

森林生态系统植被自然更新的研究现状与热点分析

沙欢^{1,2,3}, 庞丹波^{2,3,4}, 彭妞^{1,2,3}, 陈林^{2,3,4*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏银川 750021; 3. 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, 宁夏银川 750021; 4. 宁夏大学生态环境学院, 宁夏银川 750021)

摘要 [目的] 为未来开展森林生态系统恢复和经营管理提供参考依据。[方法] 基于 Web of Science 和中国知网数据库, 通过可视化文献分析工具 CiteSpace, 对 2000 至 2021 年全球已发表的有关森林生态系统植被自然更新研究的相关文献进行分析。[结果] 该领域的历年发文量呈波动上升趋势, 美国、巴西、加拿大的发文量排在全球前列, 在国际间保持着紧密的合作关系。国内发文量远低于国外, 增长趋势缓慢且相关研究起步较晚, 国际影响力较弱, 与森林资源丰富的国家相比具有明显差距。国外以 ZHU J J, KAREN D H, DANIEL C D 等为核心作者形成的研究团队引领着该领域的发展。国内多以科研院所形成的团队内部合作为主。生态类期刊是该研究领域学术成果展示的重要平台, 《Forest Ecology and Management》期刊收录的相关文献最多, 国内核心期刊发文量处在第一位的是《生态学杂志》。目前国内外对森林植被自然更新影响因素的研究多分布在光照或林窗动态、种子库或种子雨、火烧、水分、人为干扰等方面。探究林隙/林窗、土壤、火、种子特性的影响机制是该领域近几十年的研究热点。[结论] 气候变暖引起的夏季极端干旱以及人类对土地的不合理利用造成的植被更新障碍问题成为全球在该领域的新兴研究前沿。

关键词 森林生态系统; 自然更新; 文献计量; CiteSpace 软件; 研究热点

中图分类号 S-058 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)24-0220-10

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.24.048



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Status and Hot-spot Analysis of Natural Regeneration of Forest Ecosystem Vegetation

SHA Huan^{1,2,3}, PANG Dan-bo^{2,3,4}, PENG Niu^{1,2,3} et al (1. School of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021; 2. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021; 3. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021; 4. College of Ecological Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021)

Abstract [Objective] To provide a reference basis for future forest ecosystem restoration and management. [Method] A visual literature analysis tool CiteSpace was used to analyzed the literatures on natural regeneration of forest ecosystem vegetation from 2000 to 2021 based on the two databases of Web of Science and CNKI. [Result] The number of publications in this field fluctuated upward over the years, with the United States, Brazil and Canada ranking among the top in the world and maintaining close cooperation with the international community. The number of domestic publications was much lower than those of foreign countries, with a slow growth trend, a late start of related research and a weak international influence, thus there was an obvious gap compared with countries rich in forest resources. Foreign research teams were leading the development of the field formed by core authors, such as ZHU J J, KAREN D H, DANIEL C D and so on. Domestic research institutes were mainly engaged in internal team cooperation. Ecological journals were an important platform for displaying academic achievements in this research field. The journal of *Forest Ecology and Management* contained the most relevant literature, and the domestic core journal *Chinese Journal of Ecology* had the largest number of articles. At present, global researches on the influencing factors of natural regeneration of forest vegetation were mostly distributed in light or gap dynamics, seed bank or seed rain, fire, water, human disturbance and so on. Exploring the influencing mechanisms of forest gaps, soils, fire and seed germination had been a hot research topic in recent decades. [Conclusion] The problems of extreme summer droughts caused by climate warming and barriers to vegetation regeneration caused by unreasonable land use were emerging research frontiers worldwide in this field.

Key words Forest ecosystem; Natural regeneration; Bibliometric; CiteSpace; Research hot spots

自然更新是逐步恢复扰动前生态系统结构、功能和组成的一个重要生态过程^[1], 同时也是负责森林生态系统世代更替、平衡稳定的关键^[2]。在森林生态系统中, 植被的自然更新包括各种木本植物和草本植物的自然再生^[3-4], 能够保证种群繁衍生息、维持群落组成结构^[5], 对森林资源的可持续利用和生物多样性保护具有重要作用, 是当前森林动态研究的热点^[6]。在复杂的生态学过程中, 种子的产生、扩散和萌发, 幼苗的存活和建成, 林木的衰老和枯倒^[3], 每一个阶段都会受到不同因素的驱动, 然后通过采取不同更新策略以适应

当前的生长环境。其中, 种子和幼苗的再生阶段对植被自然更新的成功起着至关重要的作用^[7], 不仅受到外界环境条件的影响, 还与物种自身的生物生态学特性、林分结构、立地条件及干扰破坏等有关, 是多种影响因素的综合作用。近年来, 由于气候变化引起温度和降雨格局的改变, 对森林生态系统中植被的自然更新造成了不同程度的干扰, 因此探究植被更新障碍成为国内外学者关注的焦点。

目前, 已有大量研究报道了森林自然更新过程中植被与生物、非生物因子之间的交互作用。在研究手段上, 刘玉配^[8]通过种子添加试验来检验濒危物种水杉 (*Metasequoia glyptostroboides*) 自然更新的种源限制和微生物限制。Pistón 等^[9]通过测定植被的功能性状和群落特征, 认为灌木的松散表型相比较紧密表型对群落组成和多样性有着更积极的影响。施小瑜等^[10]从天目铁木 (*Ostrya rehderiana*) 本身的生理生态学特性以及外界干扰 2 个方面着手定性描述其濒危危机

基金项目 宁夏重点研发计划项目(2021BEG02005); 国家自然科学基金项目(32201631); 第三批宁夏青年科技人才托举工程项目(TJGC2018068); 宁夏自然科学基金项目(2023AAC03061)。

作者简介 沙欢(1998—), 女, 宁夏平罗人, 硕士研究生, 研究方向: 恢复生态学。*通信作者, 副研究员, 博士, 硕士生导师, 从事恢复生态学研究。

收稿日期 2022-12-13

制。Zhu 等^[11]通过 Meta 分析定量评估林隙对植被更新的影响,结果显示林隙的影响会因森林类型、林隙特征、环境因素和植物性状而异。Lombaerde 等^[12]对收集的 32 项试验研究数据进行 Meta 分析发现,清除林下植被会对树种幼苗的再生产产生最大的积极影响。Ahmed 等^[13]通过温室试验验证了赤桉(*Eucalyptus camaldulensis*)凋落物会对农业和林木作物的种子萌发、地上部分和根系生长等产生抑制作用。De Pauw 等^[14]开展模拟增温和光照试验来评估林下层植物群落对温度和光照水平增加的反应,认为光处理对植被的功能性状和总覆盖率影响更大。然而,基于文献计量学的方法,综合分析该研究领域的热点趋势变化还鲜见涉及。

通过文献计量分析,能够有效找出相关领域在某一时期内已开展的研究成果,分析文献的引用关系,有助于挖掘研究热点和发展态势^[15-16]。鉴于此,笔者基于 Web of Science (WOS)和中国知网数据库(CNKI),将检索到的有效文献导入 CiteSpace 软件进行计量分析,从时间、国家、作者、期刊、关键词等角度综合探究该研究领域的热点演变,为未来掌握森林的更新动态、了解关键影响因素、开展生态系统恢复和森林经营管理提供参考依据,对保护物种的生物多样性、实现森林资源的可持续利用、维持生态系统的平衡具有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 数据来源及处理

WOS 数据库是由美国科学信息研究所 (ISI) 推出的引文数据库,收录了全球最具影响力的学术期刊^[17]。该研究以 WOS 数据库的核心合集作为外文数据来源,以“natural regeneration”“forest”“seed *”为主题词检索,时间范围选择 2000—2021 年(检索日期为 2022 年 2 月 15 日)。初次检索后的基础数据量较多,为保证文献数据的有效性,在 WOS 左侧的提炼检索结果栏内对文献类型及研究方向进行勾选,剔除与该研究主题明显不相关的文献,如 Pharmacology Pharmacy、Chemistry Medicinal、Marine Freshwater Biology 等,共得到文献 2 571 篇。将筛选好的文献以纯文本格式导出,运行 CiteSpace 5.8.R3 软件对其进行数据格式转换及去重,最终获得与该研究领域相关的有效文献 2 570 篇。

