

田菁研究进展的文献计量分析

薄文昊^{1,2} 吴倩倩³ 吕梦真^{1,2} 汪海珍^{1,2*}

(1. 浙江省全省农业资源与环境重点实验室,杭州 310058; 2. 浙江大学水土资源与环境研究所,杭州 310058; 3. 乐清市农业农村发展中心,乐清 325600)

摘要 为了更加系统地了解国内外田菁(*Sesbania*)研究现状,该文利用Citespace、VOSviewer、HistCite等文献计量工具,系统分析了中国知网检索平台(1958—2024年)与Web of Science核心合集数据库(1928—2024年)的相关文献。结果表明:(1)田菁研究全球年发文量呈现增长态势,2016—2024年中国发文占比显著增多;中、英文研究均集中于农业科学相关领域,发文期刊主要包括《中国土壤与肥料》《Weed Technology》《Indian Journal of Agricultural Sciences》等;崔元臣和Holsters M分别是该领域中、英文发文最多的研究学者。(2)田菁关键词共现网络主要分为共生固氮、农业绿肥、畜禽饲养、生物防治、田菁胶5类。(3)近年来,田菁共生固氮研究更加侧重于基因层面,扩大根瘤菌宿主范围实现非豆科植物固氮已成为研究热点之一;在盐碱土改良应用研究中,利用微生物介导的田菁耐盐性增强策略受到关注;在畜禽饲养、生物防治方面,国外研究发文虽比国内多,但中国已在田菁等饲草遗传转化技术领域取得突破,建立了相应基因编辑体系;田菁胶研究的最新进展主要侧重于提升改性工艺、扩大其性能和使用范围。

关键词 田菁;固氮;绿肥;田菁胶;计量分析

中图分类号:S551 文献标志码:A doi:10.7525/j.issn.1673-5102.2026.01.004

Bibliometric Analysis of Research Progress on *Sesbania*

BO Wenhao^{1,2} WU Qianqian³ LÜ Mengzhen^{1,2} WANG Haizhen^{1,2*}

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Hangzhou 310058; 2. Institute of Soil and Water Resources and Environmental Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058; 3. Agricultural and Rural Development Center of Yueqing, Yueqing 325600)

Abstract To systematically understand the current research status of *Sesbania* in China and abroad, this paper utilized bibliometric tools such as Citespace, VOSviewer, and HistCite to systematically analyze the relevant papers from the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) search platform (1958—2024) and the Web of Science Core Collection database (1928—2024). Results indicated: (1) Global annual publication output on *Sesbania* research has shown an increasing trend, with Chinese contributions significantly increasing from 2016 to 2024. Both Chinese and English studies concentrated on the fields related to agricultural science, with key journals including *Soil and Fertilizer Sciences in China*, *Weed Technology* and *Indian Journal of Agricultural Sciences*, etc. Cui Yuanchen and Holsters M were the top contributors in Chinese and English publications, respectively. (2) The co-occurrence network of *Sesbania* keywords were mainly classified into five categories: symbiotic nitrogen fixation, agricultural green manure, livestock feeding, biological control, and sesbania gum. (3) Recent studies have increasingly focused on gene-level mechanisms in symbiotic nitrogen fixation, expanding the host range of rhizobia for nitrogen fixation of non-legumes has become one of the research hotspots. In saline-alkali soil remediation applications, microbial-mediated strategies to enhance salt tolerance for *Sesbania* have gained attention. Although there are more research papers published abroad in livestock feeding and biological control, China has achieved significant advancements in genetic transformation technologies for forage crops like *Sesbania*, with establishing corresponding gene-editing systems. Recent

基金项目:浙江省科技计划项目(2023C02021)。

第一作者简介:薄文昊(2000—),女,硕士研究生,主要从事土壤学研究。

* 通信作者:E-mail:wanghz@zju.edu.cn。

收稿日期:2025年9月8日。

advances in sesbania gum research primarily focused on improving the modification processes to enhance its performance and application scope.

Key words *Sesbania*; nitrogen fixation; green manure; sesbania gum; bibliometric analysis

田菁属(*Sesbania*)植物属于豆科(Fabaceae)植物,广泛分布于亚洲热带地区(尤其集中在印度、中国和泰国)及非洲,属内植物种类多达60余种,不同品种的田菁属植物因其特性各异而在用途上各有不同,这也使整个田菁属具有广泛使用前景^[1-3]。如田菁(*S. cannabina*)、长喙田菁(*S. rostrata*)因抗盐碱能力良好且能与根瘤菌形成互利共生关系,可转化大气中的氮、增加土壤中的腐殖质含量并降低盐分含量等,被广泛用作绿肥,且可作为改善盐碱地的潜在生物措施^[4-6]。与根瘤菌共生还可以显著提高田菁属植物的生物量、叶绿素含量、光合速率、超氧化物歧化酶活性和过氧化氢酶活性,提升田菁属植物对于环境的适应能力^[7-8]。刺田菁(*S. bispinosa*)、大花田菁(*S. grandiflora*)和沼生田菁(*S. javanica*)也因其丰富的营养价值与蛋白质含量而被许多国家作为蔬菜食用^[2,9],相关研究最早可以追溯到1928年^[10]。除作为可食用的蔬菜为人类活动提供能量外,有研究^[11-12]表明,在草料中加入印度田菁(*S. sesban*)作为草料补充剂可提高食草动物基础粮的日摄入量,增强高蛋白牧草的供给能力,对畜牧产业的发展起到一定的支撑作用。

此外,已有研究^[13]表明,大花田菁的叶、花和树皮含有酚类、生物碱、单宁、皂苷和黄酮类等生物活性化合物,具有抗糖尿病、抗氧化、抗癌、抗溃疡和保肝等作用,可减少氧化应激,具有一定的医用价值。除富含营养物质外,田菁属植物还可用于提取田菁胶,通常从田菁属种子的胚乳中提取。田菁胶是一种水胶体,成分主要包括半乳甘露聚糖及少量蛋白质和脂肪。半乳甘露聚糖是一种广泛存在的多糖,因其亲水性、增稠性、胶凝性、黏合性、悬浮性、乳化性及成膜性等功能特性而备受学术界和工业界的关注^[14-15]。

基于现有研究基础,本文通过中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)检索平台和美国科睿唯安(Clarivate Analytics)Web of Science(WOS)核心合集数据库,检索田菁研究的相关文献,进一步采用VOSviewer与CiteSpace知识图谱分析工具对田菁研究的国内外发文数量、主要国家(地区)与机构、主要发文期刊和研究学者、

重要文献、研究热点及趋势等进行计量分析,系统揭示田菁国内外研究现状、发展态势及潜在研究前沿,旨在为该领域的基础研究与应用拓展提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据来源于CNKI和WOS核心合集数据库,中、英文检索词主题分别设置为田菁、“sesbania*”,其中,中文文献检索范围为学术期刊和学位论文,英文文献类型设置为论文(article)和综述论文(review article)。英文检索中双引号(“”)作用是将词组看为一个整体来进行检索,可提高检索的准确性;星号(*)表示任何字符组,包括空字符。检索论文中,中文文献关于田菁的最早发文在1958年;而英文文献关于田菁的发文最早可以追溯到1928年,但早期发文篇幅较短。本文中有关田菁的发文数量按年计,故检索时间设置至2024-12-31,通过检索共获取中、英文文献分别为1 054篇、2 727篇。

