

基于文献计量的放牧对草地植物—土壤交互作用关系的影响分析

张程辉¹, 兰慧琴^{2,3}, 刘建康^{2,3}, 王益涛^{2,3},
张洁^{2,3}, 王晓娟⁴, 莎仁图雅⁵, 曹恭祥⁵, 邢玉坤⁵

(1. 宁夏大学 林业与草业学院, 宁夏 银川 750021;

2. 宁夏大学 生态环境学院, 宁夏 银川 750021; 3. 西北退化生态系统恢复与

重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021; 4. 宁夏大学 动物科技学院, 宁夏 银川 750021;

5. 内蒙古自治区林业科学研究院内蒙古鄂尔多斯森林生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 鄂尔多斯 016100)

摘要: [目的] 系统评价放牧对草地生态系统植物—土壤交互作用关系影响的研究热点和发展趋势脉络, 为草地生态学未来发展方向提供科学依据。[方法] 基于 R 语言、Citespace 和 VOSviewer 软件, 分析 2000—2023 年 Web of Science 和中国知网 (CNKI) 数据库中筛选的 10 809 篇文献。[结果] 国内外在该领域的发文量整体呈增长趋势, 研究热点主要聚焦放牧管理对气候敏感区草地植被群落特征与土壤循环功能的影响, 研究视角逐渐从基于传统植物群落—种群—个体生态学调查研究放牧强度、气候变化对草地生态系统的复杂作用机制, 拓展至生态系统繁殖更新及碳平衡特征, 最终延伸至多因素交互作用的脆弱生态系统优化管理模式研究上, 这一转变标志着草地生态学研究的结构层次逐步从宏观向微观层面深化。[结论] 未来研究应借鉴同类领域的前沿研究方法, 加大对跨尺度与多因素交互作用对生态系统复杂影响机制的研究, 将小尺度的试验结果与区域或全球尺度生态模型相结合, 重点关注多维度、多尺度、多因素对地上与地下生态过程联动的影响, 以推动生态系统管理和保护策略的优化。

关键词: 文献计量学; 放牧; 植物—土壤交互; R 语言; Citespace; VOSviewer

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0407-10

中图分类号: S812.2

文献参数: 张程辉, 兰慧琴, 刘建康, 等. 基于文献计量的放牧对草地植物—土壤交互作用关系的影响分析 [J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 407-416. Zhang Chenghui, Lan Huiqin, Liu Jiankang, et al. Impact of grazing on plant-soil interactions in grassland based on bibliometrics data [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 407-416. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.018; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.018.

Impact of grazing on plant-soil interactions in grassland based on bibliometrics data

Zhang Chenghui¹, Lan Huiqin^{2,3}, Liu Jiankang^{2,3}, Wang Yitao^{2,3},

Zhang Jie^{2,3}, Wang Xiaojuan⁴, Sharen · Tuya⁵, Cao Gongxiang⁵, Xing Yukun⁵

(1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. College of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

3. Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwest China of

Ministry of Education, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 4. College of Animal Science and Technology,

Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 5. Inner Mongolia Ordos Forest Ecosystem National

Observation and Research Station Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Ordos, Inner Mongolia 016100, China)

Abstract: [Objective] Research hotspots and developmental trends of grazing impacts on plant-soil interactions in grassland ecosystems were systematically evaluated to provide a basis for management of grassland ecology.

收稿日期: 2024-07-17

修回日期: 2025-01-27

采用日期: 2025-02-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于植物—土壤互作的荒漠植被斑块演变时空特征与调控机制(32360280)”, “土壤斑块异质性下荒漠草原植被空间格局及其形成机制(32001117)”; 2023 年自治区全职引进高层次人才科研启动项目(2023BSB03022); 内蒙古自治区林业科学研究院开放课题(KF2024MS05); 国家林草科技计划项目(2024NLTS05); 第七批宁夏回族自治区青年科技人才托举工程

第一作者: 张程辉(1999—), 男(汉族), 宁夏回族自治区银川市人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠生态学。Email: 2873570912@qq.com。

通信作者: 刘建康(1988—), 男(汉族), 山东省潍坊市人, 博士, 副研究员, 主要从事草地退化与恢复生态学研究。Email: liujiankang1989@126.com。

[Methods] Using R language, CiteSpace, and VOSviewer software, 10,809 articles from the Web of Science and China National Knowledge Infrastructure databases published from 2000 to 2023 were analyzed. [Results] The number of publications in this field showed an increasing trend, both domestically and internationally. Research has mainly focused on the effects of grazing management on vegetation community characteristics and soil cycling in climate-sensitive grassland areas. The research perspective has gradually shifted from traditional plant community-population-individual ecological investigations of grazing intensity and climate change impacts to ecosystem reproduction, renewal, and carbon balance characteristics, and ultimately to optimizing management models for fragile ecosystems based on multifactor interactions. This transition marks the evolution of grassland ecology research from macro-to micro-scale studies [Conclusion] Future research should incorporate advanced methods from related fields to enhance our understanding of the complex mechanisms of cross-scale and multimode interactions in ecosystems and combine small-scale experimental results with regional and global ecological models. Emphasis should be placed on the multidimensional, multiscale, and multifactor impacts on the linkage between aboveground and belowground ecological processes to promote optimization of ecosystem management and conservation strategies.