该研究的中文核心数据库选自中国知网,检索方式选择高级检索,将主题词设置为“自然更新”,时间范围设定为 2000—2021 年,以核心期刊和学位论文库作为数据来源,共搜索到 240 篇文献。考虑到初次检索的文献数据量较少,并未限定更多的检索词。在导出数据前对检索的文献进行人工审阅,严格删除研究主题、对象与该研究领域不相关、信息不完整的各类无效文献。为了提高分析结果的精确度,将其中的会议报告、期刊会议征稿、学术成果等非学术性文献剔除,同样导入 CiteSpace 5.8.R3 软件中进行数据格式转换和去重,最终统计出 189 篇文献作为中文数据源,其中核心期刊 94 篇,学位论文 95 篇。

1.2 研究方法

CiteSpace 是由美国 Drexel 大学陈超美教授开发的一款用于计量和分析文献数据的信息可视化软

件^[18-19]。该研究利用 CiteSpace 5.8.R3 软件并辅以 Excel 2019,从历年发文量、国家及作者合作关系、关键词聚类、突现词分析等方面对相关文献进行数据信息的挖掘以及知识图谱的绘制。设置 Time Slicing(时间跨度)为 2000—2021 年,# Years Per Slice(时间切片)为 1 或 3 年。在 Node Types(节点类型)中分别选择 Author、Country、Keyword 等功能类型,设置 Top N(节点阈值)为 40 或 50,Pruning(剪切方法)选择 Pathfinder 法,其他设置均为默认值。

2 结果与分析

2.1 发文数量及发 文期刊分析

2.1.1 历年发文数量

历年发文数量可以反映某一研究领域在某个时间段内的发展现状及持续热度变化^[20]。2000 至 2021 年 WOS 和 CNKI 数据库森林自然更新年度发文趋势存在明显区别(图 1)。国外针对该领域的研究呈现波动式逐渐攀升态势,2008 年度发文量突破 121 篇,在 2021 年达到 210 篇。由于相关研究涉及多种学科交叉且受到调查年限和验证手段的限制,数据获取较为困难,这可能是造成趋势波动不稳定的因素之一。

由图 1 可知,国内研究增长趋势平缓,历年发文量远低于国外,研究起始时间较国外晚 3 年之久。到 2017 年峰值也仅为 18 篇,国外同年发文量是其 8 倍之多,说明国内学者对该领域研究的关注度较低,研究体系仍处于起步阶段。2000 年 CNKI 核心期刊上最先刊出的文献是赵学海等^[21]发表在《林业科技通讯》上的“红松直播在营造接近自然林中的作用”,其次是 2002 年何维明^[22]发表在《植物生态学报》上的“为什么自然条件下沙地柏种群以无性更新为主”,为今后中国进一步探究森林植被自然更新规律、扩展研究尺度提供参考。以“自然更新”为关键词发表的硕博论文始于 2005 年,其中武小钢^[23]研究了采伐迹地华北落叶松种群(*Larix principis-rupprechtii*)的自然更新格局,结果表示林缘更新可作为带状采伐更新设计的根据。由于只选择了核心期刊和学位论文作为数据源,导致检索出的文献量不够,这也意味着与国外相比,我国在该领域的高质量文章产出不够、学术水平及科研能力不高。

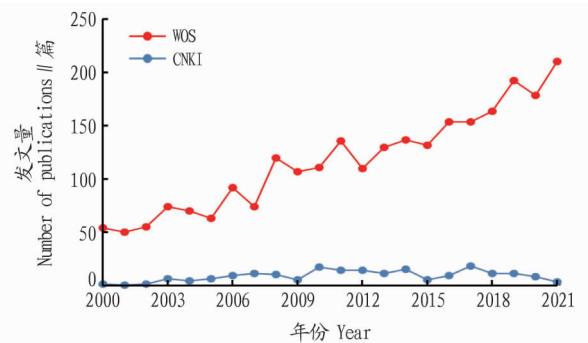


图 1 全球相关研究历年发文量

Fig.1 The number of relevant global research publications over the years

2.1.2 期刊刊文情况

2000—2021 年全球共有 340 种核心期刊发表了与该领域相关的研究文献。该研究以核心期刊

刊文量为衡量标准,对收录相关文献最多的前 15 种期刊进行统计(表 1)。在 WOS 数据库中刊文量较多的是《Forest Ecology and Management》和《Forests》,刊文数量分别为 536 和 117 篇。其中期刊《Forest Ecology and Management》所收录文献量占文献总量的 20.86%,远超其他期刊的文献贡献量,在该领域处于领先地位,较高的影响因子一定程度上也保证

了研究结果的理论和试验价值。统计 CNKI 数据库的刊文情况发现,我国对该领域的研究关注度不够,排名前 15 的核心期刊总刊文量为 55 篇,远远低于 WOS 数据库收录的文献量。排名前 3 的期刊分别是《生态学杂志》《林业科学》和《生态学报》,处于第 1 位的《生态学杂志》刊文量仅为 7 篇,相关研究多集中于国外。

表 1 相关研究刊文量排名前 15 的期刊

Table 1 Top 15 journals for the number of relevant research publications

序号 Number	WOS 数据库 WOS database				CNKI 数据库 CNKI database			
	期刊 Periodical	发文量 Number of publications 篇	比例 Proportion %	影响因子 Impact factors	期刊 Periodical	发文量 Number of publications 篇	比例 Proportion %	影响因子 Impact factors
1	Forest Ecology and Management	536	20.86	4.584	生态学杂志	7	3.70	2.997
2	Forests	117	4.55	3.292	林业科学	5	2.65	1.880
3	New Forests	66	2.57	2.561	生态学报	5	2.65	4.773
4	Restoration Ecology	63	2.45	4.241	广西植物	5	2.65	1.241
5	Plant Ecology	60	2.34	2.396	植物生态学报	5	2.65	2.546
6	European Journal of Forest Research	50	1.95	3.479	北京林业大学学报	4	2.12	1.984
7	Canadian Journal of Forest Research	49	1.91	2.293	应用与环境生物学报	3	1.59	1.952
8	Annals Of Forest Science	48	1.87	4.055	植物科学学报	3	1.59	1.550
9	Biotropica	40	1.56	3.399	浙江农林大学学报	3	1.59	2.056
10	Scandinavian Journal Of Forest Research	34	1.32	1.978	西北植物学报	3	1.59	1.552
11	Forestry	33	1.28	3.277	应用生态学报	3	1.59	3.893
12	Journal of Forest Research	33	1.28	1.498	干旱区研究	3	1.59	2.711
13	Ciencia Florestal	31	1.21	0.848	西北农林科技大学学报(自然科学版)	2	1.06	1.667
14	Journal of Vegetation Science	31	1.21	3.699	林业科学研究	2	1.06	1.668
15	Ecological Applications	29	1.13	6.131	西部林业科学	2	1.06	1.538

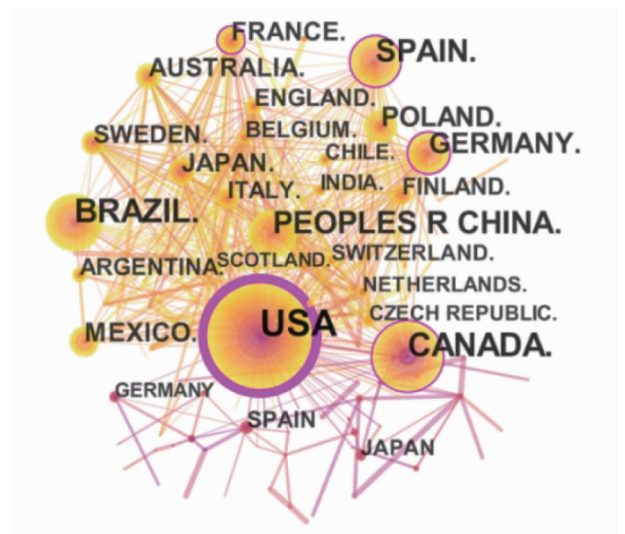
2.2 合作网络特征分析

2.2.1 国家合作网络分析。国家之间的交流合作有利于促进各国科技的发展与进步^[24]。借助 CiteSpace 软件对 WOS 数据库中的 2 570 篇文献进行处理,绘制国家合作网络图谱(图 2),得到 178 个节点,表明在该领域已有 178 个国家开展研究,并组成了不同程度的合作关系。可视化分析可知,发文量居于前 3 的国家分别是美国、加拿大和巴西。美国在该领域的关注度最高且研究起始时间最早,总发文量高达 558 篇,占国外发文总量的 21.7%,以 0.82 的中介中心性处于首位,因此发表的文章在国际上影响力较强,国家合作紧密度较高;其次是加拿大和巴西,发文量均为 246 篇,但中介中心性不高(0.13、0.03),表明与其他国家合作参与度较低,国际影响力偏弱;德国发文量虽少,但中介中心性较高(0.16),说明以较高质量的研究成果得到了国际的普遍认可。我国以 180 篇外文文献量排全球第 5,与国内 CNKI 数据库文献量基本一致,这也进一步说明国内高水平学者多倾向于发表外文期刊以促进科研成果的交流与共享,但中心性仅为 0.04,国际影响力偏弱,未来学术发展仍需不断努力。

