

(南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037)

**摘要:** 为了解国内外人工林土壤地力的研究进展和发展趋势, 采用文献计量学方法, 以中国知网(CNKI)和 Web of Science 核心合集数据库相关文献为数据源, 利用 VOSviewer、HistCite 等工具, 从国家、机构、作者、研究热点方面对 2021 年之前的有关文献进行了计量分析。结果表明: 国内外该领域年发文量呈逐渐增长趋势, 国际上发文量前 3 位的国家是中国、美国和巴西; 中国最先在该领域进行研究且与国际的合作交流较多, 文献总被引频次位居前列; 国内该领域发文机构主要为涉林高校及中国科学院下属研究所, 国际上美国俄亥俄州立大学发表的文献质量明显突出, 引用频次较高; 现阶段国内外在该领域的研究主要围绕土壤微生物群落组成、土壤养分含量以及与土壤地力维持的关系, 但多处在定量描述阶段, 很少涉及微生物功能代谢与人工林下有机物质周转以及对土壤地力维持的影响机制, 研究深度亟待提升。总之, 国内外同行合作交流、学科间交叉融合以及新生研究力量的补充是未来有效提升该研究领域的关键所在。

**关键词:** 生产力; 土壤质量; 土壤肥力; 土壤退化; 文献计量分析

中图分类号: S714; G353.1 文献标志码: A

## Study on Soil Fertility of Plantation at Home and Abroad Based on Bibliometrics

CAO Chaoyang, ZI Haiyun, YU Li, LI Xiaogang\*, RUAN Honghua

(College of Biology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** Based on the related literatures of CNKI and Web of Science Core Collection Database, the research status and future development direction of plantation soil fertility at home and abroad were investigated by using bibliometrics method in order to provide reference basis for subsequent scholars to study in this field. VOSviewer visualization software, HistCite citation map analysis software were performed for the quantitative analyses of countries, research institutions, authors, hot spots that involved in this area. All the relevant literatures used were published before 2021. The annual volume of literature published in this field is increasing gradually, and the top three countries are China, the United States and Brazil. China is the first to conduct research in this field, and has more cooperation and exchanges with the international community, and the total citation frequency of literature ranks in the forefront. Domestic research institutions are mainly forest-related universities and institutes affiliated to Chinese Academy of Sciences. Internationally, the literatures issued by Ohio State University were outstanding quality and frequently citation. At present, the research in this field at home and abroad mainly focuses on the compositions of soil microbial community, soil nutrient contents and the relationship between soil fertility maintenance and plantation, but the related research is mostly in the quantitative description stage, and does not involve the functional metabolism of microbial community, the underline mechanism in the turnover of organic materials in soil fertility maintenance. This study clearly shows the current research hotspots and future development trends in this field, and provides reference values for relevant personnel. In brief, the cooperation and exchange between domestic and foreign peers, interdisciplinary integration and the supplement of new research strength may be the key to effectively promote this research field in the future.

**Key words:** Productivity; Soil quality; Soil fertility; Soil degradation; Bibliometric analysis

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42077045)、江苏省农业科技自主创新资金项目(CX21-3045)和江苏省杰出青年基金项目(BK20190040)资助。

\* 通讯作者(xgli@njfu.edu.cn)

作者简介: 曹超阳(1997—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 研究方向为森林土壤微生物生态。E-mail: caochoayang@njfu.edu.cn

森林作为陆地最大的生态系统,是人类及各种生物生存和发展的基础。自1998年以来,我国林业发展战略已由以前的木材生产与生态建设并重阶段转变为以生态建设为主阶段,其中人工林在生态环境的恢复和重建过程中作用突出,是我国增加碳汇、减缓气候变化以及保护生物多样性的重要支撑<sup>[1-6]</sup>。多年来,我国人工林面积稳步增加。据2018年第9次森林资源清查结果显示,我国现有人工林面积为7954万hm<sup>2</sup>,居世界首位<sup>[7]</sup>。然而,由于人工林树种单一、结构简单、森林经营的粗放式管理,导致人工林生产力总体不高、土壤地力衰退等问题突显,其已成为威胁生态环境保护、制约林业可持续发展的重要瓶颈<sup>[8-10]</sup>。

土壤是支撑林木生长和林业发展最重要的基础资源。其中,土壤地力是指土壤满足生产功能和生态系统服务的能力,由土壤物理、化学以及生物学共同作用的结果<sup>[11]</sup>。然而由于土壤质量或土壤肥力等与植物生长、土壤养分循环更为密切,在农业生态系统研究中使用频繁。对于森林或人工林生态系统,外源营养投入较少,物质循环相对封闭,因此我国关于人工林的研究中土壤地力一词常代替为土壤肥力或土壤质量<sup>[7,12]</sup>。文献计量学是科研人员对某研究领域现状进行分析时常使用的一种方法<sup>[13]</sup>,其以科学文献的外部特征为研究对象,利用统计学原理评价某领域当前研究状况,能清晰地了解领域知识结构及热点内容,同时能预测未来研究趋势<sup>[14-15]</sup>。目前文献计量分析方法已在多个领域有所应用,如农业、林业、教育、医学等,具有准确、客观等特点,发展应用已较为成熟<sup>[14,16-18]</sup>。

