



任文欣, 曾正群, 彭正萍, 付鑫, 郭江龙, 胡志旭, 高占林. 基于文献计量分析的1995—2024年中国大豆氮肥管理研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(01): 35-48.

REN Wenxin, ZENG Zhengqun, PENG Zhengping, FU Xin, GUO Jianglong, HU Zhixyu, GAO Zhanlin. Research progress on soybean nitrogen fertilizer management in China from 1995 to 2024 based on bibliometric analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(01): 35-48.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.01.04

基于文献计量分析的1995—2024年中国大豆氮肥管理研究进展

任文欣¹ 曾正群¹ 彭正萍^{1,2} 付鑫^{2,3*} 郭江龙⁴ 胡志旭⁴ 高占林⁴

(1. 河北农业大学 资源与环境科学学院, 河北 保定 071033;

2. 河北农业大学 华北作物改良与调控国家重点实验室, 河北 保定 071033;

3. 河北农业大学 国土资源学院, 河北 保定 071033;

4. 河北省农林科学院 植物保护研究所, 河北 保定 071030)

摘要 为厘清大豆氮肥管理领域的研究态势、发展现状和发展趋势, 基于中国知网数据库和 Web of Science 核心数据库检索1995—2024年中国大豆氮肥管理相关文献, 经筛选整理, 共得到525篇中文文献和179篇英文文献, 利用CiteSpace软件对文献进行可视化分析。结果表明: 1) 1995—2024年, 我国大豆氮肥管理研究领域发文量总体呈波动上升趋势, 2003年后增速显著, 发文量受国家出台的相关政策影响显著。2) 我国对大豆氮肥管理的研究视角逐渐从传统农业科学转向与植物学、生态学和经济学等多学科交叉融合, 极大拓宽了研究方向。3) 我国大豆氮肥管理的研究热点聚焦于土壤根瘤菌及根瘤固氮机理、根际微生物群落调控作用、环境效益评估和种植体系氮素效率利用等方面, 且英文文献更关注大豆间作系统的经济效益与生态效益。4) 中国大豆氮肥管理的研究作者以杨文钰和马春梅为核心, 研究机构主要集中在我国东北地区和西南地区, 以东北农业大学和四川农业大学为中心, 呈“区域聚集-全局分散”特征, 跨区域合作明显不足, 未来亟待深化多学科、多地域协同研究。本研究可为科研人员提供中国大豆氮肥管理领域发展全景视角, 为农业调控政策制定提供理论依据, 为大豆养分管理研究提供思路 and 方向。

关键词 大豆; 氮肥; 种植模式; 氮素利用; 根瘤固氮; CiteSpace; 研究态势

中图分类号 G353.1; S143.1 **文章编号** 1007-4333(2026)01-0035-14

文献标志码 A

Research progress on soybean nitrogen fertilizer management in China from 1995 to 2024 based on bibliometric analysis

REN Wenxin¹, ZENG Zhengqun¹, PENG Zhengping^{1,2}, FU Xin^{2,3}, GUO Jianglong⁴,
HU Zhixyu⁴, GAO Zhanlin⁴

(1. College of Resource and Environmental Engineering College, Hebei Agricultural University, Baoding 071033, China;

2. National Key Laboratory of Crop Improvement and Regulation in North China, Hebei Agricultural University,

Baoding 071033, China;

3. College of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding 071033, China;

4. Plant Protection Institute, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Baoding 071030, China)

Abstract To clarify the research landscape, current status, and future trends in the field of soybean nitrogen fertilizer management in China, a bibliometric analysis was conducted based on literature retrieved from the China National Knowledge Infrastructure and Web of Science Core Collection databases spanning from 1995 to 2024.

收稿日期: 2025-03-18; 接受日期: 2025-06-20

基金项目: 河北省现代农业产业技术体系建设专项(HBCT2024060207); 国家自然科学基金青年科学基金项目(42207404)

第一作者: 任文欣(ORCID:0009-0002-9039-0833), 硕士研究生, E-mail: 1269001151@qq.com

通讯作者: 付鑫(ORCID:0000-0001-5663-9012), 副教授, 主要从事农田生态系统土壤养分提升研究, E-mail: fuxinxin1215@163.com

After screening and compilation, a total of 525 Chinese articles and 179 English articles were obtained, and CiteSpace software was used for visual analysis on the literature. The results showed that: 1) From 1995 to 2024, the number of publications in the field of soybean nitrogen management research in China showed a fluctuating upward trend, with a significant acceleration after 2003. The publication volume was notably influenced by relevant national policies. 2) The research perspective on soybean nitrogen management in China has gradually shifted from traditional agricultural science to interdisciplinary integration with botany, ecology, and economics, greatly expanding the research direction. 3) The research hotspots of soybean nitrogen management in China focus on the mechanisms of symbiotic nitrogen fixation by rhizobia in root nodules, the regulatory role of the rhizosphere microbial community, environmental benefit assessment, and nitrogen use efficiency in cropping systems. Notably, English literature shows a greater emphasis on the economic and ecological benefits of soybean intercropping systems. 4) The core authors of soybean nitrogen management in China are centered around Yang Wenyu and Ma Chunmei. The research institutions are primarily concentrated in the Northeast and Southwest regions of China, with Northeast Agricultural University and Sichuan Agricultural University as the central hubs, this distribution exhibits a pattern of “regional aggregation and global dispersion”, highlighting a significant lack of cross-regional collaboration. Future studies urgent to deepen multi-disciplinary and cross-regional collaborative research. This study can provide researchers with a panoramic perspective on the development of soybean nitrogen management in China, offers a theoretical basis for the formulation of agricultural regulation policies, and suggests new ideas and directions for soybean nutrient management research.

Keywords soybean; nitrogen fertilizer; planting pattern; nitrogen fertilization; nodule nitrogen fixation; CiteSpace; research landscape

近年来,中国消费结构正处于升级的重要阶段,居民对大豆等高蛋白食品需求持续增加^[1],大豆作为我国重要的粮油作物备受关注^[2]。2021年12月中央农村工作会议上,习近平总书记对“三农”工作做出重要指示,提出需切实调整农业结构,扩大大豆及油料种植面积,并取得可考核的成效^[3]。2024年我国大豆种植面积为 1.01×10^7 hm²,较2023年下降了2.8%,单产仍处于较低水平,仅为美国单产的60%,世界平均单产的70%^[4],且大豆种植区域呈现“东北集中,西南扩散”的趋势^[5],在此背景下,为提升大豆产能,保障粮食安全,树立大食物观^[1],科学施肥与优化耕作管理已成为推动大豆种植绿色可持续发展的关键手段。

氮素是大豆生长发育中必须的营养元素^[6],对大豆生长和高产至关重要。由于大豆通过根瘤固氮仅能提供生育期内所需氮量的50%~60%^[7],因此仍需通过施用氮肥来保证大豆的正常生长。适量的施用氮肥可以维持土壤肥力^[8],减少N₂O排放^[9],提高大豆产量和品质^[10],但施氮不合理则会抑制根瘤固氮^[11],影响土壤健康^[12],降低大豆产量^[13],因此,大豆种植过程中的氮肥管理至关重要。大量针对大豆生育期施氮量调控的研究表明,大豆产