2.2.2 作者合作关系分析。文献计量学中把某一领域具有较高学术影响力和突出贡献的研究人员称为核心作者,可由普赖斯定律^[25]计算得出,如下:

$$M = 0.749(N_{\max}^{1/2}),$$

式中: M 代表核心作者至少应发表的文章量; N_{\max} 代表统计年



注:节点越大代表国家的发文数量越多,节点颜色越浅代表起始时间越早,节点之间的连线代表相邻国家的联系强度,节点外边越宽代表其中介中心性越大。

Note: The larger the node, the greater the number of country communications. The lighter the node color, the earlier the start time. Connections between nodes represent the strength of ties between neighboring countries. The wider the outer edge of the node, the greater the betweenness centrality.

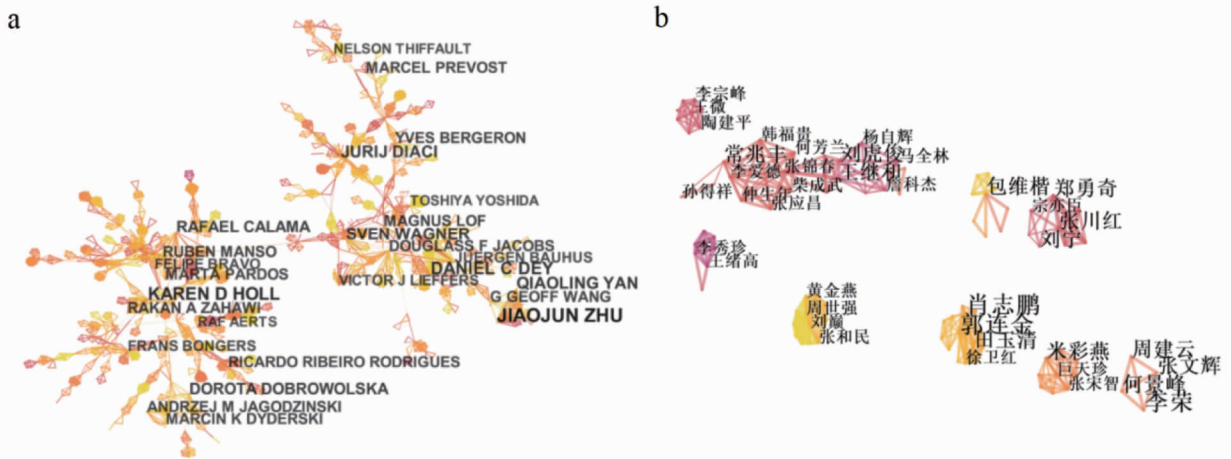
图 2 国家合作网络图谱(WOS)

Fig.2 National cooperative network(WOS)

段内发文量最高的作者其总文章量。统计 WOS 数据库后得出, $N_{\max}=22$ 、 $M=3.5$, CNKI 数据库中 $N_{\max}=4$ 、 $M=1.5$ 。因此该领域发文量不少于 4 篇的 176 位作者成为外文核心作者, 对该领域研究作出较大贡献; 发文量不少于 2 篇的作者为中文核心作者, 共计 52 位, 相比之下我国的研究力量较薄弱, 未来还需发现和培养更多的优秀科研人员。

为进一步清楚显示作者间合作关系, 借助 CiteSpace 软件绘制作者共现网络图谱(引文量阈值设为 50)。由图 3a 可知, 国外研究作者间形成了整体分散部分集中的 2 类大规模合作网络, 一类是以 ZHU J J、DANIEL C D、YAN Q L、SVEN WAGNER、JURIJ DIACI 等为首的核心作者形成的研究网, 发现来自中国科学院沈阳应用生态研究所的 ZHU J J(朱教君)所带领的研究团队外文发文量最高(22 篇), 成为该领域最

活跃的核心作者, 在国际上具有重要的学术影响力。另一类, KAREN D H、DOROTA DOBROWOLSKA、RAFAEL CALAMA 等是较早并持续相关研究的核心作者, 其学术思维在不同团队间得到了发散性的交流合作, 一定程度上引领着该领域的研究。国内作者合作网络星状特征明显, 但整体呈分散现象, 仅形成了少数较明显的作者团队(图 3b)。主要研究团队有来自上饶师范学院生命科学系的郭连金团队、西北农林科技大学西部环境与生态教育部重点实验室的李荣团队、甘肃省治沙研究所的常兆丰团队等。这表明国内作者主要以团队方式进行学术研究, 且以重点高校及重点院所为研究主体, 内部沟通交流频繁, 但跨团队合作关系较弱, 没能形成良好的研究网络, 应主动加强团队间学术交流与合作。



注: a 为 WOS 数据库; b 为 CNKI 数据库。

Note: a was WOS database; b was CNKI database.

图 3 全球相关研究作者合作关系图谱

Fig.3 Author collaboration in global related research

2.3 文献共被引分析 文献被引频次可以反映作者的科研水平和学术影响力, 同时也是一个国家科研结果被其他机构或期刊认可的体现。从 WOS 数据库文献被引情况来看(表 2), 国外作者倾向于从物种自身生物学特性和火灾后植被恢复机制为基础发散研究。其中作者 Karen D.Holl 于 2001 年发表在《Restoration Ecology》上的文章被引频次最高, 文中提出撂荒牧场演替为山地森林过程中存在的重要更新障碍, 可通过加强种子传播能力、限制牧草与幼苗生长竞争的手段来促进其自然恢复。被引频次排名第 2 的文章, 对撂荒牧场森林的恢复策略从林火干扰方面进行了进一步的探究, 并强调适当的恢复策略取决于土地退化程度、所期望的恢复速度以及与原森林物种组成的相似度。排名第 3 的文章发现西班牙本土松树表现出明显的与火灾相适应的生活史。排名第 4 的文章通过田间试验探讨了忍冬灌木如何从地上、地下部分对乔木幼苗的生存产生竞争。排名第 5 的文章则综合评估了种间竞争、种子扩散限制、火灾和土壤养分缺乏对限制森林更新的相对重要性。

由表 2 可知, CNKI 数据库中被引频次最高的文章是罗

应华于 2003 年发表在《生态学报》上的, 该文与排名第 5 的文章均研究了在不同间伐处理强度下以及套种不同树种对林下物种多样性及乔木幼苗幼树初期生长的积极影响, 提出间伐措施是促进林木更新、健康演替的有效经营方式。被引频次排名第 2 的文章从林区火烧后的植被变化情况出发, 探讨在自然更新及人工促进下的恢复过程。排名第 3、4 的文章对不同林窗、林冠环境下幼苗的生长和存活状况进行连续观测, 探究其对生境差异的响应规律。因此相比较国外, 国内作者更注重植被更新与实际生产实践之间的相互作用。

2.4 研究热点及趋势分析

2.4.1 重要影响因素发文情况统计。 植被自然更新是一个复杂的生态学过程, 在这一过程中又包括了种子产生、扩散和萌发, 幼苗定居和建成, 林木衰老和枯倒 3 个阶段, 每一阶段的任何影响因子超过或者低于临界值均会对生态系统中的森林资源再生产生不同程度的干扰^[3]。目前, 国内外学者在该领域已形成一定的理论和试验成果, 因此该研究在收集前人研究成果的基础上, 整理归纳出影响森林植被更新的 9 种重要因素, 通过设定相应的主题词在已检索获得的 WOS

