生态重建的应用上。对 CNKI 数据进行分析，得到 132 个节点，253 条连线(图 6B)，出现频次排名前 5 位的关键词为“种子库”“土壤种子库”“物种多样性”

“地上植被和植被恢复”。进一步对出现频次中等程度的关键词进行统计发现，国内土壤种子库相关内容主要集中在退化草地、人工草地、高寒草地、塔里木河等生境。因此，在国内有关土壤种子库的研究还主要集中在种子库特征与物种多样性的关系、种子库在植被恢复中的应用等方面。



为了更准确地把握研究前沿信息,本文对 Web of Science 检索结果 2010—2020 年引用次数超过 20 次的论文进行重筛选,共得到 261 条文献条目。根据研究内容进行分类,首先将论文分为方法类和内容类,方法类涉及土壤种子库相关方法,共有 13 篇文献,即对鉴定土壤种子库组成的两种方法的对比评测^[37]、杂草种子库的动态建模^[38]以及杂草竞争的 3D 建模^[39]等。除此之外的文献为内容类,该类又可以分为具体生境研究和特定物种的研究。特定物种的研究主要为了揭示土壤种子库的更替及补充情况,在实验室条件下通过生理及分子手段研究各种植物种子休眠^[40]、萌发^[41]及种子寿命^[42]等,共有 25 篇文献。其余部分是各种生境土壤种子库的研究,其中研究草地的文章最多,有 55 篓,林地第 2,有 43 篓,湿地第 3,26 篓,之后为沙地和农田的研究,分别为 20 篓和 16 篓。草地的研究多数旨在揭示以放牧为主的干扰条件下土壤种子库的动态变化,以及水文条件对土壤种子库的影响。林地的研究主要涉及被干扰林地,论文有 24 篓,其中火、间伐和开采的干扰占主要部分,另外还有植物入侵、风暴及动物对林地的影响;原始林地的研究主要涉及林分补充。湿地的研究

主要集中在原生植被及群落演替方面。沙地的研究涉及放牧、植物入侵和环境对土壤种子库的影响,以及沙地植物演替动态等方面。农田的研究主要集中在对杂草的管理上。通过对CNKI数据库2010—2020年的研究检索结果分析,共获得335篇论文,研究草地的论文最多,有62篇;其次是林地(61篇),之后是沙地和农田,各29篇。草地的研究主要在典型草原、荒漠草原和高寒草甸3种草地类型中。典型草原和荒漠草原主要研究围栏封育^[15,43]为主的恢复措施下土壤种子库变化。高寒草地研究以放牧及啮齿类动物^[44]为主的影响下土壤种子库的变化,以及在各种恢复措施下土壤种子库的变化。除此之外,草地的研究也涉及一些植物群落的种子库动态,典型草地和荒漠草地蒿属植物及禾本科植物居多,如绢蒿^[45]、克氏针茅^[46]及短花针茅^[47]等。林地的研究主要是在原生林地不同立地条件下土壤种子库特征、种子库与幼苗更新的关系上^[48-49],对受损林地的研究较少。沙地的研究主要有对沙漠植被的组成^[50]和人工恢复条件下沙地植被的演化研究^[51]。农田的研究主要集中于杂草的管理。除此之外,研究相对较多的还有湿地和矿区,相关论文分别为25篇和15篇,湿地的研究主要集中在对各种湿地类型中土壤种子库及与植被之间关系的研究上。矿区的研究以恢复过程中土壤种子库变化的研究为主。

综上,土壤种子库的研究主要集中在对各种生态环境下土壤种子库变化的研究中。林地和草地在国内外相关研究中均占有较大比例,国内对于林地的研究多基于自然条件下,而国外对火因子影响下林地土壤种子库的研究较多。与林地相比,草地生态环境脆弱,易受放牧等人工干扰的影响,这使得草地退化更加严重。因此草地生境的相关研究多集中在退化草地及人工恢复后草地土壤种子库的变化上。结合前沿视图及突增关键词分析,土壤种子库相关研究还集中在种子库对植物群落补充更替方面。随着人类活动,生态环境问题越加凸显,土壤种子库也将为该问题的解决提供决策参考。如采矿业的发展,矿区的生态恢复成为难题,目前主要采用表土回填技术进行矿区生态修复,利用土壤种子库相关知识可探讨表土保存过程中土壤种子库的保存时间,以及通过土壤种子库评估表土回填植被恢复效果。另外土壤种子库相关内容也可为退化草原的恢复提供帮助,可利用其确定退化草原的演替阶段,以及人工修复后评估其修复效果等。因此,土壤种子库的研究虽然较为基础,但在解决实际生态环境问题中具有重要的作用。