现阶段国内外关于人工林土壤地力方面的研究较多,但使用文献计量学对人工林土壤地力领域进行的研究尚未有报道。基于文献计量学的可视化软件,通过提取分析引文数据,可形成可视化网络知识图谱,便于解读分析,同时具有一定时效性。由此,本文以Web of Science核心合集数据库1985—2020年以及CNKI数据库2021年之前有关人工林土壤地力研究的论文为对象,利用VOSviewer可视化分析软件、HistCite引文图谱分析软件以及Web of Science自带检索结果分析,在发文量及趋势、主要研究国家、主要研究机构、知名作者、高被引文献、关键词方面进行了计量学分析,对主要研究国家、机构之间的合作关系进行了可视化解读,以探究当前该领域的研究热点及发展趋势,为后续学者在该领域的研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

在CNKI数据库中,以“(人工林 \* 土壤肥力)+(人工林 \* 土壤质量)+(人工林 \* 土壤地力)”为主题进行检索,起始年份不限,截至2020年12月31日,共检索出729条成果。本文主要聚焦与乔木相关的人工林,因此逐一识别删除了茶园、经济林果、灌木林等归类为人工林的研究文献,共得638篇中文学术期刊文献用于后续分析。在Web of Science核心合集数据库中,以“plantation\* AND “soil quality” OR plantation\* AND “soil fertility” OR plantation\* AND “site quality” OR plantation\* AND “site fertility” OR artificial forest\* AND “soil quality” OR artificial forest\* AND “soil fertility” OR artificial forest\* AND “site quality” OR artificial forest\* AND “site fertility” OR man-made forest\* AND “soil quality” OR man-made forest\* AND “soil fertility” OR man-made forest\* AND “site quality” OR man-made forest\* AND “site fertility””为主题进行检索,时间1985—2020年,文献类型为Article,共检索出1376条成果,同样删除了茶园、经济林果、灌木林等归类为人工林的研究文献,获得了1051篇文献用于后续分析。

### 1.2 研究方法

利用VOSviewer可视化软件、HistCite引文分析软件、Origin 2019绘图软件以及Web of Science自带检索结果分析,对国内外有关人工林土壤地力方面的文献在发文量演变、主要研究力量、关键词、高被引文章方面进行了计量分析。运用HistCite、VOSviewer软件时,重要参数有总被引频次、总联系强度,其表示国家或机构与同行之间的合作关系,连线越多表示在该领域的影响力越大。

## 2 结果与分析

### 2.1 发文量

在CNKI数据库中,有关人工林土壤地力的文献于1979年首次发表,而在Web of Science数据库中,美国学者于2001年首次发表相关文献,可见我国学者对该领域研究的关注明显领先国际同行。然而,最初十几年在CNKI数据库中相关文献发文量较低(每年约4篇),直到1995年,年发文量才达到10篇以上,随后整体呈现逐步增加的趋势,2013年发文量达到46篇,之后又呈现下降趋势(图1)。在Web of Science数据库中,自2001年出现相关文献以来,发文量整体呈上升趋势,2017年也出现了下降,之后几年发文量急速增加,2020年发文量高达124篇,

是 2017 年的 2 倍之多(图 1)。中国学者于 2003 年开始在 Web of Science 数据库发表相关文献, 2010 年前呈现稳步增加态势, 之后呈现快速增加趋势, 截至 2021 年我国学者在 Web of Science 数据库发文量约占该领域总发文量的 23.3%。

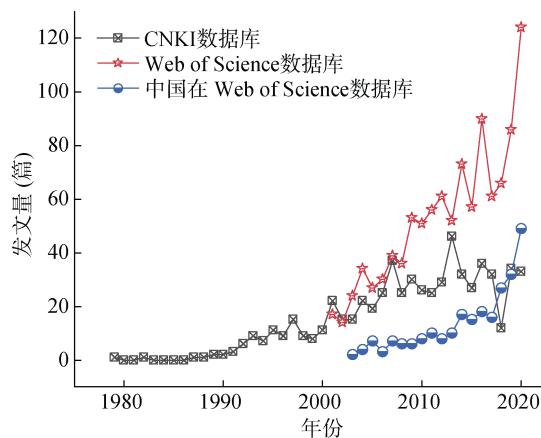


图 1 CNKI 数据库、Web of Science 数据库以及中国在 Web of Science 数据库发文量

Fig. 1 Published literatures in CNKI database, Web of Science database, and Chinese published literature in Web of Science database

## 2.2 主要研究力量

**2.2.1 发文国家与机构** 全球共有 90 多个国家致力于该领域的研究, 在 Web of Science 数据库中发文量前 3 位的国家分别是中国、美国和巴西(表 1)。特

别是, 我国发文量为 245 篇, 分别是巴西和美国的 2 倍和 1.4 倍, 明显领先世界各国。发文量排名前 10 位的国家共发表文献 983 篇, 占总发文量的 93.5%。美国学者所发表文献的总被引频次以 4 200 次位居第一, 中国、澳大利亚分别位列第二和第三(表 1)。对国家合作网络图分析发现, 我国、美国分别与国际上 33、34 个国家有合作交流, 处于领先地位; 其中美国、加拿大和澳大利亚等与我国合作交流最为密切, 是促进我国开展人工林土壤地力研究的主要力量(图 2)。

