

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.029

引用格式:胡蓉,杨洁,唐庄生,等.氮磷添加对草地生态系统土壤碳循环的影响[J].草地学报,2026,34(2):670—678

HU Rong, YANG Jie, TANG Zhuang-sheng, et al. Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Carbon Cycle in Grassland Ecosystems[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):670—678

氮磷添加对草地生态系统土壤碳循环的影响

胡蓉, 杨洁*, 唐庄生, 赵忠祥

(甘肃农业大学草业学院, 甘肃兰州 730070)

摘要:土壤碳循环是全球碳循环的核心,影响着陆地生态系统的碳汇功能。作为关键驱动因子,氮磷添加通过改变土壤碳组分转化过程与微生物群落活性,调控土壤碳固存与释放的平衡。本文基于CiteSpace文献计量法,系统分析了近10年国内外的研究进展。结果表明:研究数量呈指数增长,热点聚焦于土壤活性与稳定性碳组分动态、微生物功能群落的代谢响应以及碳输入-输出通量的非线性平衡;国内研究在区域差异化响应机制和微生物-碳耦合过程的微观解析方面贡献突出,但在多因子交互实验设计与长期观测数据整合上存在不足。未来研究需突破长时间序列原位控制实验,阐明氮磷化学计量比与碳组分转化的耦联机制,并基于模型-数据融合实现碳周转的精准预测。本研究为定量评估草地生态系统在人为氮磷输入下的碳汇潜力提供了理论框架,对实现“双碳”目标下的生态系统适应性管理具有指导意义。

关键词:草地生态系统;碳循环;氮磷添加;CiteSpace

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0670-09

Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Carbon Cycle in Grassland Ecosystems

HU Rong, YANG Jie*, TANG Zhuang-sheng, ZHAO Zhong-xiang

(Pratacultural College of Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu Province 730070, China)

Abstract: The soil carbon cycle constitutes the core of the global carbon cycle, governing the carbon sink function of terrestrial ecosystems. As key driving factors, nitrogen and phosphorus additions regulate the balance between soil carbon sequestration and release by altering the transformation processes of soil carbon fractions and microbial community activities. Based on CiteSpace bibliometric analysis, this study systematically reviewed global research progress over the past decades. Results indicated that the number of studies were growing exponentially, with research hotspots focusing on: the dynamics of labile and stable carbon fractions in soils, metabolic responses of microbial functional communities, and the nonlinear equilibrium of carbon input-output fluxes. While domestic research had made significant contributions to regional differential response mechanisms and micro-scale analysis of microbial-carbon coupling processes, shortcomings persisted in experimental designs for multi-factor interactions and the integration of long-term observational data. Future research should prioritize breakthroughs in long-term in-situ controlled experiments to elucidate the coupling mechanisms between nitrogen-phosphorus stoichiometry and carbon component transformation, and achieve precision prediction of carbon turnover through model-data fusion. This study provides a theoretical framework for quantitatively evaluating the carbon sequestration potential of grassland ecosystems under anthropogenic nitrogen and phosphorus input, and has guiding significance for the adaptive management of ecosystems under the goal of “Double Carbon”.

Key words: Grassland; Carbon cycle; Nitrogen and phosphorus addition; CiteSpace

收稿日期:2025-01-27;修回日期:2025-05-05

基金项目:甘肃农业大学公招博士科研启动基金项目(GAU-KYQD-2021-39)资助

作者简介:胡蓉(2004-),女,汉族,甘肃静宁人,本科生,主要从事草地生态研究,E-mail: 209794149@qq.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: yang_jie@gau.edu.cn

土壤碳循环是全球碳循环中的核心组成部分^[1],全球约三分之一的有机碳储存在土壤中^[2],尤其在草地生态系统中,土壤作为碳的巨大储存库,发挥着重要作用。随着全球气候变化的加剧,土壤碳的释放与储存已成为全球变暖研究中的关键问题。氮磷富集作为农业生产和大气氮沉降的常见影响因素,其对土壤碳循环的作用已引起广泛关注^[3]。草地覆盖了全球约40%的陆地面积,作为全球陆地生态系统中重要的生物群落类型之一,储存着大量的碳。氮磷的施用不仅直接影响草地植物的生长,还通过改变草地土壤微生物群落、根系活动及土壤碳的转化过程,间接影响草地土壤碳的存储与释放。氮的添加通常通过促进植物生长和微生物活动来增加土壤有机碳的固定量^[4]。然而,过量的氮输入也可能加速土壤有机碳的矿化和呼吸作用,导致碳的释放^[5]。磷是植物和微生物生长的限制因子,其添加能缓解氮的限制作用,促进植物根系生长并优化微生物功能^[6],但其对草地土壤碳循环的具体影响机制仍不完全明确。

尽管已有大量文献关注氮磷添加对土壤碳循环的影响,尤其是在草地生态系统中的应用,但现有研究仍存在一定的局限性。大部分研究聚焦于实验室或短期田间实验,缺乏长时间尺度的连续观测,无法充分揭示氮磷添加对草地土壤碳的长期效应^[7]。更重要的是,氮磷耦合作用的复杂性及其对土壤碳动态的影响尚未得到充分关注,现有研究对其相互作用及综合效应的讨论相对薄弱。为了弥补这些不足,本研究采用文献计量分析方法,通过CiteSpace软件对近10年来关于氮磷添加对草地生态系统土壤碳循环影响的研究文献进行系统梳理和总结。本文的主要目标是:系统梳理氮磷添加对草地生态系统土壤碳循环的研究现状,分析氮磷添加研究的时空分布、研究热点和发展趋势;归纳总结氮磷添加对草地土壤碳动态的影响机制;提出未来研究的关键问题与方向,为未来在氮磷添加与草地生态系统土壤碳循环关系的研究提供理论参考。本研究不仅系统总结了氮磷添加对草地土壤碳循环的研究进展,还为理解氮磷添加在全球碳循环中的作用提供了新视角。全面回顾氮磷添加对土壤碳动态的影响,为土壤碳管理、草地生态系统的碳固定和农业可持续发展提供理论支持,尤其对全球碳中和目标的实现具有重要的科学和实践意义。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究的数据来源于中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)和Web of Science(WOS)数据库。在CNKI数据库中,使用关键词组合“土壤碳”+“土壤碳循环”+“氮磷”+“草原”进行高级检索,检索时间范围为2014年至2024年,筛选出相关中文文献。在WOS数据库中,以“carbon”和“soil carbon cycling”和“phosphorus addition”和“nitrogen addition”和“grassland”作为主题词进行检索,时间范围也设定为2014—2024年,确保检索到的文献反映了该领域的最新研究进展。