量、氮素利用率及光合特征等指标均随施氮量增加呈先上升后下降的趋势^[14-16],但不同地区最佳施氮量存在显著差异。杨栗恒等^[16]在黑龙江省的研究中发现,氮肥施用量在34.4 kg/hm²时大豆氮素积累量和产量达到最高;闫艳红等^[17]在四川省的试验中发现,大豆施氮量在64.8 kg/hm²时净光合速率和产量均最高。除地区差异外,施氮时期和大豆种植模式(轮作、间作等)也是调控大豆氮肥施用量的关键因素。周欣雨等^[18]在河南省进行大豆追施氮肥的研究中发现,在大豆盛荚期追施45 kg/hm²氮肥时产量最高;雍太文等^[19]在四川省的大豆间套作试验中发现,套作下大豆产量显著高于单作的24%,在施氮量为45 kg/hm²时产量最高。因此,我国大豆氮肥管理存在空间异质性,进一步开展不同地区、不同耕作模式下的氮肥管理对提升大豆产量具有重要意义。虽然我国关于大豆氮肥管理的研究不断深入,但缺乏多学科交叉研究背景下的系统性整合,难以从宏观角度把握大豆氮肥管理研究动态及未来发展趋势,有必要对现有研究进行进一步梳理和分析。

文献计量学是通过分析文献的定量特征,运用数学和统计学方法来描述、评估和预测科学技术的

现状与发展趋势的图书情报学分支学科,该术语最早由英国学者 David A. Pendlebury 于 1669 年提出^[20]。CiteSpace(引文空间)是一款基于科学计量学和数据可视化的多元、分时、动态引文可视化分析软件,随着 CiteSpace 的不断更新,其功能已从单纯的引文挖掘扩展到其他知识单元的共现分析,包括作者、机构、国家/地区之间的合作等^[21]。

本研究拟基于中国知网(CNKI)数据库和 Web of Science(WOS)核心数据库,利用 CiteSpace 软件对大豆氮肥管理研究的论文数据集进行计量分析,梳理大豆氮肥管理领域的发展历程,揭示该领域研究脉络与前沿方向,旨在为后续研究提供参考依据,以期推动大豆氮肥管理的理论创新和可持续发展。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据来自于 CNKI 数据库和 WOS 核心数据库。在 CNKI 数据库中以“(SU=‘氮肥’OR SU=‘氮肥施用’OR SU=‘增效’OR SU=‘氮素分配’OR SU=‘氮素利用率’OR SU=‘氮平衡’OR SU=‘间作’OR SU=‘套作’OR SU=‘间套作’OR SU=‘带状复合种植’OR SU=‘根瘤固氮’OR SU=‘氮素吸收’OR SU=‘氮肥减施’OR SU=‘减氮’OR SU=‘减氮增效’OR SU=‘减量施氮’))AND SU=‘大豆’”进行检索,在 WOS 核心数据库使用“高级检索”功能以“(TS=(nitrogen fixation in soybean)OR TS=(Nitrogen reduction) OR TS=(nitrogen balance) OR TS=(nitrogen use efficiency) OR TS=(intercropping) OR TS=(synergistic interaction) OR TS=(nitrogen fertilizer) OR TS=(nitrogen application and soybean) OR TS=(nitrogen absorption and distribution) OR TS=(dual rot system) OR TS=(inhibitory effect of nitrogen application on N fixation) OR TS=(nitrogen utilization efficiency)) AND TS=(soybean) AND CU=(China)”进行检索,时间跨度均选择 1995-01—2024-12-31。CNKI 数据库和 WOS 核心数据库分别检索出 3 290 篇和 1 792 篇期刊文献。对检索得到的文献进行筛选,具体筛选条件为:1)试验设置地点在中国境内;2)试验处理必须涉及氮肥管理;3)必须涉及大豆种植,但大豆种植模式不进行

限制。文献必须满足全部筛选条件。去除重复文献后,共得到有效中文文献 525 篇和英文文献 179 篇。

1.2 研究方法

运用 CiteSpace 6.4. R1 软件分别对 CNKI 数据库和 WOS 核心数据库得到的有效文献进行知识图谱可视化分析,在节点类型模块(Node types)选择机构(Institution)、合作作者(Author)和关键词(Keyword)选项进行研究机构、作者和关键词可视化图谱的绘制。网络节点的连接强度计算方法选择 Cosine 法,计算公式如下:

$$\text{Cosine}(C_{ij}, S_i, S_j) = \frac{C_{ij}}{\sqrt{S_i S_j}} \quad (1)$$

式中:Cosine(C_{ij}, S_i, S_j)为余弦相似度算法下 i 和 j 的关联强度; i 和 j 为 2 个不同的节点; C_{ij} 为 i 和 j 的共现次数; S_i 为 i 出现的频次, S_j 为 j 出现的频次。算法应用范围选择各个时间切片内部(Within slices),节点筛选方式选择 g-index 法,计算公式如下:

$$g \leq \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g (k \cdot C_i) \quad (2)$$

式中: g 为衡量某位研究者作为一个独立个体的研究成果影响力; k 为规模因子; C_i 为节点 i 出现的次数。为提高网络可读性并保证网络节点数量,运用寻径网络法(Pathfinder)进行裁剪,并采用中介中心性(BC_i)衡量节点的重要性,计算公式如下:

$$BC_i = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{n_{st}^i}{g_{st}} \quad (3)$$

式中: BC_i 为中介中心性; g_{st} 为从节点 s 到节点 t 的最短路径数; n_{st}^i 为从节点 s 到节点 t 的 g_{st} 条最短路径中经过节点 i 的最短路径数。使用 Microsoft Office 软件对年度发文量及文献被引现状进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 中国大豆氮肥管理研究论文现状

2.1.1 年度发文量变化趋势

发文量的波动是评估学术领域关注热度和发展脉络的重要指标。图 1 展示了 1995—2024 年 CNKI 数据库和 WOS 核心数据库大豆氮肥管理文献的发表情况,可知该领域文献发表量呈阶段性增长,可分为探索期、稳步发展期和快速增长期。

1)探索期(1995—2003年)。在此期间我国对大豆氮肥管理研究进行初步尝试,年均中文文献发文量为4篇,英文文献发文量不足1篇,研究尚处于萌芽状态。2)稳步发展期(2004—2015年)。此时期大豆良种补贴不断提高,实施大豆临储政策,国际关注度逐渐增强,年均中文文献发文量为20篇,英文文献为2篇。3)快速增长期(2016—2024年)。此时

期大豆定价和补贴遵循“市场定价,价补分离”,通过粮豆补贴大力推进大豆间作种植,年均中文文献发文量达到28篇,英文文献达到18篇,显示该领域研究蓬勃发展,国际影响力不断扩大。这一增长趋势不仅体现了学术界的持续关注,也彰显了国家政策调控对科学研究的积极影响,预示该领域未来将有更多突破性进展。

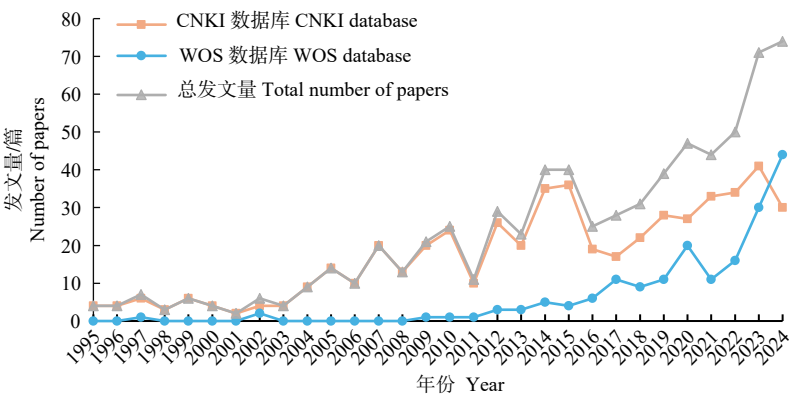


图1 1995—2024年中国大豆氮肥管理研究发文章年度分布

Fig. 1 Annual distribution of papers on soybean nitrogen fertilizer management research in China from 1995 to 2024

2.1.2 核心发文章期刊

对发文章期刊的分析可有助于研究人员根据自身的研究方向选择重点期刊进行投稿和阅读,也可间接反映该领域的多学科交叉情况。表1为基于CNKI数据库中文文献中所属北大中文核心和CSCD的期刊中载文章量排名前10的期刊。载文章量最多的期刊是《大豆科学》,共载文77篇,2024年影