1.2 研究方法

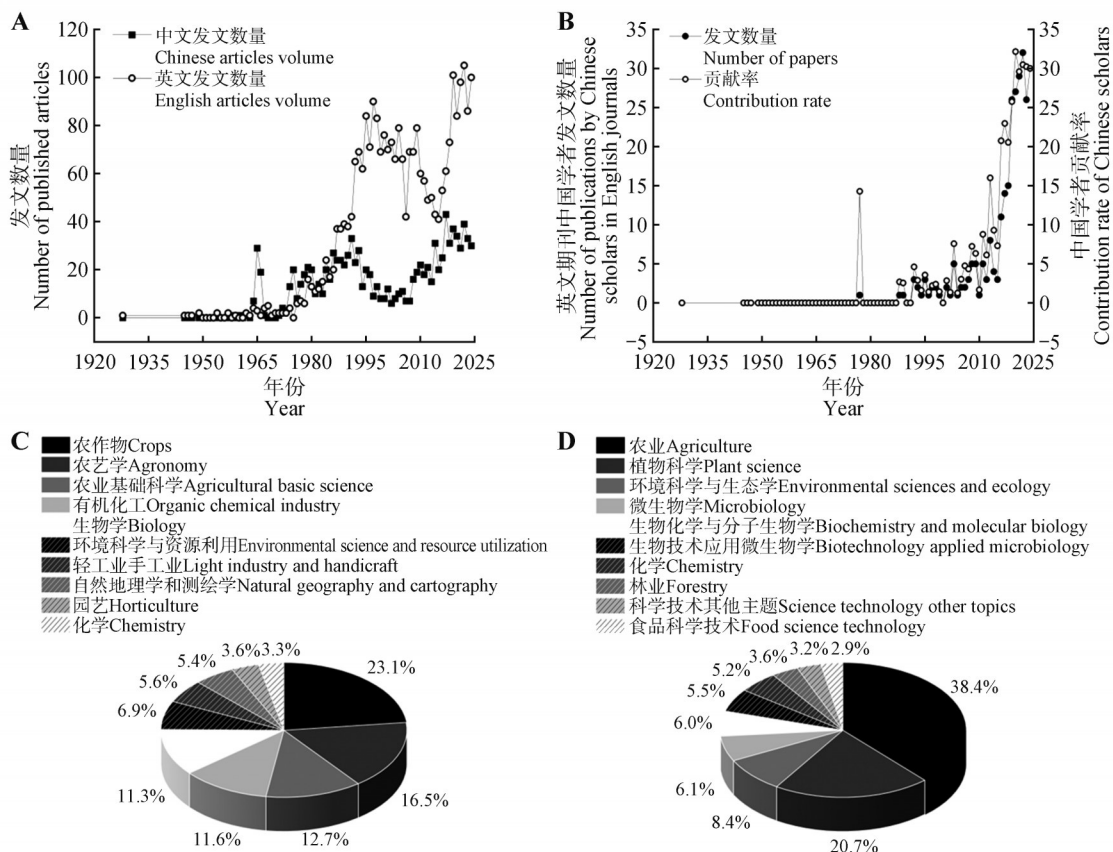
在CNKI检索平台和WOS核心合集数据库中检索文献,并采用VOSviewer软件的合作(co-authorship)网络分析田菁研究国家(countries)及机构(institution)之间的合作关系,合作网络图中圆圈大小表示发表数量的多少,连线疏密表示合作的密切程度,连线越密表明科研合作越密切^[16];总联系强度(total link strength, TLS)参数值越大,亦表明国家或科研机构间合作联系越紧密^[17]。同时,通过VOSviewer软件的共现(co-occurrence)网络分析田菁研究领域的重要关键词及其之间的共现关系。使用HistCite引文图谱分析工具中本地引用次数(total local citation score, TLCS)与总引用次数(total global citation score, TGCS)2个重要参数来确定田菁研究的主要学术期刊。使用CiteSpace对田菁研究领域排名前10的关键词开展突现情况分析^[18]。此外,通过美国国家医学图书馆(National Library of Medicine, National Center for Biotechnology Information, NCBI)Genome模块检索田菁根瘤菌的全基因组信息,查找不同根瘤菌中相关固氮功能基因并绘图进行比对。

2 结果与分析

2.1 发文的学科分布与主要国家或机构

分析结果表明,总体上,关于田菁的研究论文发文量相对较少,但年度发文量仍呈现一定的增长态势(图1),这表明国内外研究者对该领域的关注度有所提升。由图1A可见,田菁相关研究的发文量在1928—1975年期间处于蓄势阶段,该阶段的研究主要集中在植物病害与植物可食用性方面^[10,19];蓄势阶段后,中文文献关于田菁的发文水平约为20篇·a⁻¹,而英文文献从1976—1995年呈现增长趋势,在1996年之后发文水平约为70篇·a⁻¹。2016—2024年,中国学者发表的英文文献在全球发文总量的占比达20.5%~32.1%(图1B)。进一步分析发现,2015年之前中国发文以中文期刊为主,

2015年以后中国发文量在中文期刊与英文期刊中趋于平衡。由图1C、1D可见,田菁研究涉及多个学科和领域,中文发文量排名前5位的学科(学科类别基于《中国图书馆分类法》分类)分别为农作物(23.1%)、农艺学(16.5%)、农业基础科学(12.7%)、有机化工(11.6%)、生物学(11.3%);英文发文量排名前5位的学科分别为农业(38.4%)、植物科学(20.7%)、环境科学与生态学(8.4%)、微生物学(6.1%)、生物化学与分子生物学(6.0%)。上述结果表明,开展田菁研究较多的学科主要集中在农业与环境两大领域,同时,田菁研究也在有机化工、生物学等其他学科不同研究方向取得一定的进展,交叉学科研究范式逐步形成,为后续深化研究提供支撑。



A. 发文量; B. 英文期刊上中国学者的发文量及贡献率; C、D 分别为 CNKI 和 WOS 数据库发文量前十的学科。

A. Number of publications; B. Number of publications by Chinese scholars in English journals and their contribution rate; C and D. The top ten disciplines in CNKI and WOS databases, respectively.

图1 田菁相关研究的中、英文发文情况

Fig.1 Research publications on *Sesbania* in Chinese and English

田菁研究领域英文发文数量排名前5的国家为印度(636篇)、美国(427篇)、中国(281篇)、英

国(98篇)、埃塞俄比亚(96篇)。由VOSviewer共同作者合作网络分析总联系强度可见,田菁研究

领域国际上合作密切的国家有美国(TLS=198)、中国(TLS=117)、印度(TLS=115)、英国(TLS=104)等(图2A);但国内外各机构之间的合作目前还不够紧密,世界各机构合作总联系强度排名前3的机构

分别为瓦赫宁根大学(TLS=16)、国际农用林研究中心(TLS=10)、印度农业研究所(TLS=9)(图2B)。此外,中文文献分析结果显示,国内各机构分布呈现独立点状分布,合作关系弱。

