

DOI: 10.20103/j.stxb.202410252605

刘志晖, 张子嘉, 钱龙, 刘倩光, 杨梅花, 张光茹, 杨国姣, 胡中民. 基于文献计量分析的草地生态系统生产力稳定性研究进展. 生态学报, 2025, 45(23): - .

Liu Z H, Zhang Z J, Qian L, Liu Q G, Yang M H, Zhang G R, Yang G J, Hu Z M. Research progress on stability of productivity in grassland ecosystem based on bibliometric analysis. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(23): - .

基于文献计量分析的草地生态系统生产力稳定性研究进展

刘志晖¹, 张子嘉², 钱 龙¹, 刘倩光¹, 杨梅花¹, 张光茹³, 杨国姣^{1,*}, 胡中民¹

1 海南热带雨林国家生态质量综合监测站, 生态学院, 海南大学, 海口 570228

2 海南省生态环境监测中心, 海口 571126

3 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631

摘要: 草地生态系统生产力稳定性对维持草地生态系统服务和功能至关重要。为深入了解草地生态系统生产力稳定性的研究脉络, 本文基于文献计量学方法使用 CiteSpace、VOSviewer 等软件, 以 1998—2024 年间 Web of Science 核心数据库中相关文献为数据源进行可视化统计分析, 系统总结了草地生态系统生产力稳定性的研究进展。结果表明: (1) 1998—2024 年草地生产力稳定性的相关研究发文量呈现上升趋势, 中国在该领域的研究实力全球领先, 中国科学院和兰州大学发文量突出, Collins, Scott L 和 Eisenhauer, Nico 等为主要核心作者; (2) 研究热点“生物多样性”、“生态系统生产力”和“时间稳定性”始终是核心主题, 说明生物多样性与稳定性的关系始终是研究热点; (3) 研究方法丰富和完善, 研究方向从关注地上生物多样性与稳定性的关系扩展到同时关注地上与地下生物多样性与稳定性的关系, 并且更加全面阐述了全球变化因子对草地生态系统生产力稳定性的影响及机制, 解析了不同时空尺度上草地生产力稳定性的响应机制。未来研究可以聚焦于全球变化多因子对草地稳定性的影响, 同时推动长期实验的开展和跨学科合作, 共同促进草地生态学的深入发展。

关键词: 生产力稳定性; 草地生态系统; 研究进展; 文献计量

Research progress on stability of productivity in grassland ecosystem based on bibliometric analysis

LIU Zhihui¹, ZHANG Zijia², QIAN Long¹, LIU Qianguang¹, YANG Meihua¹, ZHANG Guangru³, YANG Guojiao^{1,*}, HU Zhongmin¹

1 Hainan Tropical Rainforest Ecosystem Observation and Research Station, School of Ecology, Hainan University, Haikou 570228, China

2 Ecological Environment Monitoring Center of Hainan Province, Haikou 571126, China; ³School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

Abstract: Understanding grassland ecosystem productivity-stability relationships is critical for sustaining the ecological services and functions. To provide a comprehensive insight into the research framework surrounding grassland ecosystem productivity stability, this study applied bibliometric analysis with CiteSpace and VOSviewer. The analysis utilized Web of Science Core Collection data (1998—2024). The study provides systematic summary of research progress on grassland ecosystem productivity stability. The results indicate: (1) The number of publications on grassland productivity stability has steadily increased from 1998 to 2024. China has emerged as a global leader in this domain, with the Chinese Academy of

基金项目: 海南大学科研启动经费 (KYQD(ZR)-22082); 海南省自然科学基金 (423RC432); 海南大学协同创新中心项目 (XTCX2022STB07)

收稿日期: 2024-10-25; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangguojiao@hainanu.edu.cn

Sciences and Lanzhou University contributing significantly to the research output. Prominent authors in this field include Collins, Scott L., and Eisenhauer, Nico. (2) The research hotspots, including “biodiversity,” “ecosystem productivity,” and “temporal stability,” have consistently remained central themes, indicating that the relationship between biodiversity and stability has been a persistent focus of research. (3) Research methods have gradually become more diverse and refined. Research directions are more comprehensive, most previous studies have focused on the relationship between aboveground biodiversity, emerging studies increasingly address belowground biodiversity-stability linkages. Furthermore, the understanding of the impacts and mechanisms of global change factors on the grassland ecosystem productivity stability has become more profound. The response mechanisms of grassland productivity stability were analyzed across different temporal and spatial scales. Future research can focus on the impact of multiple factors of global change on grassland ecosystem stability, while promoting long-term experiments and interdisciplinary cooperation to jointly promote the in-depth development of grassland ecology.