响因子为1.8,该期刊主要刊登大豆相关研究的各方面文章。2024年影响因子最高的期刊为《中国生态农业学报》和《应用生态学报》,均为5.0,《中国生态农业学报》主要刊登生态学、生态经济学等方面的文章,《应用生态学报》主要刊登农业生态学、资源生态学、产业生态学、生态规划与生态设计和污染生态学等生态学相关文章。

表1 1995—2024年中国大豆氮肥管理研究发文章量排名前10的核心中文期刊

Table 1 Top 10 core Chinese journals on soybean nitrogen fertilizer management research in China from 1995 to 2024

排序 Sort	期刊 Journal	发文章/篇 Number of papers	2024年影响因子 Impact factors in 2024
1	《大豆科学》	77	1.8
2	《东北农业大学学报》	15	2.1
3	《植物营养与肥料学报》	14	4.6
4	《中国土壤与肥料》	11	2.9
5	《核农学报》	10	2.6
6	《中国油料作物学报》	9	2.4
7	《中国生态农业学报》	9	5.0
8	《中国农业科学》	8	3.8
9	《作物学报》	7	4.0
10	《应用生态学报》	7	5.0

表 2 为基于 WOS 核心数据库大豆氮肥管理载文量排名前 10 的英文期刊,可知载文量最多期刊的是 *Field Crops Research*,共载文 13 篇,2024 年影响因子为 5.6,该期刊重点关注作物生态学、作物生理学、农学以及作物改良。2024 年影响因子最高的期刊为 *Science of the Total Environment*,其影响因子为 8.2。

2.1.3 文章被引现状

由表 3 所示的中国大豆氮肥管理研究排名前 5 的高被引中文文献可知,主要集中在 3 个研究领域:单作体系中的氮肥优化、间套作系统的氮素利用机制以及生育期氮肥施用策略。首先,在大豆单作体系中的氮肥优化方面,深入探讨了不同施氮水平下

大豆根系、氮素利用效率、根瘤生长和固氮能力的变化。大豆根长、根表面积和根体积随施氮量增加呈现先降后增再降低的趋势^[22-23]。其次,在间套作中,对大豆产量和氮素利用率与氮素水平进行探索。套作大豆在合适的施氮量下能够显著提高大豆花后光合速率和干物质积累^[17]。在间作体系中,玉米可通过吸收大豆固定的氮素,减轻对土壤氮素的竞争,从而提高了氮素利用效率^[24],为理解间作增产的生物学机制提供了重要参考。最后,在生育期氮肥施用策略中,播前施用过多氮肥或在不宜阶段施用氮肥会导致产量降低,播前或开花前期施用过量氮肥则会显著抑制根瘤的生长,降低固氮能力^[25]。

表 2 1995—2024 年中国大豆氮肥管理研究发文量排名前 10 的英文期刊

Table 2 Top 10 English journals on soybean nitrogen fertilizer management research in China from 1995 to 2024

排序 Sort	期刊 Journal	发文数量/篇 Number of papers	2024 年影响因子 Impact factors in 2024
1	<i>Field Crops Research</i>	13	5.6
2	<i>Aronomy</i>	10	3.3
3	<i>Frontiers in Plant Science</i>	9	4.1
4	<i>Science of the Total Environment</i>	8	8.2
5	<i>Journal of Soil Science and Plant Nutrition</i>	6	3.4
6	<i>Journal of Integrative Agriculture</i>	5	4.6
7	<i>BMC Plant Biology</i>	5	4.3
8	<i>Agricultural Water Management</i>	4	5.9
9	<i>Agriculture</i>	4	3.3
10	<i>Agriculture, Ecosystems & Environment</i>	4	6.0

表 3 1995—2024 年中国大豆氮肥管理研究排名前 5 的高被引中文文献

Table 3 Top 5 highly cited Chinese literatures on soybean nitrogen fertilizer management research in China from 1995 to 2024

排序 Sort	篇名 Title	被引频次/次 Citation frequency	通讯作者 Corresponding author	期刊 Journal
1	施氮对大豆根系形态和氮素吸收积累的影响 ^[22]	171	韩晓增	《中国生态农业学报》
2	施氮对大豆根瘤生长和结瘤固氮的影响 ^[23]	147	韩晓增	《华北农学报》
3	施氮量对套作大豆花后光合特性、干物质积累及产量的影响 ^[17]	145	杨文钰	《草业学报》
4	玉米大豆间作条件下氮素养分吸收利用研究 ^[24]	145	李少明	《云南农业大学学报》
5	大豆不同生长阶段施用氮肥对生长、结瘤及产量的影响 ^[25]	117	甘银波	《大豆科学》

由表 4 所示的大豆氮肥管理研究排名前 5 的高被引英文文献可知,其研究方向主要聚焦于玉米-大

豆间套作系统,从多维度揭示了协同增效机制。首先,在生理层面,间作和套作在提高土地利用效率

和氮肥利用效率方面具有显著优势,间作通过优化氮素利用效率显著提升了氮肥利用效率^[28]。套作在减氮处理下表现出更高的土地生产力,且对根系生长具有促进作用^[26]。其次,在土壤微生物层面,间作系统可通过增加土壤微生物的丰度(如氨氧化菌和反硝化菌)和氮素转化能力(如氨化和硝化),

优化土壤氮素循环,降低氮素损失^[29]。随着氮肥施用量的增加,固氮菌数量呈现先增加后减少的趋势^[27]。最后,在农艺管理方面,优化种植方式如秸秆覆盖与氮肥联合处理,显著提高了土壤碳组分、土壤酶活性和大豆产量,同时降低了对环境的负面影响^[30]。

表 4 1995—2024 年中国大豆氮肥管理研究排名前 5 的高被引英文文献

Table 4 Top 5 highly cited English literatures on soybean nitrogen fertilizer management in China from 1995 to 2024

排序 Sort	篇名 Title	被引频次/次 Citation frequency	通讯作者 Corresponding author	期刊 Journal
1	Intercropping maize and soybean increases efficiency of land and fertilizer nitrogen use; A meta-analysis ^[26]	207	Zhang Chaochun	<i>Field Crops Research</i>
2	Effects of root interaction and nitrogen fertilization on the chlorophyll content, root activity, photosynthetic characteristics of intercropped soybean and microbial quantity in the rhizosphere ^[27]	170	Huang Guoqin	<i>Plant, Soil and Environment</i>
3	Effects of reduced nitrogen inputs on crop yield and nitrogen use efficiency in a long-term maize-soybean relay strip intercropping system ^[28]	118	Yong Taiwen, Yang Wenyu	<i>PLoS One</i>
4	Yield advantage and nitrogen fate in an additive maize-soybean relay intercropping system ^[29]	111	Yong Taiwen	<i>Science of the Total Environment</i>
5	Integrated use of straw mulch with nitrogen fertilizer improves soil functionality and soybean production ^[30]	104	Yang Gaihe, Wang Haiyan	<i>Environment International</i>

2.2 中国大豆氮肥管理研究机构及作者

2.2.1 研究机构

大豆氮肥管理相关文章发文机构的时区分布揭示了我国在此领域主要研究机构的变化趋势及政策对研究活动的推动作用。本研究在生成研究机构共现网络图后利用“Timezone view”功能,分别绘制了中文文献和英文文献的发文机构时间区图谱,见图2和图3。由图2可知,发文量排名前5的机构东北农业大学农学院、新疆农业大学农学院等在2003年后发文量均显著增加,这与我国2002年起在黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区实施的大豆良种补贴政策相吻合。

由图3可知,英文文献的主要发文机构为Ministry of Agriculture & Rural Affairs(农业农村部)和Chinese Academy of Sciences(中国科学院)等,这些机构的发文主要集中在2011年之后,这一现象与2010—2011年的全球粮食价格危机有关,这场危机暴露了传统高投入工业化农业模式的脆弱性,促使国际社会重新重视农业的可持续发展。

