



鱼洋, 郜敏, 刘喜东, 乔江波, 贾小旭, 朱元骏, 邵明安. 基于文献计量学的绿肥研究进展与展望[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(09): 94-109.
YU Yang, GAO Min, LIU Xidong, QIAO Jiangbo, JIA Xiaoxu, ZHU Yuanjun, SHAO Mingan. Research progress and prospect of green manure based on bibliometrics[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(09): 94-109.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.09.09

基于文献计量学的绿肥研究进展与展望

鱼洋¹ 郜敏² 刘喜东³ 乔江波^{1,4*} 贾小旭⁴ 朱元骏⁴ 邵明安⁴

(1. 西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 山西能源学院 机电工程系, 山西 晋中 265713;

3. 陕西省林业科学院, 西安 710082;

4. 自然资源部自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100055)

摘要 为了解当前国内外绿肥研究现状、热点及未来发展趋势,以“绿肥”为关键词,分别检索CNKI和Web of Science数据库1994—2024年相关文献,基于文献计量学可视化工具CiteSpace与VOSviewer对文献年发文量、作者和机构、关键词以及新兴词进行了定量和可视化分析。结果表明:1)以绿肥为主题的中英文文献发文量整体呈上升趋势;从英文发文机构来看,美国农业部农业研究所国际影响力最强。2)美国是该研究领域的核心国家,影响力较大;尽管中国论文数量较多,但影响力较小,科研水平有待提高。3)中国农业科学院曹卫东研究员是绿肥研究领域发表论文最多的学者,形成了以其为核心成员的绿肥研究团队,然而缺乏与国际其他核心团队合作。4)绿肥研究主要集中在开发绿肥种质资源、优化绿肥种植技术、探究对土壤和作物的影响等方面。5)绿肥研究热点不断演变和创新,前期主要围绕绿肥管理模式、作物产量提升、绿肥腐解机制开展基础研究,未来绿肥研究将转向更深层次的绿肥种质资源选育及创新、土壤质量综合提升等方面。本研究为相关科研人员了解绿肥相关领域的研究现状及未来方向提供了重要参考,且对我国绿肥发展具有重要指导意义。

关键词 绿肥; 文献计量学; CiteSpace; VOSviewer; 知识图谱

中图分类号 S333.5 文章编号 1007-4333(2025)09-0094-16

文献标志码 A

Research progress and prospect of green manure based on bibliometrics

YU Yang¹, GAO Min², LIU Xidong³, QIAO Jiangbo^{1,4*}, JIA Xiaoxu⁴,
ZHU Yuanjun⁴, SHAO Mingan⁴

(1. Institute of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Shanxi Institute of Energy, Jinzhong 265713, China;

3. Shaanxi Academy of Forestry, Xi'an 710082, China;

4. Key laboratory of Coupling Process and Effect of Natural Resources Elements, Ministry of Natural Resources, Beijing 100055, China)

Abstract To understand the current research status, hotspots and future development trends of green manure both domestically and internationally, the relevant literatures published from 1994 to 2024 in CNKI and Web of Science databases were retrieved by taking green manure as the keyword. Based on the bibliometric visualization

收稿日期: 2025-02-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1900300);“三北”地区林草部门联合公关科研项目

第一作者: 鱼洋(ORCID:0009-0007-4742-3886), 硕士研究生, E-mail: yuyang19784@163.com。

通讯作者: 乔江波(ORCID:0000-0002-9448-6157), 副研究员, 主要从事生态水文过程、土壤结构与植被关系研究, E-mail: jiangboqiao815@163.com

tools, CiteSpace and VOSviewer, the annual number of papers, authors and institutions, keywords and emerging words were quantitatively and visually analyzed. The results showed that: 1) The number of Chinese and English literatures with the subject of green manure was on the rise as a whole. From the perspective of English-language publication institutions, the Agricultural Research Institute of the United States Department of Agriculture has the strongest international influence. 2) The United States is the core country in this research field with considerable influence. Although China has a large number of papers, the influence is relatively small, and the level of scientific research needs to be improved. 3) Researcher Cao Weidong of Chinese Academy of Agricultural Sciences is the most published scholar in the field of green manure research, and has formed a green manure research team with him as the core member. However, his collaboration with other core international teams is lacking. 4) Green manure research mainly focuses on the development of green manure germplasm resources, optimization of green manure planting technology, and exploration of the impact on soil and crops. 5) The research hotspots of green manure are constantly evolving and innovating. In the early stage, it mainly focused on the basic research of green manure management mode, crop yield improvement and green manure decomposition mechanism. In the future, the research of green manure will turn to more in-depth areas such as the breeding and innovation of green manure germplasm resources and the comprehensive improvement of soil quality. This study provides an important reference for relevant researchers to understand the current status and future direction in this field, and has important guiding significance for the development of green manure in China.

Keywords green manure; bibliometrics; CiteSpace; VOSviewer; knowledge graph

绿肥是以鲜绿植物体为原料的清洁有机肥源,根据固氮特性可分为豆科(紫云英、苜蓿、苕子等)与非豆科(油菜、黑麦草等)2类,其通过翻压还田实现养分缓释,兼具土壤结构改良与作物提质增效双重功能^[1-3]。在农业生态系统中,绿肥作物通过多种栽培模式在时序层面对经济作物产生影响,既可为生物体耕载体维持地力^[4],又可作为基肥为土壤提供氮磷钾及微量元素^[5-6]。在国家“质量兴农、绿色兴农”战略导向下^[7],绿肥间套轮作模式通过提升耕地可持续生产能力,已成为保障粮食安全与推动农业绿色转型的核心技术体系^[8]。可见,绿肥被广泛运用在农业领域多个方面。然而,尽管目前已有相关综述对绿肥的研究进行描述,但关于绿肥研究领域的整体发展趋势仍缺乏有效的阐述,其研究热点也鲜有系统报道,难以从宏观上把握绿肥研究的前沿方向,进而严重制约了对该领域研究全貌的系统认知。如Ma等^[9]对1992—2021年关于绿肥研究的相关中英文文献进行了可视化分析,揭示了绿肥研究的热点、发展趋势及合作网络,然而该综述并未对研究热点词汇进行聚类分析,缺乏对各热点之间潜在关系的挖掘,无法有效比较研究热点之间的类似性与差异性;李宇翔等^[10]基于Web of Science(WOS)数据库,运用文献计量学和CiteSpace、

VOSviewer等可视化分析工具,对1985—2020年绿肥研究相关文献进行了分析,但此研究一方面在空间维度缺乏国内外文献的系统对比分析,未能解析绿肥技术的演进规律与区域适应性,另一方面存在时间维度局限性,未能及时追踪及反馈近年来国际前沿进展。

文献计量学作为情报学的一个分支,其核心在于运用文献的数量特征,结合数学与统计学方法,对科学技术的现状与发展趋势进行描述、评价和预测^[11]。科学知识图谱则通过图形化手段揭示知识结构及演变,可作为文献计量学的可视化工具^[12]。CiteSpace软件专注于科学文献数据的计量、分析与关键信息识别,并利用可视化技术探测学科研究特征及其发展趋势^[13-14];VOSviewer软件则擅长科研网络分析,并提供卓越的可视化效果^[15-16]。本研究拟基于中国知网(CNKI)和WOS两大数据库,分别采用“绿肥”和“Green manure”作为关键词对1994—2024年发表的绿肥研究相关文献进行系统检索,并借助CiteSpace与VOSviewer软件进行文献计量分析,旨在揭示该领域的年度发文量变化趋势、核心作者群体及研究机构的空间分布特征,探究当前研究现状、热点与未来发展趋势,为绿肥领域的后续研究提供新的思路与参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