Key Words: productivity stability; grassland ecosystems; research progress; bibliometric analysis

草地生态系统占全球陆地表面约 40%^[1],在碳循环、生物多样性保护和农业生产中起着至关重要的作用,还提供水资源调节和气候调控等重要的生态系统服务^[2]。然而,全球草地正面临多重挑战,例如极端气候频发、土地盐碱化和人类活动干扰等,这些因素使草地生物多样性和稳定性面临严重的威胁^[3]。

由于稳定的生态系统对于为人类提供可持续的生态产品和服务至关重要^[4-5],因此,迫切需要厘清草地生态系统生产力稳定性的研究脉络。生态系统生产力稳定性指的是生态系统在不同时间尺度下应对外部干扰或环境变化时维持其结构和功能的能力,可通过稳定性、抵抗力、恢复力和敏感性衡量^[6-7]。通过生态系统生产力稳定性的研究,可以识别影响生态系统稳定性的关键因素,为生态保护和管理决策提供科学依据。

生态系统生产力稳定性受多种因素影响,例如生物多样性、气候变化和人为干扰等。例如,研究发现生物多样性越高以及物种异步性越高的草地在应对干扰时更稳定^[4,8]。此外,优势物种稳定性通过选择效应可以维持生态系统的稳定^[4]。这些发现加深了对草地生态系统稳定性的理解,为草地管理和保护提供了科学依据。

然而,目前尚缺乏对草地生态系统生产力稳定性研究脉络的定量分析。文献计量学作为一种定量分析方法,通过分析大量科学文献,可以全面了解该领域中的发展趋势、热点和前沿领域^[9]。本文基于 Web of Science 核心数据集收录的草地生态系统稳定性研究文献,运用 CiteSpace 软件和 VOSviewer 软件对其进行梳理和可视化计量分析,为草地生态系统生产力稳定性研究提供理论参考。

1 数据来源及方法

1.1 数据来源

本文选取 Web of Science (WOS)核心合集数据库为数据来源并利用高级检索进行搜索,由于“草地生态系统生产力稳定性”在英文翻译中形式不统一,所以 WOS 检索条件设置为:TS = (grassland OR steppe OR meadow) AND TS = (stability OR resistance OR resilience OR sensitivity),语种为“English”。检索时间跨度为 1998 年至 2024 年 8 月(检索时间截止为 2024 年 8 月 28 日),对检索结果逐条筛选,删除不相关的文章以及不符合主体的文献,共检索文献 1632 篇。将筛选后的文献以“全记录与引用的参考文献”的格式下载保存为纯文本文件,作为分析数据的样本。

1.2 分析方法

CiteSpace 是一款用于分析和可视化科学文献中的知识结构和动态发展的软件工具,VOSviewer 是一款用于构建和可视化文献计量学网络的软件工具。本文利用 CiteSpace6.3.R1 软件和 VOSviewer 软件相结合,对草地生态系统稳定性研究领域文献进行了知识图谱绘制展示了其研究机构、作者、关键词热点和突现词等信息,

采用 Scimago Graphica 软件绘制国际合作网络图,图中圈的大小代表发文量的多少,圈越大表示该国家发文量越多。

2 结果与分析

2.1 年发文量分析

发文的数量可以体现该领域的研究热度^[10]。草地生态系统生产力稳定性的论文自 1998 年至 2024 年可以大致分成三个阶段(图 1):第一个阶段(1998—2008 年)处于起步阶段,论文发表数量较少,说明对草地生态系统生产力稳定性的研究关注度较低;第二个阶段(2009—2017)年出现增长趋势,论文数量每年都有所增加,幅度相对平稳;第三阶段(2018—2024)年论文数量快速增长,2022 年和 2023 年达到顶峰,分别为 197 篇和 194 篇,有关草地生态系统生产力稳定性的研究受到极大关注,活跃度显著增加。在过去 26 年中草地生态系统稳定性领域得到了越来越多的关注,尽管在某些年份有些波动,但总体趋势向上。