2.2.2 研究作者

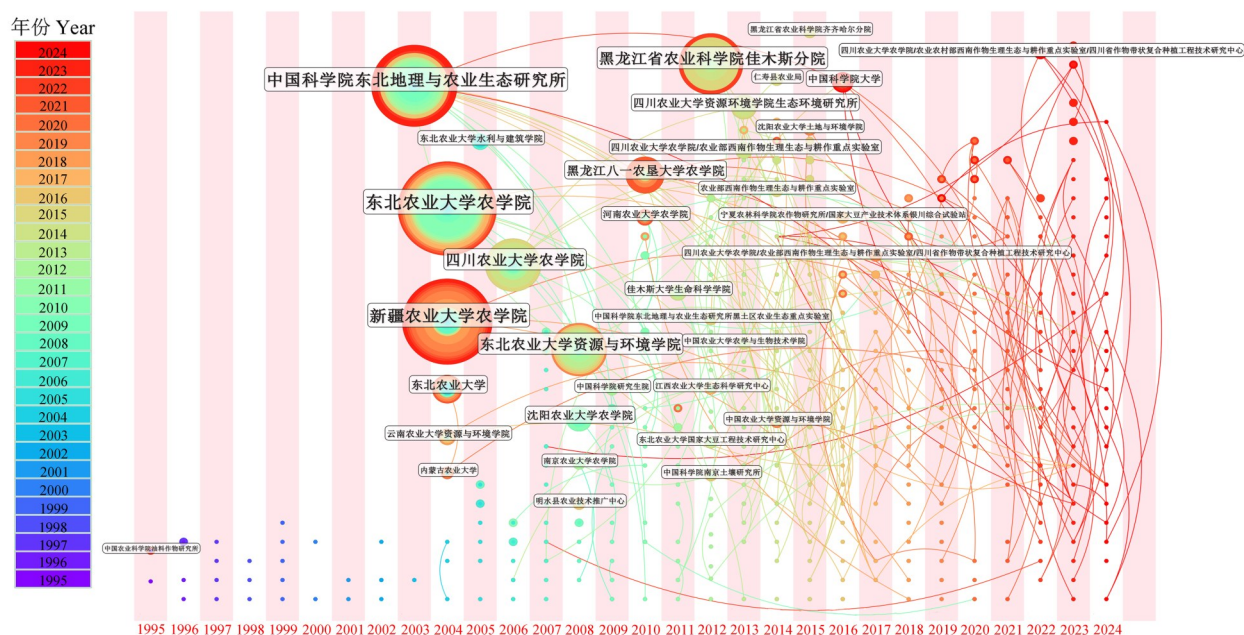
表5和表6分别为发文量排名前10的中文和英文文献作者。由表5可知,中文文献发文量较高的前5位作者有3位均来自四川农业大学,他们之间的合作关系密切,总发文量占据排名前10作者发文总量的40.78%;东北农业大学的2位作者龚振平和马春梅也表现出紧密合作,并与黑龙江省畜牧兽医局的祖伟有一定合作;发文量排名前10的作者首次发文时间均在2003年之后,与图1所示的发文量增长趋势相吻合。

由表6可知,英文文献发文量前6的作者均来自四川农业大学,其中杨文钰的发文量最高;部分作者在中、英文期刊发文量均位列前10位,如杨文钰和雍太文等;英文文献发文量前10的作者的发文时间则均在2012年之后,与图1所示的大豆氮肥管理英文文献发表量增长趋势相吻合。

2.3 中国大豆氮肥管理研究热点及趋势

2.3.1 研究热点

关键词共被引分析为研究领域主题提供了直观



图中节点大小代表发文量的高低;节点颜色的变化代表时间演变;连线粗细表示共现关系的强弱。下同。

In the figure, the size of the node represents the number of the articles published. The change of the color of the node represents the evolution over time. The thickness of the connection line indicates the strength of the co-occurrence relationship. The same below.

图2 1995—2024年中国大豆氮肥管理研究中文文献发表机构时间区图谱

Fig. 2 Time zone map of Chinese literature publishing institutions on soybean nitrogen fertilizer management research in China from 1995 to 2024

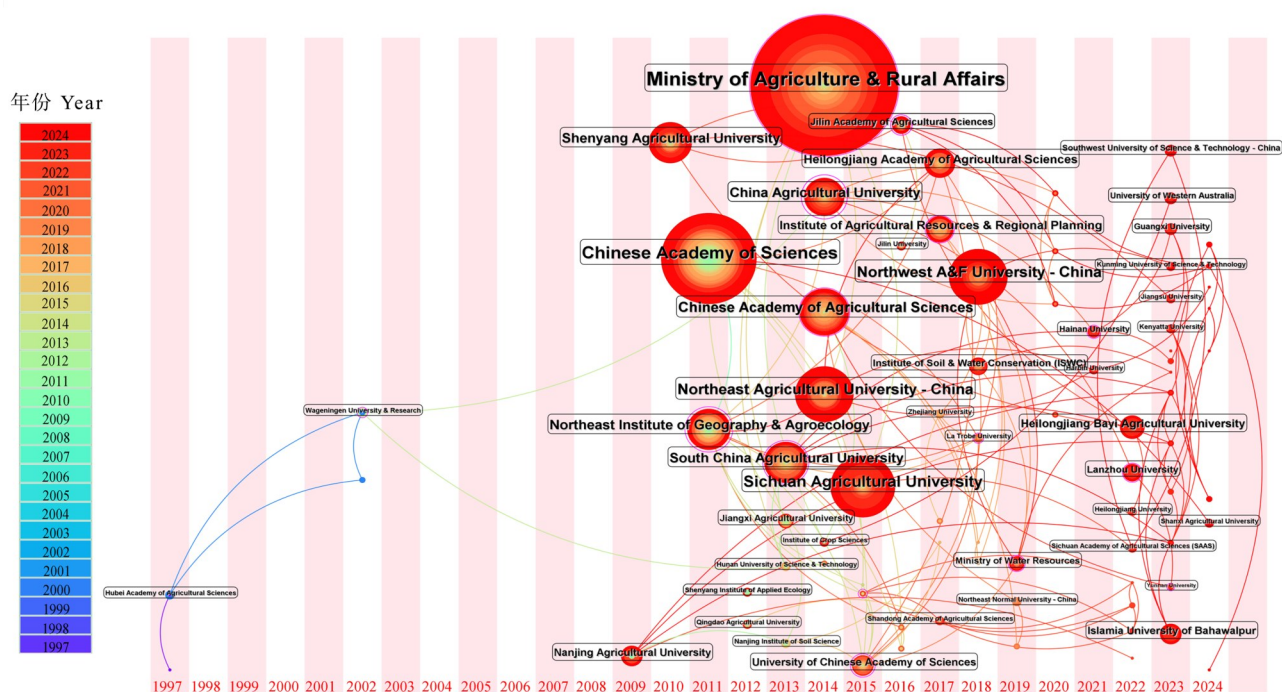


图3 1995—2024年中国大豆氮肥管理研究英文文献发表机构时间区图谱

Fig. 3 Time zone map of English literature publishing institutions on soybean nitrogen fertilizer management research in China from 1995 to 2024

表5 1995—2024年中国大豆氮肥管理研究中文文献发文量排名前10的作者

Table 5 Top 10 authors of Chinese literature on soybean nitrogen fertilizer management research in China from 1995 to 2024