所用数据来源于CNKI和WOS数据库,检索时段均设定为1994-01-01—2024-07-01。中文文献采用高级检索功能,将“绿肥”作为主题词,文献来源限定为学术期刊中的“EI、北大核心、CSSCI和CSCD”。经人工剔除年份、作者和研究机构等信息缺失及与研究主题无关的文献后,最终得到1 437篇有效文献,并以“Refworks”和“Excel”格式导出。英文文献检索采用高级策略,选取SCI-EXPANDED索引库,以“green manure”为主题词,文献类型限定为Articles,语言筛选为English,同样去除与研究主题不相关的文献后,共获得1 215篇有效文献,以“Plain text file”格式导出。

1.2 研究方法

以CNKI和WOS数据库获取的有效文献为源数据,使用CiteSpace(6.3.1, Basic)和VOSviewer(1.6.20)软件进行知识图谱绘制,通过关键词共现分析法解析该领域的研究热点与发展动向,运用对数似然比(Log-likelihood rate, LLR)检验算法对关键词实施聚类分析,以此总结绿肥领域的相关研究分布状况;采用关键词突现分析法明确不同时间段的前沿研究领域,并通过时间线图对绿肥研究前沿的年份演化过程进行可视化呈现。不同年份、期刊和国家的发文量数据在Microsoft Excel中进行统计。

2 结果与分析

2.1 年发文量

年发文量趋势能够客观反映绿肥研究文献在不同时期的现状、水平及发展动态,这对于把握该领域的整体研究态势具有重要意义^[17]。图1为1994—2024年绿肥研究中、英文文献数量的年度分布。可知:1994—2000年绿肥研究中文文献年发文量呈现减少态势,这是由于该时期绿肥不具备直接经济效益,且化肥成为供应农作物养分的主导肥源,导致绿肥的生产与应用几乎被完全忽视^[18];2001—2006年,中文文献年发文量呈现恢复性增长趋势,这一转变源于国家高度重视经济发展与环境保护效益不协调的问题,并在财政状况得到改善的条件下加大对绿肥发展的支持力度,该阶段的研究工作主要聚焦于绿肥栽培技术开发和最佳利用模式等方面^[19];2006—2010年,中文文献年发文量呈现逐渐上升趋势,这归因于国家在此期间持续加大在资源整合、技术进步、机制解析、试验示范和人才培养等方面的投入,并取得明显成效^[4, 19];2011—2021年,中文文献发文量迈入平稳上升阶段,并于2021年发文量达到最高峰,这得益于前期积累的科研基础条件提供的有力支撑;2021年后,绿肥研究文献年发文量呈现回落态势,2024年的发文量因统计周期仅为7个月,与2023年数据相比有所减少。

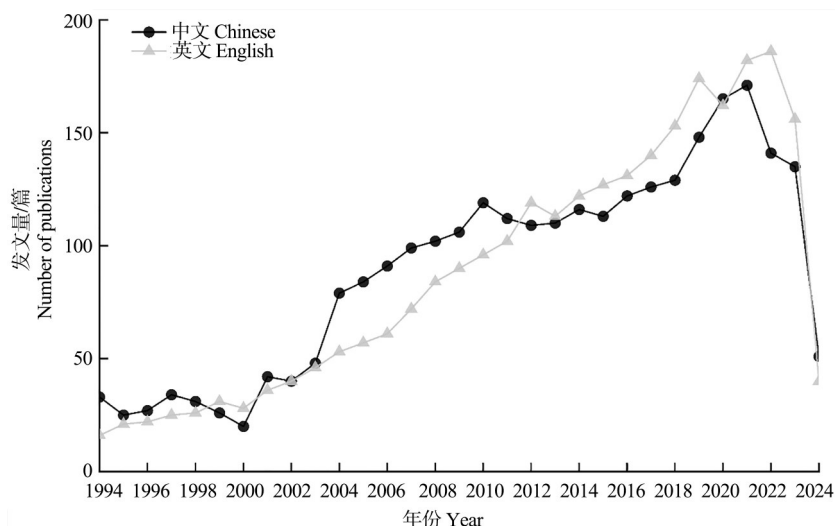


图1 绿肥研究领域中英文文献年发文量

Fig. 1 Annual number of publications in the field of green manure research in Chinese and English

绿肥研究英文文献年发文量与中文文献年发文量存在一定的相似性,2000—2012 年及 2013—2022 年英文文献年发文量经历了 2 轮显著增长阶段,前一阶段发展特征与 2001—2010 年中文文献的恢复性增长及稳步上升阶段在时间上重叠,后一阶段年发文量反超了中文文献且与该阶段中文发文态势相似。这 2 个阶段内英文文献年发文量的增幅均表现突出,其中 2022 年发文量达到最高峰。

2.2 期刊发文量

表 1 为绿肥相关研究中文发文量排名前 10 的期刊。由表 1 可知,绿肥研究中文发文量前 10 期刊共计发表 485 篇文献,占中文文献总量的 33%。发文量前 3 的期刊依次为《中国土壤与肥料》《植物营养与肥料学报》和《中国农业科学》。从期刊影响因子来看,最具影响力的为《土壤学报》,其 2024 年复合影响因子为 5.7。

表 1 绿肥研究领域中文发文量排名前 10 的期刊

Table. 1 Top 10 journals in terms of the number of Chinese publications in the field of green manure research

排名 Ranking	期刊 Journal	发文量/篇 Number of articles	2024 年复合影响因子 Composite impact factor in 2024
1	《中国土壤与肥料》	105	3.1
2	《植物营养与肥料学报》	86	4.5
3	《中国农业科学》	50	3.8
4	《应用生态学报》	41	4.9
5	《土壤通报》	38	3.8
6	《中国生态农业学报》	35	5.0
7	《土壤学报》	35	5.7
8	《草业科学》	33	3.1
9	《农业环境科学学报》	32	3.5
10	《生态环境学报》	30	3.4

表 2 为绿肥相关研究英文发文量排名前 10 的期刊。由表 2 可知,绿肥研究英文发文量前 10 期刊共计发表 640 篇文献,占英文文献总量的 52%。发

文量位居前 3 的期刊分别是 *Agronomy Basel*、*Agriculture Ecosystems Environment* 和 *Agronomy Journal*。从 2024 年中国科学院文献情报中心期刊

表 2 绿肥研究领域英文发文量排名前 10 的期刊

Table. 2 Top 10 journals in terms of the number of English publications in the field of green manure research

排名 Ranking	期刊 Journal	发文量/篇 Number of articles	2024 年复合影响因子 Composite impact factor in 2024
1	<i>Agronomy Basel</i>	106	4.6
2	<i>Agriculture Ecosystems Environment</i>	95	6.0
3	<i>Agronomy Journal</i>	87	4.0
4	<i>Communications in Soil Science and Plant Analysis</i>	74	4.3
5	<i>Indian Journal of Agricultural Sciences</i>	62	4.1
6	<i>Soil Tillage Research</i>	58	6.8
7	<i>Science of The Total Environment</i>	47	8.2
8	<i>Plant and Soil</i>	41	4.9
9	<i>Nutrient Cycling in Agroecosystems</i>	38	4.4
10	<i>Sustainability</i>	32	4.3