为确保数据的质量与代表性,排除了会议论文、科技成果报告、在线发表文献。最终,在CNKI数据库中共获得4873篇中文文献,在WOS数据库中获得353篇英文文献。这些文献为本研究提供了丰富的数据支持,涵盖了氮磷添加对草地生态系统土壤碳循环的影响及其机制的最新研究成果。

1.2 分析方法

本研究采用CiteSpace软件进行文献计量分析,以揭示氮磷添加对草地土壤碳循环研究领域的热点、发展趋势和新动态。CiteSpace基于共引分析(Cocitation analysis)和路径网络算法(Path finder)等方法,通过对文献进行计量分析^[8],能够有效识别研究领域中的核心文献、关键作者、重要机构、研究主题及其演变趋势。CiteSpace的可视化效果使得文献的分析结果更加直观和易于解读。其步骤为:首先,将从CNKI和WOS导出的作者、机构、关键词、引文等原始数据载入CiteSpace,完成去重与一致性校正,确保信息完整可靠^[9]。随后,依托清洗后的数据集依次构建并解读作者合作网络、机构合作网络及关键词共现与聚类网络,以识别核心研究者及其贡献,梳理主要研究单位的合作格局与方向,厘清氮磷添加对草地土壤碳循环主题的热点演进。接着,通过突现检测功能捕捉短期内涌现的高强度关键词,借助时间线视图勾勒该领域的发展阶段与关键转折,并用Excel 2021统计年度发文量,绘制增长曲线,揭示研究热点的迁移。最后,综合图谱结果与统计数据,系统阐释氮磷添加在草地生态系统土壤碳循环中的作用机制,凝练当前热点,提出未来研究需突破的方向。

2 结果与分析

2.1 研究文献数量的时间趋势

从研究趋势来看(图1),CNKI与WOS文献呈现出不同的发展态势。CNKI中文文献自2018年后因中国生态保护政策和“双碳”目标的推动快速增长,而WOS国际文献则保持稳定或先增后缓,反映出国际研究热点逐渐进入平台期。2014—2017年为该领域的探索阶段,文献量较低;2018年后,CNKI文献因《巴黎协定》和“双碳”目标影响显著上升,而2020—2024年WOS文献增速放缓,转向微生物机制等细分领域。数量差异源于政策驱动、语言数据库偏向和研究成熟度不同。草地土壤碳循环研究热点与全球气候变化、草地退化治理密切相关,氮磷添加调控研究成为学科交叉焦点。未来,国内研究需加强机理探索以接轨国际,国际研究将向多因子交互及全球模型拓展,数据跨度延长至2024年,“双碳”目标对中文文献量的持续影响值得关注。

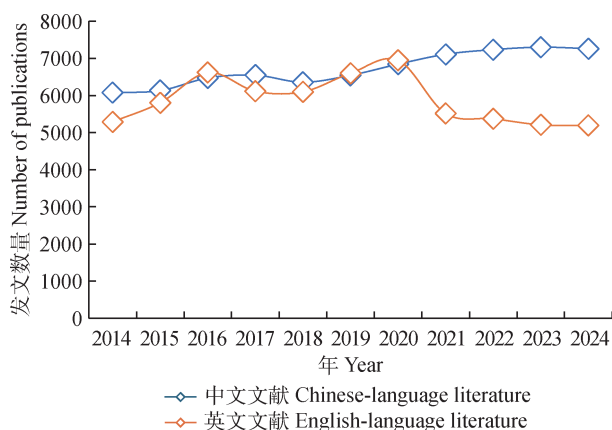


图1 2014—2024年收录在CNKI与WOS中出版物数量
Fig. 1 Number of publications included in CNKI and WOS from 2014 to 2024

2.2 发文作者

基于CiteSpace对草地生态系统土壤碳循环领域文献的统计,在2014—2024年期间CNKI与WOS发文量排名前五的作者中(表1),中文文献发文量最高的学者为韩国栋教授,英文文献中Eisenhauer Nico教授发表的相关研究最多。除核心作者外,多位高产学者的研究涵盖了氮磷添加对草地碳循环的影响、微生物群落的调控作用等多个方向。

作者合作网络图谱(图2)呈现出以下特征:①“大分散、小聚集”布局:整体合作网络呈现分散化趋势,但存在若干紧密协作的小型研究团体。②

核心学者网络地位:韩国栋、王忠武、赵萌莉等在合作网络中占据中心位置,其发文量和合作频次均显著高于其他学者。③核心-外围结构:网络中存在明显的核心-外围层级分布,核心层由主要研究团队构成,成员间合作密切(如韩国栋与王忠武长期共同开展氮磷添加对土壤碳影响的研究);外围层包括众多独立研究者,合作强度较低但仍参与相关研究,反映该领域研究网络的持续扩展。