和 CNKI 数据库中进行二次检索。

统计结果显示,国外相关研究多分布在探究光照或林窗动态(591 篇)、种子库或种子雨(546 篇)、火烧(439 篇)以及水分(427 篇)的影响机制上。而国内除在林窗动态(52 篇)、种子库或种子雨方面同样集中外(34 篇),还更侧重于对人为干扰(28 篇)和土壤理化性质(27 篇)展开探究。可见光照条件和种子库潜在在制约植被更新格局、调节群落结构上占据着重要的地位。其研究方法也主要是通过人工控制光处理、对比调查不同林冠环境或不同林分类型下的种子萌发和幼苗生长状况以及监测种子库的动态。在当代气候变化的背景下,频繁的火灾和降雨的减少对森林的管理和恢复带来了巨大的挑战,因此国外多针对火灾处理后幼苗存活、树木

建立、植被类型等方面展开大量研究以对其进行再生动态评估^[26-27],同时以季节性降水作为干旱森林自然更新的重要的预测因子^[28]。国内在人为干扰和的土壤理化性质上的研究发文也较多,通过不同的间伐措施进行近自然林分改造以分析更新层至乔木层物种多样性的变化^[29-30],改变林内土壤理化性质有助于改善幼苗幼树在林下的生长和定居^[31-32],是学者较为关注的研究内容。关于风扰对自然更新的影响,国外发文量达到了 111 篇,国内鲜见涉及。国外学者认为,强风扰动对树冠造成严重的破坏,大大增加了冠层树木的死亡率,但对幼苗和幼树的伤害很小,风扰后使林内的光照环境发生变化,这就为耐荫物种提供了优势形成提前更新^[33-34],且风散种子的传播在林分的更新发展上起着重要作用。

表 2 2000—2021 年高被引文献信息

Table 2 The highly cited literature information from 2000 to 2021

数据库 Database	第一作者 Author	被引频次 Frequency 次	年份 Year	期刊 Journal	文献标题 Literature title
WOS	Karen D.Holl	390	2001	Restoration Ecology	Tropical montane forest restoration in Costa Rica:Overcoming barriers to dispersal and establishment
	T.Mitchell Aide	378	2001	Restoration Ecology	Forest regeneration in a chronosequence of tropical abandoned pastures:Implications for restoration ecology
	Raul Tapias	247	2004	Plant Ecology	Life histories of Mediterranean pines
	David L.Gorchov	200	2003	Plant Ecology	Competitive effects of the invasive shrub, <i>Lonicera maackii</i> (Rup.) Herder (Caprifoliaceae), on the growth and survival of native tree seedlings
	Elaine Hooper	161	2005	Journal of Applied Ecology	Barriers to forest regeneration of deforested and abandoned land in Panama
CNKI	罗应华	153	2003	生态学报	马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响
	王绪高	116	2003	生态学杂志	大兴安岭北坡火烧迹地自然与人工干预下的植被恢复模式初探
	刘庆	66	2004	植物生态学报	林窗对长苞冷杉自然更新幼苗存活和生长的影响
	张远彬	61	2006	植物生态学报	岷江冷杉林林窗小气候及其对不同龄级岷江冷杉幼苗生长的影响
	李荣	56	2011	西北农林科技大学学报 (自然科学版)	近自然经营间伐对辽东栎林植物组成及林木更新的影响

2.4.2 关键词聚类分析。关键词是作者对文章内容的高度凝练和总结,词频越高说明相关主题受到的关注程度越高。该研究利用 CiteSpace 软件,设置时间切片为 3 年,使用 pruning 和关键词聚类功能,绘制该研究领域的关键词聚类时区图,并结合高频关键词表对关键词出现的频次及其相关关系进行汇总,能够更加直观地展现目标领域的主要研究热点和研究方向。2000 至 2021 年,WOS 和 CNKI 数据库分别形成 12 个关键词聚类分区,对前 6 个分区可视化,编号顺序# 0 到 # 5,数字越小说明该聚类分区包含的关键词越多、比例越高。

根据 WOS 聚类时区图(图 4),ModularityQ = 0.367 3 (>0.3)、Mean Silhouette S = 0.763 5 (>0.7),聚类分析结果显著,达到软件可靠性的临界值,得出的聚类图谱结果合理。国外对于该领域的研究主要集中在#0 scots pine、#1 Canopy gap、#2 forest recovery、#3 soil、#4 fire、#5 natural regeneration 这 6 类聚类结果,其中“Canopy gap”“soil”和“fire”是针对影响因素研究的主要聚类热点,研究起始时间均较早。#0 scots pine 聚类排在最高位(聚类大小为 20),表明近几十年里松科树种自然更新的建立机制备受世界学者的关注,尤以欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)的研究突出,为今后探究林隙、土壤、林火等影响因素奠定了基础理论和研究方向。#1 Canopy gap

和#2 forest recovery(聚类大小为 15)聚类的相关文献围绕林冠空隙和森林恢复关键词展开。林隙的大小能反映林隙环境与周围对照林分环境的差别程度,是影响植被自然更新过程中种子萌发、苗木定居、幼苗生长等阶段的重要因素,所以研究者常以林隙干扰来研究植被自然更新的反应规律。但从 2009 年开始,#1 Canopy gap 和#3 soil 这 2 种聚类分区的研究方向不再是国外学者重点关注的问题,#2 forest recovery 这一研究热点从 2000 年一直延续至今,可见促进森林生态系统的恢复和重建从始至终都是全球生态保护工作的核心部分。从关键词随时间变化结果来看,其动态变化趋势不明显,高频关键词多集中在 2000 年(表 3),WOS 数据库中出现频次最高的关键词是“growth”(518 次),其次是关键词“regeneration”(475 次)、“forest”和“natural regeneration”分别出现 434 和 349 次,这些高频关键词都是在自然更新的基础上演化而来的。2001 年以后出现频次较高的关键词为“diversity”,也反映出了基于物种多样性研究构成了森林更新动态发展的研究基础。

根据 CNKI 数据库绘制的关键词聚类时区图(图 5),ModularityQ = 0.881 9 (> 0.3),Mean Silhouette S = 0.967 8 (>0.7),聚类结果合理可靠。结果发现,国内热点聚类时间

较为滞后,从 2003 年起随着文献数量的缓慢上升,许多研究热点才开始涌现。主要形成了 4 类重要聚类热点,分别是#0 植物群落、#1 林窗、#3 种子萌发、#5 α 多样性,相比较国外研究热点的演变,两者之间存在明显的差异。在这 4 类研究热点中#0 植物群落和#1 林窗的聚类值较高(聚类大小分别为 28、27),说明这类热点方向是研究工作的核心部分。随着时间的不断推进,以#3 种子萌发、#5 α 多样性为关键词进行的研究也逐渐成为该领域的重要热点方向,其中#3 种子萌发聚类热点从 2021 年起一直发展到至今,成为当前主要聚焦热点。与 WOS 不同的是,CNKI 高频关键词随时间变化较明显(表 3),呈现出较好的演变趋势。除关键词自然更新、更新这类相近词频次较高外,国内学者也更加集中在探究森林生态系统更新与植被自身生物、生态学特性之间的关系上。此外随着时间的推移,“林隙”“光照”“种子”“种子库”“演替”等关键词依次突出,与聚类结果相一致,充分说明了不同时间段内国内学者对该领域研究的关键视角。

表 3 全球相关研究高频关键词

Table 3 High frequency keywords of global related research

数据库 Database	关键词 Keywords	年份 Year	频次 Frequency//次
WOS	growth	2000	518
	regeneration	2000	475
	forest	2000	434
	natural regeneration	2000	349
	dynamics	2000	347
	vegetation	2000	257
	pattern	2000	256
	diversity	2001	248
	tree	2000	234
	establishment	2000	228
	recruitment	2000	202
	restoration	2000	188
	seedling	2000	178
	dispersal	2000	176
	rain forest	2000	175
	fire	2000	165
	disturbance	2000	162
	management	2000	161
	survival	2000	142
	succession	2000	139
CNKI	自然更新	2003	47
	更新	2005	16
	种子萌发	2010	11
	天然更新	2003	9
	林窗	2004	9
	群落结构	2008	8
	幼苗	2004	8
	种子雨	2012	7
	间伐	2009	7
	植被恢复	2003	6
	更新方式	2000	6
	种群结构	2005	6
	幼苗更新	2012	5
	环境因子	2009	5
	岷江冷杉	2006	4
	林隙	2007	4
	光照	2008	3
种子	2006	3	
种子库	2007	3	
演替	2008	3	