Keywords: bibliometrics; grazing; plant-soil interaction; R language; Citespace; VOSviewer

草地生态系统广泛分布于干旱和半干旱地区,覆盖陆地总面积的近40%^[1],可为动植物的生存提供丰富的自然环境和物质基础,在全球营养元素循环、区域生物多样性维持、土壤碳库稳定性调节等方面扮演着重要角色^[2]。在全球气候变化和人类活动日趋频繁的背景下^[3],近年来草地退化速度不断加快;目前,全球约49%的草地面临退化风险^[4]。放牧作为草地最直接和最主要的利用方式,通过调节植物群落物种组成^[5]、土壤养分利用效率^[6]、元素含量^[7]、根系特征^[8]、凋落物质及分解^[9]、微生物群落特征等^[10],对草地生态系统物质循环和能量交换产生复杂而多元的作用^[11-12]。牲畜的采食、践踏和排泄可改变植物群落结构和土壤性状,形成植物—土壤之间的正负反馈机制^[6]。放牧对植物—土壤互作关系的调控过程受草地类型、放牧强度和环境因子的影响,具有区域差异性^[13]。研究表明,轻度或适度放牧有助于促进土壤养分循环和土壤微生物活动,维持生态系统稳定^[14-15],而过度放牧会导致植物逆行演替,使得土壤生产力和植物多样性降低,引发负反馈效应^[13,16]。目前,放牧对植物及土壤影响的研究多局限于特定区域、特定植被类型的短期监测,缺乏对不同气候区、植被类型的全面考察,这限制了研究结果的普适性,难以厘清放牧对植物—土壤互作关系的复杂作用机制。因此,全面评估放牧影响下植物与土壤间互馈机制,有助于揭示放牧对草地生态系统结构功能特征的深远影响,为制定草地可持续生态管理策略提供科学指导。

文献计量学是理解和分析科学研究动态的重要工具,它能够量化学术领域发展状况,有助于科研人员探索新的研究方向、把握学科发展脉络^[17]。目前,

文献计量学已被广泛应用于医学、管理学、农学等学科,在草地生态学研究,此方法已用于研究放牧影响下土壤动物^[18]、凋落物^[19]、生态系统结构与功能等^[20]多个方面。但目前关于放牧对草地植物—土壤互作关系的影响研究方向相对分散,尚未形成系统的综合研究体系,特别是关于其研究现状、作用途径和未来研究重点等缺乏全面的梳理与总结。为此,本研究基于文献计量学方法,以放牧影响下植物—土壤互作关系为研究对象,通过回顾2000—2023年相关研究成果分布情况,梳理研究的发展脉络和内在逻辑,总结该领域的动态、热点及未来研究方向,这不仅有助于更好地理解当前研究状况,也可为未来该研究发展方向提供新思路和新见解。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文选取WOS核心合集和CNKI为来源,WOS以“TS=(“grazing”) AND TS=(“grassland”) OR TS=(“meadow”) AND TS=(“plants”) AND TS=(“soil”)”,文献类型为Article和Review Article;CNKI中检索主题为“放牧、草地、草原、植物、土壤”,文献类型为学术期刊,检索时间为2000—2023年,去除学位论文、会议论文、成果、无作者、重复文献等与该研究不相关文献类型,利用CiteSpace软件数据转换和去除重复功能后,最终得到WOS文献8732篇,CNKI文献共2077篇。

1.2 分析方法

本文使用R语言(R4.3.2)“bibliometrix”程序包、CiteSpace(6.3.R6)和VOSviewer(1.6.20)软件对该领域研究机构、期刊、关键词聚类、突发性及时间线

进行定量可视化分析,此外,利用 Microsoft Excel 2016 软件采集 CiteSpace 软件中两个数据库发文量和各国家英文文献合作关系数据,并用 Origin 2024 和 Scimago Graphis 软件分别绘制发文趋势图和各国英文文章发文及合作关系图。

2 结果与分析

2.1 发文量、主要发文国家及合作关系

由图 1 可以看出,2000—2023 年有关放牧对草地植物—土壤交互作用影响研究的发文量总体呈上升趋势。其中,CNKI 数据库中年均增长率为 12.12%,显著高于 WOS 数据库中年均增长率(6.76%)。其中发文国家排名前 4 的依次是中国(1 362 篇)、美国(1 227 篇)、德国(907 篇)和英国(715 篇),且中国与美国、德国、英国等 80 个国家建立了密切的合作关系(图 2)。在国家合作总频次方面,美国最高(70 次),其次是中国(64 次)、德国(63 次)和英国(59 次)。这表明中国和美国在该领域参与度较高,学术贡献及影响力较大,双方在此领域占据主导地位。

2.2 发文期刊、主要发文机构及合作关系

发文期刊分布能综合评价某领域的主流学术期刊及其影响力^[21]。由表 1 可知,关于放牧影响植物—土壤交互作用的研究多发表于草地生态学研究领域的核心期刊,其中发文量排前 3 的英文期刊是《Agriculture Ecosystems & Environment》《Rangeland Ecology & Management》和《Science of The Total Environment》;发文量居前 3 的中文期刊为《生态学报》《草地学报》和《草业科学》,其中《生态学报》以影响因子 4.065 位居榜首。机构合作关系网络中节点的大小代表作者发文量,节点连线代表机构合作关

系^[22]。从图 3 可以看出,WOS 数据库中研究机构群体以中国科学院、兰州大学、中国农业科学院等为代表。在 CNKI 数据库中,中国科学院、宁夏大学、内蒙古农业大学等是研究放牧影响植物—土壤交互关系的主要机构。

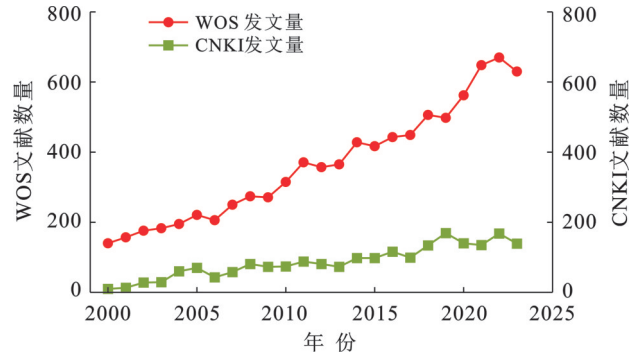


图 1 2000—2023 年相关中英文文献发文量
Fig.1 Publication volume of relevant references in Chinese and English from 2000 to 2023