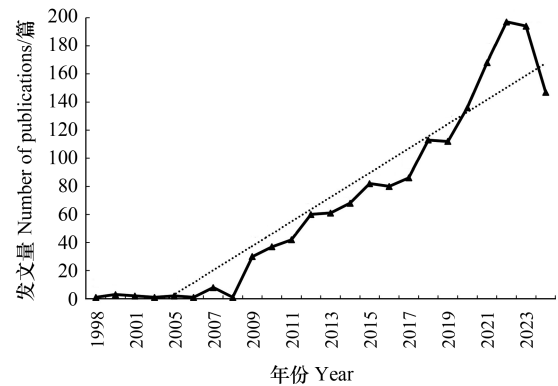


图 1 1998—2024 年文献年度发文量

Fig.1 Annual number of publications from 1998 to 2024

2.2 发文国家分布

一个国家或地区在某一领域的研究活跃度通常通过其发表的论文数量来衡量,论文数量越多则活跃程度越大;国家或地区在该领域的科研实力和关注度可以参考 CiteSpace 计算的中介中心性来衡量,当中介中心性大于 0.1 时,该节点被认为是网络中的重要节点,节点越大,影响力越大^[11]。研究国家的中心性可以反映其在研究网络中的重要性和影响力,显示出其在知识传播和合作中的角色^[12]。

中国在该领域的研究活动最为活跃,发文量达 756 篇,占总发文量 46.32%,远超美国 426 篇、德国 177 篇等其它国家(表 1)。自 2009 年至 2024 年,除中国外,北美和欧洲等地区的发文量也比较高,表明这些地区同样在研究草地生态系统生产力稳定性方面投入了大量的科研资源。同时,美国、德国和英国的中介中心性超过 0.1,表明这些国家在国家合作网络中占有重要地位。发文量的国家合作关系图谱表明草地生态系统生产力稳定性的研究已经形成了以中国、美国和欧洲等地区为主的全球研究格局(图 2)。其中欧洲的研究网络较为密集,一部分国家同中国联系紧密(如美国、德国等),德国虽然发表数量不是最多,但其中介中心性最高,为 0.23,说明这些国家对该领域研究关注度较高且国家之间合作交流频繁。

表 1 发文量前 5 名的国家

Table 1 Top 5 countries in terms of number of publications

排名 Rank	国家 Country	数量 Count	总发文量所占比 The proportion of total publications	中介中心性 Centrality
1	中国	756	46.32%	0.06
2	美国	426	26.10%	0.11
3	德国	177	10.85%	0.23
4	英国	115	7.05%	0.10
5	法国	112	6.86%	0.05

2.3 发文机构分布

研究机构合作网络可以识别主要的合作伙伴和研究热点,从而揭示不同机构之间的协作关系,进而了解该领域的合作模式和趋势^[12]。分析机构的研究输出和中心性变化,则可以识别该领域中关键研究机构在科学发展中的作用。根据对研究机构的统计和机构合作网络图谱分析,中国科学院在该领域的研究最为突出,

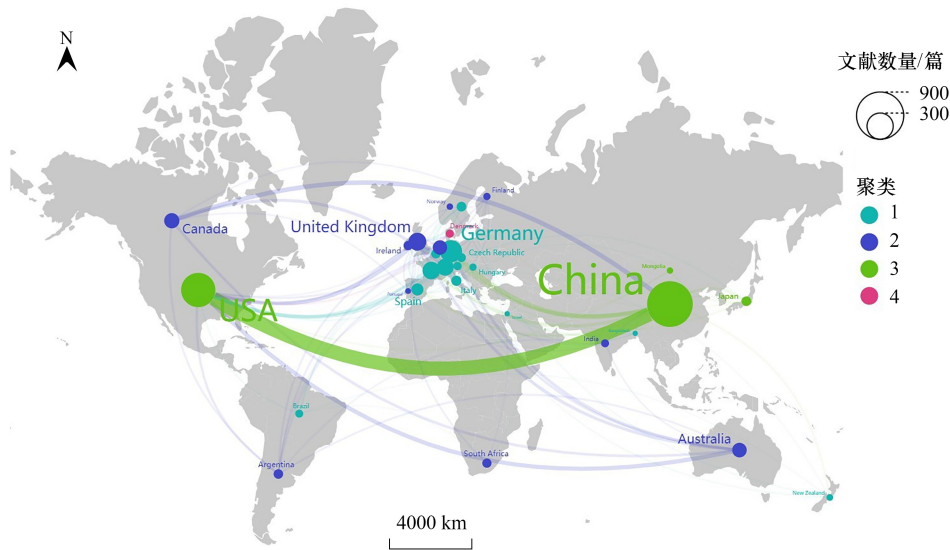


图 2 不同国家发文量及合作关系图谱
Fig.2 Map of cooperation between countries in number of publications