合作频次与共引分析表明,核心学者通过密切协作推动了本领域关键科学问题的深入研究,有效促进了相关理论和技术的发展。

表1 在2014—2024年期间CNKI与WOS发文量排名前5的作者

Table 1 The top 5 authors of CNKI and WOS during 2014—2024

序号 Rank	作者 Author	中文发文量 Number of CNKI	作者 Author	英文发文量 Number of WOS
1	韩国栋 Han Guodong	182	Eisenhauer Nico	59
2	王忠武 Wang Zhongwu	104	Rattan Lal	58
3	赵萌莉 Zhao Mengli	98	Kuzyakov Yakov	58
4	辛晓平 Xin Xiaoping	89	Sardans Jordi	45
5	陈林 Chen Lin	81	Buckley Daniel H	42

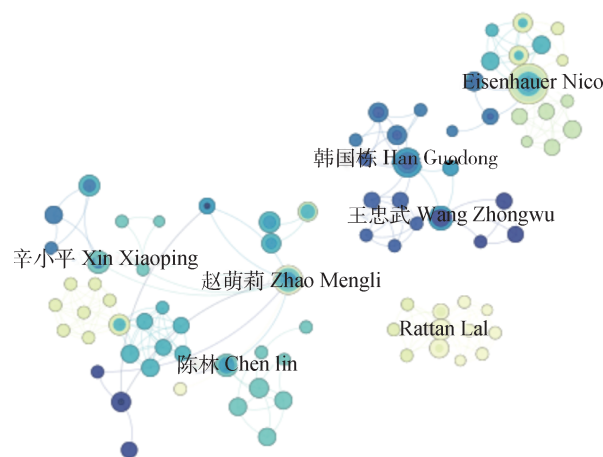


图2 CNKI, WOS作者合作网络

Fig. 2 CNKI, WOS author collaboration network

2.3 发文区域与机构

表2和图3为氮磷添加对草地土壤碳循环研究领域的几所核心研究机构,核心机构通过频繁合作,推动了该领域的研究进展,斯坦福大学、马普学会和中国科学院等知名学术机构在该领域占

据主导地位。这些机构通过跨学科合作,在氮磷添加对土壤碳循环的影响研究中做出了重要贡献。例如,斯坦福大学的研究团队专注于研究氮磷添加如何通过植物生长与微生物活动影响土壤碳储存^[10],而马普学会则在全球碳循环与气候变化背景下,探索氮磷添加对碳矿化与碳呼吸的影响。核心机构之间的合作较为紧密,表明它们在相关研究中有着频繁的交流与合作。斯坦福大学与中国科学院、马普学会等机构的合作推动了氮

磷添加与草地土壤碳循环研究的跨国合作。通过这些合作,研究者能够共享实验数据、方法和成果,增强了研究的国际化与多样性。随着研究的深入,越来越多的学术机构加入了该研究领域,尤其是来自发展中国家(如印度、巴西、南非等)的机构,这些国家的研究机构开始参与到全球土壤碳循环与气候变化相关的研究中。这表明,全球范围内的合作网络正在不断扩展,为未来的跨区域比较和多维度研究奠定基础。

表 2 发文量排名前 5 的科研单位

Table 2 Top 5 scientific research institutions with the largest number of publications

序号 Rank	CNKI 机构名称 CNKI institution name	发文量 Number of articles	百分比 Percentage/ %	WOS 机构名称 WOS institution name	发文量 Number of articles	百分比 Percentage/ %
1	中国科学院大学 University of Chinese Academy of Sciences	649	31.50	Stanford University	333	48.61
2	内蒙古农业大学 Inner Mongolia University	428	20.78	Max Planck Society	161	23.50
3	西北农林科技大学 Northwest A&F University	422	20.49	Chinese Academy of Sciences	89	12.99
4	东北林业大学 Northeast Forestry University	345	16.75	Indian Institute of Tropical Meteorology	57	8.32
5	宁夏大学 Ningxia University	216	10.49	Institute of Botany	45	6.57



图 3 发文机构

Fig. 3 Issuing authority

2.4 研究热点与趋势分析

2.4.1 研究热点的主要聚类 关键词聚类分析(图4、图5)表明,关键词可以分为几个主要类别,每个类别代表一个独立的研究方向或核心议题。根据聚类结果,以下几个研究方向为该领域的核心热点:

氮磷添加与土壤碳储存:这一聚类显示了氮磷添加对土壤碳储存的影响是研究的核心问题之一。研究发现,氮磷添加可能通过促进植物生长和微生物活动来增加土壤有机碳的固定^[11]。氮磷作为植物生长的关键限制性养分,其添加可通过两条核心

途径提升土壤有机碳固定:一是促进植物生长,增强光合作用,增加生物量,使根系分泌物和凋落物增多,从而增加碳输入^[12];二是调控微生物活动,刺激微生物生长、改变群落组成、促进矿物结合态碳形成,影响碳转化^[13]。此外,氮磷添加还可能通过间接效应抑制土壤有机碳的分解,例如降低微生物对酶活性的需求和提高其碳利用效率。从时间维度看,短期添加可能导致土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)波动,长期则使SOC净增加,但存在碳饱和和限制^[14]。而生态系统类型、土壤性质、添加比例等因素也会影响氮磷添加对SOC的作用效

果^[15]。因此,氮磷添加对SOC的净效应取决于植物-微生物-矿物相互作用的平衡,合理管理养分输入,优化配比并结合有机肥,可最大化土壤碳汇潜力,助力碳中和目标的实现。然而,过量的氮磷输入也可能加速碳的矿化和呼吸作用,导致土壤碳的释放^[16]。