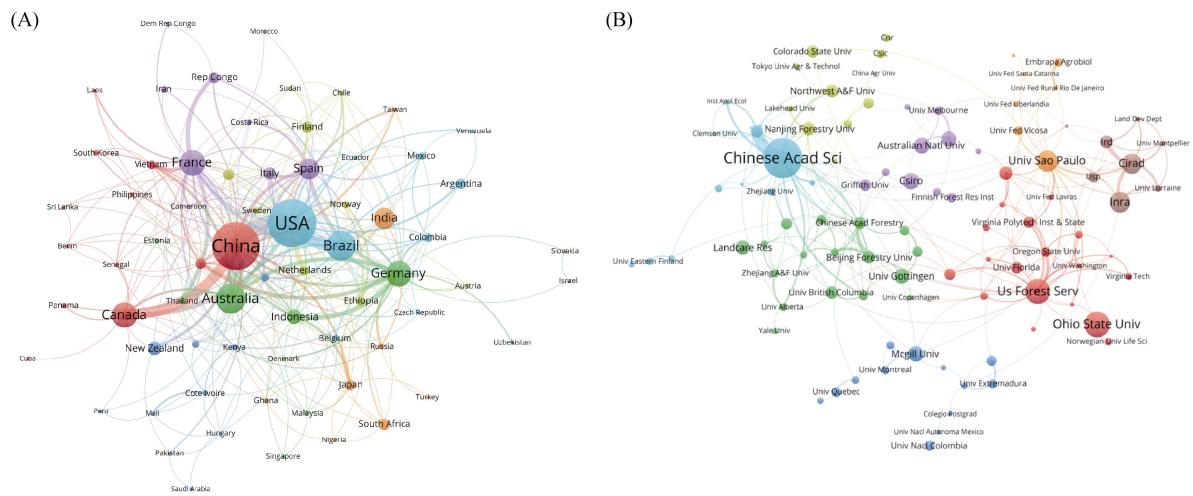
在 CNKI 数据库中, 发文量前 10 位的机构共发表 233 篇文献, 占总发文量的 36.5%, 大多是我国涉林类高校(图 3)。发文量前 3 位的机构分别是: 北京林业大学(34 篇)、西北农林科技大学(31 篇)以及中国林业科学院林业研究所(28 篇)。在 Web of Science 数据库中, 有关该领域的 1 397 所研究机构中, Chinese Academy of Sciences(中国科学院)发表文献的被引频次(1 882 次)位居第一, 比第二 United States Forest Service(美国国家森林局)(877 次)和第三 University of São Paulo(巴西圣保罗大学)(855 次)引用之和还要多(图 2)。总被引频次排名前 30 位的机构中, 有 8 个来自中国, 占比接近 1/3, 领先世界各国(图 2)。从发文量来看, Chinese Academy of Sciences 以 81 篇发文量位居第一, 是第二名 United States Forest Service 的 2.6 倍。发文量前 10 位的机构中, 有 5 个来自中国。

表 1 Web of Science 数据库人工林土壤地力领域发文量前 10 位的国家  
Table 1 Top 10 countries in the field of plantation soil fertility in Web of Science database

国家	发文量(篇)	占比(%)	总被引频次	总联系强度	最初发文年份
China(中国)	245	23.31	4 120	107	2003
USA(美国)	174	16.56	4 200	112	2001
Brazil(巴西)	120	11.42	1 897	56	2002
Spain(西班牙)	76	7.23	1 029	56	2002
India(印度)	75	7.14	1 073	12	2001
Canada(加拿大)	73	6.95	1 378	39	2001
Australia(澳大利亚)	70	6.66	1 924	62	2002
Germany(德国)	61	5.80	1 453	70	2001
France(法国)	60	5.71	1 471	59	2001
Italy(意大利)	29	2.76	418	26	2001

**2.2.2 国内外发文作者** 在 CNKI 数据库中, 该领域涉及 1 763 位作者, 被引频次前 10 位的作者中有 7 位在 20 世纪 90 年代就已发表有关研究论文。其中, 俞新妥以 818 次总被引频次位居第一, 其早在 1992 年就发表了有关杉木人工林地力和养分循环研究的文献, 目前共发表 12 篇有关文献, 针对杉

木人工林土壤地力衰退, 提出了不同树种混交、林地间作等措施来改善土壤地力状况。杨承栋和汪思龙分别以 707、667 次总被引频次排名二、三, 两人到目前都发表了 9 篇有关文献。此外, 马祥庆以及杨玉盛等也在该领域发表了不少文献, 具有一定的影响力(表 2)。



(图中圆圈大小表示文献的总被引次数, 连线表示两者之间的联系强度, 线条越粗表示联系越强。国际上该研究领域共 93 个国家, 图 A 中仅展示 68 个国家合作关系; 全球共 1 397 个相关机构, 图 B 中仅展示 96 个重要机构的合作网络)

图 2 国际上人工林土壤地力领域研究国家合作网络图(A)、国际研究机构合作网络图(B)

Fig. 2 Cooperation network diagram of international research countries in the field of plantation soil fertility(A), network diagram of international research institutions cooperation (B)