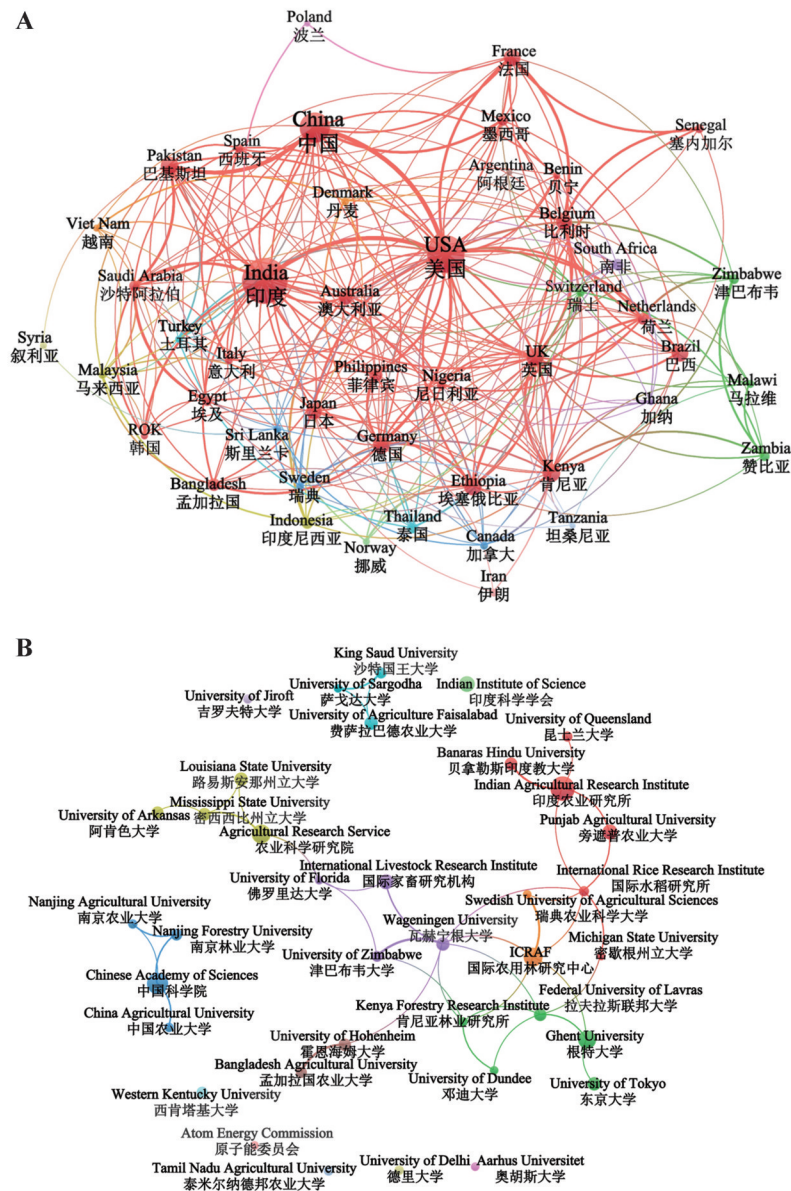


图2 英文文献主要发文国家(A)和机构(B)间的合作关系网络

Fig.2 The cooperative relationship network among the main countries (A) and institutions (B) that published English papers

2.2 主要发文期刊与学者

田菁研究领域中、英文发文数量排名前5的期刊,主要集中在农学与土壤领域,具体为《中国土壤与肥料》(24篇)、《土壤通报》(18篇)、《农业科技通讯》(16篇)、《上海农业科技》(15篇)、《江苏农业科学》(15篇)、《Weed Technology》(92篇)、《Indian

Journal of Agricultural Sciences》(82篇)、《Agroforestry Systems》(73篇)、《Plant and Soil》(57篇)、《Biology and Fertility of Soils》(52篇)。CNKI检索平台和WOS核心数据库中发文量排名前5的作者及其主要研究方向如表1所示,学者的研究方向主要集中在化学、植物学及微生物学等方面,涉及的研

究内容有:田菁胶及其提取物的理化特性、趋化作用及工业应用开发^[20-22],根瘤菌侵染诱导田菁结瘤的分子信号通路、茎瘤对田菁生长发育的调控机

制^[23-24],田菁内生菌资源挖掘、共生固氮体系功能解析及氮素增效机制的研究^[5,25-26],田菁在滨海盐渍土改良中的应用^[27]等。

表 1 CNKI检索平台、WOS核心合集数据库中田菁研究论文发文量前5的学者

Table 1 Top 5 scholars with the number of published papers on *Sesbania* research in the CNKI and WOS databases

数据库 Database	作者 Author	发文量 Publication volume	机构 Institution	研究方向 Research direction	本地引用 (TLCS)	总引用 (TGCS)
CNKI	崔元臣 Cui Y C	16	河南大学 Henan University	化学、有机化工、轻工业手工业 Chemistry, organic chemical industry, light industry and handicraft industry	10	192
	李德亮 Li D L	10	湖南农业大学 Hunan Agricultural University	环境科学与资源利用、化学、水产和渔业 Environmental science and resource utilization, chemistry, aquaculture and fisheries	6	141
	杨中艺 Yang Z Y	10	湖南工学院 Hunan Institute of Technology	生态学、环境生物学、环境教育、循环低碳发展 Ecology, environmental biology, environmental education, circular low-carbon development	5	120
	解志红 Xie Z H	9	山东农业大学 Shandong Agricultural University	盐生植物根际微生物多样性及功能微生物资源开发、植物-微生物互作及联合修复技术 Diversity of microorganisms in halophytes rhizosphere and development of functional microbial resources, plant-microbe interaction and combined remediation technology	21	112
	朱小梅 Zhu X M	8	江苏沿海地区农业科学研究所 Institute of Agricultural Sciences of Jiangsu Coastal Area	农业资源利用 Agricultural resources utilization	22	98
WOS	Holsters M	52	根特大学 Ghent University	植物科学、生物化学与分子生物学、微生物学 Plant science, biochemistry and molecular biology, microbiology	43	1 509
	Boyette C D	35	美国农业部 United States Department of Agriculture	植物科学、农业、生物技术与应用微生物学、化学 Plant science, agriculture, biotechnology and applied microbiology, chemistry	10	290
	Ladha J K	35	加州大学戴维斯分校 University of California, Davis	农业、植物科学、微生物学、环境科学与生态学 Agriculture, plant science, microbiology, environmental science and ecology	18	1 520
	Savithri H S	34	印度科学研究所 Indian Institute of Science	生物化学与分子生物学、生物物理学、病毒学 Biochemistry and molecular biology, biophysics, virology	19	607
	Xie Z H	31	中康涅狄格州立大学 Central Connecticut State University	微生物学、工程学、材料科学、生物技术与应用微生物学 Microbiology, engineering, materials science, biotechnology and applied microbiology	63	663

2.3 关键词聚类分析

从田菁的中、英文发文的关键词共现网络中归纳分析得到,中文文献中出现频次最多的3个关键词分别为田菁(93次)、田菁胶(70次)、绿肥(24次),整体大致被分为共生固氮、绿肥/盐碱土壤改良、田菁胶3个部分;英文文献中出现频次最多的3个关键词分别为 growth(生长,235次)、*Sesbania* (长喙田菁,233次)、*Sesbania* (田菁属,190

次),整体大致被分为固氮/绿肥、生物防治、畜禽饲养3个部分(图3)。中、英文发文在关键词上有很大的重叠部分,目前,田菁研究仍然以农业领域为主。同时,关键词突现分析发现,中文文献近30 a对于田菁属植物的研究重心在根瘤共生固氮及利用田菁属植物的耐盐碱特性进行土壤环境改良方面,而在英文文献中,研究重点除在共生固氮方面与中文文献相同外,对田菁属植物的饲用价

值和提取物价值方面的关注程度增加(图4)。

3 研究热点与发展趋势

3.1 共生固氮

由图3~4可见,田菁研究中有关根瘤菌与田菁属植物共生固氮的研究受到较高关注。氮素在粮食生产中通常是主要受限的元素,也是成本最高的肥料之一。在提高土壤肥力方面,作为豆科植物,田菁属植物可使土壤中碱解氮和全氮含量

明显增加,研究^[28]表明:种植长喙田菁后其根瘤固氮有约2/3进入土壤。另据报道^[29],65 d长喙田菁的氮累积量可达 $681 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而其生物固氮量在植物总氮积累中占比高达85.6%,且耕层土壤中有机碳含量亦随着田菁枯枝落叶腐解而提高。近年来,随着遗传工程、合成生物学、宏基因组学、转录组学等技术方法的应用及多学科的交叉研究,对根瘤菌与田菁共生固氮机制的基因层面解析日益深入。