土壤微生物与碳矿化:关键词“微生物群落”和“土壤微生物”聚集在一起,显示了微生物群落在氮磷添加影响草地土壤碳循环过程中的重要作用。氮磷添加不仅促进了植物生长,还通过影响土壤微生物的结构和功能,调节土壤碳的转化。氮磷添加通常会改变微生物的群落组成,增加微生物的活性,从而影响碳的分解和矿化。在自然生态系统中,微生物群落对氮和磷添加的响应复杂多样。外源添加氮磷可缓解微生物的养分限制,改变其代谢优先级和群落结构。富营养型微生物占比增加,而寡营养型微生物减少,分解不同底物的微生物类群也会发生适应性变化^[17]。细菌群落对氮添加的响应表现为富营养型细菌增加、寡营养型细菌减少,代谢功能上更倾向于利用易降解碳,同时硝化作用增强,物种多样性下降^[18]。磷添加则使磷酸酶分泌能力强的类群和放线菌丰度上升,促进有机磷矿化基因表达,增强细菌对碳的利用效率。真菌群落对氮添加的响应表现为外生菌根真菌受抑制,腐生真菌占比上升,真菌生物量整体下降,木质素分解能力减弱。磷添加则促进丛枝菌根真菌增加,腐生真菌中磷获取能力强的类群占比上升,真菌驱动的有机质分解增强,群落多样性可能提高^[19]。细菌与真菌响应差异的机制在于细胞结构、代谢策略、养分需求和环境耐受性的不同。微生物群落结构与功能的改变同时也影响着土壤碳呼吸与碳通量。研究表明,氮磷添加常增强土壤呼吸作用,加速土壤有机碳分解^[20]。但由于不同草地生态系统自身特性差异,面对氮磷添加时会呈现不同反应模式。

草地碳管理与土壤肥料管理:草地作为重要的碳汇,其管理方式对土壤碳循环具有直接影响。关键词“草地管理”和“碳管理”聚集在一起,显示了研究者们对草地生态系统碳储存和管理的关注。合理的草地管理能够优化氮磷的施用,提高土壤碳的固存能力,并减少过量肥料对土壤健康和碳储存的负面影响^[21]。例如放牧方式在氮磷添加背景下对草地土壤碳循环影响显著,适度放牧可通过刺激植物补偿性生长、促进凋落物腐殖化等^[22],与氮磷添

加协同增效,提高SOC储量;而过度放牧会抵消氮磷添加效益,加速碳损失^[23]。轮牧或休牧比连续放牧更利于维持植物生产力和土壤碳稳定^[24];反刍动物排泄物、混合放牧也会影响养分平衡和碳固存^[25]。其关键作用机制涉及植物-土壤反馈、微生物群落调控及土壤物理结构变化。不同区域下,干旱区氮磷添加可能加剧放牧导致的碳损失,湿润区二者结合利于碳固存^[26]。管理上可通过动态调整载畜量、靶向施肥和植被恢复辅助等策略进行优化。

2.4.2 聚类分析中的新兴研究方向 在关键词聚类中识别出一些新兴的研究方向,这些方向反映了当前研究热点的变化和未来可能的发展趋势(图5):

氮磷添加与全球变化:近年来,关于氮磷添加对草地土壤碳库影响的研究,正从局部生态系统视角转向全球变化背景下的系统性研究。随着全球气候变化的多维度影响(包括大气CO₂浓度持续攀升、全球平均气温显著升高、极端气候事件频发、降水格局剧烈变动)与人为氮磷输入(农业生产施肥、化石燃料燃烧、大气沉降等)的复合效应日益凸显,研究者们发现氮磷添加的生态效应呈现出前所未有的复杂性、非线性和尺度依赖性特征^[2]。这种认识的深化直接反映在科学文献的关键词演变上。数据显示,“气候变化”和“全球变化”等关键词在近五年的相关研究中出现频次激增40%以上,已跃升为该领域最核心的研究主题词。这一转变标志着研究范式的重要革新:从过去聚焦单一生态系统的养分调控实验,发展到如今关注全球碳-氮-磷循环耦合及其气候反馈的多尺度综合研究。在科学认识层面,研究者们已逐步揭示出氮磷添加与气候变化因子的多途径交互作用机制。在全球变暖背景下,温度升高会明显加速土壤有机质的微生物分解过程(温度每升高10℃,分解速率提高2~4倍),而氮磷输入则会通过改变微生物群落结构和功能(如提高碳利用效率10%~20%)来调控这一过程的强度和方向^[27]。

长期监测与动态变化:在全球气候变化背景下,氮磷添加对草地土壤碳库的长期影响越来越受到关注。研究表明,其效应呈现明显的阶段性特征:北美草原实验显示,前5—10年土壤有机碳可增加15%~25%,但10—15年后积累速率减缓甚至下降^[28]。这种动态变化源于植物生产力、微生物群落和有机质化学性质的多重作用,且受气候条件调控

——温带草原一般表现为持续固碳,而干旱区更易出现碳饱和。研究手段从传统采样发展到整合稳定同位素、分子生物学和自动监测等新技术,数据共享平台(如ILTER)也为长期研究提供了支撑。未来应重点解决氮磷效应的时间累积规律、区分短期和长期影响机制等关键问题,以提高全球碳循环预测能力。