2.4.3 突现词可视化分析。利用 CiteSpace 软件提供的突现词探测算法考察词频的时间分布,可以将变化率高的突现词从大量的关键词中探测出来,并依靠词频的变动趋势来确定学科的研究前沿^[35]。突现词的突现强度越高,越能代表该时间段内的最新研究动态及发展趋势^[36]。对 WOS 数据库和 CNKI 数据库进行同义关键词合并及无关关键词排除后,调整 Burstness 中的 Minimum Duration(最小持续突现年份)值为 2,并分别调节 r [0,1] 值为 1.0、0.3 以保证有一定数量的突现词。分别检测出突现词 35 和 34 个,最后选择前 20 个绘制关键词突现图(图 6)。

在 WOS 数据库(图 6a)中最早兴起的热点为“recovery”“deciduous forest”“coniferous forest”,突现时间维持了 12 年之久,说明国外对森林生态系统植被恢复和更新动态特征的研究对象早期多集中在针叶林和阔叶林,评估植被自然更新的适应机制有助于可持续森林管理的发展^[37]。另外“boreal forest”的突现强度较高、持续时间也较长,表明北方森林的更新状况受到国外学者较高的关注度。到 2009 年,兴起的热点有“rain”“tropical rain forest”“seed”,这是由于受到温室效应、全球气候变化的影响,降水格局发生改变,水分及降雨对植被更新和幼苗生长的重要性开始被认知,有研究通过对林场不同演替阶段下雨季和旱季土壤种子库的调查,以了解该地区的自然更新潜力^[38]。2018 年以后,“climate change”“land use”“drought”“natural regeneration”等词成为这一时期的突现词并延续至今。其中“climate change”突现强度最高达到 15.80,体现了在多变的气候条件下不断深化探索植被生长适应性问题的趋势^[39],并有研究发现气候变化和自然干扰正在催化森林向不同植被类型的转变,替代植被类型被证明具有弹性,将形成对区域气候的生物物理反馈,并影响随后的干扰机制^[40]。可见,关键词突现图谱的分析结果为未来的研究趋势提供了很好的参考。

从 CNKI 关键词突现图谱来看(图 6b),随着时间推移,“红松”“辽东栎”“种子萌发”“间伐”“生态恢复”“林隙”“林窗”等突现关键词不断涌现。“种子萌发”“间伐”和“自然更新”3 个关键词突现强度达到 2.00 以上,分别为 2.91、2.44、2.78,是该领域的重点研究内容。红松(*Pinus koraiensis*)作为古老树种,在阔叶树等林冠下呈现独特的簇状自然更新方式,通过直播造林模拟红松自然更新方式^[21],摸清直播苗木、幼树生长规律成为 2000—2005 年兴起的研究热点。2006—2014 年,李荣团队发表的多篇文章通过探究不同间伐措施和强度对辽东栎(*Quercus wutaishanica*)植物组成、幼苗自然更新及生长规律的影响^[41-42],使得“辽东栎”“种子萌发”“间伐”成为该时期的最新研究动态,其中“辽东栎”突现词持续时间最长。“种子雨”作为影响植被自然更新过程中生产力变化的重要因子,突现时长达 9 年,是国际上植物种群生态学和植被生态学研究的热点之一^[43],却仅仅持续到了 2020 年,是这一时期的重要研究前沿。随着研究的不断深入,持续到现在的突现关键词有“群落结构”“闽楠”“影响因子”“岷江冷杉(*Abies faxoniana*)”“冗余分析”,成为该领域

的新兴研究手段,通过冗余分析用以探索群落结构及物种组成受响应变量约束的关系。

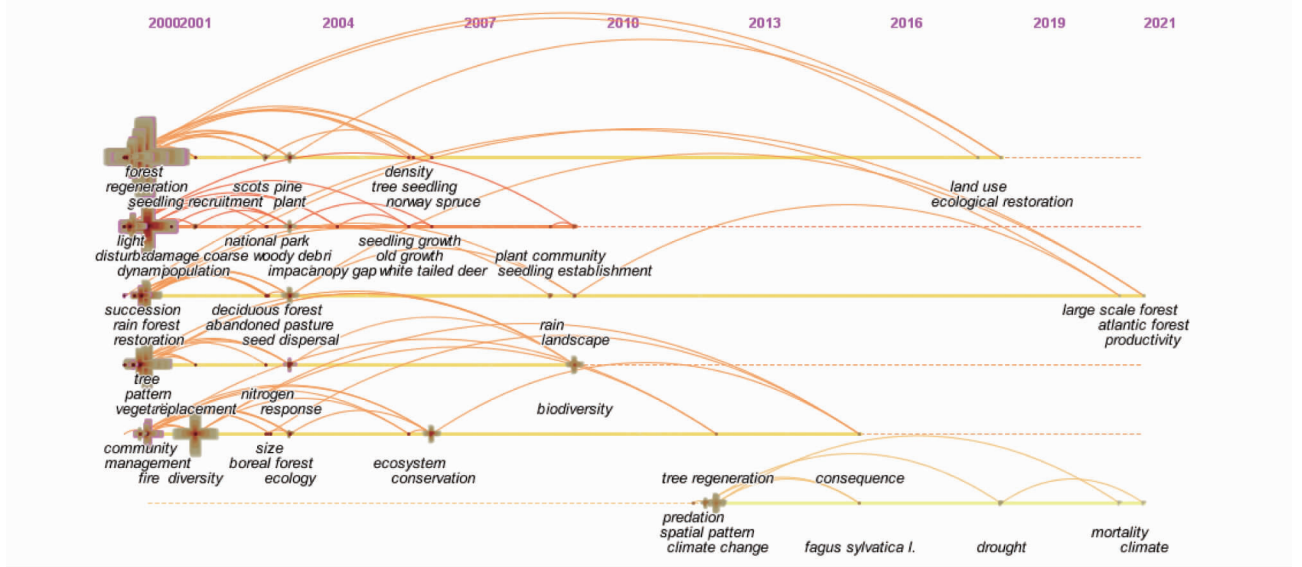


图 4 关键词聚类时区图(WOS)
Fig.4 Keywords clustering time zone diagram(WOS)