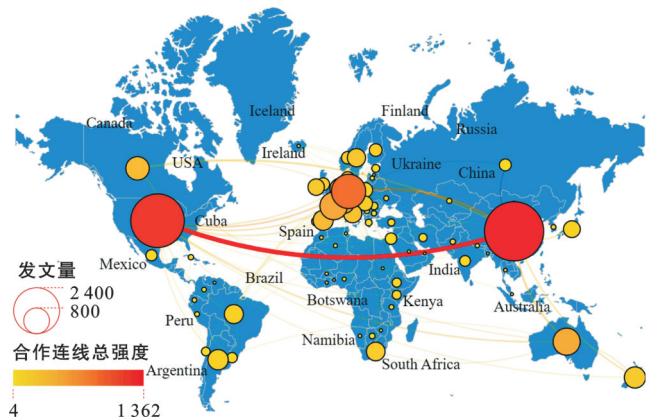


图 2 相关英文文献主要发文国家与合作关系
Fig.2 Main publishing countries of relevant references in English and their collaborative relationships

表 1 相关内容发文量排名前 10 位期刊

Table 1 Top 10 journals of publication volume in relevant content

WOS	发文量	影响因子(2023 年)	CNKI	发文量	影响因子(2023 年)
Agriculture Ecosystems & Environment	361	6.576	生态学报	174	4.065
Rangeland Ecology & Management	222	2.398	草地学报	147	3.057
Science of The Total Environment	170	10.754	草业科学	139	1.791
Applied Vegetation Science	156	3.431	草业学报	138	2.746
Plant and Soil	146	4.993	中国草地学报	109	2.738
Journal of Applied Ecology	141	6.869	植物生态学报	89	2.933
Ecological Indicators	132	6.263	生态学杂志	82	2.437
Journal of Arid Environments	128	2.759	应用生态学报	70	3.435
Grass and Forage Science	121	2.856	草原与草坪	51	1.454
Plos One	117	3.752	生态环境学报	42	2.556

2.3 国内外研究论文关键词聚类

关键词聚类共现分析功能可根据关键词出现频

次发现研究热点^[23]。如图 4 所示,将检索文献以关键词进行聚类分别得到 7 个代表不同研究内容的标签,

在CNKI关键词聚类中,“#0植物群落”聚类主要探讨羊草草原的群落特征与土壤养分的关系,包括休牧的影响等。“#1草地”聚类主要关注草地植被特征、温室气体排放及土壤氮元素含量等。“#2典型草原”聚类主要涉及草原管理方式与植物生活型组成、空间分布等特性之间关系。“#3荒漠草原”聚类涉及异质生境或人为干扰下猪毛蒿等植物的生态适应性及植物群落多样性等。“#4气候变化”聚类聚焦于干旱、半干旱生态系统中植物根系与土壤多功能性之

间的关系。“#5植被特征”与“#6青藏高原”聚类主要关注青藏高原地区不同草地类型、管理方式下草原植被特征与群落结构、及植物与土壤之间复杂作用关系。这些聚类展示了草地和植物群落的多维特性,包括生长环境、管理策略、气候变化的影响及其在生态系统中的功能。各聚类反映了植物生态学的不同研究方向,强调了人类活动对不同类型草地生态系统影响的复杂性与差异性,为了解国内放牧对植物—土壤交互关系影响研究的主题与热点提供了基础信息。

表2 相关文献关键词聚类共现分布

Table 2 Co-occurrence distribution of keyword clusters in relevant references

WOS	关键词总数	年份	出现频次前5位的关键词	CNKI	关键词总数	年份	出现频次前5位的关键词
#0	68	2009	nitrous oxide, urine, denitrification, nitrate, nitrate leaching	#0	40	2009	植物群落, 土壤养分, 羊草草原, 群落特征, 休牧
#1	52	2012	<i>Leymus chinensis</i> , ecological stoichiometry, community composition, water use efficiency, biomass production	#1	29	2008	草地, 植被, 温室气体, 围栏, 土壤全氮
#2	49	2012	climate change, remote sensing, soil respiration, alpine grassland, carbon dioxide	#2	28	2007	典型草原, 放牧, 生活型, 分布, 割草
#3	49	2007	grassland birds, survival, Xizangan Plateau, seed mass, seedling establishment	#3	28	2013	荒漠草原, 猪毛蒿, 刈割, 异质生境, 草甸草原
#4	46	2012	sequestration, impacts, nitrogen, grassland degradation, quality	#4	27	2010	气候变化, 人类活动, 根系, 全球变化, 半干旱区
#5	44	2005	land use, conservation management, functional diversity, plant community, forage quality	#5	27	2015	植被特征, 高寒草甸, 划区轮牧, 冗余分析, 不同土层
#6	41	2011	ecosystem respiration, eddy covariance, ecosystem function, shrub encroachment, plant diversity	#6	25	2013	青藏高原, 高寒草原, 分布特征, 高寒草地, 草地类型