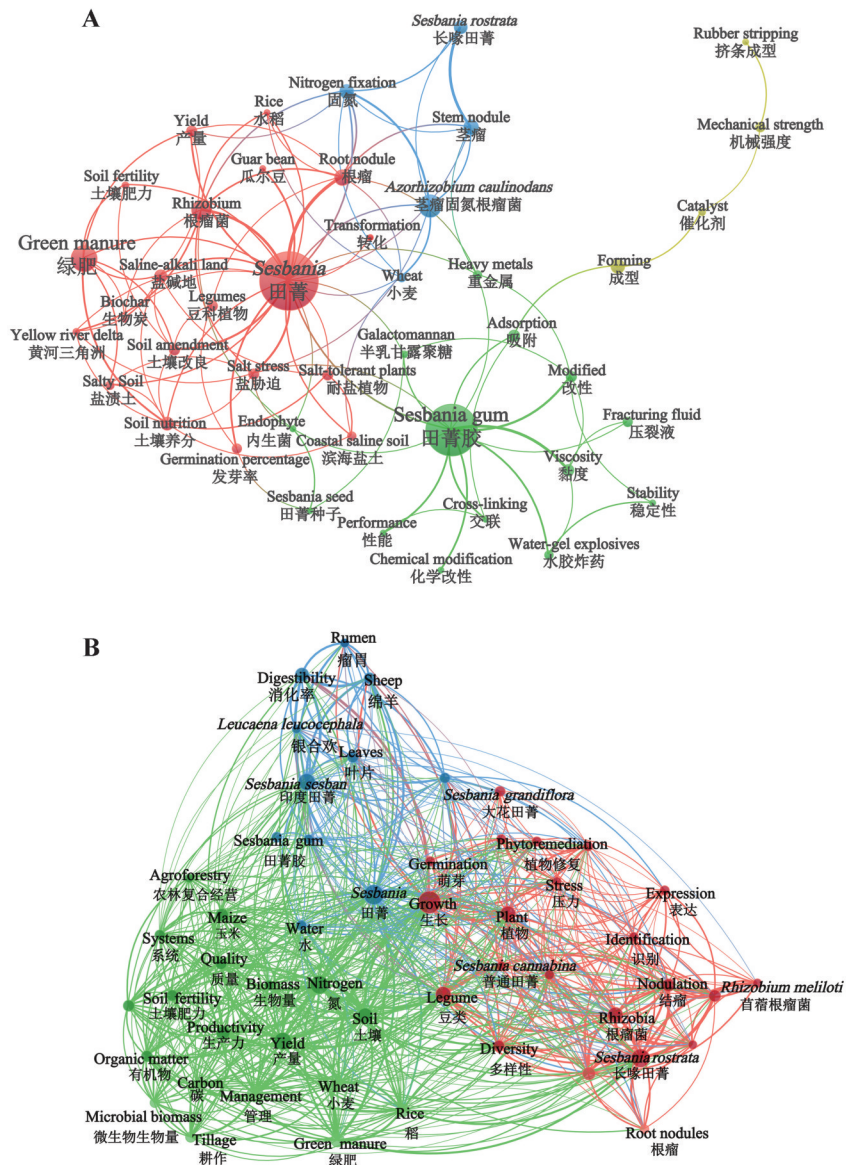


图3 中文(A)和英文(B)文献关键词共现网络

Fig. 3 The co-occurrence network of keywords in Chinese (A) and English (B) papers

田菁根瘤的组织结构中,皮层代替表皮起保护作用,根瘤菌在根的皮肤中繁殖,刺激皮层细胞分裂,导致根组织膨大突出形成定型根瘤,根瘤内

一个共生体中可含有多个类菌体,有中华根瘤菌属(*Sinorhizobium*)、固氮根瘤菌属(*Azorhizobium*)、中慢生根瘤菌属(*Mesorhizobium*)、剑菌属(*Ensi-*

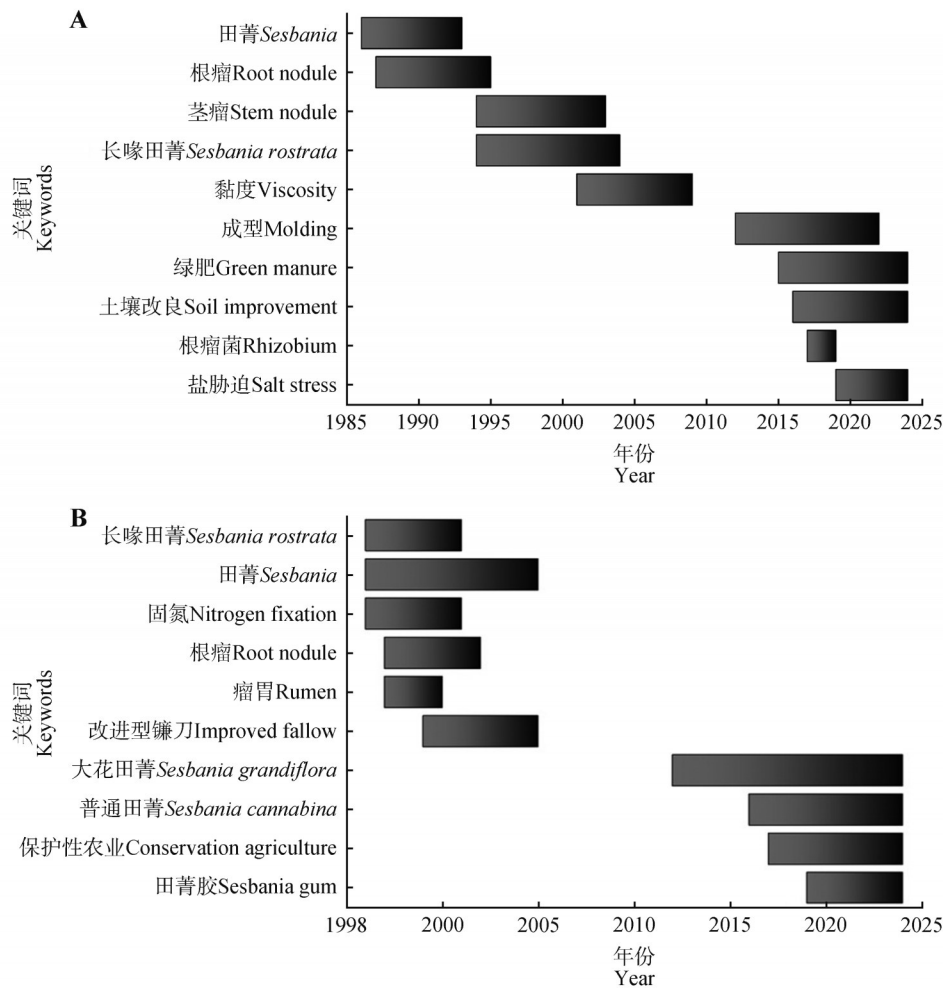


图 4 中文(A)和英文(B)文献的关键词突现情况

Fig.4 The emergence of keywords in Chinese(A) and English(B) papers

fer)、根瘤菌属(*Rhizobium*)、农杆菌属(*Agrobacterium*)和新根瘤菌属(*Neorhizobium*)等^[3,30]。其中,田菁剑菌(*Ensifer sesbaniae*)和华特拉新根瘤菌(*Neorhizobium huautlense*)是中国最主要和分布最广的田菁根瘤菌^[31],土壤特性(pH、总氮、速效钾和有效磷)是影响根瘤菌分布的主要因素^[32]。根瘤菌与田菁的共生主要取决于根瘤菌的 *nod* 和 *nif* 基因及 Nod 因子结构和相应的分泌系统(III型分泌系统; T3SS)等^[33]。长喙田菁是茎瘤固氮根瘤菌(*Azorhizobium caulinodans*)的寄主豆科植物,在茎瘤固氮根瘤菌的研究^[34]中发现,根瘤菌在与宿主田菁属植物共生过程中会产生活性氧,根瘤菌对活性氧的反应对于成功的结瘤、固氮非常重要。