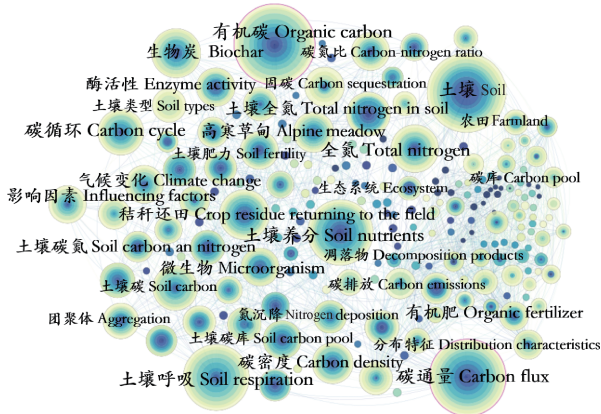


图4 关键词网络图

Fig. 4 Keyword network map

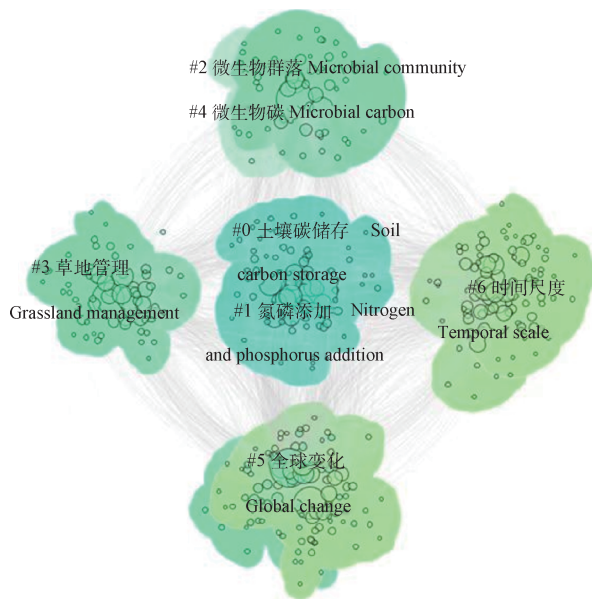


图5 关键词聚类图

Fig. 5 Keyword clustering map

2.4.3 关键词突现 关键词突现性是指在一段时间内关键词的出现频率快速上升,可以认为这些关键词是在该段时间内代表该领域的研究前沿与热点。图6为排名前25的关键词突现图,在图中,空心线段表示关键词未出现的阶段,实心填充线段代表关键词出现的时间,加粗的实心线段则是

关键词爆发的时间段。图7为关键词时间线图,根据关键词热点突现图和关键词时间线图分析可以看到一些关键词在特定时间段内的快速增长,显示了这些话题在氮磷添加对草地土壤碳循环的研究中的突发性。

通过整合关键词突现图与时间线图,可清晰识别氮磷添加对草地土壤碳循环研究的动态演变:早期(2014—2016年)主要聚焦于其对土壤碳储存的直接效应。随后,研究重心逐渐转移,自2017年起深入探讨微生物群落在其中的核心作用,强调微生物驱动着碳矿化、呼吸和固定等关键过程。2018年后,碳通量与碳呼吸成为新的焦点,关注氮磷添加如何影响土壤碳释放与储存的动态平衡。同时,碳固定的研究突现,凸显了其在全球碳中和背景下对土壤碳储量的潜在贡献。2019年后,草地管理作为应用导向的新兴热点兴起,研究如何优化管理措施以改善氮磷添加的碳储存效果。2020年后,气候变化及其与氮磷输入的交互作用成为核心议题。关键词突现性分析表明,氮沉降和有机碳动态是理解氮磷添加影响土壤碳循环的核心方面。

整体趋势表明:研究从基础碳储量评估(早期)→微生物机制解析(中期)→碳动态过程量化(中后期)→管理策略优化(近期)逐步深化,体现多学科交叉下草地碳循环研究的多元化发展。