数量达 843 篇, 占总发文量的 51.65%, 且中介中心性最高, 在合作网络中具有重要的中介作用。其次, 兰州大学和加利福尼亚大学也在该领域有较强的学术产出, 分别 77 篇和 72 篇(表 2)。

表 2 发文量前 5 名的 WOS 机构
Table 2 Top 5 WOS institutions in terms of number of publications

排名 Rank	WOS 机构名称 WOS institutions	数量 Count	总发文量所占比 The proportion of total publications	中介中心性 Centrality
1	Chinese Academy of Sciences	843	51.65%	0.12
2	Lanzhou University	77	4.72%	0.03
3	University of California	72	4.41%	0.01
4	United States Department of Agriculture	70	4.29%	0.04
5	Peking University	68	4.17%	0.01

WOS: Web of science 核心合集数据库 Web of Science Core Collection

2.4 主要研究作者

通过作者的发文量和中心性变化, 可以识别领域中的新兴研究趋势和关键研究方向。作者之间的合作网络可以揭示领域内的合作模式和主要研究合作伙伴, 显示作者如何通过合作推动该领域的进步, 中心性高的作者在科学交流中扮演重要角色^[11]。统计发现 Collins, Scott L 和发文数量第一, 发表了 34 篇文章, 其次是 Eisenhauer, Nico 和 Jiang, Lin, 分别为 28 篇和 22 篇(表 3)。

表 3 发文量前 5 名的作者
Table 3 Top 5 authors in terms of number of publications

排名 Rank	作者 Author	数量 Count	中介中心性 Centrality	排名 Rank	作者 Author	数量 Count	中介中心性 Centrality
1	Collins, Scott L	34	0.08	4	Han, Xingguo	21	0.07
2	Eisenhauer, Nico	28	0.12	5	Smith, Melinda D	20	0.06
3	Jiang, Lin	22	0.04				

图 4 展示了发文量的机构合作关系图谱, 结合表 3 和图 4 可知, Eisenhauer, Nico 的中介中心性最高, 达 0.

12,其次是 Collins, Scott L, 为 0.08, 这些专家在该研究领域影响力高且占据重要地位。图 4 中节点聚类呈独立分散, 表明大多数研究人员倾向于进行小规模的研究, 节点之间的线性连接表明研究人员之间有进行合作交流。