对 NCBI 数据库中田菁剑菌、华特拉新根瘤菌和茎瘤固氮根瘤菌全基因组进一步比对分析发现(图 5),3 株菌株在固氮功能基因方面有相似之处,

其中 *nifX*、*nifN*、*nifH*、*nifD*、*nifS*、*nifE*、*nifW*、*nifK*、*nifT*、*nifB*、*nifA* 功能基因在 3 株菌株中均有出现,但不同菌株功能基因间相似性值为 0.195~0.902。根瘤菌的共生固氮相关基因是以基因簇的形式存在的,主要存在于共生质粒或者染色体的共生岛上。已有研究^[35]表明,将田菁茎瘤固氮根瘤菌的共生岛转移到受体根瘤菌中的慢生华癸根瘤菌(*Mesorhizobium huakuii* 7653R, 93)后,受体根瘤菌也获得了在长喙田菁上结根瘤和茎瘤的能力。如何扩大根瘤菌在豆科植物上的共生固氮宿主范围,并最终实现非豆科植物固氮的研究,亦是近年来田菁属植物研究的热点之一。

3.2 盐碱土壤改良

国内对田菁属植物在盐碱土壤改良研究中的关注度显著高于国外,该主题在中文文献关键词共现网络(图 3A)及中文排名前 10 的关键词突现

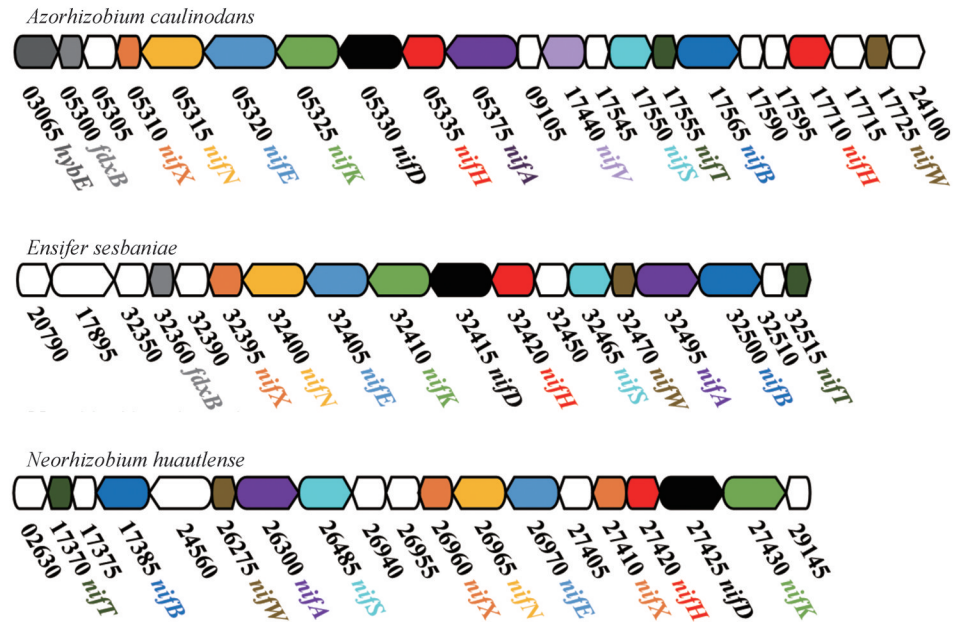


图5 田菁根瘤菌的固氮功能基因比对

Fig.5 Comparison of nitrogen fixation functional genes of rhizobia of *Sesbania*

(图4A)中均有体现,亦是我国学者近年来发表的田菁属植物研究领域英文文献中的重要主题之一。由于田菁属植物具有较强的耐盐碱能力,其种植不仅可以改良盐碱地,提高土壤肥力,还可以促进生态系统的恢复和平衡^[36],而且田菁对炎热干燥天气表现出极强的适应性,可以在田间强碱性土壤(pH约为10.0)中进行结瘤,从而具有固氮活性^[37]。研究^[38]表明,在含盐量为 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的重度盐渍土上种植田菁,其生物量可达到正常土壤中的95%。目前,已有团队在田菁中发现了4个特定的碱诱导磷酸盐转运体基因,这些基因可能通过缓解碱性土壤中可用磷的缺乏而发挥耐碱功能,提高田菁对碱性土壤的适应性^[39]。由于田菁对盐、干旱、水涝和养分贫乏的栖息地具有很强的耐受性,在中国已被广泛种植在盐碱地区,通过提高盐碱地的肥力和作物产量,成为可持续农业的重要角色。

近年来,利用微生物介导植物耐盐性的研究受到广泛关注。研究^[7,40]表明,与盐生植物相关的内生细菌均表现出很强的耐盐性,田菁内生菌是田菁发挥抗胁迫作用的关键因素之一,内生菌与植物共生可以保护植物免受生物和非生物胁迫,对宿主植物耐盐性具有重要作用。如接种茎瘤固氮根瘤菌可以通过增强叶绿素合成来提升抗氧化

酶活性和脯氨酸含量,从而提高田菁对盐胁迫的耐受能力^[41]。田菁属植物能够与根瘤菌共生固氮的特性,可使其在盐碱土壤中生长时获得更多养分,进而增强耐盐碱能力。同时,在滨海盐渍土种植田菁可提高盐碱土的土壤孔隙度^[6],而且植物蒸腾作用替代地面蒸发,避免了地面蒸发造成的地表积盐,促进土壤脱盐。研究^[42]表明,连续种植田菁2 a后,土壤表层、中层和深层的脱盐率分别达到6.09%、6.95%、4.26%。

此外,田菁属植物的生长也可促进盐碱土中根际细菌群落的积极发展。在有机肥与河沙和蛇纹石混合施用条件下,田菁根际富集了多种植物生长促生根瘤菌(如鞘氨单胞菌(*Sphingomonas*))及氮循环相关细菌^[43]。盐碱土壤中添加生物炭可提高土壤有机碳、土壤 NH_4^+ 和 NO_3^- 、微生物生物量碳含量和土壤酶活性,从而促进田菁生长^[8,44],并可增强田菁属植物的生理、生化和抗氧化酶活性,有助于固定土壤中的金属元素^[45]。因而,可采用豆科绿肥结合土壤调理剂的控盐增肥技术模式,对中、重度盐碱地进行改良。

3.3 畜禽饲料与生物防治

在英文文献关键词共现网络(图3B)及排名前10的关键词突现情况(图4B)中,均体现了田菁属植物在饲料和生物防治领域的研究,国外在此领

域开展的研究较国内更多。田菁是富含粗蛋白的氮源饲草,由其子叶粉碎制成的蛋白饲料田菁子叶粉,营养丰富、氨基酸组成比较齐全,其营养成分与我国广泛使用的植物性蛋白饲料豆饼十分相似,但成本更低,经济效益显著^[12]。田菁的饲料成分随生育期变化明显,生长到70 d时,粗蛋白含量为16.7%,随后逐渐下降,而纤维素含量则随生长期延长而增加^[46]。最新研究^[47]表明,田菁能够给反刍动物瘤胃消化利用提供更多的营养物质;添加复合乳酸菌接种剂后可进一步增加青贮饲料的好氧稳定性^[48],为反刍动物高效利用富含蛋白质的青贮饲料提供了途径。此外,印度田菁也可作为牲畜(尤其是小型反刍动物)的青饲料或干草,因其易消化、低纤维、高蛋白(蛋白质含量达23.8%)^[49];作为羔羊的日常用饲料(添加量 $\leq 40\%$)不会对羔羊的生长产生不利影响,并可以改善肉质^[50]。目前,我国已经建立了田菁等饲草的遗传转化与基因编辑体系,实现了单基因与多基因转化,并应用CRISPR/Cas系统进行基因编辑,创制出多个高产、优质、抗逆的饲草新材料^[51]。