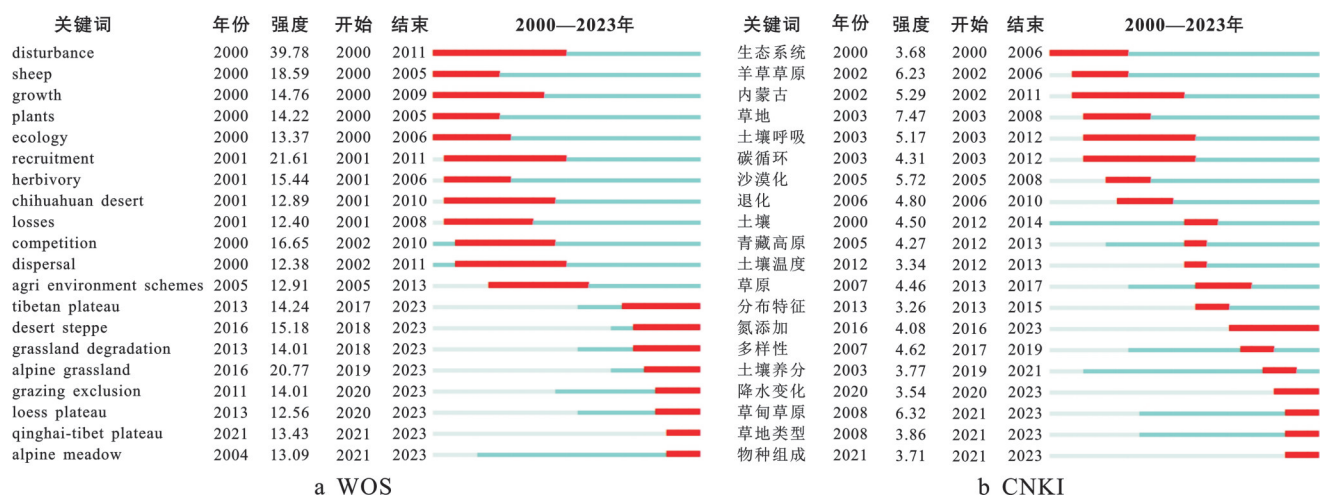
2.4 国内外研究发展趋势

关键词突现和时间分布线图能直观揭示某领域在特定时段内的研究内容及趋势变化,根据图5—6所示,将放牧对植物—土壤互作关系的研究划分为3个阶段:①第一个阶段为2000—2009年,关键词有disturbance(扰动)、sheep(羊)、herbivory(牧食)、plant community(植物群落)、soil nitrogen(土壤氮素)、生态系统、碳循环、全球变化、草地类型等。在此阶段中,学者将牲畜牧食行为作为研究草地生态系统平衡的重点,在放牧过程中牲畜通过采食植物直接改变草地生产力,但在植物补偿机制作用下,其对不同植物的选择性采食又为非优势植物提供了生态位空间,当放牧强度适中时草地植物多样性显著提高^[26-27]。此外,牲畜将植物组织(叶片、枝条、种子等)摄入体内后,经过消化系统作用将不易吸收的物质以排泄物形式返还土壤,加速草地生态系统物质能量循环过程,影响土壤养分状况及碳固持过程,为植物生长提供氮源,进而改变植物群落抗性^[28]。与此同时,国内学者还深入探讨了气候变化背景下放牧活动如何影响草地土壤碳循环过程,指出牲畜通

过踩踏直接改变土壤容重和孔隙等物理性状,抑制土壤碳转换和矿化过程^[29]。研究显示,放牧引起的土壤碳库变化呈现较强的空间异质性,这种特性与放牧强度、气候条件等紧密相关^[30],并且随着纬度的增加,放牧对土壤碳储量的影响程度逐渐减弱^[31-32]。然而,有学者指出当放牧强度超过一定阈值时,土壤碳储量会急剧下降^[33]。在此阶段中,学者一方面深入探讨了不同放牧强度下草地生态系统的复杂响应机制,如植物—土壤营养元素循环、碳氮平衡、生物多样性变化等;另一方面,研究视角也拓展至气候变化、人类活动干扰等外部因素对草地生态系统的影响。这将有助于建立更加全面的关于“放牧—植物—土壤”研究的相关理论框架,为草地管理和可持续利用提供科学依据。②第2个阶段为2010—2015年,关键词变为competition(竞争)、dispersal(扩散)、seed germination(种子萌发)、seed mass(种子大小)、土壤温度、青藏高原、固碳效益、荒漠草地。在此阶段,学者主要研究了放牧活动对土壤种子库建立、竞争、扩散及繁殖的重要影响机制^[34],指出牲畜可通过粪便和皮毛帮助传播种子,增加土壤种子库多样

性^[35];同时,牲畜的移动和践踏行为通过破碎化表层土壤、压实及掩埋土壤等方式,促进种子埋藏和存活,为草地植物群落更新、再生创造条件^[36];此外,牲畜的啃食、践踏和排泄行为对土壤表层产生扰动,改变植物种子微环境,打破某些种子休眠结构,刺激植物种子萌发,间接增加植物多样性^[37]。然而,随着放牧强度加深,牲畜过度采食和践踏影响植物生长繁殖,直接影响土壤中种子的来源^[38];另一方面,过度放牧则增加对土壤侵蚀和压实程度,抑制了适宜种子的萌发、生长^[39]。因此,合理的放牧管理措施至关重要,它不仅有助于保持草地生态功能,还能维护植物群落多样性和生态恢复能力。与此同时,学者又进一步探究了放牧影响下土壤固碳机制,指出放牧活动通过减少植物生物量、释放温室气体和升高土壤温度等显著削弱了土壤的碳封存能力,这主要是因为一方面牲畜觅食直接减少了地表植物生物量,降低了植物群落光合速率,进而抑制草地固碳能力^[40];另一方面牲畜粪便分解会释放温室气体,削弱草地碳封存能力^[41]。在重度放牧条件下,随着土壤温度显著升高,土壤碳含量下降,又进一步降低了土壤碳汇能力^[42]。在全球变化背景下,有学者发现在青藏高原地区随着土壤温度持续升高,碳释放量逐渐增加,削弱了高寒草地的碳封存能力^[43]。然而,在内蒙古的增温和增雨试验则表明,气候变暖将使中国北方干旱、半干旱区荒漠草地成为碳源^[44]。在此