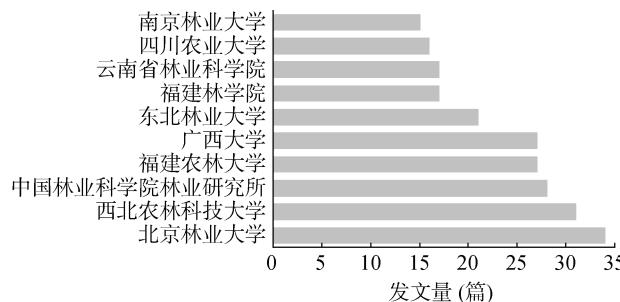


图 3 国内人工林土壤地力领域主要研究机构

Fig. 3 Major domestic research institutions in the field of plantation soil fertility

表 2 CNKI 数据库人工林土壤地力领域被引频次前 10 位作者

Table 2 Top 10 authors cited in the field of plantation soil fertility in CNKI database

作者	发文量(篇)	总被引频次	开始发文年份
俞新妥	12	818	1992
杨承栋	9	707	1994
汪思龙	9	667	2004
马祥庆	9	606	1995
杨玉盛	8	501	1993
何宗明	8	488	1994
林开敏	7	299	1997
刘爱琴	8	295	1993
方晰	6	232	2003
温远光	6	201	2005

在 Web of Science 核心合集数据库中, 该领域共 3 906 位作者, 总被引频次前 10 位的作者中, 7 位属于法国和美国, 这 10 位学者开始发文时间均在 2000

年之后。美国学者 Lal R 以 782 次被引位居第一, 其所发表的文献被多数人认可(表 3)。在发文时间上, 国际上 Ranger J、Laclau J P 分别于 2002 年、2003 年发表相关文献, 中国学者 Zhu J J(朱教君)发文数量较多, 但 2010 年才首次发表该领域文献, 这也导致总被引频次稍低于国际上一些作者(表 3, 图 4)。

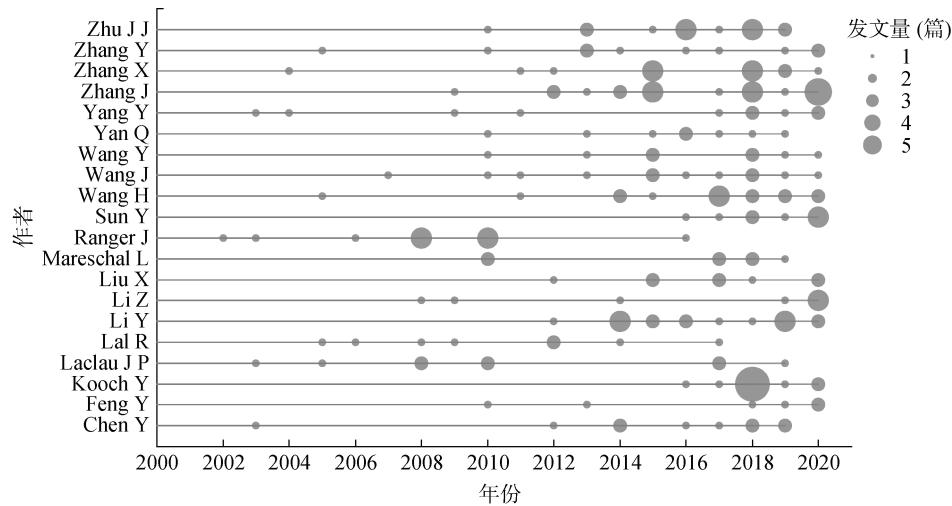
### 2.3 关键词

对文献关键词进行分析, 可以展现该领域的知识图谱, 把握不同知识领域之间的联系, 挖掘新的研究热点<sup>[19-21]</sup>。在 CNKI 数据库中, 该领域文献整体呈现出“土壤肥力”“人工林”“土壤养分”“杉木”“土壤理化性质”“土壤”等 6 个彼此间联系紧密的关键词聚类(图 5)。与“人工林”“土壤肥力”联系紧密的关键词有“杉木”“桉树”“马尾松”等树种, 以及“土壤酶”“微生物”“土壤养分”等因子, 表明相关学者

表 3 Web of Science 数据库人工林土壤地力领域总被引频次前 10 位作者

Table 3 Top 10 authors cited in the field of plantation soil fertility in Web of Science database

作者	发文量(篇)	国家	总被引频次	开始发文年份
Lal R	8	美国	782	2005
Ranger J	10	法国	569	2002
Laclau J P	10	法国	503	2003
Forrester D I	6	瑞士	396	2006
Bouillet J P	5	法国	382	2005
Deleporte P	5	法国	314	2003
Bauhus J	2	德国	314	2006
Powers R F	3	美国	281	2001
Busse M D	4	美国	278	2001
Grove T S	6	澳大利亚	276	2002



(图中圆圈大小表示作者的发文数量,仅展示发文量排名前 20 位的作者)