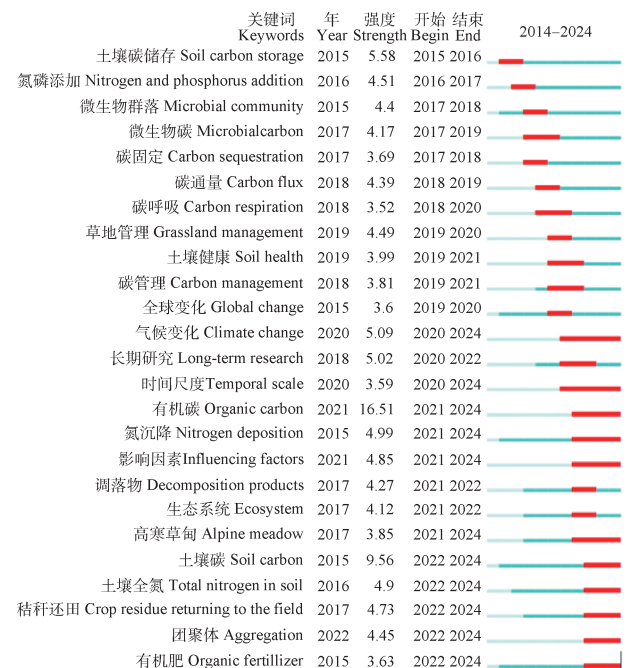


图6 突现性排名前25的关键词

Fig. 6 Top 25 keywords with the strongest citation bursts

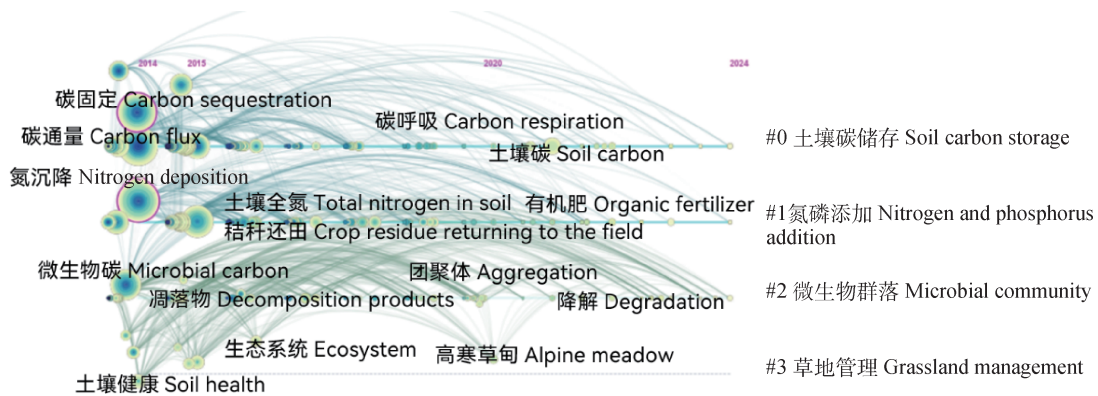


图7 关键词时线

Fig. 7 Keyword timeline

注:关键词时间线可以明确地显示出关键词随时间变化的趋势,图中关键词所在位置表示该关键词出现的时间节点,圆圈图形的大小表示该关键词在相应时间出现的频率,圆圈越大,表示相关的发文章越高

Note: The keyword timeline can clearly show the trend of keywords changing with time. The location of the keyword in the figure indicates the time node of the keyword. The size of the circle graph indicates the frequency of the keyword at the corresponding time. The larger the circle, the higher the amount of related articles

3 讨论

本研究通过文献计量分析揭示了氮磷添加对草地土壤碳循环的影响,并对该领域的研究热点进行了深入探讨。从国内外研究差异来看,欧美国家的氮磷添加研究起步较早,且研究成果在长期监测、跨学科整合和气候变化背景下的土壤碳动态等方面具有领先优势。欧美国家的学者早期便开始关注氮磷添加对土壤碳储存的影响,尤其是在全球气候变化的框架下,他们的研究深入探讨了氮磷添加如何通过影响碳矿化和碳通量来调节碳的释放与固存。相比之下,虽然国内研究起步较晚,但近年来随着对草地生态系统碳循环关注的增加,取得了显著进展。特别是在氮磷添加对草地碳储存、微生物群落的作用等方面,国内学者已经做出了重要贡献。然而,相较于欧美的研究,国内在跨区域比较和长期研究方面仍存在一定的不足,尤其是在多因素耦合作用的研究中,亟需进一步加强。

在理论与实际意义方面,氮磷添加对草地土壤碳循环的研究不仅为碳循环理论提供了重要证据,也为生态系统管理和政策制定提供了科学依据。氮磷添加对草地土壤碳储存的影响直接关系到土壤碳汇功能和全球碳平衡,进而影响气候变化的调节^[29]。合理的氮磷施用和草地管理措施可以促进土壤碳的固定和储存,有助于减缓全球变暖进程^[30]。其中,根系输入管理(如种植深根系作物)与激发效应调控(优化施肥抑制正激发)可作为提升土壤碳汇功能的关键策略。因此,理解氮磷添加对

草地碳循环的作用机制,对于制定合理的碳管理政策和促进可持续农业发展具有重要的理论和实践意义。尽管该领域的研究已取得一定进展,但仍存在一些研究空白和改进空间。首先,当前的研究大多集中于短期效应和局部区域,缺乏长期效应的研究。土壤碳的变化不是一个即时反应,长期的氮磷添加效应可能在土壤微生物群落、土壤结构以及碳储存能力上展现出不同的动态变化^[31]。例如,长期氮磷输入可能通过改变根系分泌物化学组成(如酚类物质比例)或激发效应阈值,重塑SOC的周转路径,此类过程需结合跨年度观测与模型模拟进行量化^[32-33]。因此,未来的研究应加强跨年度和跨区域的长期监测,探讨氮磷添加对草地土壤碳循环的长期影响。其次,现有研究集中于氮磷添加的单一效应,但草地土壤碳循环是一个多因素交互作用的复杂系统,未来的研究应更加关注多因素耦合作用,例如氮磷添加与气候变化、水分变化、土地利用变化等因子的协同效应^[34]。深入探究这些因素对土壤碳动态过程的协同影响机制,可为制定全面的碳管理策略提供科学依据。此外,微生物群落在氮磷添加对土壤碳矿化、碳呼吸及碳固定过程中的作用越来越受到重视,未来研究需要进一步探讨微生物如何在这些过程中发挥关键作用,尤其是如何通过调节微生物群落的结构和功能来影响碳的转化。

随着对氮磷添加影响研究的不断深入,草地碳管理逐渐成为一个新的研究热点。如何通过优化草地管理措施,如合理施肥、牧草轮换、草地恢复等,提高土壤碳的长期储存能力,已成为该领域的

重要研究方向。草地管理不仅仅是施肥的问题,还包括对土壤健康的维护和微生物多样性的保护^[35]。例如,引入菌根植物可通过增强根系-微生物互作抑制正激发效应,同时提升微生物残体碳对稳定碳库的贡献^[36]。研究如何在草地管理中实现氮磷添加的最佳管理策略,将为全球碳管理提供更加具体的操作建议。此外,土壤微生物的管理和草地碳管理将成为未来研究的关键,尤其是在实现全球碳中和目标的背景下,如何通过草地管理提高碳储存能力和土壤健康的研究将受到越来越多的关注。

4 结论与展望

本研究通过文献计量分析揭示了氮磷添加对草地土壤碳循环影响的最新研究趋势及其发展动态。氮磷添加对草地土壤碳的影响已成为土壤学、生态学和全球变化研究中的一个重要议题。研究表明,氮磷添加不仅影响土壤碳储存,还通过调节土壤微生物群落、碳通量和碳矿化等多种机制,深刻改变土壤碳的动态过程。特别是微生物群落和碳通量的变化,揭示了氮磷添加对土壤碳的双向调节作用。草地碳管理和全球气候变化的交互作用逐渐成为研究的核心方向,提示我们应将氮磷添加效应与气候变化、土壤健康等多因素结合,以更全面地理解其对土壤碳循环的长期影响。