研究阶段,学者深入探讨了不同放牧强度下草地植物—土壤系统的复杂反应机理,包括种子库动态变化、植物繁衍、竞争策略以及与气候因素的交互影响等;另一方面研究视角也更多地关注草地碳汇功能的调控机制,量化了放牧管理和气候变化情景下草地生态系统的碳平衡特征,这将有助于为草地生态系统管理和“碳中和”目标提供更加优化的理论依据。③第3个阶段为2016—2023年,关键词包括 alpine grassland(高寒草地)、grassland degradation(草地退化)、ecological stoichiometry(生态化学计量)、ecological restoration(生态恢复)、草甸草原、多样性、不同土层、土壤微生物等。在此研究阶段,随着草地生态研究的逐步深入,学者逐渐将研究聚焦到生境条件恶劣地区,利用生态化学计量学研究了高寒草地(草甸、草原)退化的特征与机理。在青藏高原高寒草地的生态恢复试验发现,放牧条件下土壤碳氮比变化显著,而草地封禁后土壤碳氮比的时间稳定性较强^[45-46]。此外,研究学者也更多的开始关注土壤微生物群落特征,指出牲畜放牧可通过采食、排泄和践踏3种途径影响植物向土壤中输入资源的质量与数量、根系分泌物、及土壤理化性质,进而影响土壤微生物多样性^[47]。研究发现随着放牧强度的增加,不同土层中土壤微生物碳、氮含量均呈现出降低的趋势^[48],且过度放牧条件下草甸草原土壤微生物多样性显著下降^[49]。



注:红色线段表示突现年份,蓝色线段表示普通年份。

图5 2000—2023年放牧对草地植物—土壤互作关系的关键词突现排名前20位分析

Fig.5 Analysis on top 20 keyword bursts in grazing effects on grassland plant-soil interactions from 2000 to 2023

在这一研究阶段,研究学者进一步深化对不同生境下高寒草地生态化学计量特征及其与气候、土地利用变化的交互作用的认知,以期更好地预测脆弱生态系统的响应与演替。另一方面,研究视角延伸至基于生态系统服务的优化管理模式,关注如何在维护草地

生态功能的前提下提高其对人类福祉的贡献。同时也更多地关注动物行为、生境片段化等对草地生态系统的影响。总的来说,这一阶段的研究更加注重综合性和应用性,通过对放牧影响下植物群落、土壤性状及微生物特征的综合研究因地制宜地提出恢复

及管理措施,进而为维持脆弱生境的生态稳定性、实现高寒草地的可持续利用提供更加科学的支撑。

3 结论与展望

通过分析 2000—2023 年 WOS 和 CNKI 两个数据库文献后发现,近年来放牧对草地植物—土壤交互作用关系影响研究的关注度逐渐提高,年发文量呈增长趋势。

各国学者对放牧影响下草地植物个体生长发育特征、植物及土壤微生物结构功能、土壤性状和生产生态功能等多方面进行了深入研究,形成了以中国、美国、德国、英国等国为主体的国际化、多元化合作

模式,在当今科学研究逐渐全球化、智能化、技术化的驱动下,通过在国内外草地生态学领域的权威性和代表性期刊上发表研究成果,展示了最新的研究理论、方法和观点。进入 21 世纪后,国内外研究热点主要依赖传统地面植被与土壤调查、卫星和无人机遥感技术、分子生物学技术、气候模拟、涡度测量相关技术等收集数据,结合多元统计分析、生态模型构建、生物大数据技术、元数据分析、人工智能等技术手段,以便更深入了解放牧对草地生态系统能量流动、营养元素循环、物种竞争、更新能力、动态变化、服务等结构功能特征的影响,共同推动退化及恢复生态学研究进展。