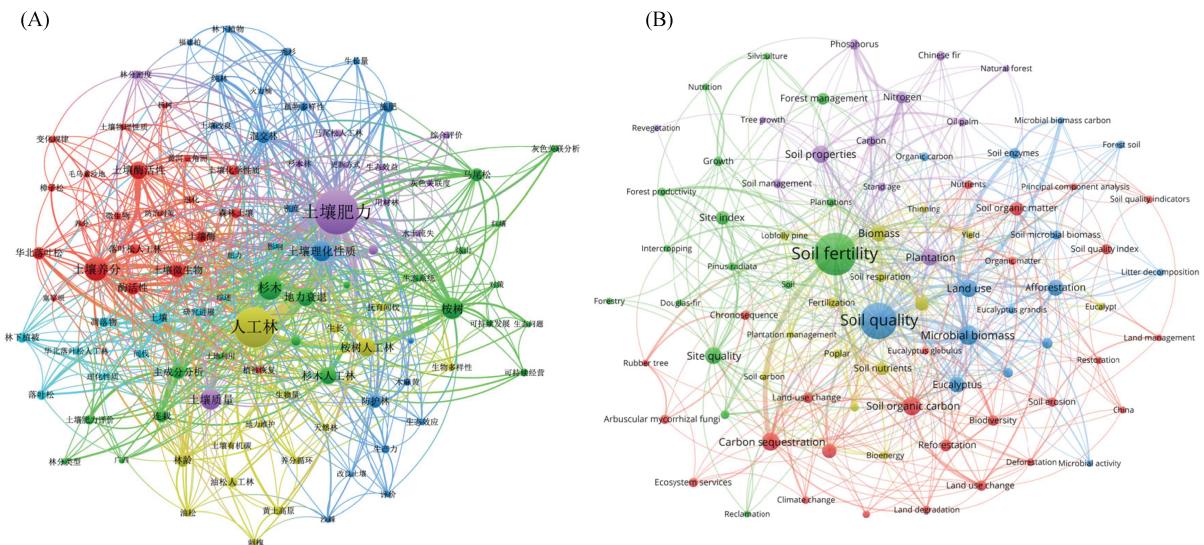
图 4 Web of Science 数据库人工林土壤地力领域知名作者随时间的发文量

Fig. 4 Top-authors production in the field of plantation soil fertility of Web of Science database over the time

主要针对分布较广的人工林类型开展了土壤微生物及养分方面的研究。地力衰退与杉木之间的联系较为紧密,说明我国对杉木人工林地力衰退进行了大量研究。值得注意的是,近年来“林龄”“生物多样性”“可持续发展”等关键词逐渐出现,今后相关研究可能更多关注人工林生态功能与服务价值。

在 Web of Science 数据库中,通过关键词共现网络分析发现,国际上对该领域的研究逐渐形成了以“Soil fertility(土壤肥力)”“Soil quality(土壤质量)”“Soil organic carbon(土壤有机碳)”“Soil properties(土壤性质)”“Biomass(生物量)”为核心的 5

个聚类群(图 5)。与“土壤肥力”“土壤质量”关联紧密的关键词有“微生物生物量(Microbial biomass)”“碳汇(Carbon sequestration)”“土壤有机碳”等。人工林树种关键词中“桉树(Eucalyptus)”出现的频次较高,高于“杉木(Chinese fir)”和“杨树(Poplar)”。此外,近年来高频出现的关键词有“碳氮循环(Carbon-nitrogen cycle)”“土壤质量指标”“土壤性质”“微生物活性(Microbial activity)”“微生物生物量”“酶活性(Enzyme activity)”等,表明国际上同行研究重心逐渐转移到人工林土壤功能和微生物活性方面,研究尺度也愈加微观化。



(图中圆圈大小表示关键词所出现的频次,图 A、图 B 中关键词出现的最小频次分别为 4、7)

图 5 CNKI 数据库(A)和 Web of Science 数据库(B)文献关键词共现网络图

Fig. 5 Co-occurrence network of CNKI database literature keywords (A) and Web of Science database literature keywords (B)

## 2.4 国内外经典文献

在 CNKI 数据库中, 该领域被引频次最高的 10 篇文献多发表在农林、生态领域的知名期刊上, 发表时间在 1997—2004 年(表 4)。杨万勤和王开运<sup>[22]</sup>2004 年发表在《林业科学》的“森林土壤酶的研究进展”一文, 介绍了土壤酶活性可作为人工林土壤肥力状况的指标, 被引频次超过了 600 次, 是该领域被引次数最高的一篇文献。焦如珍等<sup>[23]</sup>1997 年发表的“杉木

人工林不同发育阶段林下植被、土壤微生物、酶活性及养分的变化”一文, 揭示了杉木连载生产力下降的原因: 过氧化氢酶和多酚氧化酶活性降低, 导致土壤中有毒物质积累, 这为防控杉木人工林地力衰退提供了科学依据。这 10 篇文章的研究内容大多是关于人工林土壤肥力、土壤养分、土壤理化性质等方面, 且被引用次数均超过 170 次, 文献质量较高, 对该领域的研究具有重要的参考意义。

表 4 CNKI 数据库中人工林土壤地力领域被引频次前 10 位的文献  
Table 4 Top 10 cited literatures in the field of plantation soil fertility in CNKI database