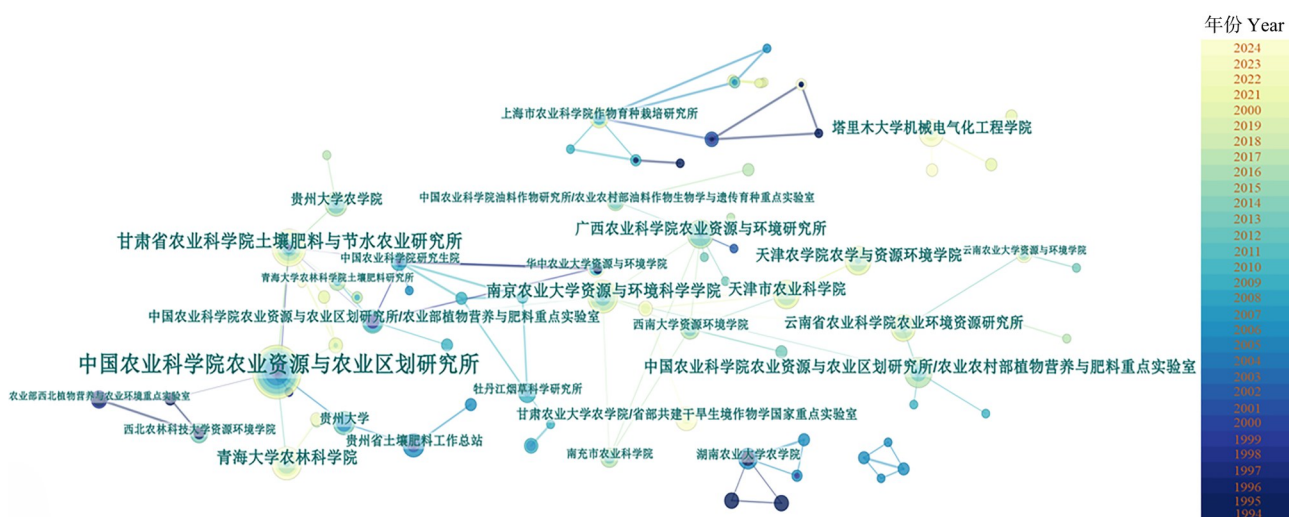
分区情况来看,发文量前10的英文期刊中,包含3个1区期刊和3个2区期刊。就期刊影响因子而言,*Science of The Total Environment*是最具影响力的英文期刊,其2024年复合影响因子为8.2。

2.3 绿肥研究主要力量

2.3.1 主要研究机构

机构共现分析能有效识别领域内核心研究机构及其合作强度^[20]。图2为绿肥研究中文文献机构合作网络图谱。由图2可知,绿肥研究中文文献的发文机构以农业科研院所和高校为主,这些机构拥有专业的科研团队和较强的综合科研实力。发文量排名前4的机构均聚焦于土壤肥料与农业资源领

域,分别是中国农业科学院农业资源与农业区划研究所、西北农林科技大学资源环境学院、甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所和南京农业大学资源与环境科学学院。研究机构所在的甘肃、江苏、青海、广西、云南等省份是我国农业生产的重要区域,这些地区的科研机构更易获得绿肥研究样本和资源,从而形成研究优势^[8]。此外,地方农业科研单位和相关农业部门同样积极推动绿肥研究,如贵州省土壤肥料工作总站、南充市农业科学院等地方科研机构也参与了绿肥研究。今后还应不断加强科研院所和高校之间的合作,共同推进绿肥科研成果的实际应用。



节点与字体的大小代表发文量多少;节点之间的连线代表二者之间存在合作关系,连线越粗则表示二者之间联系越密切。下同。

The size of the node and the font represents the amount of documents issued. The connection between the nodes represents a cooperative relationship between the two, the thicker the connection is, the closer the relationship between the two is. The same below.

图2 绿肥研究领域中文研究机构合作网络图谱

Fig. 2 Collaboration network map of Chinese research institutions in the field of green manure research

图3为绿肥研究英文机构合作网络图谱。由图3可知,绿肥研究英文发文核心研究机构间的合作网络密度显著高于中文发文机构,但因研究方向的分化导致研究力量呈现分散态势。绿肥研究英文文献的发文机构中,发文量排名前20的机构包含多家中国科研机构,体现了我国在该领域的国际学术研究具有一定参与度。其中发文量排名前4的机构依次为 Chinese Academy of Agricultural Sciences (中国农业科学院)、Agriculture and Agri-Food Canada(加拿大农业及农业食品部)、United States Department of Agriculture Research Service(美国农业部农业科学研究院)、Ministry of Agriculture of

The People's Republic of China(中国农业部)。值得注意的是,中国农业科学院作为绿肥研究英文发文量最高的机构,其发文总量达279篇,显著高于其他机构的发文规模,显示我国在该领域国际研究格局中处于重要地位;而美国农业部农业科学研究院作为国际上具备较高科研水平的科研机构,在绿肥研究领域与其他发达国家合作紧密,其研究成果在世界范围内有着重要影响。

2.3.2 主要研究国家

表3为绿肥研究领域英文发文量排名前10的国家。由表3可知,中国、美国、印度和巴西是绿肥研究领域的主要论文产出国,分别发表了224、190、

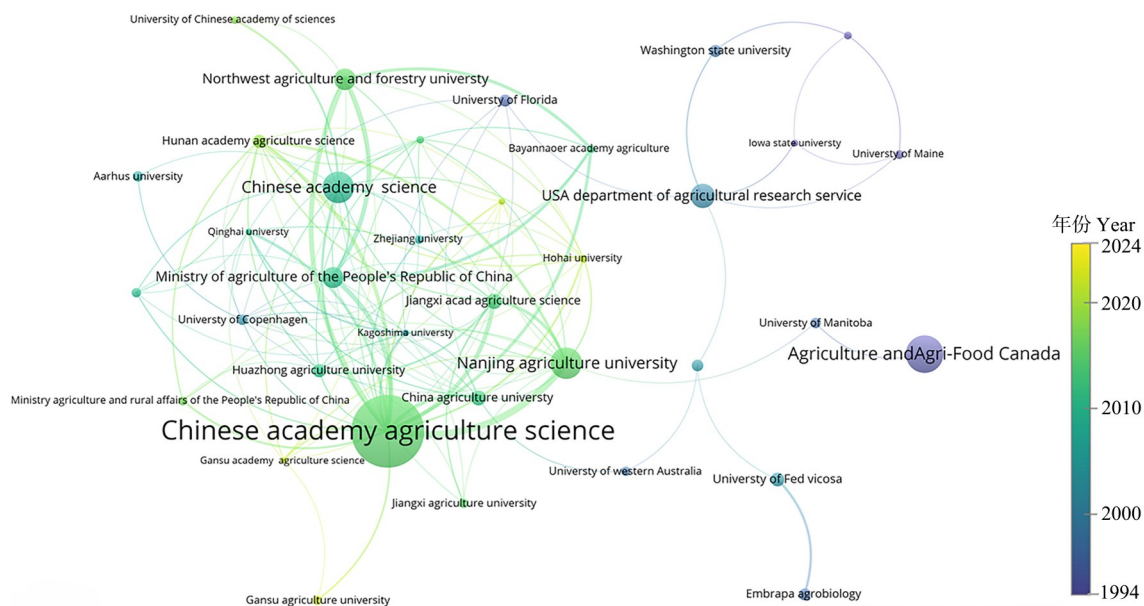


图 3 绿肥研究领域英文研究机构合作网络图谱

Fig. 3 Cooperative network map of English research institutions in the field of green manure research

表 3 绿肥研究领域英文发文量排名前 10 的国家

Table. 3 Top 10 countries in the field of green manure research published in English

排名 Ranking	国家 Country	发文量/篇 Number of articles	中心性 Centricity	占比/% Proportion
1	中国	224	0.08	17.92
2	美国	190	0.37	15.71
3	印度	145	0.09	11.93
4	巴西	84	0.06	6.90
5	加拿大	53	0.11	4.43
6	意大利	46	0.12	3.78
7	澳大利亚	39	0.10	3.20
8	德国	32	0.17	2.63
9	日本	24	0.09	1.97
10	英国	22	0.21	1.81

145 和 84 篇文献,在英文文献总发文量中的占比依次为 17.92%、15.71%、11.93% 和 6.90%;美国以中心性值 0.37 居于首位,表明美国在国际绿肥研究合作网络中处于核心枢纽地位,对绿肥研究领域有着显著影响。

图 4 为绿肥研究领域国家合作关系网络图谱。由图 4 可知,虽然中国在绿肥研究领域发文量最多,但与其他发达国家合作较少,因此需进一步提升研究成果质量及加深国际合作,以增强我国在绿肥研究领域的影响力。

2.3.3 核心作者分析

作者共现分析揭示了领域内核心学者的合作与互引关系^[21]。图 5 为绿肥研究领域中文文献研究学者共现知识图谱。由图 5 可知,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所曹卫东研究员以 110 篇发文量成为绿肥研究领域发文量最高的作者;甘肃省农科院土壤肥料与节水农业研究所包兴国团队、西北农林科技大学资源与环境学院高亚军团队均与其建立紧密合作关系;其余作者发文规模普遍较小,反映我国绿肥研究领域存在核心团队稀