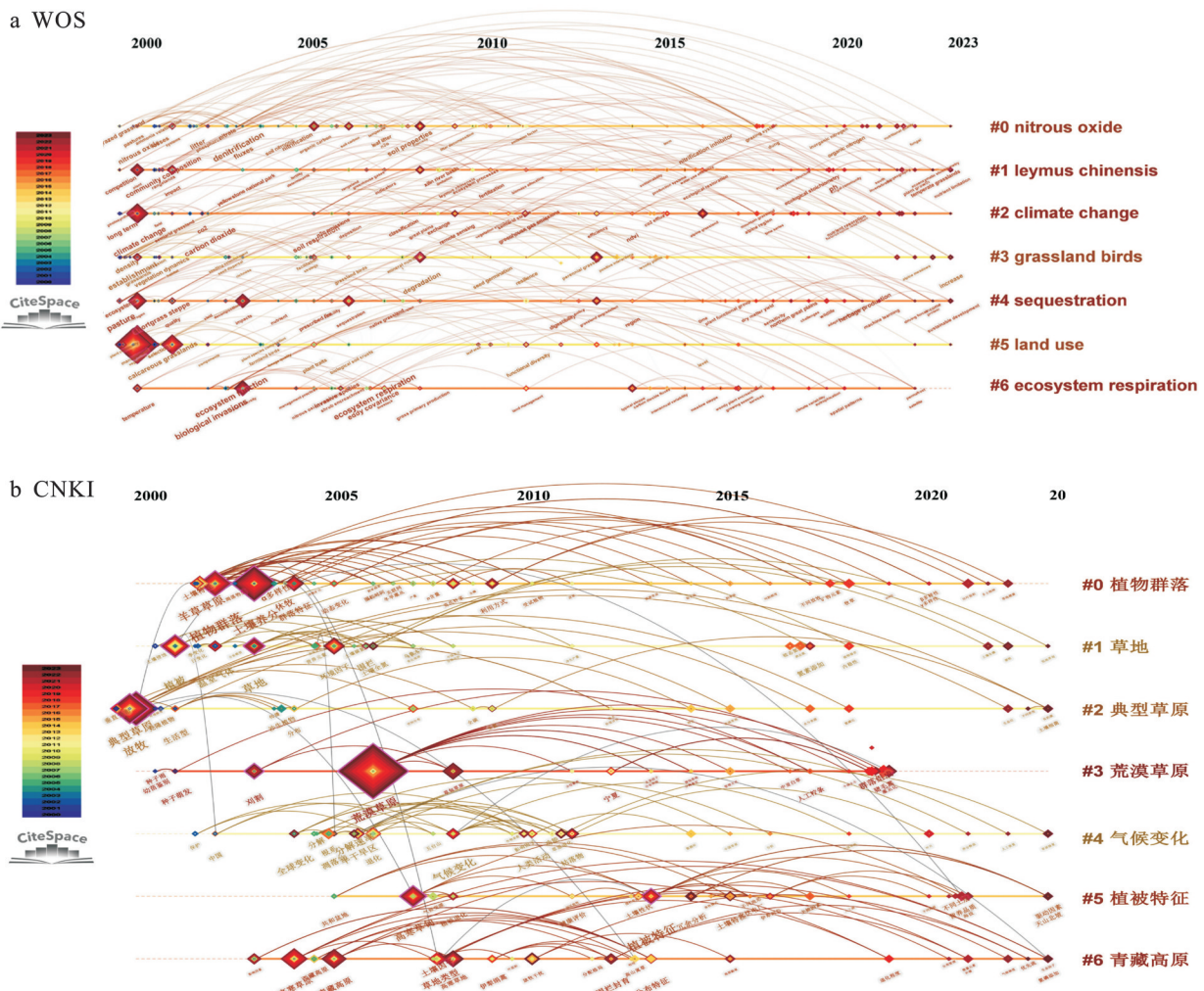


图 6 WOS 和 CNKI 关键词时间分布线

Fig.6 Time distribution line of keywords in WOS and CNKI

20 世纪末为应对全球气候变化,多国首脑联合签署了《联合国气候变化框架公约》,其目标是通过减少 CO₂、N₂O、CH₄ 等温室气体排放、减少人为活动对生态系统的危害,减缓气候变化造成的负面影响。因此,在进入 21 世纪后,研究主要集中在草地生态系统碳氮循环的主要影响因素,包括牲畜的牧食、踩踏

和排泄行为、气候条件等。此后,随着基础研究的逐渐完善,放牧对草地植物群落更新与演替以及固碳能力的影响逐渐成为研究焦点,这一转变反映了对草地生态系统功能的理解更深入,尤其在应对气候变化和土地退化等问题时,草地生态系统在碳循环中的作用愈加凸显。近年来,生态学研究技术的不断

断迭代更新,特别是高通量技术、基因组学、分子生态学技术和现代仪器的应用,推动了生态学、土壤学和微生物学等学科的融合,使得学者能够从微观层面更精细、全面地分析放牧对植物、土壤及微生物特征的多维度影响,这一进展标志着放牧对植物—土壤互作关系的研究结构层次逐步从宏观到更细致的微观层面推进,这一转变不仅深化了对放牧影响机制的理解,为未来该领域研究提供了丰富的视角和方法。

基于对前述研究历程的梳理和对现实需求的分析,放牧影响下草地植物—土壤互作关系这一领域的研究未来应更加注重系统化、综合性和应用导向。一方面,学者可借鉴同类研究领域的前沿动态和方法创新,重点加强对跨尺度、多模式、多强度放牧交互作用影响下草地生态系统的响应演变和功能调控机理,从合理调控草畜平衡关系的角度实现草地资源生态保护。另一方面,还可利用生态过程网络分析等方法,将放牧对生态系统功能影响的小尺度试验结果与区域或全球尺度生态模型相结合,探讨由放牧行为(选择性采食、践踏、排泄物返还等)驱动的植物—土壤—微生物各要素间复杂的反馈联系,以更全面、深入地认识放牧行为对植物—土壤系统的作用过程和影响机制。同时,还应加强对地上(植物及动物)与地下(土壤及微生物)生态过程的联动研究,提升对生境破碎化、气候变暖、氮沉降、资源利用方式、生物多样性等因素对不同草地生态系统养分和物质循环的认识。在充分考虑区域差异基础上,通过系统开展多因素、多尺度协同作用对植物—土壤系统调控机制和关键因素的研究,可在更精细尺度上解读草地生态系统功能调控过程,进而针对不同生境特点因地制宜地提出研究设计和管理对策,以推动草地生态系统健康和可持续发展。

参考文献 (References)

- [1] White R P, Murray S, Rohweder M. Pilot analysis of global ecosystems: Grassland ecosystems [J]. World Resources Institute, 2000,4(6):275-280.
- [2] 朴世龙,方精云,贺金生,等.中国草地植被生物量及其空间分布格局[J].植物生态学报,2004,28(4):491-498. Piao Shilong, Fang Jingyun, He Jinsheng, et al. Spatial distribution of grassland biomass in China [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004,28(4):491-498.
- [3] Dong Shikui, Shang Zhanhuan, Gao Jixi, et al. Enhancing sustainability of grassland ecosystems through ecological restoration and grazing management in an era of climate change on Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020,287:106684.
- [4] Bardgett R D, Bullock J M, Lavorel S, et al. Combating global grassland degradation [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021,2(10):720-735.
- [5] 王益涛,刘建康,武志嘉,等.围封对荒漠草原典型植物群落特征及多样性的影响[J].水土保持研究,2025,32(1):121-130. Wang Yitao, Liu Jiankang, Wu Zhijia, et al. Impact of enclosure on characteristics diversities of typical vegetation communities in desert grasslands [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(1):121-130.
- [6] Yang Zhaoping, Baoyin T, Minggagud H, et al. Recovery succession drives the convergence, and grazing versus fencing drives the divergence of plant and soil N/P stoichiometry in a semiarid steppe of Inner Mongolia [J]. Plant and Soil, 2017, 420(1):303-314.
- [7] 张望,张凤杰,黄泽行,等.放牧强度对克氏针茅草原土壤微量元素含量的影响[J].天津农业科学,2016,22(8):40-43. Zhang Wang, Zhang Fengjie, Huang Zehang, et al. Effects on soil trace elements under different grazing intensities in *Stipa krylovii* steppe [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2016,22(8):40-43.
- [8] Qiao Jirong, Chen Xinli, Chang S X, et al. Grazing intensity changes root traits and resource utilization strategies of *Stipa breviflora* in a desert steppe [J]. Plant and Soil, 2024,503(1):475-488.
- [9] Luo Caiyun, Xu Guangping, Chao Zengguo, et al. Effect of warming and grazing on litter mass loss and temperature sensitivity of litter and dung mass loss on the Tibetan Plateau [J]. Global Change Biology, 2010,16(5):1606-1617.
- [10] 安海涛,孙彩彩,董全民,等.根际和非根际土壤微生物活性对放牧方式的响应[J].草地学报,2025,33(3):813-822. An Haitao, Sun Caicai, Dong Quanmin, et al. Response of rhizosphere soil and bulk soils microbial activity to livestock assembly [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025,33(3):813-822.
- [11] Hou Dongjie, Guo Ke, Liu Changcheng. Asymmetric effects of grazing intensity on macroelements and microelements in grassland soil and plants in Inner Mongolia grazing alters nutrient dynamics of grasslands [J]. Ecology and Evolution, 2020,10(16):8916-8926.
- [12] Trivedi P, Batista B D, Bazany K E, et al. Plant-microbiome interactions under a changing world: Responses, consequences and perspectives [J]. New Phytologist, 2022,234(6):1951-1959.
- [13] 周华坤,赵新全,周立,等.青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J].草业学报,2005,14(3):31-40. Zhou Huakun, Zhao Xinquan, Zhou Li, et al. A study on correlations between vegetation degradation and soil