3 讨论与结论

在Web of Science数据库核心合集中有关土壤种子库的文章在1999—2020年呈现逐年增长的趋势,而在CNKI数据库中其在1983—2009年呈现增长的趋势,之后发文量逐渐下降。关于土壤种子库研究在国内出现下降的现象,笔者认为主要有以下3个原因:一是与国内的评价体系有关,关于土壤种子库的研究文章,很难发表在影响因子较高的期刊上,因此过去这方面研究的主力军转移了研究兴趣;二是土壤种子库研究技术没有较大的突破,例如对土壤中的休眠种子年限的估测;三是关于土壤种子库的新的科学问题也未见出现。

有关土壤种子库的研究主要集中在对种子库中种子本身特征、与地上植被的关系、土壤种子持久性和在生态重建中的应用上。研究的学科主要为生态学和农学两个学科,且主要在基础学科中。随着人类的活动,生态问题已经不可忽视,各种生态系统面临各种生态问题,由于放牧使得草地退化和荒漠化问题日渐严重,二氧化碳浓度升高、氮沉降和植物入侵等对植物群落的影响已不可忽视,因此应该加强土壤种子库在解决实际生态系统问题中的作用。另外,有关土壤种子库的研究在干旱地区、湿润及半湿润地区的研究较多,有关干旱半干旱地区土壤种子库的研究国外较少且相对分散,而国内研究较多。该地区生态环境脆弱,面临各种生态问题,在半旱区开展有关土壤种子库的研究,揭示在现存的环境条件下的土壤种子库的特征,结合其特征设计相关的植被恢复方案,利用土壤种子库植被的恢复效果进行评估已成为重点研究对象,而在后续的研究中还应注意在植被恢复过程中各种微地形、微生境的变化以及例如生物结皮等结构的出现对植被恢复和土壤种子库的影响。除此之外,随着采矿业的发展,矿区生态修复问题也刻不容缓,而目前相关研究较为缺乏,利用土壤种子库相关内容评价恢复方案的可行性及恢复效果也将成为今后的研究内容。

通过文献计量在线分析平台及CiteSpace软件的使用,较为全面地反映了国内外有关土壤种子库的学科发展过程及研究方向。这为土壤种子库的研究提供了一定的参考价值。结合本文的分析结果,有关土壤种子库的研究应积极探索新的科学问题,还应顾及更多研究领域,加强在解决实际问题中的作用,提高我国在该领域的科研水平和影响力,结合全球气候变化所带来的生态问题加强国际间的研究合作关系,在全球尺度上利用土壤种子库反映生态变化,为解决生态