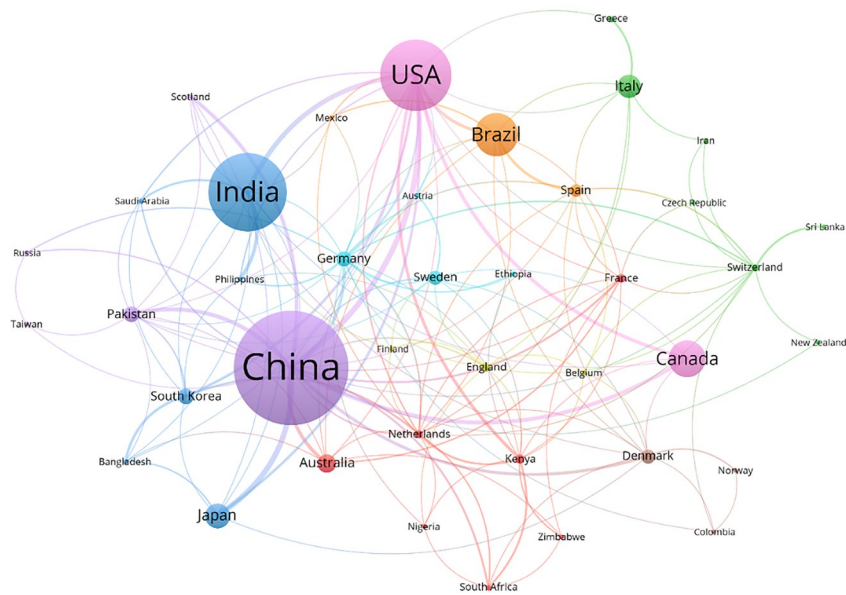


图4 绿肥研究领域国家合作关系网络图谱

Fig. 4 Network map of national cooperation relationship in green manure research field



图5 绿肥研究领域中文文献作者共现知识图谱

Fig. 5 Co-occurrence knowledge map of Chinese literature authors in the field of green manure research

缺、合作关联薄弱的问题,这种离散型协作模式不利于高质量研究成果产出。

图6为绿肥研究领域英文文献研究合作作者的知识图谱。由图6可知,英文文献中曹卫东研究员仍是发文量最多的学者;曹卫东团队与于爱忠团队、高亚军团队和张久东团队均有紧密合作,但与国际上知名的绿肥团队如韩国的Kim. P. J团队、加拿大的Smith团队和印尼的Ciaccia团队等缺乏深度合作,国际交流较少。

综合中文和英文文献作者共现知识图谱可知,曹卫东团队以110篇中文文献成为核心研究作者,在中文绿肥研究领域占据重要地位,但其英文文献产

出量与中文产出量存在显著差异,国际学术成果输出力度有待加强。从作者群体构成来看,英文文献作者中78.6%仍为中国学者,这一高比例表明研究成果主要由国内研究者主导产出,直观反映出国内研究者与国际研究者共同开展的深度合作有限,跨国学术合作网络尚未充分构建。其中,曹卫东团队的国际合作网络强度与韩国Kim. P. J团队、加拿大Smith团队等国际领先团队相比存在明显差距,这种国际合作不足的现状导致研究视角相对局限,不利于绿肥研究成果的国际传播与交流。未来应着力推动与国际领先团队的学术互动,拓宽合作渠道,以提升我国在绿肥研究领域的国际学术影响力。

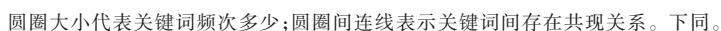


图7 绿肥研究领域中文文献关键词共现知识图谱

Fig. 7 Keywords co-occurrence knowledge map of Chinese literature in green manure research field

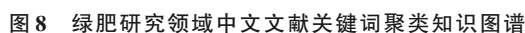


Fig. 8 Keywords clustering knowledge map of Chinese literature in green manure research field

能力较弱,但仍能通过增加有机质输入量提升土壤有机碳水平,但其提升效果不及豆科绿肥显著^[28]。此外,绿肥与作物轮作制度的实施可有效防止土壤有机碳流失,实现土壤有机碳含量的持续提升^[29]。综上所述,绿肥在提升土壤有机碳含量方面具有巨大应用潜力,合理利用绿肥可在改善土壤健康状况和保障可持续农业生产中发挥关键作用。

“春小麦”的频数为59,中心性为0.19。在绿肥与春小麦的轮作体系中,翻压绿肥可显著提高土壤碳氮比(C:N),促进土壤有机质积累,改善土壤团粒结构,增强土壤微生物活性,进而间接提升春小麦产量^[30]。同时,该种植措施能够优化春小麦的生长态势和抗逆性能^[31],显著提高土壤养分含量的同时降低了化肥施用量^[32]。因此,科学设计绿肥与春小麦的轮作体系,不仅可提高作物产量和经济效益,还能协同改善土壤养分状况和作物抗逆性。

“豆科绿肥”的频数为51,中心性为0.14。我国豆科绿肥作物主要包括豌豆(*Pisum sativum*)、蚕豆(*Vicia faba*)和羽扇豆(*Lupinus spp*)等品种,其特有的生物固氮作用可有效提升土壤氮素含量^[33],并在草地生态系统中扮演关键角色^[34],同时还能抑制水稻田中杂草的生长^[35]。然而,豆科绿肥自身易受病虫害威胁,需通过选育抗性品种、优化轮作方案等综合防控策略降低病虫害影响^[36]。近年来,豆科植物组织和细胞培养技术的突破,为豆科绿肥作物的遗传改良和新品种培育提供了新的技术途径^[33]。与其他绿肥品种相比,豆科绿肥具有固氮能力强、土壤肥力提升效果显著、土壤结构改善作用突出及经济效益高等多重优势。

“烤烟”的频数为46,中心性为0.08。长期单一施用化肥致使植烟区土壤质量退化,对烟草品质产生不利影响。利用冬季闲田种植绿肥可实现培肥地力,为烤烟生长提供充足养分,进而提升烟草品质。翻压绿肥能显著改善土壤理化性质、增加土壤微生物量及提高酶活性^[37-38]。研究表明,不同绿肥品种及不同施用年限对植烟区土壤质量、烟草产量和区域经济效益的提升效果存在差异^[39]。总体而言,绿肥可通过多种作用途径提高烟草产量,并有效改善植烟区土壤质量状况。

“种植模式”的频数为38,中心性为0.09。绿肥与不同作物的轮作、间作种植模式可增强土壤肥力,提高作物产量,是实现可持续农业的重要技术

支撑。研究发现,不同绿肥种植模式对作物养分利用和腐解特征具有显著影响^[4]。长期采用双季稻—绿肥种植模式可大幅改善土壤肥力性状^[40]。此外,合理的种植模式还能有效抑制杂草生长,降低作物在不利环境下的生长负荷^[41]。因此,针对不同地区、土壤类型和气候条件开展适应性研究,建立科学合理的绿肥种植模式,对推动高效、绿色、可持续的农业发展具有重要实践意义。

“绿肥油菜”的频数为31,中心性为0.04。油菜作为绿肥作物,具有种植成本低、综合效益好的优势^[42]。种植油菜不仅能提高土壤肥力,还可通过翻压还田及与其他作物轮作等方式改良盐碱土壤,提升土壤养分,增加作物产量^[43-44]。近年来,油菜绿肥的施肥效应及适宜施肥量成为研究热点,科学合理的施肥管理可延长其生育期,提高生物量累积,从而更好地发挥其土壤改良的作用^[45]。

2.4.2 英文关键词

图9为英文文献关键词聚类知识图谱。由图9知,绿肥高频关键词聚类主要划分为“nitrogen”(氮肥)、“matter”(问题)、“hairy vetch”(毛叶苕子)、“fertilizer”(肥料)、“winter wheat”(冬小麦)、“methane”(甲烷)、“soil”(土壤)、“farmyard manure”(堆肥)和“rice yield”(水稻产量)9个聚类。