排序 Sort	作者 Author	发文量/篇 Number of papers	首次发文年份 Time of first publication	合作作者数量 Number of co-authors	所属机构 Institution
1	杨文钰	27	2006	27	四川农业大学
2	雍太文	21	2009	21	四川农业大学
3	韩晓增	20	2005	20	中国科学院东北地理与农业生态研究所
4	王小春	14	2009	14	四川农业大学
5	龚振平	13	2004	13	东北农业大学
6	严君	13	2009	13	中国科学院大学
7	马春梅	12	2004	12	东北农业大学
8	徐文修	11	2016	11	新疆农业大学
9	章建新	11	2004	11	新疆农业大学
10	祖伟	10	2005	10	黑龙江省畜牧兽医局

表6 1995—2024年中国大豆氮肥管理研究英文文献发文量排名前10的作者

Table 6 Top 10 authors of English literature on soybean nitrogen fertilizer management research in China from 1995 to 2024

排序 Sort	作者 Author	发文量/篇 Number of papers	首次发文时间 Time of first publication	合作作者数量 Number of co-authors	所属机构 Institution
1	Yang Wenyu	16	2015	15	四川农业大学
2	Yong Taiwen	15	2015	14	四川农业大学
3	Chen Ping	12	2017	11	四川农业大学
4	Wang Xiaochun	12	2015	11	四川农业大学
5	Yang Feng	9	2015	6	四川农业大学
6	Luo Kai	9	2022	9	四川农业大学
7	Du Qing	8	2017	5	中国科学院
8	Wang Jianwu	8	2013	8	华南农业大学
9	Ma Chunmei	7	2017	7	东北农业大学
10	Liu Weiguo	6	2015	6	新疆大学

视角。图4为基于1995—2024年大豆氮肥管理研究中文文献关键词的共现网络图,该网络图包含451个节点和681条连线,密度为0.0067。“产量”是出现频率最高的关键词,共出现182次,在其之后为“氮肥”“根瘤菌”等。“根瘤菌”(0.46)、“氮肥”(0.38)、“品质”(0.36)、“减氮”(0.29)和“产量”(0.28)等关键词具有较高中介中心性,凸显了其在网络中的核心地位。

图5为1995—2024年大豆氮肥管理研究英文文献关键词共现网络图,该网络图共有392个节点和1084个连线组成,网络密度为0.0141。由图5可知,我国对大豆氮肥管理的研究主要从土壤肥力、间作和根瘤固氮等方面展开。“growth”(生长发育)是

出现次数最高的关键词,共出现30次,“yield”(产量)、“maize”(玉米)、“wheat”(小麦)、“productivity”(生产力)、“soil”(土壤)、“management”(管理措施)、“fixation”(固定作用)、“carbon”(碳)和“fertilizer”(施肥)的出现频次也相对较高。“management”(管理措施,0.31)、“fertilizer”(施肥,0.29)、“fixation”(固定作用,0.17)、“accumulation”(积累,0.17)和“N₂O emissions”(N₂O排放,0.16)等关键词具有较高的中介中心性。

2.3.2 研究趋势

关键词突现分析能有效揭示不同时期大豆氮肥管理研究的热点及其变化趋势。通过CiteSpace

表7 1995—2024年中国大豆氮肥管理研究中文文献关键词突现表

Table 7 Keywords of Chinese literature on soybean nitrogen fertilizer management research in China from 1995 to 2024

排序 Sort	关键词 Keyword	年份 Year	突现强度 Burst strength	开始年份 Beginning year	结束年份 Ending year	1995—2024年
1	品质	1995	3.48	1995	2009	
2	固氮	1996	2.43	1996	2002	
3	菜用大豆	2001	2.71	2001	2009	
4	氮素	2004	2.46	2004	2015	
5	施肥	1999	3.03	2007	2010	
6	根瘤固氮	2008	2.22	2008	2011	
7	氮素积累	2009	2.26	2009	2016	
8	减量施氮	2014	3.65	2014	2020	
9	施氮量	2005	2.69	2017	2018	
10	光合特性	2010	2.18	2018	2022	
11	根瘤菌	1998	2.53	2020	2021	
12	间作	2004	3.54	2021	2024	
13	种植密度	2008	3.22	2021	2022	
14	农艺性状	2008	2.18	2022	2024	

这一时期的研究通过不同施氮水平探索了大豆品种对氮肥的响应差异,为后续的氮肥管理提供了重要依据。2008—2020年,研究热点逐渐转向大豆的固氮机制,“根瘤固氮”“氮素积累”和“根瘤菌”等关键词突现,此阶段的研究深入探索了大豆根瘤固氮能力在不同施氮方式下的变化情况,揭示了氮肥施用下大豆根瘤的响应机制,为大豆的氮素高效利用提供了新思路。自2021年开始,研究焦点进一步拓展,涉及“间作”“种植密度”和“农艺性状”等关键词,这些研究通过对比不同间作模式根际的边际效应和施氮方案对大豆农艺性状的影响,优化了大豆的种植方式和施肥策略,旨在提高大豆产量和改善品质。

利用 CiteSpace 软件的突现探测功能筛选出的 14 个大豆氮肥管理研究领域中具有显著突现性的英文关键词如表 8 所示。“wheat”(小麦)以 3.10 的突现强度位居第 1,“maize”(玉米)和“rice”(水稻)分别位列第 2 和第 3 位,其突现强度分别为 2.46 和 2.29。从时间维度来看,1997—2010 年,“plant”(植株)和“dry matter”(干物质)成为突现关键词,这一时期的文献主要聚焦于不同品种大豆在不同施肥量下的产量变化,探讨产量提升的主要驱动力。2011—2020 年,研究领域显著拓宽,新增了“rice”(水稻)、

“growth”(生长发育)等多个突现性关键词,这一阶段,研究者们开始关注大豆根际微生物的特性,发现大豆根瘤菌表型对根际微生物群落的影响较氮肥更为显著。此外,为追求环境效益,研究者们通过调整施氮量和种植模式,综合评估了光合作用指标和系统生产力指数等多项指标。2021 年起“productivity”(生产力)、“maize”(玉米)等关键词突现,此阶段研究者们探索通过改善光热资源、施肥方式和种植方式等途径提高大豆产量。

3 讨 论

3.1 大豆氮肥管理的研究态势

我国大豆种植面积相对有限,大部分集中在东北地区 and 西南地区,因此,最初针对大豆氮肥管理研究的团队以东北农业大学马春梅和四川农业大学杨文钰为核心,形成了南北协同的区域性研究范式。马春梅等^[31]的研究揭示了氮肥不同施用方式是提高大豆产量的重要因素;杨文钰等^[32]的研究强调玉米大豆复合种植下,氮肥管理可以有效提高产量,保障粮食安全。他们的研究成果为我国大豆氮肥管理奠定了坚实基础。随着研究的不断深入,我国氮肥管理相关中文文献从 1995 年的 4 篇增至 2024 年 74 篇,英文文献则从 0 篇提高到 44 篇,这一

表 8 1997—2024 年中国大豆氮肥管理研究英文文献关键词突现表

Table 8 Keywords of English literature on soybean nitrogen fertilizer management research in China from 1997 to 2024						
排序 Sort	关键词 Keyword	年份 Year	突现强度 Burst strength	开始年份 Beginning year	结束年份 Ending year	1997—2024 年
1	plant	1997	1.92	1997	2009	
2	dry matter	2010	1.75	2010	2014	
3	rice	2016	2.29	2016	2017	
4	growth	2013	2.00	2017	2018	
5	food security	2017	1.79	2017	2018	
6	bacterial community	2016	1.71	2018	2021	
7	fertilization	2014	1.98	2019	2021	
8	wheat	2017	3.10	2020	2024	
9	microbial community	2015	2.07	2020	2021	
10	responses	2009	1.71	2020	2024	
11	productivity	2013	1.80	2021	2024	
12	maize	2012	2.46	2022	2024	
13	use efficiency	2011	1.79	2022	2024	
14	yield	2018	1.74	2022	2024	