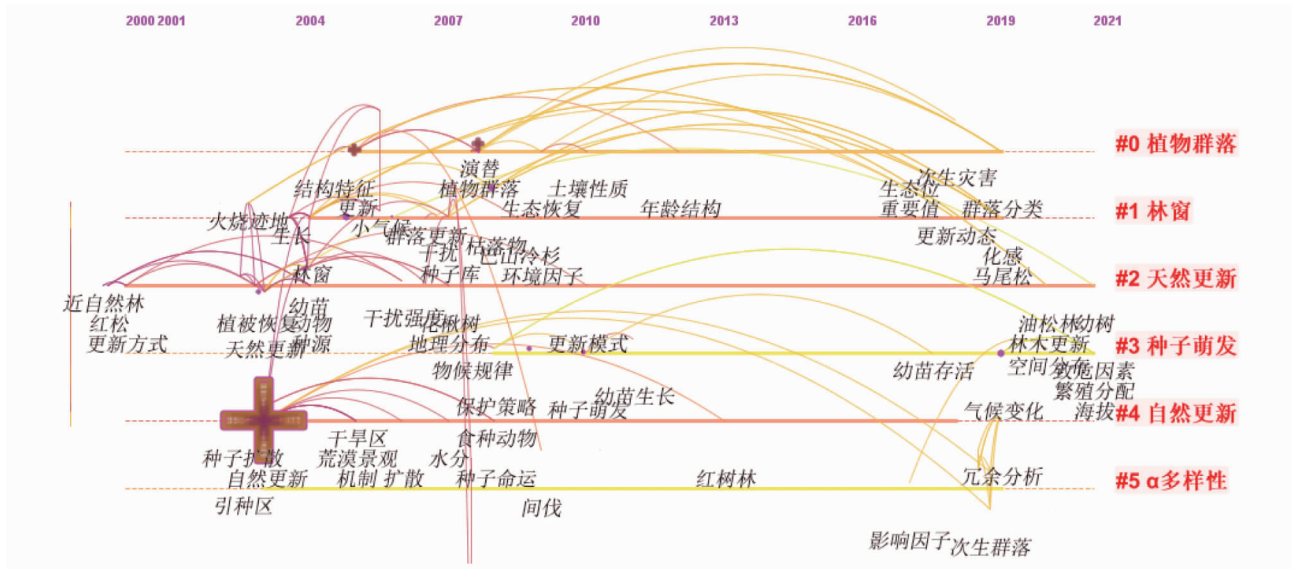


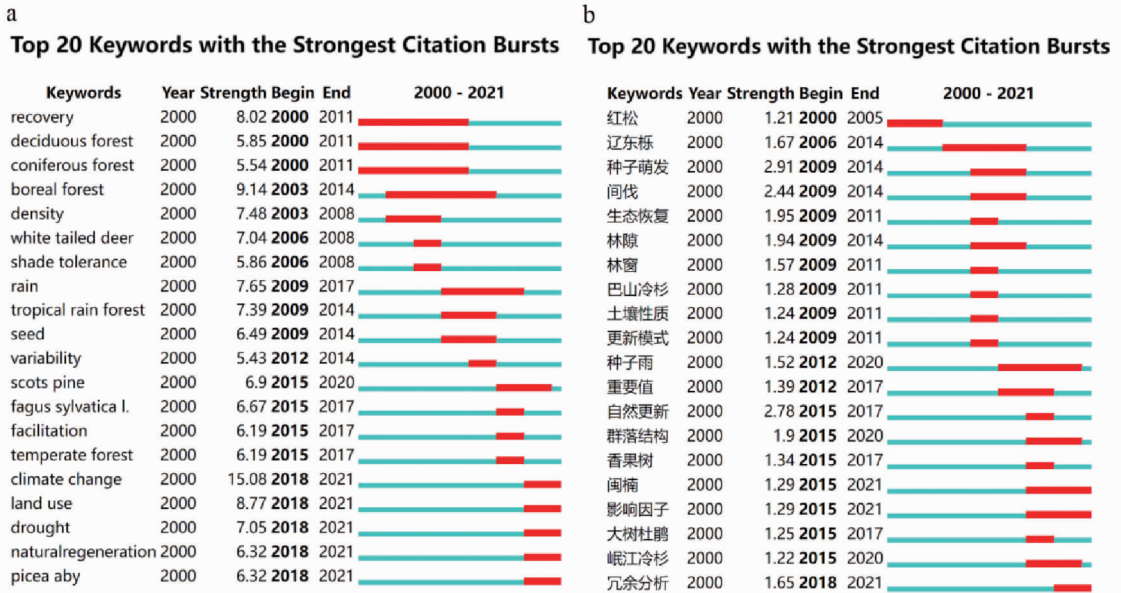
图 5 关键词聚类时区图(CNKI)
Fig.5 Keywords clustering time zone diagram(CNKI)

3 讨论

近年来,气候变化已经成为各国普遍关注的环境问题,各种生物及非生物因子在气候变化的背景下对森林生态系统中植被的自然更新产生了不同程度的影响,主要表现在林下植被生态功能低下、生长发育退化、演替进程缓慢。国内外学者围绕各种影响因素开展了较多的科学研究,并在研究成果上取得了一定的进展。以森林生态系统植被自然更新为主题的研究自 2000 年以来呈现逐年波动的增长趋势,我国发文量远低于国外,增长趋势缓慢且相关研究起步较晚。一方面是由于国内学者其科研能力及高质量文章产出不足,同领域不同团队之间交流合作欠缺,导致了与发达国家相比存在较大差距;另一方面也可能与我国林业的早期发展实践有关,在 20 世纪 70 年代以前,我国森林的发展经营主要是

通过人工造林措施来增加木材产量,以及森林采伐利用后进行大面积的更新恢复,很大部分是针对人工林的发展,导致林内生态环境破坏和生物多样性下降^[44],直到 90 年代才逐渐意识到可持续森林资源经营和生态系统保护的重要性^[45],通过采取各种造林、抚育措施以及封山育林工程进行人工促进植被更新,恢复退化森林生态系统。因此,与欧洲其他经验较成熟的国家相比,我国相关经验较少且更新手段较差,制约了我国人工促进森林自然更新的发展^[46]。

森林生态系统作为陆地生态系统的主体^[47],植被类型多样,地理气候差异复杂^[44],因此各种生物、非生物因素对林下植被生长和更新进程的影响差异有所不同。从重要影响因素的发文情况统计来看,全球关于该领域的研究多分布在“光照或林窗动态”“种子库或种子雨”“火烧”“水分”“人



注:a 为 WOS 数据库;b 为 CNKI 数据库。

Note:a was WOS database;b was CNKI database.

图 6 全球相关研究关键词突现图谱

Fig.6 Global related research keyword emergence diagram

为干扰”等因素方面。森林复杂的冠层结构可以削弱林内光照、降低地面辐射,并与林内的空气温湿度、土壤养分及水分等密切相关,进而影响到林下幼树幼苗的生长和发展^[48-49],而林窗的出现则显著增强了区域小环境的光照强度和植被的生长空间,为其幼苗、幼树提供了良好的生存环境^[50-51],他们之间密切的联系这一客观事实早已被学者所认知。种子雨作为森林群落更新繁殖体的主要来源,种子库中有活力的种子萌发后补充种群发展,均代表了森林植被的更新基础和更新潜力,是植物群落组成的潜在力量,成为目前该领域的研究焦点^[52-53]。欧洲环境署的多项研究表明,欧洲气候变暖高于全球的平均水平,许多地区极端降雨、林野火灾频发事件增加,同时也导致了森林植被自然更新存在很大的不确定性,成为当前应对气候问题的主要挑战^[54-55],因此国外诸多学者针对“火烧”和“水分”因素对森林植被自然更新的限制作用这一全球性科学问题也展开了大量的研究。森林植被的更新不仅受到自然因素的影响,同时也是耦合了人为干扰综合作用的结果,干扰性破坏一旦超过系统自我调节的阈值,必然会使森林生态系统的平衡失调,造成群落结构的破坏^[56]。因此除前几种影响因素外,我国学者则更集中于探究“人为干扰”因素对森林植被更新的影响。自 1998 年以来,我国的一系列天然林保护工程启动实施以及近自然森林经营模式的应用,使森林系统的完整功能有效发挥、结构不断优化,推动了森林资源可持续向更深层次发展。

对植被自然更新的研究经过多年的积累,根据其研究内容和对象的不同形成了不同的热点聚类。从关键词聚类来看,国内外对该研究领域的热点聚类可归纳为“欧洲赤松”“植物群落”“林隙/林窗”“土壤”“火烧”“种子萌发”“森林

恢复”“种子萌发”等。其中关于影响因素的聚类结果与前文重要影响因素的热点统计结果基本一致,同时也呈现出 2 种研究对象聚类:一种是对欧洲赤松及其变种;另一种则是更广泛的森林植物群落。欧洲赤松作为欧亚地区遗传变异最丰富的针叶树种,具有重要的生态价值和经济价值^[57-58]。欧洲赤松强烈依赖于有利的外部条件,如土壤层中足够的水分、不密集的草本层和林地内较高光照水平,自 20 世纪 30 年代起就成为欧亚森林管理中的一个热门话题^[59-60]。对欧洲赤松林分不断的商业砍伐和传统的管理方式导致很难在大面积实现再生和更新并出现了针叶林退化的问题^[61]。加之近几年极端温度和频繁干旱引发的不利条件,以及欧洲赤松林本身自然更新对气候变化和采伐方式的敏感性^[62],深入探讨欧洲赤松林自然更新成功的因素,并寻求其有效的森林管理手段,成为当前全球科学家面临的更困难的挑战之一。总之,无论是针对某一特定树种还是某一植物群落展开研究,充足的林内光照和土壤性质、宽阔的生长空间、合理的气候变化、良好的种子特性以及这些因素之间的相互作用对森林植被自然更新产生的影响难以忽略。最后依据对相关文献的关键词突现分析,过去国内对植被自然更新影响因素的研究虽然在探究种子雨的作用机理上维持了较长的时间,但整体并未形成明显的前沿动态。从全球尺度上来看,该领域的研究角度已从植物“种子”特性转变为对“气候变化”“土地利用”及“干旱”因素的探究,因此基于全球气候变化这一背景下,气候变暖引起的夏季极端干旱以及人类对土地的不合理利用造成的植被更新障碍问题成为目前该领域的新兴研究前沿,并且随着时间的推移,深入探索多变的气候条件对森林生态系统中植被自然更新的影响仍会是未来全球关注的重点。