从聚类频数来看,“nitrogen”(氮肥)最高,表明绿肥对土壤氮素有着重要调控作用,其中豆科绿肥在增加土壤氮含量方面效果尤为显著,其施用可有效降低土壤容重、提升土壤氮利用率、促进氧化亚氮排放,进而提升土壤氮素水平^[46];其次为“hairy vetch”(毛叶苕子),种植毛叶苕子可通过提升土壤团聚体稳定性、降低土壤容重、增加孔隙度等途径,实现土壤质量与作物产量的同步提高^[47];“winter wheat”(冬小麦)表明合理采用绿肥种植模式能改善作物生产条件、提升土壤质量,绿肥与冬小麦轮作还能大幅改善其土壤性质、提升土壤肥力^[48];“methane”(甲烷)表明绿肥通过分解释放大量养分,增强土壤有益微生物活性,促进养分的矿化与转化,进而实现土壤固碳,有效减少土壤碳流失^[46];“rice yield(水稻产量)”则聚焦于绿肥提升作物产量的作用机制,例如长期采用水稻—水稻—绿肥轮作模式可使作物产量平均提高11%^[49];“farmyard manure”(堆肥)表明绿肥作为覆盖作物翻压后,能有效改善土壤理化性质、抑制杂草生长,通过形成物理屏障减少作物与杂草的光照竞

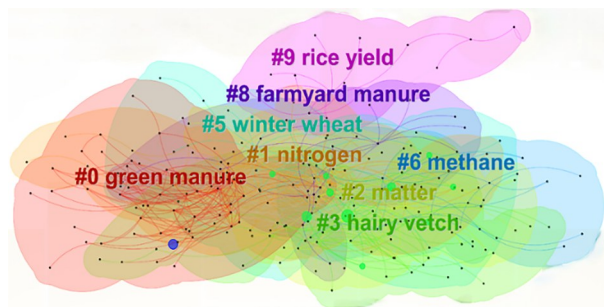


图9 绿肥研究领域英文文献关键词聚类知识图谱

Fig. 9 Keywords clustering knowledge map of English literature in green manure research field

争,增强作物抗逆性,从而提高作物产量^[50]

3 研究趋势

研究前沿代表了科学研究的最新动态和现实问题,充分了解研究前沿有助于掌握和预测未来学科发展趋势。一般而言,关键词突现分析是反映研究前沿最直观的方式^[51],其中“突现”是指某些关

键词在较短时间内出现频率呈现显著且剧烈的波动变化。因此,通过对文献的系统分析,筛选出突现程度高的关键词,可掌握研究前沿和领域发展趋势^[52]。

3.1 关键词时间线图

3.1.1 中文文献

将关键词共现图谱转换为时间线视图可以清晰地展示研究热点的动态发展过程,图10为根据中文文献中的关键词首次出现时间及频次绘制的关键词时间线视图。由图10可知,该研究领域的整体趋势是绿肥对作物产量的影响向改善土壤质量和绿肥种质资源筛选的方向转变。1994—2000年,中文文献主要侧重于填闲种植绿肥与翻压绿肥还田的研究;2001—2015年相比上一阶段研究热点大幅增加,例如绿肥的不同种植模式、绿肥腐解特征和绿肥提高土壤中酶活性的作用机制等^[19];2016—2024年,改善土壤质量、培肥土壤以及探寻绿肥新品种成为热点方向。

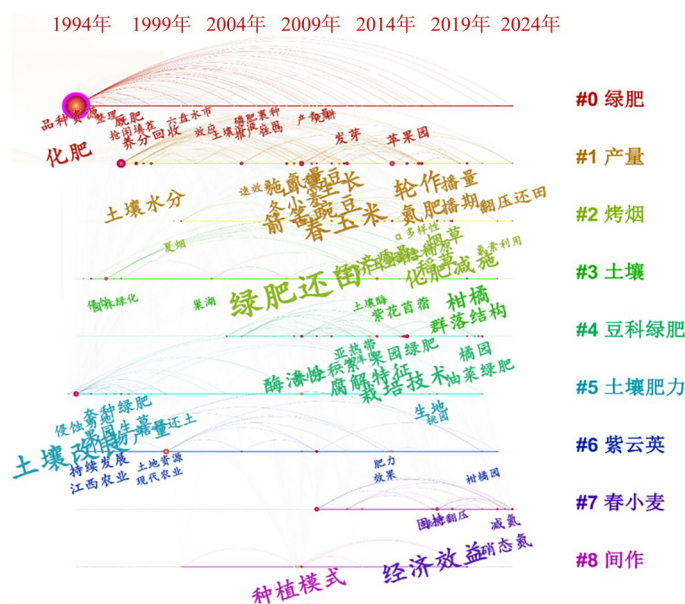


图10 绿肥研究领域中文文献关键词时间线视图

Fig. 10 Keywords timeline view of Chinese literature in green manure research field

3.1.2 英文文献

英文文献关键词时间线视图见图11。由图11可知,英文文献的研究方向呈现出动态演进特征,从早期聚焦于提升作物产量逐渐向绿肥固碳机制、氮素循环效率优化及绿肥管理模式改良等深度研究领域拓展。根据热点关键词的分布特征与时间线视图的演化轨迹可以明确,英文文献绿肥研究主

要集中在绿肥耕作管理实践、土壤培肥效应、氮素高效利用机制等核心领域。

3.2 研究前沿

表4为中文文献频次排名前15的突现词。由表4可知:“油菜”突现强度最大,达5.21,持续时间为2016—2024年,反映其在国内绿肥研究与推广中的持续高度关注,主要研究方向聚焦于轮作

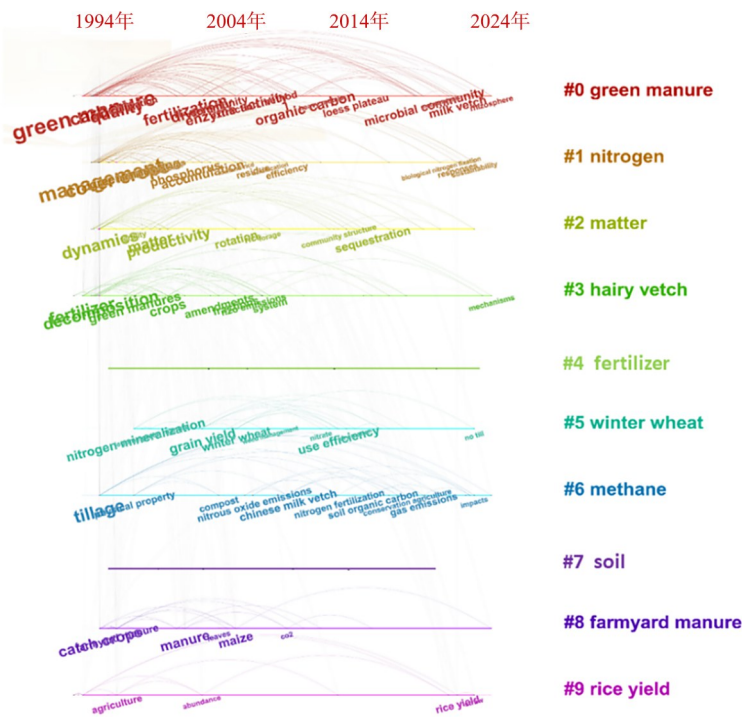


图 11 绿肥研究领域英文文献关键词时间线视图

Fig. 11 Keywords timeline view of English literature in green manure research field

表 4 绿肥研究领域中文文献频次排名前 15 的突现词

Table. 4 Top 15 most frequently occurring words of Chinese literature in green manure research field

排名 Ranking	关键词 Keyword	年份 Year	强度 Strength	开始年份 Beginning year	结束年份 Ending year	1994—2024 年
1	油菜	2016	5.21	2016	2024	-----
2	玉米	1999	4.99	1999	2024	-----
3	土壤养分	2010	4.59	2010	2022	-----
4	土壤	1997	4.44	1997	2019	-----
5	毛叶苕子	2017	4.43	2017	2024	-----
6	水稻	2006	4.29	2006	2014	-----
7	绿肥种植	2015	4.23	2015	2019	-----
8	烤烟	2010	3.78	2010	2017	-----
9	豆科绿肥	2010	3.71	2010	2014	-----
10	土壤肥力	2005	3.38	2005	2013	-----
11	腐解	2015	3.36	2015	2022	-----
12	黑麦草	2016	3.27	2016	2018	-----
13	种植模式	2010	3.12	2010	2017	-----
14	作物产量	1994	3.12	1994	2002	-----
15	紫云英	2018	3.11	2018	2020	-----

注：红色线表示关键词突现持续的时间，浅蓝色部分表示其尚未进入突现阶段的年份。下同。
Note: The red line represents the duration of the keyword bursts, and the light blue section indicates the years before it has entered the prominence phase. The same below.