题名	第一作者	期刊	发表时间	被引频次
森林土壤酶的研究进展	杨万勤	林业科学	2004	609
杉木人工林不同发育阶段林下植被、土壤微生物、酶活性及养分的变化	焦如珍	林业科学研究	1997	320
抚育间伐对人工林土壤肥力的影响	张鼎华	应用生态学报	2001	304
川西亚高山针叶林凋落物对土壤理化性质的影响	林波	应用与环境生物学报	2003	205
坡面土地利用方式与景观位置对土壤质量的影响	刘世梁	生态学报	2003	196
黄土丘陵区刺槐人工林土壤养分特征及演变	许明祥	植物营养与肥料学报	2004	192
岩质海岸防护林土壤微生物数量及其与酶活性和理化性质的关系	胡海波	林业科学研究	2002	179
不同人工林生态系统林地土壤质量评价	黄宇	应用生态学报	2004	175
落叶松人工林凋落物与土壤肥力变化的研究	陈立新	应用生态学报	1998	173
人工林地力衰退研究综述	马祥庆	南京林业大学学报	1997	170

在 Web of Science 数据库中, 该领域被引频次前 10 位的文献发表时间在 2001—2011 年, 被引频次都在 100 次以上(表 5)。这 10 篇文章的第一作者中, 有 4 位美国学者、2 位中国学者。被引频次最高(526 次)的是美国学者 Lal 等<sup>[24]</sup>2005 年发表的“World crop residues production and implications of its use as a biofuel”一文, 该文章提出了人工种植林木作为原料制造生物燃料的可行性, 以减少对化石能源的消耗。瑞典学者 Forrester 等<sup>[25]</sup>在“Mixed-species plantations of Eucalyptus with nitrogen-fixing trees: A review”一文中, 介绍了在桉树纯林中引植固氮树种, 可以提高树木的生产力及氮、磷元素的循环速率。此外, 西北农林科技大学的 Jiao 等<sup>[26]</sup>在“Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China”一文中得出: 通过植树造林可以提升土壤地力、加快退化土壤的恢复和重建, 该文也是我国学者在该领域所发表文献中被引次数最高的一篇(120 次)。

## 3 讨论

### 3.1 国内外研究力量现状

我国早在 1979 年就开始了关于人工林土壤地力方面的研究, 但最初的十几年发文量不高, 与当时的

环境条件、科研能力等现状有关。随着互联网的兴起以及科学技术的发展, 我国的科研水平有了很大提高, 发文量呈快速上升的趋势, 1995 年我国年发文量首次达到两位数。国际上美国、法国、德国等发达国家 21 世纪初才开始该领域的研究, 随着全球多个国家逐渐重视该领域研究, 发文数量呈稳定上升的趋势。目前, 虽然我国发文量领先世界各国, 为美国的 1.4 倍, 但总被引频次却不高, 论文质量有待提升。澳大利亚的发文量明显低于巴西、西班牙、加拿大等, 但文献的总被引频次较高, 说明该国在本领域的研究较为深入, 所发表文献质量较高。总的来说, 中国与美国在发文量、总被引频次以及总联系强度等指标上仍位居前列, 表明两国学者在人工林土壤地力研究方面的影响力较高, 得到国际同行的认可。国际上许多国家彼此间的合作关系不强, 这可能与多年来有关人工林土壤地力方面的国际性研究计划和项目支撑力度不强有关。因此, 国家、科研机构以及学者间的合作交流、科技项目是今后一段时期内有效提升有关人工林土壤地力研究水平的关键要素。

通过分析研究机构得出, 我国相关机构在该领域的研究在国际上处于领先水平。在 Web of Science 数据库中该领域发文数量前 10 位的机构中, 有 5 个来自中国, 领先世界各国。其中, 中国科学院与 25 个

表 5 Web of science 数据库中人工林土壤地力领域被引频次前 10 位的文献  
Table 5 Top 10 cited literatures in the field of plantation soil fertility in Web of Science database

题名	第一作者	期刊	发表时间	被引频次
World crop residues production and implications of its use as a biofuel	Lal R	Environment International	2005	526
Mixed-species plantations of Eucalyptus with nitrogen-fixing trees: A review	Forrester D I	Forest Ecology and Management	2006	303
Glyphosate toxicity and the effects of long-term vegetation control on soil microbial communities	Busse M D	Soil Biology and Biochemistry	2001	200
Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil	Laclau J P	Forest Ecology and Management	2010	158
Carbon sequestration in perennial bioenergy, annual corn and uncultivated systems in southern Quebec	Zan C S	Agriculture Ecosystems & Environment	2001	157
Production dynamics of intensively managed loblolly pine stands in the southern United States: a synthesis of seven long-term experiments	Jokela E J	Forest Ecology and Management	2004	127
Patterns and mechanisms of soil acidification in the conversion of grasslands to forests	Esteban G J	Biogeochemistry	2003	122
Twenty years of stand development in pure and mixed stands of <i>Eucalyptus saligna</i> and nitrogen-fixing <i>Facaltaria moluccana</i>	Binkley D	Forest Ecology and Management	2003	121
Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China	Jiao F	Catena	2011	120
Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China	Yang Y S	Plant and Soil	2009	113

研究机构间有合作关系,包含我国一些农林类高校和国外知名高校。此外,我国农林类高校(如北京林业大学、南京林业大学及福建农林大学)与来自美国、澳大利亚、英国的相关机构有一定合作关系,但强度稍弱于与国内机构之间。同时,国际上许多研究机构也存在相同的情况,即合作交流很大程度上局限在与本国的一些机构之间。值得提及的是,美国俄亥俄州立大学发文量虽不多,但文献的总被引频次位居第二,且其与国际上众多研究机构之间的联系性不强,表明其在此领域的研究深度明显高于其他机构。总体上,研究成果较为突出的机构多数来自于中国、美国、法国和加拿大等国家,但不同国家研究机构间合作强度不高,限制了该领域研究的深入和影响。