尽管本研究提供了氮磷添加对草地土壤碳循环影响的全面概述,但仍存在诸多未解之谜。未来的研究应进一步加强跨区域和长时间尺度的比较研究,特别是在不同气候条件、土壤类型及草地管理方式下的氮磷添加效应。同时,针对多因素耦合作用的研究将是未来的关键方向,如何在全球变化背景下,优化氮磷添加的施用和草地管理策略,以提高土壤碳储存并减缓气候变化,是亟待解决的重要问题。此外,土壤微生物群落在碳矿化、碳呼吸和碳固定过程中的作用仍需深入探讨,未来的研究应结合微生物学和生态学的前沿成果,推动草地碳管理的优化与实践。

参考文献

- [1] 占奥丽,黄敏,尹龙,等. 土壤碳循环微生物作用研究进展[J]. 华中农业大学学报,2024,43(4):70-81
ZHAN A L, HUANG M, YIN L, et al. Roles of microorganisms in carbon cycling in soil[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(4):70-81
- [2] 肖红,刘玉玲,刘忠宽,等. 氮磷添加对草甸草原土壤氮磷转化功能基因丰度的影响[J]. 生态学报,2023,43(1):313-326
XIAO H, LIU Y L, LIU Z K, et al. Responses of soil nitrogen and phosphorus transformation functional genes abundances to nitrogen and/or phosphorus additions in a meadow steppe[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1):313-326
- [3] 冯继广,张秋芳,袁霞,等. 氮磷添加对土壤有机碳的影响:进展与展望[J]. 植物生态学报,2022,46(8):855-870
FENG J G, ZHANG Q F, YUAN X, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil organic carbon: review and prospects[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(8):855-870
- [4] 郭洁芸,王雅歆,李建龙. 氮添加对中国陆地生态系统植物-土壤碳动态的影响[J]. 生态学报,2022,42(12):4823-4833
GUO J Y, WANG Y X, LI J L. Effects of nitrogen addition on plant-soil carbon dynamics in terrestrial ecosystems of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12):4823-4833
- [5] FLEISCHER S. Interaction between N and C in soil has consequences for global carbon cycling[J]. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(1):16-19
- [6] 李强,黄迎新,周道玮,等. 土壤氮磷添加下豆科草本植物生物固氮与磷获取策略的权衡机制[J]. 植物生态学报,2021,45(3):286-297
LI Q, HUANG Y X, ZHOU D W, et al. Mechanism of the trade-off between biological nitrogen fixation and phosphorus acquisition strategies of herbaceous legumes under nitrogen and phosphorus addition[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(3):286-297
- [7] 贺佩,李悦,江明兢,等. 连续氮添加14年对温带典型草原土壤碳氮组分及物理结构的影响[J]. 生态学报,2021,41(5):1808-1823
HE P, LI Y, JIANG M J, et al. Effects of 14-year continuous nitrogen addition on soil carbon and nitrogen composition and physical structure at different depths in a typical temperate steppe[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5):1808-1823
- [8] 朱亮,赵瑞雪,寇远涛,等. 基于CiteSpace II的“共引分析”领域知识图谱分析[J]. 数字图书馆论坛,2012,52(12):59-64
ZHU L, ZHAO R X, KOU Y T, et al. Visualization analysis of co-citation analysis research based on CiteSpace II[J]. Digital Library Forum, 2012, (12):59-64
- [9] 王冠超,邓世果. 我国供应链网络研究热点与发展趋势分析——基于CiteSpace可视化分析[J]. 运筹与模糊学,2023,13(6):6725-6734
WANG G C, DENG S G. Analysis of research hotspots and development trends in china's supply chain network-based on CiteSpace visualization analysis[J]. Operations Research and Fuzziology, 2023, 13(6):6725-6734
- [10] 赵晓雅,关梦冉,孙孟瑶,等. 氮磷添加对亚热带常绿阔叶林凋落物产量及其养分含量的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(6):55-62
ZHAO X Y, GUAN M R, SUN M Y, et al. Effects of nitrogen and phosphorus additions on litterfall production and nutrient dynamics in evergreen broad-leaved forests[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(6):55-62
- [11] 姚易寒,张少博,周家树,等. 氮磷添加对毛竹林土壤有机碳矿化及其激发效应的影响[J]. 土壤学报,2023,60(4):1088-1100
YAO Y H, ZHANG S B, ZHOU J S, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on organic carbon mineralization and priming effect in a moso bamboo plantation soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(4):1088-1100
- [12] 李志强,齐鹏,王雅芝,等. 氮磷添加对黄土高原小麦土壤养分含量及生态化学计量特征的影响[J]. 中国农学通报,2024,40(10):95-102