问题提供决策参考。

参考文献：

- [1] Simpson R L. Ecology of soil seed bank[M]. San Diego: Academic Press, 1989:149–209.
- [2] 李国旗, 李淑君, 蒙静, 等. 土壤种子库研究方法评述[J]. 生态环境学报, 2013, 22(10): 1721–1726.
- [3] 李秋艳, 赵文智. 干旱区土壤种子库的研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 350–358.
- [4] 沈有信, 赵春燕. 中国土壤种子库研究进展与挑战[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 467–473.
- [5] Jiang D, Wang Y, Oshida T, et al. Review of research on soil seed banks in desert regions[J]. Disaster Advances, 2013, 6: 315–322.
- [6] Kůrová J. The impact of soil properties and forest stand age on the soil seed bank[J]. Folia Geobotanica, 2016, 51(1): 27–37.
- [7] Luo X Q, Cao M, Zhang M, et al. Soil seed banks along elevational gradients in tropical, subtropical and subalpine forests in Yunnan Province, southwest China[J]. Plant Diversity, 2017, 39(5): 273–286.
- [8] Funes G, Basconcelo S, Díaz S, et al. Seed bank dynamics in tall-tussock grasslands along an altitudinal gradient[J]. Journal of Vegetation Science, 2003, 14(2): 253–258.
- [9] 谭向前, 陈芳清, 王稷, 等. 川西山区自然边坡土壤种子库随海拔梯度的变化[J]. 山地学报, 2019, 37(4): 508–517.
- [10] Ma M J, Zhou X H, Du G Z. Soil seed bank dynamics in alpine wetland succession on the Tibetan Plateau[J]. Plant and Soil, 2011, 346(1/2): 19–28.
- [11] 王昌辉, 刘青青, 文竹梅, 等. 红壤侵蚀区植被恢复过程中土壤种子库变化特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 417–423.
- [12] Li W, Yang D, Liu W Z, et al. Soil seed bank and its relationship to the above-ground vegetation in grazed and ungrazed oxbow wetlands of the Yangtze River, China[J]. Environmental Engineering and Management Journal, 2018, 17(4): 959–967.
- [13] Zuo X A, Zhao X Y, Zhao H, et al. Spatial heterogeneity of soil seed banks in sandy grasslands under fencing and grazing in horqin sandland, Northern China[J]. Polish Journal of Ecology, 2013, 61(2): 221–231.
- [14] 方祥, 王东丽, 李佳, 等. 围封对固沙樟子松林土壤种子库的影响[J]. 草业科学, 2020, 37(4): 635–644.
- [15] 李国旗, 邵文山, 赵盼盼, 等. 封育对荒漠草原两种植物群落土壤种子库的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(6): 52–61.
- [16] Wang N, He X Y, Zhao F W, et al. Soil seed bank in different vegetation types in the Loess Plateau region and its role in vegetation restoration[J]. Restoration Ecology, 2020, 28(S1): A5–A12.
- [17] Capon S J, Brock M A. Flooding, soil seed bank dynamics and vegetation resilience of a hydrologically variable desert floodplain[J]. Freshwater Biology, 2006, 51(2): 206–223.
- [18] Esmailzadeh O, Hosseini S M, Tabari M. Relationship between soil seed bank and above-ground vegetation of a mixed-deciduous temperate forest in northern Iran. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(3): 411–424.
- [19] Ma M J, Baskin C C, Yu K L, et al. Wetland drying indirectly influences plant community and seed bank diversity through soil pH[J]. Ecological Indicators, 2017, 80: 186–195.
- [20] Ahmad P, Elgamal H A M. Citation classics in the journal of endodontics and a comparative bibliometric analysis with the most downloaded articles in 2017 and 2018[J]. Journal of Endodontics, 2020, 46(8): 1042–1051.
- [21] 陈林, 宋乃平, 王磊, 等. 基于文献计量分析的蒿属植物研究进展[J]. 草业学报, 2017, 26(12): 223–235.
- [22] 付瑞玉, 苏宏新, 张忠华, 等. 中国森林生物多样性监测网络(CForBio)的研究态势与热点: 基于文献计量分析[J]. 生物多样性, 2018, 26(12): 1255–1267.
- [23] 付全升, 黄先寒, 申仕康, 等. 基于数据库的植物功能性状研究现状文献计量学分析[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(1): 228–240.
- [24] 钱凤魁, 王卫雯, 张靖野, 等. 基于 CiteSpace 的土地利用领域研究态势分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 344–351.
- [25] Shabbir A, Dhileepan K, Zalucki M P, et al. Reducing the fitness of an invasive weed, *Parthenium hysterophorus*: Complementing biological control with plant competition[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 254: 109790.
- [26] Matthews J W, Pociask G E, Price E P F, et al. Flood exposure affects long-term tree survival in compensatory mitigation wetlands[J]. Wetlands, 2019, 39(5): 1129–1138.
- [27] Nguyen T, Bajwa A A, Belgeri A, et al. Impact of an invasive weed, *Parthenium hysterophorus*, on a pasture community in south east Queensland, Australia[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(35): 27188–27200.
- [28] Urrea-Galeano L A, Andresen E, Coates R, et al. Dung beetle activity affects rain forest seed bank dynamics and seedling establishment[J]. Biotropica, 2019, 51(2): 186–195.
- [29] 闫瑞瑞, 卫智军, 辛晓平, 等. 放牧制度对荒漠草原可萌发土壤种子库的影响[J]. 中国沙漠, 2011, 31(3): 703–708.
- [30] 李国旗, 邵文山, 赵盼盼, 等. 荒漠草原区 4 种植物群落土壤种子库特征及其土壤理化性质[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6282–6292.
- [31] Bossuyt B, Honnay O. Can the seed bank be used for ecological restoration? An overview of seed bank characteristics in European communities[J]. Journal of Vegetation Science, 2008, 19(6): 875–884.
- [32] Bekker R M, Bakker J P, Grandin U, et al. Seed size, shape and vertical distribution in the soil: Indicators of seed longevity[J]. Functional Ecology, 1998, 12(5): 834–842.
- [33] Thompson K, Bakker J P, Bekker R M, et al. Ecological correlates of seed persistence in soil in the north-west