4 展望

CiteSpace 软件具备对目标领域相关文献进行可视化分析的作用,得到了科学界的广泛应用。该研究对引文数据库进行系统检索后借助 CiteSpace 软件,运用文献计量学的方法,从多个角度有效整理归纳该领域的研究现状和热点视角,对前沿动态起到了一定的预测作用,但仍然存在不足和局限。首先,由于该研究的检索主题词是通过人为设定,并不能完全涵盖中英文、同义词的扩展,筛选过程中一些研究内容符合,但文献题目、关键词部分未包含检索主题词的文献还会被遗漏,导致文献收集的完整性不够。其次,该研究在文献的选取上仅选择了发表在 Web of Science 和 CNKI 核心数据库中的相关文献,虽保证了文献质量,但其他数据库中质量较好的文献却未被纳入统计分析中,这也是导致最终从 CNKI 数据库中统计出的文献量偏少的原因之一。最后,利用 CiteSpace 软件进行文献计量分析,仅能通过提取文献关键词的方法来分析文献具体研究内容的发展动态,无法精准的代表文献的整体主题,可能会造成对研究领域发展趋势的掌握略显不足。因此,未来对目标领域的研究一方面可涉及更广泛的数据库文献资源,以提升领域发展动态的全面性和完整性;另一方面也可结合其他文献计量工具,对目标领域在研究尺度和研究视角上进行更加深入透彻的挖掘,以提高研究结果的精确度。

森林生态系统中植被种群的多样性和外界环境条件的不稳定性决定了自然更新过程的复杂性,不同更新阶段所涉及的干扰因素不同导致对植被生长演替的影响程度不同。因此在今后的科学研究中,不应只局限在某个单一影响因素的探究上,还需耦合多个影响因素的综合作用,深入挖掘森林植被自然更新与林窗/林隙特征、土壤特性、林野火动态和种子萌发特性之间的复杂响应关系。尤其面对全球气候问题的加剧和人类高强度的土地开发利用,植被生长所需外界环境的不稳定性是当前影响其自然更新的最核心的问题。不同影响因素的作用机制是否发生转变,是否与前人的研究结果保持一致,需建立气候干扰的长期动态监测,明确不同植物种群在不同更新阶段的生理生态指标变化特征,预测森林植被在没有人干扰情况下自然更新的可能性。此外还需探索不同立地条件下植被的再生能力,以提高植被更新潜力为导向,优化人工促进植被自然更新模式,为创造更适宜植被更新需求的生境条件提供科学基础和技术支撑。最后,对照国外在森林生态系统植被自然更新影响因素研究领域的发展态势,我国需加强在国际学术上的交流与合作,提高作者及团队之间的协同意识,以吸引更多学者积极参与该领域的研究。尤其应提高国内研究成果的学术水准及国际影响力,以保证高质量成果的产出,对进一步促进该领域的发展演进具有重要作用。

参考文献

[1] CHAZDON R L, GUARIGUATA M R. Natural regeneration as a tool for large-scale forest restoration in the tropics: Prospects and challenges [J]. *Biotropica*, 2016, 48(6): 716-730.

[2] DYDERSKI M K, GAZDA A, HACHUŁKA M, et al. Impacts of soil condi-

tions and light availability on natural regeneration of Norway spruce *Picea abies* (L.) H. Karst. in low-elevation mountain forests [J]. *Annals of forest science*, 2018, 75(4): 1-13.

[3] 李小双, 彭明春, 党承林. 植物自然更新研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2081-2088.

[4] 王伯荪. *植物群落学* [M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.

[5] SHEN C C, NELSON A S. Natural conifer regeneration patterns in temperate forests across the Inland Northwest, USA [J]. *Annals of forest science*, 2018, 75(2): 1-16.

[6] 程瑞梅, 沈雅飞, 封晓辉, 等. 森林自然更新研究进展 [J]. *浙江农林大学学报*, 2018, 35(5): 955-967.

[7] MANSO R, FORTIN M, CALAMA R, et al. Modelling seed germination in forest tree species through survival analysis. The *Pinus pinea* L. case study [J]. *Forest ecology and management*, 2013, 289: 515-524.

[8] 刘玉配. 濒危物种水杉 (*Metasequoia glyptostroboides*) 自然种群的更新限制研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2015.

[9] PISTÓN N, MICHALET R, SCHÖB C, et al. The balance of canopy and soil effects determines intraspecific differences in foundation species' effects on associated plants [J]. *Functional ecology*, 2018, 32(9): 2253-2263.

[10] 施小瑜, 付迪, 胡玉洁, 等. 极小种群植物天目铁木的濒危机制 [J]. *林业科学*, 2020, 56(7): 142-150.

[11] ZHU J J, LU D L, ZHANG W D. Effects of gaps on regeneration of woody plants: A meta-analysis [J]. *Journal of forestry research*, 2014, 25(3): 501-510.

[12] DE LOMBAERDE E, BAETEN L, VERHEYEN K, et al. Understorey removal effects on tree regeneration in temperate forests: A meta-analysis [J]. *Journal of applied ecology*, 2020, 58(1): 9-20.

[13] AHMED R, HOQUE A T M R, HOSSAIN M K. Allelopathic effects of leaf litters of *Eucalyptus camaldulensis* on some forest and agricultural crops [J]. *Journal of forestry research*, 2008, 19(1): 19-24.

[14] DE PAUW K, SANCZUK P, MEEUSSEN C, et al. Forest understorey communities respond strongly to light in interaction with forest structure, but not to microclimate warming [J]. *The new phytologist*, 2022, 233(1): 219-235.

[15] 钟赛香, 曲波, 苏香燕, 等. 从《地理学报》看中国地理学研究的特点与趋势: 基于文献计量方法 [J]. *地理学报*, 2014, 69(8): 1077-1092.

[16] NEDERHOF A J. Bibliometric monitoring of research performance in the social sciences and the humanities: A review [J]. *Scientometrics*, 2006, 66(1): 81-100.

[17] 敖贵艳, 刘强, 吴伟光, 等. 基于 CiteSpace 的全球竹林碳汇研究回顾及展望 [J]. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(4): 861-870.

[18] 侯剑华, 胡志刚. CiteSpace 软件应用研究的回顾与展望 [J]. *现代情报*, 2013, 33(4): 99-103.

[19] CHEN C M. Searching for intellectual turning points: Progressive knowledge domain visualization [J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2004, 101(S1): 5303-5310.

[20] 刘清泉, 江华. 森林应对气候变化研究热点和前沿分析: 基于 Citespace V 的计量研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(1): 70-76.

[21] 赵学海, 张经一, 高仁昌, 等. 红松直播在营造接近自然林中的作用 [J]. *林业科技通讯*, 2000(8): 3-6.

[22] 何维明. 为什么自然条件下沙地柏种群以无性更新为主? [J]. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 235-238.

[23] 武小钢. 采迹地华北落叶松种群自然更新格局研究 [D]. 太谷: 山西农业大学, 2005.

[24] 虞依娜, 徐曼, 叶有华. 近 5 年森林生态系统服务价值评估研究进展: 基于 CiteSpace 文献计量学分析方法 [J]. *生态环境学报*, 2020, 29(2): 421-428.

[25] 姚雪, 徐川平, 李杰, 等. 基于普赖斯定律和二八定律及在线投稿系统构建某科技期刊核心作者用户库 [J]. *编辑学报*, 2017, 29(1): 64-66.