系统绿肥效应、秸秆还田养分利用及土壤改良；“玉米”突现强度次之，为4.99，持续时间为1999—2024年，超长突现期表明绿肥对玉米田土壤培肥、产量提升及可持续生产的长期效应；“土壤养分”（强度4.59）和“腐解”（强度3.36）研究积累深厚，奠定了国内绿肥研究基础；“毛叶苕子”突现强度为4.43，从2017年突现开始一直持续至今，作为豆科绿肥典型品种，体现了国内对本土化高效绿肥品种筛选应用的重视，预计在未来绿肥研究领域仍将保持发展趋势。

表5为英文文献频次排名前15的突现词。由表5可知：“organic carbon”（有机碳）突现强度最高，

达10.63，凸显国际绿肥研究近年聚焦土壤有机碳动态的核心方向；“milk vetch”（紫云英）和“microbial community”（微生物群落）突现强度分别为9.66和8.62，前者反映国际对其生物固氮能力的重点关注，后者展现了绿肥对土壤健康与养分循环的调控机制的重要性；“diversity”（多样性）和“accumulation”（积累）的突现持续时间分别为2017—2024年和2022—2024年，表明未来绿肥研究将重点聚焦于“进一步提升绿肥种质资源多样性”与“探索土壤碳素高效积累机制”两大关键方向。这2个方向不仅明确了后续研究的核心着力点，更凸显出当前绿肥研究领域的前沿趋势。

表5 绿肥研究领域英文文献频次排名前15的突现词
Table. 5 Top 15 most frequently occurring words of English literature in green manure research field

排名 Ranking	关键词 Keyword	年份 Year	强度 Strength	开始年份 Beginning year	结束年份 Ending year	1994—2024年
1	organic carbon	2013	10.63	2013	2024	
2	milk vetch	2022	9.66	2022	2024	
3	microbial community	2020	8.62	2020	2024	
4	manure carbon	2010	8.39	2010	2013	
5	mineralization	2002	7.64	2002	2010	
6	wheat	1994	6.93	1994	2009	
7	catch crops	2014	6.74	2014	2021	
8	efficiency	2015	6.59	2015	2019	
9	fertilization	2015	6.44	2015	2022	
10	diversity	2017	6.27	2017	2024	
11	methane	1996	6.04	1996	2003	
12	phosphorus	2006	5.90	2006	2011	
13	residues	2001	5.80	2001	2011	
14	accumulation	2022	5.74	2022	2024	
15	carbon sequestration	2012	5.61	2012	2017	

4 结论与展望

4.1 结论

为了解当前国内外绿肥研究现状、热点及未来发展趋势，本研究利用 CiteSpace 和 Vosviewer 软件对1994—2024年CNKI和WOS数据库中的绿肥研究相关文献进行文献计量和可视化分析。主要结论如下：

1)全球绿肥研究发文量整体上呈现持续增长趋势。中文文献年发文量历经1994—2000年减少、2001年后恢复增长与平稳发展阶段，2021年达到最

高峰，其发展得益于国家政策支持与科研基础保障；英文文献年发文量于2000—2012年和2013—2022年经历2轮显著增长，前一阶段与中文文献增长长期重叠，后一阶段发文量反超中文文献并于2022年达到最高峰，整体增长态势突出。

2)研究主要力量方面，美国农业部农业研究所通过深度国际合作在影响力方面占据核心地位，中国虽拥有高产学者（如曹卫东研究员中英文总发文142篇）及机构（中国农业科学院发文占比18.7%），但中介中心度均值仅为0.23，表明国内成果的国际

学术影响力欠佳。

3)中英文文献研究热点方面存在显著差异,中文文献聚焦于绿肥种植模式优化、绿肥品种选育及土壤有机碳提升,而英文文献集中于绿肥固碳机制和提升氮素循环效率。

4.2 展望

未来我国在绿肥研究方面可从以下4个关键领域开展深入研究:

1)在机理研究层面,需重点突破绿肥-土壤-作物系统的互作机制,建立相关模型,量化绿肥对土壤结构改良和作物增产的贡献率,明确该机制可为绿肥改善土壤质量的作用提供新视角,从而为合理种植绿肥提供科学依据。

2)在种质创新方面,需整合建立国家级绿肥种质基因库,重点挖掘抗逆基因资源,优化栽培模式以适应不同的农业生产环境和需求。

3)在国际合作方面,应建立“优势互补”的协同机制,将我国的绿肥种植模式(如稻-绿肥轮作)与国际先进的固碳减排技术相结合,构建兼顾产量提升和生态服务的绿肥技术体系。

4)在学科交叉方面,绿肥应用与现代可持续农业技术相结合是必然趋势。运用人工智能和大数据技术实现种植模式优化、长期智能监测和经济与环境效益动态评估的一体化管理,为绿肥的科学管理和应用提供有力工具。