- European flora[J]. *Journal of Ecology*, 1998, 86(1): 163–169.
- [34] Long R L, Gorecki M J, Renton M, et al. The ecophysiology of seed persistence: A mechanistic view of the journey to germination or demise[J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2015, 90(1): 31–59.
- [35] 于顺利, 蒋高明. 土壤种子库的研究进展及若干研究热点[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 552–560.
- [36] 杨跃军, 孙向阳, 王保平. 森林土壤种子库与天然更新[J]. 应用生态学报, 2001, 12(2): 304–308.
- [37] Price J N, Wright B R, Gross C L, et al. Comparison of seedling emergence and seed extraction techniques for estimating the composition of soil seed banks[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2010, 1(2): 151–157.
- [38] Gardarin A, Dürr C, Colbach N. Modeling the dynamics and emergence of a multispecies weed seed bank with species traits[J]. *Ecological Modelling*, 2012, 240: 123–138.
- [39] Colbach N, Collard A, Guyot S H M, et al. Assessing innovative sowing patterns for integrated weed management with a 3D crop: Weed competition model[J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 53: 74–89.
- [40] Liyanage G S, Ooi M K J. Intra-population level variation in thresholds for physical dormancy-breaking temperature[J]. *Annals of Botany*, 2015, 116(1): 123–131.
- [41] Herranz J M, Ferrandis P, Martínez-Duro E. Seed germination ecology of the threatened endemic Iberian *Delphinium fissum* subsp. *sordidum* (Ranunculaceae)[J]. *Plant Ecology*, 2010, 211(1): 89–106.
- [42] Cheib A L, Garcia Q S. Longevity and germination ecology of seeds of endemic Cactaceae species from high-altitude sites in south-eastern Brazil[J]. *Seed Science Research*, 2012, 22(1): 45–53.
- [43] 黄欣颖, 王堃, 王宇通, 等. 典型草原封育过程中土壤种子库的变化特征[J]. 草地学报, 2011, 19(1): 38–42.
- [44] 李春鸣, 陈淑燕, 徐长林, 等. 东祁连山高寒草甸鼢鼠鼠丘土壤种子库特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(9): 1543–1549.
- [45] 刘洪来, 毛林灿, 靳瑰丽, 等. 伊犁绢蒿荒漠不同退化阶段草地土壤种子库分析[J]. 草地学报, 2012, 20(3): 413–418.
- [46] 李元恒, 韩国栋, 王正文, 等. 内蒙古克氏针茅草原土壤种子库对刈割和放牧干扰的响应[J]. 生态学杂志, 2014, 33(1): 1–9.
- [47] 李志强, 王明玖, 陈海军, 等. 短花针茅荒漠草原土壤种子库对不同放牧强度的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(6): 184–188.
- [48] 阿日根, 刘洋, 格日乐高娃, 等. 大兴安岭3种主要林型兴安落叶松土壤种子库与天然更新[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(10): 66–70.
- [49] 黄红兰, 张露, 廖承开. 毛红椿天然林种子雨、种子库与天然更新[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 972–978.
- [50] 马全林, 卢琦, 魏林源, 等. 干旱荒漠白刺灌丛植被演替过程土壤种子库变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2285–2294.
- [51] 王明明, 刘新平, 何玉惠, 等. 科尔沁沙地封育恢复过程中植物群落特征变化及影响因素[J]. 植物生态学报, 2019, 43(8): 672–684.