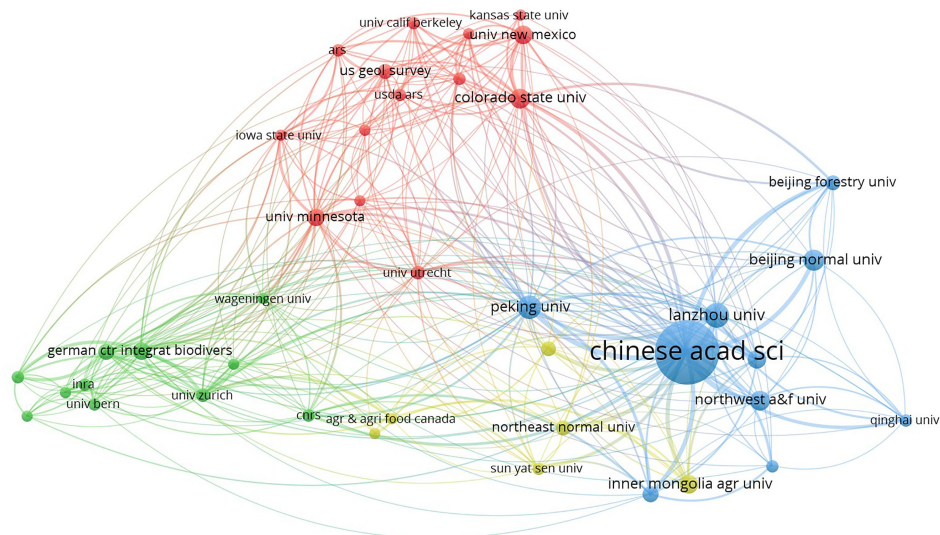


图 3 研究机构合作网络图谱

Fig.3 Collaboration networks among research institutes

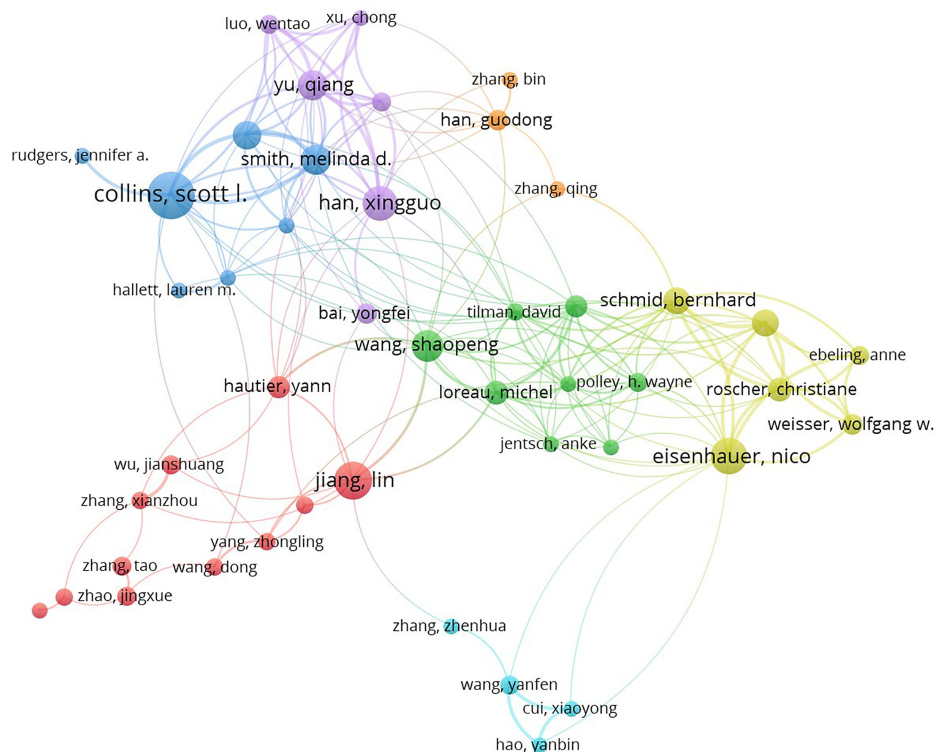


图 4 发文量主要作者合作关系图谱

Fig.4 Map of cooperation between major authors in number of publications

2.5 关键词分析

2.5.1 关键词聚类及发展趋势

通过聚类分析, 可以识别出主要的研究主题和子领域, 揭示出研究主题的演变过程, 包括新兴主题的出现

和传统主题的衰退,有助于预测未来的研究方向和发展趋势。图 5 展示了根据关键词在时间序列上变化趋势,分别选取了不同发展阶段具有代表性的年份,以便观察热点变化;图 6 展示了关键词年度热点变化分布,以便从整个领域的发展年限上观察关键词热点变化。由此可以得出几个结论:

(1) 研究焦点的转变:早期研究(2013—2015 年)中“生物多样性”和“生产力”是图中最大的节点是核心主题,研究热点从“生物多样性”、“生产力”、“稳定性”等关键词向“气候变化”和“恢复力”等关键词发生转变。后期研究(2020—2022 年)中“生物多样性”依然是中心节点,随着时间推移“氮沉降”、“抵抗力”、“时间稳定性”及“物种异步性”等关键词逐渐涌现。

(2) 研究主题的异同:在 1998—2024 年中,“生物多样性”和“生产力”依然是研究的核心主题,说明生物多样性与稳定性的关系始终是研究热点。“气候变化”、“恢复力”和“时间稳定性”在后期关键词热图中更加显著,反映出生态系统应对环境压力的关注度增加。后期中增加了“高原草甸”和“敏感性”等关键词,显示出对特定地理区域的研究增加,可能这些地区的稳定性对气候变化的响应更加敏感。