[26] WASSERMAN T N, WALTZ A E M, ROCCAFORTE J P, et al. Natural regeneration responses to thinning and burning treatments in ponderosa pine forests and implications for restoration [J]. *Journal of forestry research*, 2022, 33(3): 741-753.

[27] POULOS H M, FREIBURGER M R, BARTON A M, et al. Mixed-severity wildfire as a driver of vegetation change in an arizona madrean sky island system, USA [J]. *Fire*, 2021, 4(4): 1-23.

[28] CUEVA-ORTIZ J, ESPINOSA C I, AGUIRRE-MENDOZA Z, et al. Natural regeneration in the tumbesian dry forest: Identification of the drivers affecting abundance and diversity [J]. *Scientific reports*, 2020, 10(1): 1-13.

[29] 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 等. 马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33(19): 6154-6162.

- [30] 李荣,张文辉,何景峰,等.不同间伐措施对辽东栎幼苗自然更新及生长状况的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(1):52-60,68.
- [31] 姜仲茂.5种乡土红树植物定居无瓣海桑人工林林下限制因子研究[D].北京:中国林业科学研究院,2019.
- [32] 谭露.唐家河自然保护区岷江冷杉林的天然更新状况及其影响因子[D].绵阳:绵阳师范学院,2017.
- [33] FRANKLIN J F, MITCHELL R J, PALIK B J. Natural disturbance and stand development principles for ecological forestry[R]. 2007.
- [34] SZWAGRZYK J, MACIEJEWSKI Z, MACIEJEWSKA E, et al. Forest recovery in set-aside windthrow is facilitated by fast growth of advance regeneration[J]. Annals of forest science, 2018, 75(3):1-12.
- [35] 邱均平,吕红.近五年国际图书情报学研究热点、前沿及其知识基础:基于17种外文期刊知识图谱的可视化分析[J].图书情报知识,2013(3):4-15,58.
- [36] KLEINBERG J. Bursty and hierarchical structure in streams[C]//Proceedings of the eighth ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining. New York, USA; ACM, 2002:91-101.
- [37] IJIMA H, SHIBUYA M. Evaluation of suitable conditions for natural regeneration of *Picea jezoensis* on fallen logs[J]. Journal of forest research, 2010, 15(1):46-54.
- [38] KUNZ S H, MARTINS S V. Soil seed bank in seasonal semideciduous forest and abandoned pasture[J]. Rev. Árvore, 2016, 40(6):991-1001.
- [39] ROUSI M, POSSEN B J M H, RUOTSALAINEN S, et al. Temperature and soil fertility as regulators of tree line Scots pine growth and survival-implications for the acclimation capacity of northern populations[J]. Global change biology, 2018, 24(2):e545-e559.
- [40] HANSEN W D, FITZSIMMONS R, OLNES J, et al. An alternate vegetation type proves resilient and persists for decades following forest conversion in the North American boreal biome[J]. Journal of ecology, 2021, 109(1):85-98.
- [41] 李荣,何景峰,张文辉,等.近自然经营间伐对辽东栎林植物组成及林木更新的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(7):83-91.
- [42] 李荣.近自然经营强度对辽东栎种群与群落恢复影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [43] 陈晓丽,王根绪,杨燕,等.贡嘎山不同林龄峨眉冷杉种子雨及土壤种子库[J].生态学杂志,2013,32(5):1141-1147.
- [44] 雷静品,李慧卿,江泽平.在我国实施近自然森林经营的分析[J].世界林业研究,2007,20(5):63-67.
- [45] 程中倩,吴水荣,刘世荣.我国森林天然更新及人工促进天然更新的现状与展望[J].山西农业大学学报(自然科学版),2018,38(10):71-76.
- [46] 陈永富.森林天然更新障碍机制研究进展[J].世界林业研究,2012,25(2):41-45.
- [47] 丁惠萍,张社奇,钱克红,等.森林生态系统稳定性研究的现状分析[J].西北林学院学报,2006,21(4):28-30,61.
- [48] 黄润霞,贾小容,刘婷,等.亚热带生态公益林冠层结构与林下辐射动态[J].西北林学院学报,2020,35(1):28-36.
- [49] ZHANG X R, TAN X F, WANG R Q, et al. Effects of soil moisture and light intensity on ecophysiological characteristics of *Amorpha fruticosa* seedlings[J]. Journal of forestry research, 2013, 24(2):293-300.
- [50] 李娜,康永祥,曾商春,等.太白红杉林窗更新与环境因子的关系研究[J].西北林学院学报,2019,34(6):30-36.
- [51] DAVIS K T, DOBROWSKI S Z, HOLDEN Z A, et al. Microclimatic buffering in forests of the future: The role of local water balance[J]. Ecography, 2019, 42(1):1-11.
- [52] 刘济明.茂兰喀斯特森林主要树种的繁殖更新对策[J].林业科学,2000,36(5):114-122.
- [53] 夏虹,夏春燕,宋海燕,等.重庆金佛山3种喀斯特森林群落木本植物种子雨、土壤种子库与幼苗更新[J].林业科学,2022,58(1):1-11.
- [54] SOLOMON S, QIN D W, MANNING M, et al. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (IPCC) [J]. Computational geometry, 2007, 18(2):95-123.
- [55] 岳天祥,范泽孟.典型陆地生态系统对气候变化响应的定量研究[J].科学通报,2014,59(3):217-231.
- [56] 郭朝霞,邓玉林,王玉宽,等.森林生态系统生态服务功能研究进展[J].西北林学院学报,2007,22(1):173-177,182.
- [57] 祁万宜,应中华,王军辉,等.几种针叶树种引种试验研究[J].河南农业大学学报,2006,40(1):38-44.
- [58] 兰士波.高寒地区国外用材树种引种驯化及早期评价[J].湖北农业科学,2011,50(12):2467-2471.
- [59] HILLE M, DEN OUDEN J. Improved recruitment and early growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings after fire and soil scarification[J]. European journal of forest research, 2004, 123(3):213-218.
- [60] KARA F, TOPAÇOĞLU O. Influence of stand density and canopy structure on the germination and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings [J]. Environmental monitoring and assessment, 2018, 190(12):749.
- [61] CZACHAROWSKI M, DROZDOWSKI S. Management of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands under changing environmental and social conditions [J]. Sylwan, 2021, 165(5):355-370.
- [62] SUKHAATAR G, NACHIN B, PUREVRAGCHAA B, et al. Which selective logging intensity is most suitable for the maintenance of soil properties and the promotion of natural regeneration in highly continental scots pine forests? -Results 19 years after harvest operations in Mongolia [J]. Forests, 2019, 10(2):1-21.

(上接第219页)

- [2] 潘春华.基于机器学习的南方蔬菜重大害虫识别预警研究[D].广州:华南农业大学,2019.
- [3] 迟静娣,张丽芳,李荣琼.石林县人参果几种病虫害的发生与防治[J].云南农业科技,2021(2):43-46.
- [4] 张浩.基于 WebGIS 和物联网的水稻病虫害监测与预警系统研究[D].长春:吉林农业大学,2016.
- [5] 吕佩珂,邵玉琴.番茄早疫病发病动态与防治研究[J].中国蔬菜,1987(1):23-27.
- [6] 刘孝峰,邢国文,徐奇功.番茄早疫病菌分生孢子萌发与环境条件的关系的研究[J].河南职业技术学院学报,1999,27(2):15-16.
- [7] 郑寰宇,马力,左豫虎,等.马铃薯早疫病菌分生孢子萌发条件的研究[J].植物保护,2010,36(6):91-95.
- [8] 王连平,王汉荣,茹水江,等.浙江省番茄早疫病病菌生物学特性研究[J].浙江农业学报,2022,14(6):320-325.
- [9] REN S Q, HE K M, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks [J]. IEEE transactions on pattern analysis & machine intelligence, 2017, 39(6):1137-1149.
- [10] AHMADI M, OUARDA W, ALIMI A M. Efficient and fast objects detection technique for intelligent video surveillance using transfer learning and fine-tuning [J]. Arabian journal for science and engineering, 2020, 45(3):1421-1433.
- [11] SALIH T A, ALI A J, AHMED M N. Deep learning convolution neural network to detect and classify tomato plant leaf diseases [J]. Open access library journal, 2020, 7(5):1-12.