绿肥的种植也被认为是一种有效的生态除草技术。研究^[52]显示,刺田菁叶覆盖结合苗后除草剂使用,不仅能有效抑制杂草,还可提高水稻(*Oryza sativa*)产量。试验^[53]表明,印度田菁的叶提取物含有杀虫活性成分,并可抑制杂草种子萌发、显著降低其胚芽和胚根长度;田菁浸出液和田菁秸秆还田对三叶鬼针草(*Bidens pilosa*)、稗草(*Echinochloa crusgalli*)和萝卜(*Raphanus sativus*)等植物的发育初期生长具有一定的抑制作用,对稗草的抑制作用最为显著^[54]。在适宜环境条件下,田菁种

子发芽快,生长也快,且作为绿肥栽培时,种植密度较高,能使地面被严密覆盖,导致杂草因光照受限而营养不良,生长发育受到显著抑制,甚至死亡^[55]。此外,田菁对除草剂氯嘧磺隆具有一定的耐受性,种植田菁还可以显著促进土壤中氯嘧磺隆的降解^[56]。

3.4 田菁胶

田菁胶主要出现在中文文献关键词共现网络(图3A)以及排名前10的关键词突现情况(图4)中,中文文献对于田菁胶的研究早于英文文献,但近3 a英文文献中田菁胶的研究有所增加。不同于田菁属植物大多在农业领域中应用,田菁胶的研究主要集中在工业及其他领域。目前,田菁胶相关研究主要聚焦于提取工艺改善、田菁水凝胶和气凝胶制备新方法探索、以田菁半乳甘露聚糖和田菁半乳甘露低聚寡糖为主的功能性食品的开发等方面^[57]。据研究^[58]报道,添加田菁胶不仅可改善食物的色泽、弹性和胶着性,还可显著提升萨拉米发酵香肠的感官评价综合得分。

在工业应用方面,田菁胶常用作助滤剂、稳定剂、吸附交联材料等,并可用于提取天然有机高分子絮凝剂,应用于选矿与石油钻采领域^[15]。因其独特的化学成分和单糖比例结构(图6),田菁胶具有经济、无毒、生物相容性和可降解性等特点,并具备良好的热稳定性和化学稳定性^[59]。在医学领域,田菁胶可与过渡金属螯合,制备具有携带药物分子能力的金纳米粒子^[60]。相比金纳米粒子的传统制备方法,该方法不仅可减少环境污染,且因其无毒性和优良的生物相容性,使所得材料更适用于生物医学领域。

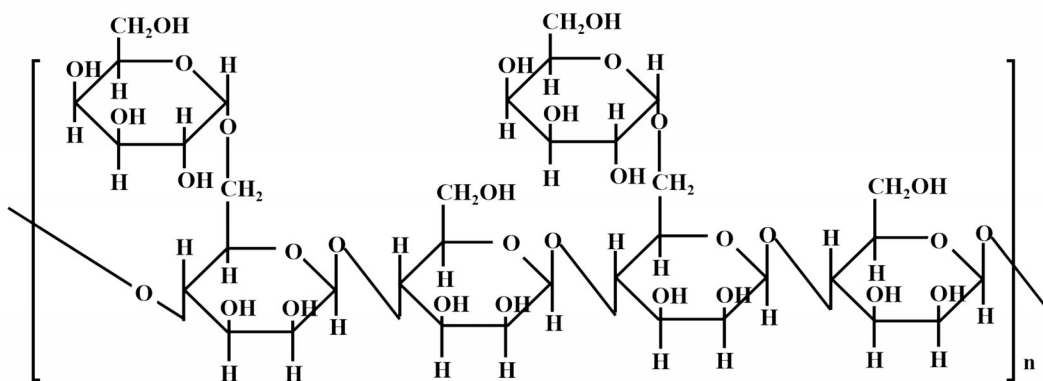


图6 田菁胶的化学结构^[59]

Fig.6 The chemical structure of sesbania gum^[59]

4 结论与展望

总体上,田菁研究领域的中、英文发文量呈持续增长趋势,近十年增速加快,且中国发文量占比逐年上升。印度、美国、中国等国家在该领域发文较多,但国内外各科研机构间的合作尚不够紧密。基于中、英文文献关键词共现网络分析,相关研究主要集中在共生固氮、农业绿肥、畜禽饲养、生物防治、田菁胶等五大研究方向。随着多学科交叉融合与新兴技术的应用,田菁属植物的研究已从表观特征逐步深入到分子机制层面,并取得了系列进展。田菁属植物未来研究热点将涵盖以下4个方面:(1)抗逆性机制与遗传改良方面,需系统解析田菁属植物耐盐碱、抗旱、耐涝等抗逆性的分子机制,挖掘渗透调节、抗氧化等相关关键功能基因,为抗逆品种培育提供理论基础。(2)共生固氮与土壤改良方面,更深入研究田菁与根瘤菌、丛枝菌根真菌的共生机制,提高固氮效率,增强其在土壤改良中的生态适应性等。(3)生物能源与高附加值成分开发方面,可利用田菁快速生长的特性,将其作为生物燃料(如纤维素乙醇)的原料,需重点突破其木质纤维素高效降解技术;也可提取黄酮类、皂苷等功能性成分,拓展其在医药、食品、化妆品等领域的应用。(4)生态修复与环境治理方面,进一步探索田菁属植物在镉、铅等重金属污染土壤及水体富营养化治理中的应用潜力,研究其根系分泌物对污染物的吸附/降解机制,并结合纳米材料等新兴技术手段提升修复效能,助力我国农业与生态环境的可持续发展。

参 考 文 献

- [1] SINGH S, KUMAR A, SRIVASTAVA M. Chemical profiling and *in-vitro* α -amylase inhibitory activity of *Sesbania sesban* and *Sesbania grandiflora* seeds [J]. International Journal of Food Properties, 2023, 26: 428-436.
- [2] BUNMA S, BALSLEV H. A review of the economic botany of *Sesbania* (Leguminosae) [J]. The Botanical Review, 2019, 85: 185-251.
- [3] 董鑫, 刘晓云, 张斌, 等. 云南省田菁根瘤菌及根瘤内生细菌遗传多样性研究 [J]. 热带作物学报, 2010, 31(1): 88-92.
- DONG X, LIU X Y, ZHANG B, *et al.* Diversity of rhizobia and endophytic bacteria isolated from root nodules of *Sesbania* spp. [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2010, 31(1): 88-92.
- [4] YU C X, WANG G M, LIU X L, *et al.* Effect of *Sesbania* and *Triticale* rotation on plant characteristics and soil quality in coastal saline-alkaline land: a two-year field experiment [J]. Bioresources, 2023, 18(4): 7109-7123.
- [5] LIU Y N, LIU X L, DONG X Y, *et al.* The effect of *Azorhizobium caulinodans* ORS571 and γ -aminobutyric acid on salt tolerance of *Sesbania rostrata* [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 926850.
- [6] 赵秋, 宁晓光, 张新建, 等. 绿肥对稻田土壤改良试验研究 [J]. 天津农林科技, 2022(1): 5-7.
- ZHAO Q, NING X G, ZHANG X J, *et al.* Study on improvement of paddy soil with green manure crops [J]. Science and Technology of Tianjin Agriculture and Forestry, 2022(1): 5-7.
- [7] CAPOEN W, OLDROYD G, GOORMACHTIG S, *et al.* *Sesbania rostrata*: a case study of natural variation in legume nodulation [J]. New Phytologist, 2010, 186(2): 340-345.
- [8] DONG X Y, LI Z Y, WANG Q, *et al.* Enhancing the growth performance of *Sesbania cannabina* using *Ensifer alkalisoli* and biochar under salt stress [J]. Rhizosphere, 2024, 30: 100888.
- [9] BHAT R, KARIM A A. Exploring the nutritional potential of wild and underutilized legumes [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2009, 8(4): 305-331.
- [10] ANONYMOUS. A flower vegetable of the Singalese: *Sesbania (Agati) grandiflora* [J]. Journal of Heredity, 1928, 19(3): 96.
- [11] BONSI M L K, OSUJI P O, NSAHLAI I V, *et al.* Graded levels of *Sesbania sesban* and *Leucaena leucocephala* as supplements to teff straw given to Ethiopian Menz sheep [J]. Animal Science, 1994, 59(2): 235-244.
- [12] 曹丽雯, 卢蕊, 范吉标, 等. 新型饲草开发利用的基础生物学问题 [J]. 植物学报, 2022, 57(6): 826-836.
- CAO L W, LU R, FAN J B, *et al.* The fundamental biological problems in the development and utilization of new forage grass [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2022, 57(6): 826-836.
- [13] RAMASUBBU K, DEVI RAJESWARI V. Green synthesizing ZnO nanoparticle using *Sesbania grandiflora* and their evaluation of anti-diabetic anti-advanced glycation end products and cytotoxic effects [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2024, 196(5): 2652-2672.
- [14] LI R, JIA X, WANG Y Q, *et al.* The effects of extrusion processing on rheological and physicochemical properties of sesbania gum [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 35-40.
- [15] 罗彤彤. 半乳甘露聚糖植物胶在选矿上的应用 [J]. 铜