### 3.2 国内外相关研究进展

现阶段国内该领域研究主要围绕不同条件下人工林土壤地力的变化动态及其影响因素开展。研究发现,适当降低林分密度以及混交造林能够提高土壤孔隙度、持水量和团聚体含量,提升土壤有机质以及养分(全氮、全磷、全钾、速效养分等)含量,其中土壤有机碳及养分含量与水稳定性团聚体含量显著相关,因此,未来应着重考虑土壤团聚体的变化特征<sup>[27-29]</sup>。此外,林龄和造林树种也是影响土壤地力变化的重要因素。近熟龄期人工林土壤有机质、速效养分、酶活

性等指标优于中幼龄期,但拐点的出现表明长期人工林经营会恶化土壤地力。落叶阔叶乔木对土壤地力的维持效果要好于针叶树种,一定程度上能够提高土壤有机质以及氮磷等养分含量,后者由于凋落物富含丹宁、木质素等难分解物质,对土壤地力的维持效果较差,连续栽植还会导致土壤酸化<sup>[30-31]</sup>。总之,通过对土壤理化及相关生物学指标进行分析,能够基本了解土壤肥力状况及其影响因素。但该领域涉及土壤微生物的研究不多,特别是关于不同微生物功能类群对人工林的响应以及菌群间相互作用机制等研究较少,因此人工林土壤养分转化的微生物驱动机制方面的研究亟待加强。

国际上关于人工林土壤碳氮循环研究偏多,发现不同树种混交能够提高土壤氮矿化及循环速率,加速土壤有机碳积累<sup>[32-33]</sup>。同时,针对人工林土壤微生物群落结构动态及功能多样性的研究更为集中。例如,人工林增施有机肥可提升土壤细菌多样性和丰富度以及相关酶活性,说明微生物对环境的响应可以作为评价人工林土壤地力的重要参考指标。虽然学者们愈加意识到微生物资源的重要性,特别是高通量测序技术的发展为人工林土壤地力演变下微生物群落研究提供了机遇,然而相关研究多处在土壤微生物群落丰度变化的描述阶段,很少涉及微生物功能代谢与人工

林下有机物料周转以及对土壤地力维持的影响机制方面。因此,国际同行合作交流、学科间交叉研究以及研究新生力量的补充是未来一段时期有效提升该研究领域的重要途径。

目前,国内外关于森林凋落物对人工林土壤碳、氮等养分循环的影响研究也较多,主要探究了凋落物多样性与土壤碳氮磷化学计量比之间的联系、土壤微生物群落对凋落物类型的响应,以及土壤酶活性、土壤有机碳等指标的动态变化。有学者认为土壤微生物群落结构多样性随凋落物多样性的增加而提高,从而提高了功能多样性,进而促进土壤养分的周转,但也有学者持相反观点,认为土壤养分循环、微生物群落多样性等与凋落物之间相关性不强<sup>[34]</sup>。

总的来说,现阶段国内外学者多围绕不同条件下人工林土壤地力的变化规律及其影响因素展开研究,主要可概括为:①不同林龄下人工林土壤地力变化规律,为森林制定合适的轮伐周期提供科学指导;②不同类型树种(如针叶、阔叶、落叶、常绿树等)对人工林土壤地力的影响,为不同地域造林树种的选择以及栽培养护提供理论支撑;③针对人工纯林引起的一系列问题,从混交、间作、间伐和施肥等营林措施上探讨缓解纯林土壤地力衰退可能性,保持森林生产力实现。未来一段时间仍可在以上几方面进行研究,同时,涉及土壤微生物的研究是本领域的热点趋势,在微观尺度上(如微生物群落功能多样性、关键菌群的作用及调控机制等)对人工林土壤地力领域进行研究,可实现生态可持续发展。

## 4 结论

目前国内外对人工林土壤地力方面的研究仍处于发展阶段,发文量呈现稳步上升的趋势,其中中国、美国和巴西为Web of Science数据库中该领域发文量排名前3位的国家。中美两国发文量以及文献的被引频次均居前列,在国际上占有重要地位。国内该领域重要的研究机构主要为涉林高校以及中国科学院下属研究所,国际上美国俄亥俄州立大学所发表的文献引用频次较高,质量明显突出。国内外该领域研究机构以及学者之间合作强度不高,今后有关人工林土壤地力研究的国际交流和合作度亟待提升。近年来,CNKI数据库中有关林龄、生物多样性、可持续发展等关键词频次高,而Web of Science数据库中则以有关土壤化学元素循环(如碳、氮等)、微生物群落结构及时空变化等关键词的研究偏多,是未来如何提高人工林生产力、土壤养分供给等重点关注的内容。