- degradation in the 'Alpine Meadow' of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Pratacultural Science*, 2005, 14(3):31-40.
- [14] Kulmatiski A, Beard K H, Norton J M, et al. Live long and prosper: Plant-soil feedback, lifespan, and landscape abundance covary [J]. *Ecology*, 2017, 98(12): 3063-3073.
- [15] Smith-Ramesh L M, Reynolds H L. The next frontier of plant-soil feedback research: Unraveling context dependence across biotic and abiotic gradients [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2017, 28(3):484-494.
- [16] Kulmatiski A, Kardol P. Getting plant-soil feedbacks out of the greenhouse: Experimental and conceptual approaches [J]. *Progress in Botany*, 2008, 69:449-472.
- [17] 赵蓉英,许丽敏.文献计量学发展演进与研究前沿的知识图谱探析[J].*中国图书馆学报*,2010,36(5):60-68.
Zhao Rongying, Xu Limin. The knowledge map of the evolution and research frontiers of the bibliometrics [J]. *Journal of Library Science in China*, 2010, 36(5):60-68.
- [18] 孙建财,刘任涛,王真,等.基于文献计量的放牧对草地土壤动物多样性的影响[J].*生态学报*,2024,44(14): 6405-6415.
Sun Jiancai, Liu Rentao, Wang Zhen, et al. Effects of grazing on grassland soil animal diversity based on bibliometrics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(14): 6405-6415.
- [19] 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 Ao, Jing Luhuai, Ze Rangdongke, et al. Progress in research on the effects of grazing on grassland litter decomposition [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2023, 32(4):208-220.
- [20] 刘玉祯,赵新全,董全民,等.放牧对草地生态系统结构与功能影响的研究进展[J].*草地学报*,2023,31(8): 2253-2262.
Liu Yuzhen, Zhao Xinquan, Dong Quanmin, et al. Research progress on the effects of grazing on grassland ecosystem structure and function [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(8):2253-2262.
- [21] Chen Guozhu, Bai Junhong, Bi Chen, et al. Global greenhouse gas emissions from aquaculture: A bibliometric analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 348:108405.
- [22] Romanelli J P, Fujimoto J T, Ferreira M D, et al. Assessing ecological restoration as a research topic using bibliometric indicators [J]. *Ecological Engineering*, 2018, 120:311-320.
- [23] Kasavan S, Yusoff S, Rahmat Fakri M F, et al. Plastic pollution in water ecosystems: A bibliometric analysis from 2000 to 2020 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 313:127946.
- [24] 查文童,朱志畅,郭双霜,等.基于文献计量学的小麦氮素监测研究进展分析[J].*农业工程学报*,2024,39(23):1-13.
Zha Wentong, Zhu Zhichang, Guo Shuangshuang, et al. Research progress analysis of wheat nitrogen monitoring based on bibliometrics [J]. *China Industrial Economics*, 2024, 39(23):1-13.
- [25] 陈悦,陈超美,刘则渊,等.CiteSpace知识图谱的方法论功能[J].*科学学研究*,2015,33(2):242-253.
Chen Yue, Chen Chaomei, Liu Zeyuan, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains [J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2):242-253.
- [26] Cao Fengfeng, Li Weibin, Jiang Yuan, et al. Effects of grazing on grassland biomass and biodiversity: A global synthesis [J]. *Field Crops Research*, 2024, 306: 109204.
- [27] Wang Baizhu, Zhu Yuanjun, Yang Xiaohui, et al. Effects of plant diversity and community structure on ecosystem multifunctionality under different grazing potentials in the eastern Eurasian steppe [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 934:173128.
- [28] Ma Xiuzhi, Ambus P, Wang Shiping, et al. Priming of soil carbon decomposition in two Inner Mongolia grassland soils following sheep dung addition: A study using ^{13}C natural abundance approach [J]. *PLoS One*, 2013, 8(11):e78578.
- [29] 周贵尧,吴沿友.放牧对草原生态系统不同气候区碳库影响的Meta分析[J].*草业学报*,2016,25(10):1-10.
Zhou Guiyao, Wu Yanyou. Meta-analysis of effects of grazing on carbon pools in grassland ecosystems in different climatic regions [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2016, 25(10):1-10.
- [30] 范凯凯,李淑贞,陈金强,等.呼伦贝尔草原土壤呼吸作用空间异质性分析[J].*草地学报*,2022,30(1):205-211.
Fan Kaikai, Li Shuzhen, Chen Jinqiang, et al. Spatial heterogeneity analysis of soil respiration in Hulunbuir grassland [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(1): 205-211.
- [31] 徐进才,张宇,高和平,等.内蒙古典型区草地不同利用方式对土壤碳库的影响[J].*中国土地科学*,2013,27(9):51-55.
Xu Jincai, Zhang Yu, Gao Heping, et al. The impact of different ways of grassland use on soil carbon sequestration in typical areas of Inner Mongolia [J]. *China Land Sciences*, 2013, 27(9):51-55.
- [32] 李娜,郭同庆,张骞,等.青藏高原高寒草地生态系统碳平衡对放牧强度的响应[J].*家畜生态学报*,2024,45(5):1-7.