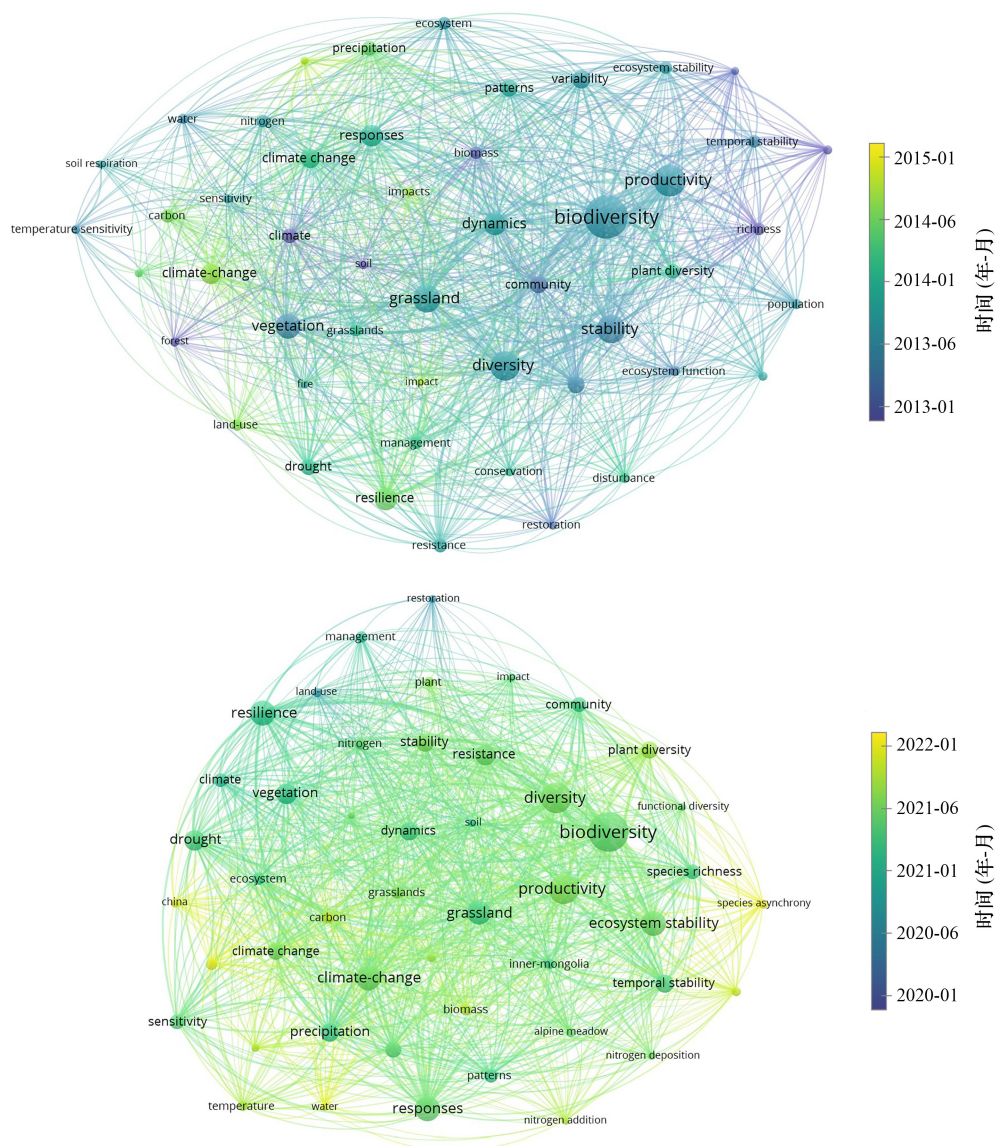


图 5 草地生态系统稳定性的研究热点变化趋势

Fig.5 Trends in research hotspots on grassland stability

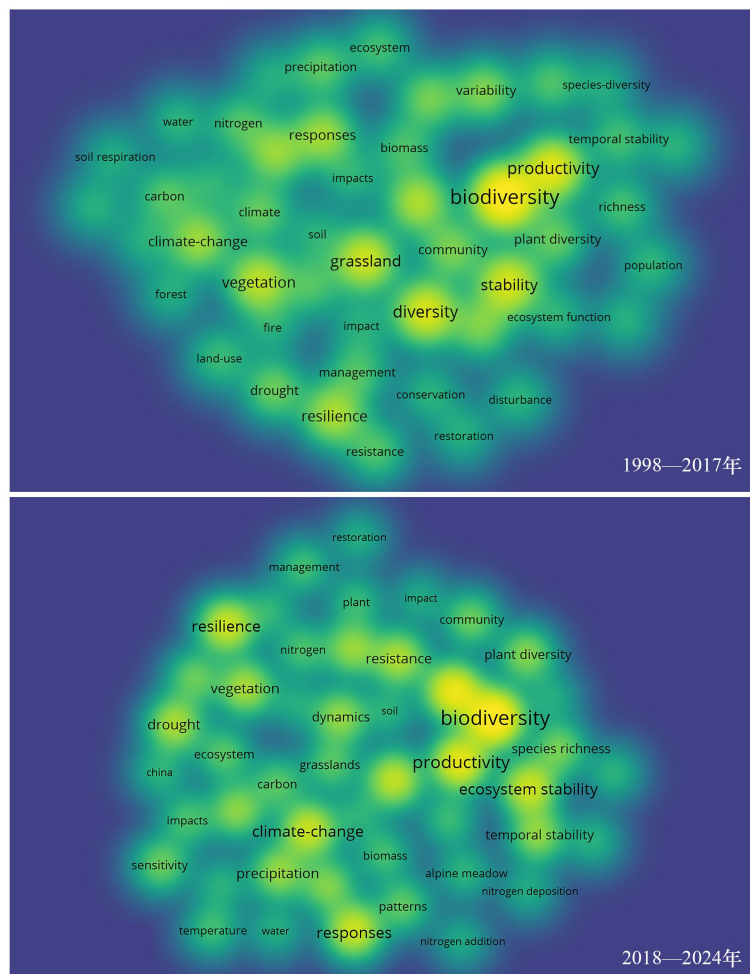


图 6 草地生态系统稳定性的研究热点分布图

Fig.6 Distribution map of research hotspots on grassland stability

2.5.2 关键词突现

关键词突现性指的是某个关键词在特定时期内出现频率迅速增加,显示该关键词在一定程度上代表了领域的前沿动态^[12–13]。

图 7 展示了在 1998 年到 2024 年期间引文突现最强的前 30 个关键词及其相关信息。通过对这些关键词的突现强度、突现开始和结束时间的分析,发现在早期中,“richness”这一关键词突现强度最高,达 9.72,“stability”次之,为 9.3,表明探究生物多样性与草地生态系统生产力稳定性的关系是早期的研究热点。近年来,关键词如“nitrogen enrichment/addition”(2020—2024)突现,说明有关全球变化因子对稳定性影响的关注度提高。

3 草地生态系统生产力稳定性的研究进展

3.1 研究方法的完善

3.1.1 生产力的估算

传统的草地生态系统生产力稳定性的研究主要依赖于野外观测,包括长期定位观测和控制实验。研究初期,Naeem 等通过引入“生态箱”,探讨生物多样性对生态系统生产力的影响^[14];随后 Tilman 在 Cedar Creek 生态研究站开展的长期实验,聚焦草地生态系统生产力、生物多样性及其稳定性变化^[15–16]。另外,遥感技术的应用丰富了生态系统稳定性相关数据的获取手段,例如 Tucker 等利用红外和可见光谱数据来分析净初级生