增长趋势体现了我国在大豆氮肥管理领域的持续进步,也反映了国际学术界的认可度不断提高。

3.2 大豆氮肥管理的研究现状

大豆氮肥管理的研究呈现出由氮肥输入到固氮机制,再到种植方式、施肥方式和环境响应拓展的清晰脉络。每一阶段的研究都建立在前一阶段的基础上,逐步深入并拓展了研究的广度和深度。这些研究对大豆的氮素管理有了更深入的理论基础,也为大豆的可持续生产提供了科学依据。

间(套)作是我国一种具有悠久历史的集约化种植模式,通过作物高矮或耐阴喜光程度的互补特征进行合理搭配,可实现资源的高效利用与农田生产力提升。近年来在各间套作模式下(大豆-玉米、核桃-大豆、谷子-大豆等)氮肥管理对土壤氮素利用率^[24]、环境效益^[33]和土壤养分^[34]提升方面表现出显著优势。大豆与玉米的间套作作为研究的重点领域,通过大田和盆栽试验,从光效能特征、土壤养分循环、植株养分吸收及根系交互等方面,系统揭示了间作模式资源互补的生理生态学基础,并明确了该模式的增产机理^[26,29]。这些成果为资源集约型农业生产和轻简化栽培提供了宝贵的研究范例。大豆间套作虽然在资源利用和生态效益方面优势显著,但需要注意的是该模式在实际推广中仍面临田

间管理复杂、人工成本高、机械适配度低等问题^[35]。目前,农业机械系统主要针对单一作物设计,难以满足间套作模式的机械化作业需求,且该模式对病虫害防治等田间管理上提高了技术门槛。为突破这些瓶颈,未来研究亟需加强专用农机装备研发,推动农机与农艺的深度融合,从而为该模式的规模化推广提供有力支撑^[36]。在大豆单作及轮作体系下,根瘤固氮作用机制^[37]、土壤中氮素利用效率^[38]和土壤微生物群落^[39]等方面对氮肥管理措施的响应取得了显著进展。基于传感器技术和大模型网络的智能氮肥决策系统也已开发^[40-41]。在实际农业生产中,可通过不同的农艺措施(如根瘤菌肥配施^[42]、生物炭配施^[43]和塑料地膜覆盖^[44])和耕作制度(单作和间套作等)等方法比较其成本效益与环境效益,从而优化氮素利用模型,提高氮素利用效率,并为生态补偿政策的设计与制定提供科学依据。

大豆氮肥管理在提高产量、优化种植结构及缓解环境压力方面的潜力极高。为推进大豆氮肥管理走向成熟,科研人员正不断从种植密度^[45]、生产配置^[44]和施肥措施^[30]等角度结合氮肥进行创新性研究。这些研究不仅关注大豆的产量,还逐渐拓展到大豆根瘤及根瘤菌^[46]、氮素利用率^[39]、土壤微生

物群落^[47]和光合特性^[48]等领域。多学科交叉研究能够弥补学科之间的空白,为领域创新提供更大空间^[49]。从国内外发文期刊、文章被引现状及关键词的演变可知,大豆氮肥管理的研究从对单一产量关注向多维度、跨学科的研究转变,不断推动技术成果的融合,为精准农业提供更加全面的理论支撑。

3.3 大豆氮肥管理研究的发展趋势

面向大豆自给率提升和国家“双碳”战略的需求,未来研究需从3个方面入手:1)构建多尺度氮素运移模型,量化氮素损失路径;2)通过分子设计育种与微生物组调控协同提升大豆间(套)作的氮素竞争互补效应;3)建立跨生态区的氮肥减施阈值动态图谱,平衡产量目标与环境容量。以上问题的突破将推动大豆减氮增效从经验驱动向机理驱动转型,为“藏粮于技”战略提供可量化的技术解决方案。

4 结 论

本研究基于CNKI数据库和WOS核心数据库,借助CiteSpace软件对1995—2024年中国大豆氮肥管理的研究文献进行可视化分析,主要得出以下结论:1)我国对大豆氮肥管理领域的研究热度和政策相关度较高,且整体呈现上升趋势,研究内容也由单一学科农学向多学科交叉发展;2)当前研究热点集中在大豆间套作、根际微生物、根瘤、氮素利用率以及环境效应等方面;3)我国大豆氮肥管理的主要研究机构未来亟需加强跨地区、跨机构合作,以促进知识共享和技术交流,构建全面的合作关系网;4)未来应进一步聚焦大豆施肥方式优化与高效种植模式的拓展,深化根瘤菌接种技术改进、种植体系环境效益提升、根际微生物群落精准调控以及土壤氮素转移路径的分子机制研究,同时,积极整合大数据平台、数值模拟模型构建以及多学科交叉合作,加速大豆产业绿色低碳转型,为保障国家粮食安全和农业可持续发展提供科技支撑。

参考文献 References

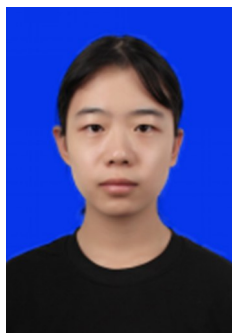
- [1] 宋敏, 张安录. 大食物观视阈下的耕地利用转型: 现实挑战、理论逻辑与实现路径[J]. 中国土地科学, 2023, 37(8): 31-41
Song M, Zhang A L. Cultivated land use transition from the “greater food” perspective: Realistic challenges, theoretical logic and implementation paths[J]. *China Land Science*, 2023, 37(8): 31-41 (in Chinese)
- [2] 吴建塞, 胡佳璇, 邢丽玮, 沈辰, 迟亮, 张晶, 刘继芳. 中国与主要大豆进口来源国价格关联和政策应对[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(4): 227-237

- Wu J Z, Hu J X, Xing L W, Shen C, Chi L, Zhang J, Liu J F. Spatial dependence of soybean price and policy responses between China and major soybean import countries[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(4): 227-237 (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国农业农村部. 十四五“全国农业农村科技发展规划[EB/OL]. [2025-03-10]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/07/5666862/files/175b7109359a41ca9d1e03ed0f0fd46c.pdf>
Ministry of agriculture and rural affairs of the people's republic of China. Notice on issuing the “14th Five-Year Plan” for agricultural and rural science and technology development nationwide[EB/OL]. [2025-03-10]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/07/5666862/files/175b7109359a41ca9d1e03ed0f0fd46c.pdf> (in Chinese)
- [4] 何秀荣. 技术进步视角的大豆竞争力比较研究[J]. 河北学刊, 2024, 44(3): 135-146
He X R. Comparative study on the competitiveness of soybeans from the perspective of technological progress[J]. *Hebei Academic Journal*, 2024, 44(3): 135-146 (in Chinese)
- [5] 李治, 何小田. 中国大豆生产时空演变格局的影响因素与优化对策研究[J]. 大豆科学, 2024, 43(6): 782-792
Li Z, He X T. Influencing factors and optimization countermeasures of spatial and temporal evolution patterns of soybean production in China[J]. *Soybean Science*, 2024, 43(6): 782-792 (in Chinese)
- [6] 刘丽君, 孙晓妹, 刘艳, 王全富, 祖伟. 氮肥对大豆结瘤及叶片氮素积累的影响[J]. 东北农业大学学报, 2005, 36(2): 133-137
Liu L J, Sun C S, Liu Y, Wang Q F, Zu W. Effects of nitrogen on nodule-forming and nitrogen concentration in soybean leaves[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2005, 36(2): 133-137 (in Chinese)
- [7] Salvagiotti F, Cassman K G, Specht J E, Walters D T, Weiss A, Dobermann A. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review[J]. *Field Crops Research*, 2008, 108(1): 1-13
- [8] 房彦飞, 徐文修, 符小文, 唐江华, 张永杰, 杜孝敬, 安崇霄, 张娜, 廖思鹏. 麦-豆周年不同施氮组合对复播大豆土壤肥力及周年产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(6): 64-72
Fang Y F, Xu W X, Fu X W, Tang J H, Zhang Y J, Du X J, An C X, Zhang N, Liao S P. Effects of different nitrogen application combinations of wheat and beans on soil fertility and annual yield[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(6): 64-72 (in Chinese)
- [9] Gao B, Ju X T, Su F, Meng Q F, Oenema O, Christie P, Chen X P, Zhang F S. Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: A two-year field study[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 112-124
- [10] 孙建好, 赵建华, 李伟琦, 吴科生, 陈亮之, 杨新强, 何旭刚, 郑浩飞. 施氮对玉米|大豆间作产量稳定性的影响[J]. 中国生态农业学报: 中英文, 2025, 33(6): 1138-1145
Sun J H, Zhao J H, Li W Q, Wu K S, Chen L Z, Yang X Q, He X G, Zheng H F. The effect of nitrogen application on yield stability of maize || soybean intercropping systems[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025, 33(6): 1138-1145 (in Chinese)
- [11] Lyu X C, Li M, Li X, Li S, Yan C, Ma C M, Gong Z P. Assessing the systematic effects of the concentration of nitrogen supplied to dual-root systems of soybean plants on nodulation and nitrogen fixation[J]. *Agronomy*, 2020, 10(6): 763
- [12] 刘思博, 殷国梅, 冀超, 丁海君, 薛艳林, 孙林, 阿拉腾布拉格, 高博, 燕茹, 吴昊, 刘永录. 不同浓度氮肥对首年紫花苜蓿产量及其根际土壤真菌群落结构的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(1): 1-12
Liu S B, Yin G M, Ji C, Ding H J, Xue Y L, Sun L, A L, Gao B, Yan R, Wu H, Liu Y L. The influence of nitrogen fertilizer application rate on yield of Medicago sativa and the rhizosphere soil fungal diversity[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(1): 1-12 (in Chinese)
- [13] 董守坤, 龚振平, 祖伟. 氮素营养水平对大豆氮素积累及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 65-70