- 业工程, 2011, 107(1): 12-15.
- LUO T T. Application of galactomannan plant gum in mineral processing [J]. *Copper Engineering*, 2011, 107(1): 12-15.
- [16] VAN ECK N J, WALTMAN L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping [J]. *Scientometrics*, 2010, 84(2): 523-538.
- [17] 严康, 楼骏, 汪海珍, 等. 污染场地研究现状与发展趋势: 基于知识图谱的分析 [J]. *土壤学报*, 2021, 58(5): 1234-1245.
- YAN K, LOU J, WANG H Z, *et al.* Research of contaminated sites based on knowledge graph analysis and its development trend [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(5): 1234-1245.
- [18] GARFIELD E. From the science of science to Scientometrics visualizing the history of science with HistCite software [J]. *Journal of Informetrics*, 2009, 3(3): 173-179.
- [19] COOPER W E. Top necrosis a virus disease of guar [J]. *Phytopathology*, 1949, 39(5): 347-358.
- [20] 崔元臣, 王新海, 李德亮, 等. 季铵型阳离子田菁胶的制备及絮凝作用 [J]. *应用化学*, 2004, 21(7): 717-721.
- CUI Y C, WANG X H, LI D L, *et al.* Preparation and flocculating effect of quaternary ammonium cationic sesbania gum [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2004, 21(7): 717-721.
- [21] 王新海, 崔元臣, 李德亮, 等. 两性田菁胶在处理生活污水中的助凝作用 [J]. *化学研究*, 2003, 14(1): 32-34.
- WANG X H, CUI Y C, LI D L, *et al.* Flocculation aid of amphoteric sesbania gum to the treatment of domestic wastewater [J]. *Chemical Research*, 2003, 14(1): 32-34.
- [22] LIU X L, XIE Z H, WANG Y X, *et al.* A dual role of amino acids from *Sesbania rostrata* seed exudates in the chemotaxis response of *Azorhizobium caulinodans* ORS571 [J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2019, 32(9): 1134-1147.
- [23] SCHROEYERS K, CHAPARRO C, GOORMACHTIG S, *et al.* Nodulation-enhanced sequences from the water stress-tolerant tropical legume *Sesbania rostrata* [J]. *Plant Science*, 2004, 167(2): 207-216.
- [24] 简曙光, 杨中艺. 茎瘤对长喙田菁在铅锌尾矿环境适应中的意义 II. 茎瘤对长喙田菁固氮和积累重金属的影响 [J]. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 209-215.
- JIAN S G, YANG Z Y. The role of stem nodule in the adaptation of *Sesbania rostrata* to Pb/Zn tailings environment II. The effect of stem nodule on nitrogen and heavy metals accumulation of *Sesbania rostrata* [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2002, 26(2): 209-215.
- [25] 庞诗琪, 李玮, 王丹丹, 等. 田菁内生菌定殖及其与多糖混合浸种的耐盐促生效果 [J]. *微生物学通报*, 2023, 50(8): 3429-3439.
- PANG S Q, LI W, WANG D D, *et al.* Colonization of *Sesbania* seed endophytic bacterium and salt-tolerant and growth-promoting effect of mixed seed soaking with endophytic bacterium and polysaccharide [J]. *Microbiology China*, 2023, 50(8): 3429-3439.
- [26] LADHA J K, MIYAN S, GARCIA M. *Sesbania rostrata* as a green manure for lowland rice: growth, N₂ fixation, *Azorhizobium* sp. inoculation, and effects on succeeding crop yields and nitrogen balance [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1989, 7(3): 191-197.
- [27] 朱小梅, 王甫同, 邢锦城, 等. 田菁翻压还田对滩涂土壤碳氮及微生物生物量的影响 [J]. *土壤*, 2021, 53(3): 529-536.
- ZHU X M, WANG F T, XING J C, *et al.* Effects of overturning *Sesbania cannabina* on soil carbon, nitrogen and microbiological biomass in coastal area [J]. *Soils*, 2021, 53(3): 529-536.
- [28] 袁剑刚, 徐昊娟, 杨中艺. 茎瘤作用对长喙田菁-*Azorhizobium caulinodans* 共生体系固氮效率的影响 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2001, 40(2): 89-92.
- YUAN J G, XU H J, YANG Z Y. Effects of stem nodulation on N-fixation of *Sesbania rostrata*-*Azorhizobium caulinodans* symbiosis [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2001, 40(2): 89-92.
- [29] RINAUDO G, DREYFUS B, DOMMERGUES Y. *Sesbania rostrata* green manure and the nitrogen content of rice crop and soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1983, 15(1): 111-113.
- [30] 陈妍, 王富强, 龙永, 等. 一株田菁根瘤菌新种的分离与鉴定 [J]. *微生物学报*, 2025, 65(8): 3301-3316.
- CHEN Y, WANG F Q, LONG Y, *et al.* Isolation and identification of a new species of *Rhizobium* from *Sesbania cannabina* [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2025, 65(8): 3301-3316.
- [31] ZHANG Z P, LIU W, SHAO S, *et al.* Diverse genomic backgrounds vs. highly conserved symbiotic genes in *Sesbania*-nodulating bacteria: shaping of the rhizobial community by host and soil properties [J]. *Microbial Ecology*, 2020, 80(1): 158-168.
- [32] 陆保福, 康文娟, 师尚礼, 等. 豆科植物-根瘤菌固氮系统及其碳氮互作 [J]. *中国草地学报*, 2023, 45(11): 119-135.
- LU B F, KANG W J, SHI S L, *et al.* Nitrogen fixation system of legume-rhizobia and its carbon-nitrogen interaction [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(11):