- LI Z Q, QI P, WANG Y Z, et al. Effect of nitrogen and phosphorus addition on nutrient content and ecological stoichiometry characteristics of wheat soils in Loess Plateau [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(10): 95-102
- [13] 苏兴雷, 渠晨晨, 康杰, 等. 微生物驱动土壤矿物结合态有机碳的形成[J]. *科学通报*, 2024, 69(22): 3327-3338
- SU X L, QU C C, KANG J, et al. Microorganisms drive the formation of mineral-associated organic carbon in soils (in Chinese) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69: 3327-3338
- [14] 覃章才, 黄耀. 基于模型的农田土壤固碳潜力估算[J]. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(7): 658-676
- QIN Z C, HUANG Y. Estimation of carbon sequestration potential of farmland soil based on model [J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2010, 40(7): 658-676
- [15] 张燕, 强薇, 罗如熠, 等. 氮磷添加对土壤微生物生长、周转及碳利用效率的影响研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(2): 526-534
- ZHANG Y, QIANG W, LUO R Y, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial growth, turnover, and carbon use efficiency: a review [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, 28(2): 526-534
- [16] QIN W K, FENG J G, ZHANG Q F, et al. Nitrogen and phosphorus addition mediate soil priming effects via affecting microbial stoichiometric balance in an alpine meadow [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 908: 168350
- [17] 杨丽娟, 孙凯, 程蕊, 等. 长期氮磷添加对滨海湿地土壤微生物残体碳和酶活性的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(12): 1624-1633
- YANG L J, SUN K, CHENG R, et al. Effects of long-term nitrogen and phosphorus supply on soil microbial necromass carbon and enzyme activities in a coastal wetland [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(12): 1624-1633
- [18] ZHANG C, SONG Z L, ZHUANG D H, et al. Urea fertilization decreases soil bacterial diversity, but improves microbial biomass, respiration, and N-cycling potential in a semiarid grassland [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55(3): 229-242
- [19] 刘珊珊, 王全成, 史加勉, 等. 亚热带森林菌根植物根系真菌群落结构对氮磷添加的响应[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(6): 1547-1554
- LIU S S, WANG Q C, SHI J M, et al. Responses of root-associated fungal community structure of mycorrhizal plants to nitrogen and/or phosphorus addition in a subtropical forest [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(6): 1547-1554
- [20] GAO W J, MA T, SHI B W, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on the mineralization potential of soil organic carbon and the corresponding regulations in the Tibetan alpine grassland [J]. *Applied Soil Ecology*, 2024, 196: 105-314
- [21] BAI Y F, COTRUFO M F. Grassland soil carbon sequestration: current understanding, challenges, and solutions [J]. *Science*, 2022, 377(6606): 603-608
- [22] 江奥, 敬路淮, 泽让东科, 等. 放牧影响草地凋落物分解研究进展[J]. *草业学报*, 2023, 32(4): 208-220
- JIANG A, JING L H, MIPAM Tserangdonko, et al. Progress in research on the effects of grazing on grassland litter decomposition [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(4): 208-220
- [23] 李强, 宋彦涛, 周道玮, 等. 围封和放牧对退化盐碱草地土壤碳、氮、磷储量的影响[J]. *草业科学*, 2014, 31(10): 1811-1819
- LI Q, SONG Y T, ZHOU D W, et al. Effects of fencing and grazing on soil carbon, nitrogen, phosphorus storage in degraded alkali-saline grassland [J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31(10): 1811-1819
- [24] 刘娟, 刘倩, 柳旭, 等. 划区轮牧与草地可持续性利用的研究进展[J]. *草地学报*, 2017, 25(1): 17-25
- LIU J, LIU Q, LIU X, et al. Review on rotational grazing for the sustainable development of grassland [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(1): 17-25
- [25] JORDON M W, BUFFET J C, DUNGAIT J A J, et al. A restatement of the natural science evidence base concerning grassland management, grazing livestock and soil carbon storage [J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2024, 291(2015): 20232669
- [26] ZHOU G Y, ZHOU X H, HE Y H, et al. Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(3): 1167-1179
- [27] 李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 等. 土壤微生物群落对全球气候变化响应的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2023, 50(4): 1700-1719
- LI Y J, MA J W, LI Y Q, et al. Responses of soil microbial community to global climate change: a review [J]. *Microbiology China*, 2023, 50(4): 1700-1719
- [28] PURAKAYASTHA T J, HUGGINS D R, SMITH J L. Carbon sequestration in native prairie, perennial grass, No-till, and cultivated Palouse silt loam [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(2): 534-540
- [29] LIU H Y, HUANG N, ZHAO C M, et al. Responses of carbon cycling and soil organic carbon content to nitrogen addition in grasslands globally [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 186: 109164
- [30] COTRUFO M F, LAVALLEE J M, ZHANG Y, et al. In-N-out: a hierarchical framework to understand and predict soil carbon storage and nitrogen recycling [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(19): 4465-4468
- [31] WU L, WANG J, XU H, et al. Soil organic carbon priming co-regulated by labile carbon input level and long-term fertilization history [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 902: 166175
- [32] MA T, GAO W J, HE J S, et al. Effects of short- and long-term nutrient addition on microbial carbon use efficiency and carbon accumulation efficiency in the Tibetan alpine grassland [J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 229: 105657
- [33] LING J, DUNGAIT J A J, DELGADO-BAQUERIZO M, et al. Soil organic carbon thresholds control fertilizer effects on carbon accrual in croplands worldwide [J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 3009
- [34] 羿明璇, 孙政国, 丛鹏飞, 等. 草地生态系统功能对气候变化的响应研究进展[J]. *中国草地学报*, 2023, 45(12): 112-120
- YI M X, SUN Z G, CONG P F, et al. Research progress on the response of grassland ecosystem function to climate change [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(12): 112-120
- [35] 刘玲莉, 井新, 任海燕, 等. 草地生物多样性与稳定性及对草地保护与修复的启示[J]. *中国科学基金*, 2023, 37(4): 560-570
- LIU L L, JING X, REN H Y, et al. Grassland biodiversity, stability, and implications for grassland conservation and restoration [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2023, 37(4): 560-570
- [36] 金文豪, 邵郡, 陈俊辉, 等. 不同类型菌根对土壤碳循环的影响差异研究进展[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(5): 953-962
- JIN W H, SHAO S, CHEN J H, et al. Research progress in the impact of different mycorrhizal types on soil carbon cycling [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, 38(5): 953-962