## 参考文献:

- [1] 赵同谦,欧阳志云,郑华,等.中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J].自然资源学报,2004,19(4):480-491.
- [2] 彭舜磊,王得祥,赵辉,等.我国人工林现状与近自然经营途径探讨[J].西北林学院学报,2008,23(2):184-188.
- [3] 王本洋,罗富和,陈世清,等.1978年以来我国林业发展战略研究综述[J].北京林业大学学报(社会科学版),2014,13(1):1-8.
- [4] 孟庆繁.人工林在生物多样性保护中的作用[J].世界林业研究,2006,19(5):1-6.
- [5] 陈幸良,巨茜,林昆仑.中国人工林发展现状、问题与对策[J].世界林业研究,2014,27(6):54-59.
- [6] 白小芳,徐福利,王渭玲.我国落叶松人工林地力衰退与施肥研究综述[J].世界林业研究,2016,29(1):75-79.
- [7] 崔海鸥,刘珉.我国第九次森林资源清查中的资源动态研究[J].西部林业科学,2020,49(5):90-95.
- [8] 吴振廷,黄卫丽,莎仁图雅,等.我国落叶松人工林土壤肥力研究现状及改善措施的研究[J].内蒙古林业科技,2021,47(1):57-60.
- [9] Zhou L, Sun Y J, Saeed S, et al. The difference of soil properties between pure and mixed Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations depends on tree species[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 22: e01009.
- [10] Ghorbani M, Sohrabi H, Sadati S E, et al. Productivity and dynamics of pure and mixed-species plantations of *Populus deltoides* Bartr. ex Marsh and *Alnus subcordata* C. A. Mey[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 409: 890-898.
- [11] 史佳伟.太岳山人工林地力影响因子的研究[D].北京:北京林业大学,2019.
- [12] 杨云博.我国人工林的地位、作用及主要造林技术[J].江西农业,2019(4):100-101.
- [13] Jones R T, Robeson M S, Lauber C L, et al. A comprehensive survey of soil acidobacterial diversity using pyrosequencing and clone library analyses[J]. The ISME Journal, 2009, 3(4): 442-453.
- [14] 张俊,张华,常畅,等.基于文献计量的凋落物研究现状及热点分析[J].生态学报,2020,40(6):2166-2173.
- [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] 马斌,柴智,王金虹.基于VOSviewer软件的黄芪治疗糖尿病研究文献计量分析[J].中国药房,2020,31(21):2634-2639.
- [17] 刘杏梅,赵健,徐建明.污染农田土壤的重金属钝化技术研究——基于Web of Science数据库的计量分析[J].土壤学报,2021,58(2):445-455.
- [18] 孙丹,李艳,陈娟娟.国际教育技术研究的热点与前沿——基于五本SSCI期刊(2000—2019年)的文献计量分析[J].现代远程教育研究,2020,32(4):74-85.

- [19] 李秋云, 韩国圣, 张爱平, 等. 1979—2012 年中国旅游地理学文献计量与内容分析[J]. 旅游学刊, 2014, 29(9): 110—119.
- [20] Tancoigne E, Barbier M, Cointet J P, et al. The place of agricultural sciences in the literature on ecosystem services[J]. *Ecosystem Services*, 2014, 10: 35—48.
- [21] Cambrosio A, Limoges C, Courtial J P, et al. Historical scientometrics? Mapping over 70 years of biological safety research with co-word analysis[J]. *Scientometrics*, 1993, 27(2): 119—143.
- [22] 杨万勤, 王开运. 森林土壤酶的研究进展[J]. 林业科学, 2004, 40(2): 152—159.
- [23] 焦如珍, 杨承栋, 屠星南, 等. 杉木人工林不同发育阶段林下植被、土壤微生物、酶活性及养分的变化[J]. 林业科学, 1997, 10(4): 34—40.
- [24] Lal R. World crop residues production and implications of its use as a biofuel[J]. *Environment International*, 2005, 31(4): 575—584.
- [25] Forrester D I, Bauhus J, Cowie A L, et al. Mixed-species plantations of *Eucalyptus* with nitrogen-fixing trees: A review[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 233(2/3): 211—230.
- [26] Jiao F, Wen Z M, An S S. Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China[J]. *CATENA*, 2011, 86(2): 110—116.
- [27] 王英生, 邓毅. 杉木红锥混交与杉木楠木混交对比分析[J]. 林业和草原机械, 2020, 1(3): 44—47, 19.
- [28] 林起财. 杉木成熟林不同密度条件下土壤肥力比较研究[J]. 农村经济与科技, 2020, 31(23): 100—102.
- [29] 胡琛, 贺云龙, 崔鸿侠, 等. 神农架 4 种典型人工林对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(12): 125—133.
- [30] 刘飞鹏. 广东省森林土壤酸化现状及调控措施[J]. 林业调查规划, 2007, 32(4): 69—72.
- [31] 闫婷, 曲娜, 闫德仁. 树木园不同树种人工林土壤养分变化特征[J]. 内蒙古林业科技, 2020, 46(2): 45—48.
- [32] Voigtlaender M, Brandani C B, Caldeira D R M, et al. Nitrogen cycling in monospecific and mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus* at 4 sites in Brazil[J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 436: 56—67.
- [33] Vidal D F, Trichet P, Puzos L, et al. Intercropping N-fixing shrubs in pine plantation forestry as an ecologically sustainable management option[J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 437: 175—187.
- [34] 余婷, 田野. 森林生态系统凋落物多样性对分解过程和土壤微生物特性影响研究进展[J]. 生态科学, 2020, 39(1): 213—223.