- Dong S K, Gong Z P, Zu W. Effects of nitrogen nutrition levels on N-accumulation and yields of soybean [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1): 65-70 (in Chinese)
- [14] 王晓伟, 闫超, 万涛, 马春梅, 龚振平, 董守坤. 施氮水平对大豆光合作用及产量的影响[J]. 作物杂志, 2011(2): 49-52
- Wang X W, Yan C, Wan T, Ma C M, Gong Z P, Dong S K. Effects of nitrogen application on yield and photosynthesis in soybean [J]. *Crops*, 2011(2): 49-52 (in Chinese)
- [15] 贾文静, 王晨瑜, 王仕杰, 邢雁捷, 赵亮茹, 任广鑫. 减量施肥对玉米-大豆间作系统产量和氮素利用的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35(12): 3435-3443
- Jia W J, Wang C Y, Wang S J, Xing Y J, Zhao L R, Ren G X. Effects of fertilizer reduction on yield and nitrogen utilization in maize-soybean intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(12): 3435-3443 (in Chinese)
- [16] 杨栗恒, 尚磊, 王孟雪, 张云贵, 张敏, 王鹏. 秸秆还田与施氮水平对大豆氮素吸收分配及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2025(2): 164-173
- Yang L H, Shang L, Wang M X, Zhang Y G, Zhang M, Wang P. Effects of straw returning and nitrogen application levels on nitrogen absorption and distribution and yield of soybean[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2025(2): 164-173 (in Chinese)
- [17] 闫艳红, 杨文钰, 张新全, 陈小林, 陈忠群. 施氮量对套作大豆花后光合特性、干物质积累及产量的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 233-238
- Yan Y H, Yang W Y, Zhang X Q, Chen X L, Chen Z Q. Effects of different nitrogen levels on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and yield of relay strip intercropping Glycine max after blooming[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(3): 233-238 (in Chinese)
- [18] 周新雨, 王天舒, 任利东, 王丽, 于淑婷, 王晶, 宋爱英, 尧水红. 种植密度和氮施用时期对不同大豆品种农艺性状和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(4): 105-113
- Zhou X Y, Wang T S, Ren L D, Wang L, Yu S T, Wang J, Song A Y, Yao S H. Effects of planting density and nitrogen application period on agronomic traits and yield of different soybean cultivars[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(4): 105-113 (in Chinese)
- [19] 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 苏本营, 宋春, 杨峰, 王小春, 杨文钰. 减量施肥对玉米-大豆套作体系中作物产量及养分吸收利用的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 474-482
- Yong T W, Liu X M, Liu W Y, Su B Y, Song C, Yang F, Wang X C, Yang W Y. Effects of reduced N application rate on yield and nutrient uptake and utilization in maize-soybean relay strip intercropping system [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 474-482 (in Chinese)
- [20] 李颖. 中国文献计量学实用研究的新进展[J]. 现代情报, 2005, 25(4): 168-170
- Li Y. New advances in practical research of Chinese bibliometrics [J]. *Journal of Modern Information*, 2005, 25(4): 168-170 (in Chinese)
- [21] 李杰, 陈超美. *CiteSpace: 科技文本挖掘及可视化*[M]. 第2版. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2017
- Li J, Chen C M. *CiteSpace: Text Mining and Visualization Scientific Literature*[M]. 2nd ed. Beijing: Capital University of Economics & Business Press, 2017 (in Chinese)
- [22] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 严君, 李晓慧. 施氮对大豆根系形态和氮素吸收积累的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1069-1073
- Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F, Yan J, Li X H. Root morphology and nitrogen accumulation in soybean (*Glycine max* L.) under different nitrogen application levels[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(6): 1069-1073 (in Chinese)
- [23] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 严君, 李晓慧. 施氮对大豆根瘤生长和结瘤固氮的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(2): 176-179
- Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F, Yan J, Li X H. Nodule growth, nodulation and nitrogen fixation in soybean (*Glycine max* L.) as affected by nitrogen application [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2009, 24(2): 176-179 (in Chinese)
- [24] 李少明, 赵平, 范茂攀, 高世昌, 郑毅. 玉米大豆间作条件下氮素养分吸收利用研究[J]. 云南农业大学学报, 2004, 19(5): 572-574
- Li S M, Zhao P, Fan M P, Gao S C, Zheng Y. Nitrogen uptake and utilization in intercropping system of maize and soybean [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2004, 19(5): 572-574 (in Chinese)
- [25] 甘银波, 陈静. 大豆不同生长阶段施用氮肥对生长、结瘤及产量的影响[J]. 大豆科学, 1997, 16(2): 125-130
- Gan Y B, Chen J. Effects of n appltcatation at dtfferent growth stages on growth nodulation and yield of soybeans [J]. *Soybean Science*, 1997, 16(2): 125-130 (in Chinese)
- [26] Xu Z, Li C J, Zhang C C, Yu Y, van der Werf W, Zhang F S. Intercropping maize and soybean increases efficiency of land and fertilizer nitrogen use; A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2020, 246: 107661
- [27] Zhang X, Huang G, Bian X, Zhao Q. Effects of root interaction and nitrogen fertilization on the chlorophyll content, root activity, photosynthetic characteristics of intercropped soybean and microbial quantity in the rhizosphere[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2013, 59(2): 80-88
- [28] Chen P, Du Q, Liu X M, Zhou L, Hussain S, Lei L, Song C, Wang X C, Liu W G, Yang F, Shu K, Liu J, Du J B, Yang W Y, Yong T W. Effects of reduced nitrogen inputs on crop yield and nitrogen use efficiency in a long-term maize-soybean relay strip intercropping system[J]. *PLoS One*, 2017, 12(9): e0184503.
- [29] Chen P, Song C, Liu X M, Zhou L, Yang H, Zhang X N, Zhou Y, Du Q, Pang T, Fu Z D, Wang X C, Liu W G, Yang F, Shu K, Du J B, Liu J, Yang W Y, Yong T W. Yield advantage and nitrogen fate in an additive maize-soybean relay intercropping system[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 987-999
- [30] Akhtar K, Wang W Y, Ren G X, Khan A, Feng Y Z, Yang G H, Wang H Y. Integrated use of straw mulch with nitrogen fertilizer improves soil functionality and soybean production[J]. *Environment International*, 2019, 132: 105092
- [31] 马春梅, 唐远征, 龚振平, 景玉良, 董守坤, 孙太靖, 祖伟. 不同施氮量对大豆吸收化肥氮效率的影响[J]. 大豆科学, 2005, 24(1): 34-37
- Ma C M, Tang Y Z, Gong Z P, Jing Y L, Dong S K, Sun T J, Zu W. The influence on different nitrogen levels to the nitrogen absorption rate in soybean[J]. *Soybean Science*, 2005, 24(1): 34-37 (in Chinese)
- [32] 杨文钰, 杨峰. 发展玉米带状复合种植, 保障国家粮食安全[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3748-3750
- Yang W Y, Yang F. Developing maize-soybean strip intercropping for demand security of national food[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21): 3748-3750 (in Chinese)
- [33] Qiao Y F, Miao S J, Han X Z, You M Y, Zhu X, Horwath W R. The effect of fertilizer practices on N balance and global warming potential of maize-soybean-wheat rotations in Northeastern China[J]. *Field Crops Research*, 2014, 161: 98-106
- [34] 曹胜, 曾斌, 邓素枫, 龚碧涯, 张文, 罗赛男, 杨水芝. 柑橘大豆间作对土壤团聚体结构及其有机碳、氮分布的影响[J]. 土壤, 2024, 56(4): 735-741
- Cao S, Zeng B, Deng S F, Gong B Y, Zhang W, Luo S N, Yang S Z. Effects of *Citrus* and soybean intercropping on soil aggregate structure, organic carbon and nitrogen distribution[J]. *Soils*, 2024, 56(4): 735-741 (in Chinese)
- [35] 杨钰莹, 司伟. 大豆玉米带状复合种植: 技术模式、成本收益与补贴政策[J]. 农业经济问题, 2023, 44(1): 49-63
- Yang Y Y, Si W. Maize-soybean relay strip intercropping system: Technical model, cost-benefit and subsidy policy[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2023, 44(1): 49-63 (in Chinese)
- [36] Ling H, Wu T F, Wu Y H, Liu Z, Zhang L H, Lv X R. Optimization of motion strategy for a micro multi-functional chassis based on RBF neural network in intercropping mode[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, 235: 110316
- [37] Lyu X C, Wang X L, Xu C, Ma C M, Cao L, Gong Z P. Effects of the concentrations of nitrogen supplied from both or one-half of the dual-root