- Li Na, Guo Tongqing, Zhang Qian, et al. Response of carbon balance to grazing intensity in alpine grassland ecosystem of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2024, 45(5):1-7.
- [33] 周恒,田福平,路远,等.草地土壤有机碳储量影响因素研究进展[J].*中国农学通报*,2015,31(23):153-157.
- Zhou Heng, Tian Fuping, Lu Yuan, et al. A review on influencing factors of grassland soil organic carbon storage [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(23):153-157.
- [34] Li Junran, Ravi S, Wang Guan, et al. Woody plant encroachment of grassland and the reversibility of shrub dominance: Erosion, fire, and feedback processes [J]. *Ecosphere*, 2022, 13(3):e3949.
- [35] Eskelinen A, Jessen M T, Bahamonde H A, et al. Herbivory and nutrients shape grassland soil seed banks [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1):3949.
- [36] Hazhir S, Erfanzadeh R, Ghelichnia H, et al. Effects of livestock grazing on soil seed banks vary between regions with different climates [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 364:108901.
- [37] 侯扶江,常生华,于应文,等.放牧家畜的践踏作用研究评述[J].*生态学报*,2004,24(4):784-789.
- Hou Fujiang, Chang Shenghua, Yu Yingwen, et al. A review on trampling by grazed livestock [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4):784-789.
- [38] 许明圆,朱文琰,杨畅,等.不同放牧强度对高寒草甸土壤种子库的影响[J].*草业科学*,2023,40(6):1461-1471.
- Xu Mingyuan, Zhu Wenyan, Yang Chang, et al. Effects of different grazing intensities on the soil seed bank in an alpine meadow [J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(6):1461-1471.
- [39] An Hang, Baskin C C, Ma Miaojun. Nonlinear response of the soil seed bank and its role in plant community regeneration with increased grazing disturbance [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2022, 59(10):2593-2603.
- [40] 张蒙,李晓兵.放牧对土壤有机碳的影响及相关过程研究进展[J].*草地学报*,2018,26(2):267-276.
- Zhang Meng, Li Xiaobing. A review: Effects of grazing on soil organic carbon and the related processes [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(2):267-276.
- [41] 赵东,刘新民.内蒙古典型草原羊粪和牛粪分解过程中有机氮组分的变化[J].*内蒙古大学学报(自然科学版)*,2018,49(2):174-181.
- Zhao Dong, Liu Xinmin. Changes of organic nitrogen fractions during the decomposition of sheep and cattle dung in Inner Mongolia steppe [J]. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2018, 49(2):174-181.
- [42] 李文华,赵新全,张宪洲,等.青藏高原主要生态系统变化及其碳源/碳汇功能作用[J].*自然杂志*,2013,35(3):172-178.
- Li Wenhua, Zhao Xinquan, Zhang Xianzhou, et al. Change mechanism in main ecosystems and its effect of carbon source/sink function on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35(3):172-178.
- [43] 王荔,曾辉,张扬建,等.青藏高原土壤碳储量及其影响因素研究进展[J].*生态学杂志*,2019,38(11):3506-3515.
- Wang Li, Zeng Hui, Zhang Yangjian, et al. A review of research on soil carbon storage and its influencing factors in the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(11):3506-3515.
- [44] 吕广一,贺梦婷,徐学宝,等.增温增雨对荒漠草原植物和土壤总氮及稳定氮同位素的影响[J].*生态学报*,2023,43(10):4167-4175.
- Lü Guangyi, He Mengting, Xu Xuebao, et al. Effects of warming and increasing precipitation on total nitrogen and stable nitrogen isotopes of plants and soil in the desert steppe [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(10):4167-4175.
- [45] Yang Xiaoxia, Dong Quanmin, Chu Hui, et al. Different responses of soil element contents and their stoichiometry (C:N:P) to yak grazing and Tibetan sheep grazing in an alpine grassland on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 285:106628.
- [46] Du Chenjun, Jing Jie, Shen Yuan, et al. Short-term grazing exclusion improved topsoil conditions and plant characteristics in degraded alpine grasslands [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 108:105680.
- [47] 赵璇.家畜放牧对草地土壤微生物多样性的作用及调控机制[D].吉林长春:东北师范大学,2022.
- Zhao Xuan. The effects and mechanisms of livestock grazing on soil microbial diversity in grasslands [D]. Changchun, Jilin: Northeast Normal University, 2022.
- [48] 张蒙蒙,徐国策,张铁钢,等.放牧强度对荒漠草原土壤微生物群落特征的影响[J].*水土保持学报*,2024,38(3):306-313.
- Zhang Mengmeng, Xu Guoce, Zhang Tiegang, et al. Effects of grazing intensity on soil microbial community characteristics in desert steppe [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3):306-313.
- [49] 薛亚芳,宗宁,何念鹏,等.长期围封和自由放牧对高寒草甸土壤微生物群落结构及碳源代谢多样性的影响[J].*应用生态学报*,2018,29(8):2705-2712.
- Xue Yafang, Zong Ning, He Nianpeng, et al. Influence of long-term enclosure and free grazing on soil microbial community structure and carbon metabolic diversity of alpine meadow [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8):2705-2712.