参考文献 References

- [1] 曹卫东, 黄鸿翔. 关于我国恢复和发展绿肥若干问题的思考[J]. 中国土壤与肥料, 2009(4):1-3
Cao W D, Huang H X. Ideas on restoration and development of green manures in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009(4):1-3 (in Chinese)
- [2] 陈子英, 孙小凤, 韩梅, 曹卫东. 国内外绿肥研究进展[J]. 青海农林科技, 2020(3):54-58
Chen Z Y, Sun X F, Han M, Cao W D. Research progress of green manure at home and abroad[J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2020(3):54-58 (in Chinese)
- [3] Gill K, Singh S, Mor M, Kalmodiya T, Singh M. Role of green manuring in sustainable agriculture: A Review[J]. *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*, 2020, 7(7):2361-2366
- [4] 樊志龙, 柴强, 曹卫东, 于爱忠, 赵财, 谢军红, 殷文, 胡发龙. 绿肥在我国旱地农业生态系统中的服务功能及其应用[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4):1389-1402
Fan Z L, Chai Q, Cao W D, Yu A Z, Zhao C, Xie J H, Yin W, Hu F L. Ecosystem service function of green manure and its application in dryland agriculture of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(4):1389-1402 (in Chinese)
- [5] 颜志雷, 方宇, 陈济琛, 王飞, 何春梅, 林新坚. 连年翻压紫云英对稻田土壤养分和微生物学特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5):1151-1160
Yan Z L, Fang Y, Chen J C, Wang F, He C M, Lin X J. Effect of turning over Chinese milk vetch on soil nutrients and microbial properties in paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5):1151-1160 (in Chinese)
- [6] Mohammed T. Cover crops dual roles: green manure and maintenance of soil fertility, A Review[J]. *International Journal of Innovative Agriculture & Biology Research*, 2019, 7(1):47-59
- [7] 曹卫东, 高嵩涓. 到2025年中国绿肥发展策略[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(12):1-9
Cao W D, Gao S J. Chinese green manure development strategy by 2025[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(12):1-9 (in Chinese)
- [8] 徐志平. 经济绿肥在可持续农业中的作用与发展对策[J]. 福建农业, 2001(11):9
Xu Z P. The role of economic green manure in sustainable agriculture and its development countermeasures [J]. *Fujian Agriculture*, 2001(11):9 (in Chinese)
- [9] Ma X T, Liao J A, Zhao J F. Visual analysis of Chinese and international green manure research based on bibliometrics[J]. *Ciência Rural*, 2024, 54(5): e20220438
- [10] 李宇翔, 钟菊新, 王磊, 蒋云伟, 宾焕军, 陆炳强, 莫永诚, 李忠义. 基于学科知识图谱的绿肥研究态势分析[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(5):5-10, 31
Li Y X, Zhong J X, Wang L, Jiang Y W, Bin H J, Lu B Q, Mo Y C, Li Z Y. Research status on green manure based on the discipline knowledge graph [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(5):5-10, 31 (in Chinese)
- [11] 冯衍, 王章凯, 余雪巍, 刘天初, 顾海萍. 基于 Web of Science 对土壤介质中抗生素抗性基因的文献计量分析[J]. 生态毒理学报, 2023, 18(6):302-313
Feng Y, Wang Z K, Yu X W, Liu T C, Gu H P. A bibliometric analysis of antibiotic resistance genes in soil media based on web of science[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2023, 18(6):302-313 (in Chinese)
- [12] 施灿海, 蓝蓉, 黄乔云, 刘明生, 孙高月, 傅灿. 尾矿污染研究进展的 CiteSpace 可视化计量分析[J]. 现代矿业, 2023, 39(8):220-227, 236
Shi C H, Lan R, Huang Q Y, Liu M S, Sun G Y, Fu C. Cite space visual measurement analysis of tailings pollution research progress[J]. *Modern Mining*, 2023, 39(8):220-227, 236 (in Chinese)
- [13] Chen C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2006, 57(3):359-377
- [14] 胡龙兵, 李小花. 基于 CiteSpace 的国内矿山生态修复高引文献计量分析[J]. 矿产勘查, 2023, 14(7):1215-1222
Hu L B, Li X H. Quantitative analysis of high citation literature on ecological restoration of mines in China based on CiteSpace[J]. *Mineral Exploration*, 2023, 14(7):1215-1222 (in Chinese)
- [15] 胡鹏杰, 杜彦铭, 夏冰, 仇浩, 吴龙华, 骆永明. 基于 Web of Science 对土壤胶体影响重金属行为研究的计量分析[J]. 土壤学报, 2024, 61(2):445-455
Hu P J, Du Y P, Xia B, Qiu H, Wu L H, Luo Y M. Bibliometric analysis of research on soil colloids affecting the behavior of heavy metals based on web of science[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(2):445-455 (in Chinese)
- [16] 李爽, 翟琰琦. 1999—2016 年期刊《绿色化学》载文的计量分析[J]. 化学通报, 2018, 81(7):660-666
Li S, Zhai Y Q. A metrology analysis of articles published on *Green Chemistry* from 1999 to 2016[J]. *Chemistry*, 2018, 81(7):660-666 (in Chinese)
- [17] 秦晓楠, 卢小丽, 武春友. 国内生态安全研究知识图谱——基于 Citespace 的计量分析[J]. 生态学报, 2014, 34(13):3693-3703
Qin X N, Lu X L, Wu C Y. The knowledge mapping of domestic ecological security research: Bibliometric analysis based on citespace[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13):3693-3703 (in Chinese)
- [18] 曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 聂军, 高亚军, 耿明建. 中国绿肥科研60年回顾

- 与未来展望[J]. 植物营养与肥科学报, 2017, 23(6):1450-1461
- Cao W D, Bao X G, Xu C X, Nie J, Gao Y J, Geng M J. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6):1450-1461 (in Chinese)
- [19] 李子双, 廉晓娟, 王薇, 赵同凯, 李洪杰. 我国绿肥的研究进展[J]. 草业科学, 2013, 30(7):1135-1140
- Li Z S, Lian X J, Wang W, Zhao T K, Li H J. Research progress of green manure in China[J]. *Pratacultural Science*, 2013, 30(7):1135-1140 (in Chinese)
- [20] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 胡志刚, 王贤文. CiteSpace知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2):242-253
- Chen Y, Chen C M, Liu Z Y, Hu Z G, Wang X W. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2):242-253 (in Chinese)
- [21] Naik S K, Das D K. Relative performance of chelated zinc and zinc sulphate for lowland rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 81(3):219-227
- [22] 迟佳蕙, 李宝敏. 国内外深度学习研究主题热点及发展趋势: 基于共词分析的可视化研究[J]. 基础教育, 2019, 16(1):101-112
- Chi J H, Li B M. Research on topics and trends of deep learning: Visualization study based on co-word analysis[J]. *Journal of Schooling Studies*, 2019, 16(1):101-112 (in Chinese)
- [23] 张宝生, 王晓敏. 基于关键词共现聚类的网络教育热点主题研究[J]. 科研管理, 2018, 39(S1):298-307
- Zhang B S, Wang X M. A study of network education hot spots based on keywords co-occurrence analysis and social network analysis[J]. *Science Research Management*, 2018, 39(S1):298-307 (in Chinese)
- [24] 李锋. 基于核心关键词的聚类分析: 兼论共词聚类分析的不足[J]. 情报科学, 2017, 35(8):68-71, 78
- Li F. Clustering analysis based on core keyword: concurrently discuss the deficiency of co-word analysis[J]. *Information Science*, 2017, 35(8):68-71, 78 (in Chinese)
- [25] 张文霞, 李盼, 殷文, 陈桂平, 樊志龙, 胡发龙, 范虹, 何蔚. 麦后复种绿肥及配施不同水平氮肥对小麦产量、品质及氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(17):3317-3330
- Zhang W X, Li P, Yin W, Chen G P, Fan Z L, Hu F L, Fan H, He W. Effects of multiple green manure after wheat combined with different levels of nitrogen fertilization on wheat yield, grain quality, and nitrogen utilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(17):3317-3330 (in Chinese)
- [26] 宋莉, 廖万有, 王焯军, 苏有健, 张永利, 罗毅, 廖珺, 吴卫国. 旱地作物间作绿肥研究进展[J]. 作物杂志, 2017(6):7-11
- Song L, Liao W Y, Wang Y J, Su Y J, Zhang Y L, Luo Y, Liao J, Wu W G. Research progress in intercropping upland crops with green manure[J]. *Crops*, 2017(6):7-11 (in Chinese)
- [27] 向红坤. 长期水稻—绿肥复种下土壤碳、氮积累的微生物机制[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022
- Xiang H K. Microbial mechanisms of soil carbon and nitrogen accumulation under long-term rice-green fertilizer multiple cropping[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [28] 且天真. 不同绿肥翻压还田对土壤理化性状及高粱产量的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023
- Qie T Z. Effects of different green manures on soil physicochemical properties and sorghum yield[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2023 (in Chinese)
- [29] 程会丹, 聂军, 鲁艳红, 聂鑫, 朱启东, 周兴, 廖育林. 绿肥对土壤有机碳含量、质量及稳定性影响的研究进展[J]. 湖南农业科学, 2018, (8):119-122
- Cheng H D, Nie J, Lu Y H, Nie X, Zhu Q D, Zhou X, Liao Y L. Research progress on the effects of green manure on quantity, quality and stability of soil organic carbon[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2018, (8):119-122 (in Chinese)
- [30] 李超. 绿肥填闲种植和施氮对旱作冬小麦农田土壤理化性质和团聚体碳氮的影响[D]. 西安: 西北大学, 2022
- Li C. Effects of cover cropping and nitrogen fertilization on soil physico-chemical properties and aggregate-associated carbon and nitrogen contents in a dryland winter wheat field[D]. Xi'an: Northwest University, 2022 (in Chinese)
- [31] Sumiahadi A, Acar R. *Green Manure for Soil Properties Improvement*[M]. 2nd ed. Gaziantep, Turkey: International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology, 2020.
- [32] 张久东, 包兴国, 王婷, 胡志桥, 曹卫东, 杨文玉, 舒秋萍, 李全福, 王健. 增施绿肥与降低氮肥对小麦产量和土壤肥力的影响[J]. 核农学报, 2011, 25(5):998-1003
- Zhang J D, Bao X G, Wang T, Hu Z Q, Cao W D, Yang W Y, Shu Q P, Li Q F, Wang J. Effect of green manure utilization and reduced n fertilizer on wheat yield and soil fertility[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2011, 25(5):998-1003 (in Chinese)
- [33] 张俊杰, 尚益民, 郭晨, 彭姗姗, 陈文峰. 我国豆科绿肥根瘤菌资源研究现状[J]. 轻工学报, 2019, 34(4):30-36
- Zhang J J, Shang Y M, Guo C, Peng S S, Chen W F. Current status of research on *Rhizobium* resources of leguminous green manure in China[J]. *Journal of Light Industry*, 2019, 34(4):30-36 (in Chinese)
- [34] 牛书丽, 蒋高明. 豆科植物在中国草原生态系统中的地位及其生理生态研究[J]. 植物学通报, 2004, 39(1):9-18
- Niu S L, Jiang G M. The importance of legume in China grassland ecosystem and the advances in physiology and ecology studies[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2004, 39(1):9-18 (in Chinese)
- [35] 王瑞龙, 张墨溪, 宋圆圆, 胡林, 苏贻娟, 曾任森. 豆科牧草对4种农田常见杂草和水稻化感作用的研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10):2307-2312
- Wang R L, Zhang M X, Song Y Y, Hu L, Su Y J, Zeng R S. Allelopathic effect of forage legumes on four common cropland weeds and rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(10):2307-2312 (in Chinese)
- [36] 江幸福, 刘悦秋, 张蕾, 程云霞, 宋琳琳. 绿肥害虫发生与防控研究现状与发展趋势[J]. 植物保护, 2018, 44(5):61-68
- Jiang X F, Liu Y Q, Zhang L, Cheng Y X, Song L L. Current status and development trends in the occurrence and control of insect pests in green manure crops[J]. *Plant Protection*, 2018, 44(5):61-68 (in Chinese)
- [37] 李正, 刘国顺, 敬海霞, 叶协锋, 解昌盛, 向永光, 张文平, 杨超, 王永, 习相银. 绿肥与化肥配施对植烟土壤微生物量及供氮能力的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(6):126-134
- Li Z, Liu G S, Jing H X, Ye X F, Xie C S, Xiang Y G, Zhang W P, Yang C, Wang Y, Xi X Y. Effects of green manure application combined with chemical fertilizers on microbial biomass C, N and nitrogen supplying characteristics of tobacco-planting soils[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(6):126-134 (in Chinese)
- [38] 杨蒙岭, 蒋豪, 顾勇, 谢强, 张永辉, 徐传涛, 陈凡. 绿肥不同栽培模式对冬闲期植烟土壤的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(8):1751-1757
- Yang M L, Jiang H, Gu Y, Xie Q, Zhang Y H, Xu C T, Chen F. Effects of different cropping patterns of green manure on tobacco-soil property during slack winter season[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(8):1751-1757 (in Chinese)
- [39] 李金秋. 套作绿肥对黑龙江黑土区土壤肥力及烤烟营养特性的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020
- Li J Q. Effects of intercropping green manure on soil fertility and flue-cured tobacco nutritional characteristics in Heilongjiang black soil region[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020 (in Chinese)
- [40] 黄晶, 刘淑军, 张会民, 王晓辉, 高菊生. 水稻产量对双季稻-不同冬绿肥轮