- system on the nitrogen fixation of soybean nodules and the distribution of absorbed nitrogen from roots [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(3): 4786-4795
- [38] 周丽, 付智丹, 杜青, 陈平, 杨文钰, 雍太文. 减量施氮对玉米/大豆套作系统中作物氮素吸收及土壤氨氧化与反硝化细菌多样性的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(6): 1076-1087
- Zhou L, Fu Z D, Du Q, Chen P, Yang W Y, Yong T W. Effects of reduced N fertilization on crop N uptake, soil ammonia oxidation and denitrification bacteria diversity in maize/soybean relay strip intercropping system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(6): 1076-1087 (in Chinese)
- [39] Zeng H L, Yu L L, Liu P, Wang Z G, Chen Y, Wang J W. Nitrogen fertilization has a stronger influence than cropping pattern on AMF community in maize/soybean strip intercropping systems[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 167: 104034
- [40] 唐汉, 王金武, 徐常塑, 周文琪, 王金峰, 王秀. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(4): 1-19
- Tang H, Wang J W, Xu C S, Zhou W Q, Wang J F, Wang X. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(4): 1-19 (in Chinese)
- [41] 王小兵, 唐文凤, 梁栋, 孙锐, 李涛, 贾昕为. 数据要素驱动农业高质量发展的管理机制研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2024, 45(10): 59-64
- Wang X B, Tang W F, Liang D, Sun R, Li T, Jia X W. Data elements drive high-quality development of agriculture[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2024, 45(10): 59-64 (in Chinese)
- [42] 朱海荣. 减氮条件下增施根瘤菌肥和叶面液肥对大豆生长发育和产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(1): 60-65
- Zhu H R. Effects of Rhizobium fertilizer and foliar liquid fertilizer on growth and yield of soybean under reduced nitrogen condition [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(1): 60-65 (in Chinese)
- [43] Zhang C, Miao Y L, Malghani S, Liu G D, Liao X L. Biochar combined with different nitrogen fertilization rates increased crop yield and greenhouse gas emissions in a rapeseed-soybean rotation system[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118915
- [44] 龙大勇, 王小利, 段建军, 何进, 杨宏伟, 徐彬. 覆膜和施肥对玉米大豆间作体系作物氮素吸收和产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(12): 13-20
- Long D Y, Wang X L, Duan J J, He J, Yang H W, Xu B. Effects of plastic film mulching and fertilization on crop nitrogen uptake and yield in maize-soybean intercropping system [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(12): 13-20 (in Chinese)
- [45] 张彦军, 王兴荣, 李玥, 李永生, 李峰, 苟作旺, 张恺东, 祁旭升. 施氮量和种植密度对甘肃省不同生态区大豆农艺性状及产量的影响[J]. *甘肃农业科技*, 2021, 52(7): 14-23
- Zhang Y J, Wang X R, Li Y, Li Y S, Li F, Gou Z W, Zhang K D, Qi X S. Effects of nitrogen and planting density on agronomic characters and yield of soybean under different ecological areas in Gansu Province [J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2021, 52(7): 14-23 (in Chinese)
- [46] 周长征, 田中艳, 李剑英, 杨柳, 吴耀坤. 施氮肥与接种根瘤菌对大豆品种抗线虫8号产量的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2015(1): 29-31
- Zhou C J, Tian Z Y, Li J Y, Yang L, Wu Y K. Effect of nitrogen and *Rhizobium* inoculation on yield of soybean variety Kangxian 8 [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2015(1): 29-31 (in Chinese)
- [47] Wang H, Gu C T, Liu X F, Yang C W, Li W B, Wang S D. Impact of soybean nodulation phenotypes and nitrogen fertilizer levels on the rhizosphere bacterial community [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 750
- [48] 崔文芳, 秦德志, 陈静, 刘剑, 严海鸥, 秦丽. 玉米大豆不同间作系统光合特性与产量边际效应[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(8): 309-319
- Cui W F, Qin D Z, Chen J, Liu J, Yan H O, Qin L. Marginal effects of photosynthetic characteristics and yield in maize and soybean intercropping systems [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(8): 309-319 (in Chinese)
- [49] 张贝贝, 尹西明, 余江. 知识密集型产业的多学科交叉创新机制研究[J]. *科学学研究*, 2024, 42(2): 415-426
- Zhang B B, Yin X M, Yu J. Research on multidisciplinary innovation mechanism of knowledge intensive industry [J]. *Studies in Science of Science*, 2024, 42(2): 415-426 (in Chinese)

责任编辑: 申青苗



第一作者简介: 任文欣, 河北农业大学资源与环境科学学院农业资源与环境专业硕士研究生。参与河北省现代农业产业技术体系建设专项(HBCT2024060207)。荣获2024—2025年度校级研究生三等奖学业奖学金。



通讯作者简介: 付鑫, 博士, 河北农业大学国土资源学院副教授, 硕士生导师。主要从事农业生态系统土壤碳氮循环研究。主持国家自然科学基金、国家重点研发计划、河北省自然科学基金等项目8项; 在国内外学术期刊共发表论文40余篇。