- 119-135.
- [33] HAN K M, LI Y, ZHANG Z P, *et al.* Comparative genome analysis of *Sesbania cannabina*-nodulating *Rhizobium* spp. revealing the symbiotic and transferrable characteristics of symbiosis plasmids [J]. *Microbial Genomics*, 2023, 9(5):001004.
- [34] ZHAO Y, NICKELS L M, WANG H, *et al.* OxyR-regulated catalase activity is critical for oxidative stress resistance, nodulation and nitrogen fixation in *Azorhizobium caulinodans* [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2016, 363(13):fnw130.
- [35] 陈雪莲, 江高飞, 钟增涛. 基因水平转移在根瘤菌进化中的研究进展[J]. *生物技术通报*, 2019, 35(10):18-24.
- CHEN X L, JIANG G F, ZHONG Z T. Research progress of horizontal gene transfer in rhizobia evolution [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2019, 35(10):18-24.
- [36] 王立志, 孟英, 潘多锋, 等. 黑龙江省中度盐碱地田菁栽培技术[J]. *农业与技术*, 2025, 45(5):71-73.
- WANG L Z, MENG Y, PAN D F, *et al.* Cultivation techniques for *Sesbania* in moderately saline-alkali soil in Heilongjiang Province [J]. *Agriculture and Technology*, 2025, 45(5):71-73.
- [37] WANG T W, ZHANG J Q, SHI W X, *et al.* Dynamic changes in fermentation quality and structure and function of the microbiome during mixed silage of *Sesbania cannabina* and sweet sorghum grown on saline-alkaline land [J]. *Microbiology Spectrum*, 2022, 10(5):e0248322.
- [38] 李燕青, 孙文彦, 许建新, 等. 华北盐碱地耐盐经济作物筛选[J]. *华北农学报*, 2013, 28(S1):227-232.
- LI Y Q, SUN W Y, XU J X, *et al.* The evaluation of salt tolerant cash crops in northern China [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28(S1):227-232.
- [39] LUO H F, WANG X F, YOU C Q, *et al.* Telomere-to-telomere genome of the allotetraploid legume *Sesbania cannabina* reveals transposon-driven subgenome divergence and mechanisms of alkaline stress tolerance [J]. *Science China Life Sciences*, 2024, 67(1):149-160.
- [40] ZHENG Y F, LIANG J, ZHAO D L, *et al.* The root nodule microbiome of cultivated and wild halophytic legumes showed similar diversity but distinct community structure in Yellow River Delta saline soils [J]. *Microorganisms*, 2020, 8(2):207.
- [41] 刘亚楠. 滨海耐盐植物田菁根瘤菌乙酰化调控及共生耐盐机制[D]. 烟台: 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2023.
- LIU Y N. Mechanism of acetylation regulation and symbiotic salt tolerance in *Rhizobium* of coastal salt-tolerant plant *Sesbania rostrata* [D]. Yantai: University of Chinese Academy of Sciences (Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences), 2023.
- [42] 张立宾, 郭新霞, 常尚连. 田菁的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果[J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(2):310-312.
- ZHANG L B, GUO X X, CHANG S L. The salt tolerance of *Sesbania* and its improvement effect on coastal saline soil [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 40(2):310-312.
- [43] AN X C, SUN M L, REN K Y, *et al.* Effect and mechanism of the improvement of coastal silt soil by application of organic fertilizer and gravel combined with *Sesbania cannabina* cultivation [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13:1092089.
- [44] CUI Q, XIA J B, YANG H J, *et al.* Biochar and effective microorganisms promote *Sesbania cannabina* growth and soil quality in the coastal saline-alkali soil of the Yellow River Delta, China [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 756:143801.
- [45] KAMAL A, NAZISH M, AKBAR M, *et al.* Enhancing *Sesbania sesban* L. (Merr.) growth and metal resilience by synergistic application of *Trichoderma harzianum* loaded biochar and biochar-zinc oxide nanocomposite [J]. *BMC Plant Biology*, 2025, 25(1):771.
- [46] 李福岭. 田菁的饲料利用价值及饲喂试验[J]. *饲料研究*, 1993(5):30-31.
- LI F L. Feed utilization value and feeding trial of *Sesbania* [J]. *Feed Research*, 1993(5):30-31.
- [47] 王路遥, 江应松, 曹晓风, 等. 田菁不同部位营养价值、分子结构特性和体外瘤胃降解率研究[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(5):3386-3400.
- WANG L Y, JIANG Y S, CAO X F, *et al.* Study on nutritional value, molecular structure characteristics and *in vitro* rumen degradation rate in different parts of *Sesbania cannabina* [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(5):3386-3400.
- [48] TAHIR M, WANG T W, ZHANG J Q, *et al.* Compound lactic acid bacteria enhance the aerobic stability of *Sesbania cannabina* and corn mixed silage [J]. *BMC Microbiology*, 2025, 25:68.
- [49] ABDULLAH A Y, QUDSIEH R I, NUSAIRAT B M. Effect of crossbreeding with exotic breeds on meat quality of Awassi lambs [J]. *Livestock Science*, 2011, 142(1/3):121-127.
- [50] FARGHALY M M, YOUSSEF I M I, RADWAN M A, *et al.* Effect of feeding *Sesbania sesban* and reed grass on

- growth performance, blood parameters, and meat quality of growing lambs [J]. *Tropical Animal Health and Production*, 2022, 54:3.
- [51] 景海春, 张景昱, 金京波, 等. 饲草作物基础生物学与生物育种[J]. 中国科学基金, 2023, 37(4):537-551.
JING H C, ZHANG J Y, JIN J B, *et al.* Fundamental biology and molecular breeding of forage crops [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2023, 37(4):537-551.
- [52] KUMARI S, SINGH M K, DENDUKURI U L. Studies on *Sesbania*, rice residue mulching and post emergence herbicides on weed growth and yield in unpuddled transplanted hybrid rice [J]. *Weed Biology and Management*, 2023, 23(3/4):122-130.
- [53] SURIPTO S, SUKIMAN S, GUNAWAN E R. Insecticidal selectivity of jayanti plant (*Sesbania sesban*) for integrated control of diamondback moth (*Plutella xylostella*) [J]. *Asian Journal of Agriculture*, 2017, 1(2):80-84.
- [54] 秦俊豪, 温莹, 李君菲, 等. 绿肥植物田菁的化感效应及对土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2015, 47(3):524-529.
QIN J H, WEN Y, LI J F, *et al.* Allelopathic effect of green manure *Sesbania* and its impact on soil fertility [J]. *Soils*, 2015, 47(3):524-529.
- [55] 岳芸莹, 丁婷婷, 段廷玉. 绿肥对主作物农艺性状、病虫害草害及土壤的影响[J]. 草业科学, 2023, 40(8):2058-2071.
YUE Y Y, DING T T, DUAN T Y. Research progress on the effects of green manure on the growth, disease, pests, weeds, and soil of main crops [J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(8):2058-2071.
- [56] 律泽, 苏澳, 胡芳雨, 等. 田菁对农田氯嘧磺隆去除及土壤微生物群落的影响[J]. 生态学杂志, 2024, 43(9):2750-2757.
LÜ Z, SU A, HU F Y, *et al.* Effects of *Sesbania* on chlormuron-ethyl removal and soil microbial community in farmland [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(9):2750-2757.
- [57] 李睿, 贾鑫, 王晨, 等. 田菁胶的改性和应用的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(7):52-55.
LI R, JIA X, WANG C, *et al.* Research advancement on modifications and applications of sesbania gum [J]. *Food and Nutrition in China*, 2019, 25(7):52-55.
- [58] 卢慧, 宋艾颖, 凌峰, 等. 基于反向传播神经网络分析的田菁胶添加对萨拉米发酵香肠品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(13):54-62.
LU H, SONG A Y, LING F, *et al.* Impact of sesbania gum addition on the quality of salami based on backpropagation-artificial neural network analysis [J]. *Food Science*, 2025, 46(13):54-62.
- [59] 崔元臣, 周大鹏, 李德亮. 田菁胶的化学改性及应用研究进展[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2004, 34(4):30-33.
CUI Y C, ZHOU D P, LI D L. Progress of study on chemical modification and application of sesbania gum [J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2004, 34(4):30-33.
- [60] ZHOU M Y, TAO Y H, WANG T, *et al.* Assessing the *in vitro* digestion of sesbania gum, a galactomannan from *S. cannabina*, and subsequent impact on the fecal microbiota [J]. *Journal of Functional Foods*, 2021, 87:104766.