- 作及环境的响应[J]. 生态环境学报, 2016, 25(8):1271-1276
- Huang J, Liu S J, Zhang H M, Wang X H, Gao J S. The response of rice yields on long-term double cropping rice with different winter green manure rotation and environment[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(8):1271-1276 (in Chinese)
- [41] 兰延, 黄国勤, 杨滨娟, 陈洪俊, 王淑彬. 稻田绿肥轮作提高土壤养分增加有机碳库[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13):146-152
- Lan Y, Huang G Q, Yang B J, Chen H J, Wang S B. Effect of green manure rotation on soil fertility and organic carbon pool[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(13):146-152 (in Chinese)
- [42] 张哲, 殷艳, 刘芳, 王积军, 傅廷栋. 我国油菜多功能开发利用现状及发展对策[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5):618-623
- Zhang Z, Yin Y, Liu F, Wang J J, Fu T D. Current situation and development countermeasures of Chinese rapeseed multifunctional development and utilization[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2018, 40(5):618-623 (in Chinese)
- [43] 刘慧, 李子玉, 白志贵, 刘建国. 油菜绿肥翻压还田对新疆盐碱土壤的改良效果研究[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6):914-923
- Liu H, Li Z Y, Bai Z G, Liu J G. Effects of rape green manure returned to field on saline alkali soil improvement in Xinjiang[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(6):914-923 (in Chinese)
- [44] 赵曼利, 戴志刚, 顾炽明, 胡文诗, 李银水, 秦璐, 鲁明星, 廖星. 油菜用地的作物优势及其在冬闲田开发中的应用潜力[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(6):1139-1147
- Zhao M L, Dai Z G, Gu C M, Hu W S, Li Y S, Qin L, Lu M X, Liao X. Advantage of oilseed rape (*Brassica napus* L.) in land use and conservation and its application for winter fallow field[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2022, 44(6):1139-1147 (in Chinese)
- [45] 周雨亭, 田贵生, 游江峰, 吴海亚, 陈妍, 游绍阳. 绿肥油菜施肥效应及适宜肥料用量研究[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(24):45-47
- Zhou Y T, Tian G S, You J F, Wu H Y, Chen Y, You S Y. Study on fertilization effect and appropriate fertilizer application of green manure rapeseed[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 59(24):45-47 (in Chinese)
- [46] Hu T, Sørensen P, Olesen J E. Soil carbon varies between different organic and conventional management schemes in arable agriculture[J]. *European Journal of Agronomy*, 2018, 94:79-88
- [47] Tejada M, Gonzalez J L, García-Martínez A M, Parrado J. Application of a green manure and green manure composted with beet vinasse on soil restoration: Effects on soil properties[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(11):4949-4957
- [48] 郭耀东, 程曼, 赵秀峰, 郝保平, 张延芳, 曹卫东, 郑普山. 轮作绿肥对盐碱地土壤性质、后作青贮玉米产量及品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(6):856-864
- Guo Y D, Cheng M, Zhao X F, Hao B P, Zhang Y F, Cao W D, Zheng P S. Effects of green manure rotation on soil properties and yield and quality of silage maize in saline-alkali soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(6):856-864 (in Chinese)
- [49] Ma D K, Yin L N, Ju W L, Li X K, Liu X X, Deng X P, Wang S W. Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China[J]. *Field Crops Research*, 2021, 266:108146
- [50] Tonitto C, David M B, Drinkwater L E. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 112(1):58-72
- [51] 李春英, 李琨. 基于CiteSpace的学习分析热点与发展趋势的研究[J]. 文化创新比较研究, 2021, 5(21):155-158
- Li C Y, Li K. Research on hotspots and development trend of learning analysis based on citespace[J]. *Comparative Study of Cultural Innovation*, 2021, 5(21):155-158 (in Chinese)
- [52] 张洪, 孙雨茜, 司家慧. 基于知识图谱法的国际生态旅游研究分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(2):342-352
- Zhang H, Sun Y Q, Si J H. Analyses of international ecological tourism research based on domain knowledge mapping[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(2):342-352 (in Chinese)

责任编辑: 申青苗



第一作者简介: 鱼洋, 西北农林科技大学资源与环境专业硕士研究生。参与国家级与省级项目共3项; 共发表学术论文2篇。



通讯作者简介: 乔江波, 博士, 中国科学院水土保持与生态环境研究中心副研究员。主要研究方向为土壤物理和包气带水文过程。先后主持国家自然科学基金项目1项、国家重点研发计划子课题3项、省级项目1项和厅级项目3项, 参与国家级和省级项目共10项。共发表学术论文16篇。