图 7 最重要 30 个关键词的突现性分析
Fig.7 Burst detection of the top 30 keywords with the strongest citation

产力变化^[17]。随着技术的发展,遥感手段逐步扩展到利用卫星和无人机获取高时间分辨率数据,从而监测草地植被覆盖、生产力和生物多样性的动态变化^[18]。近期,Xia 等则利用遥感技术和随机森林模型相结合探究高寒草地稳定性的空间分布及其影响因素^[19]。新技术和新方法的应用可以有效处理大规模、多维度数据。

生态模型的应用在模拟草地生态系统动态和预测不同情景下的生态系统生产力稳定性方面发挥重要作用。直接用于稳定性研究的模型较少,但有些模型可以在一定情景下预测草地生产力变化,从而推断稳定性变化。生产力模型因调控因子的不同可以主要分为三类:气候相关模型、光能利用率模型和过程模型^[20]。1989 年 Heimann 和 Keeling 基于光能利用率公式开发了计算全球净初级生产力模型,包括 BIOME3 和 CENTURY 等。如今,随机森林模型和深度学习模型可处理大规模数据集,可以更好的预测全球变化背景下对草地生态系统的变化。其中深度学习模型可以精准预测归一化植被指数(NDVI),并结合 CASA 模型进一步估算草地净初级生产力,为草地生态系统的动态评估提供了强有力的工具^[21]。

3.1.2 稳定性的量化

随着研究的深入,表征生态系统生产力稳定性的指标更加多元化,例如提出韧性、抵抗力、持久性和变异性^[22]。其中,抵抗力指生态系统在面对外部干扰时维持其原有结构和功能的能力,强调系统在压力下保持状

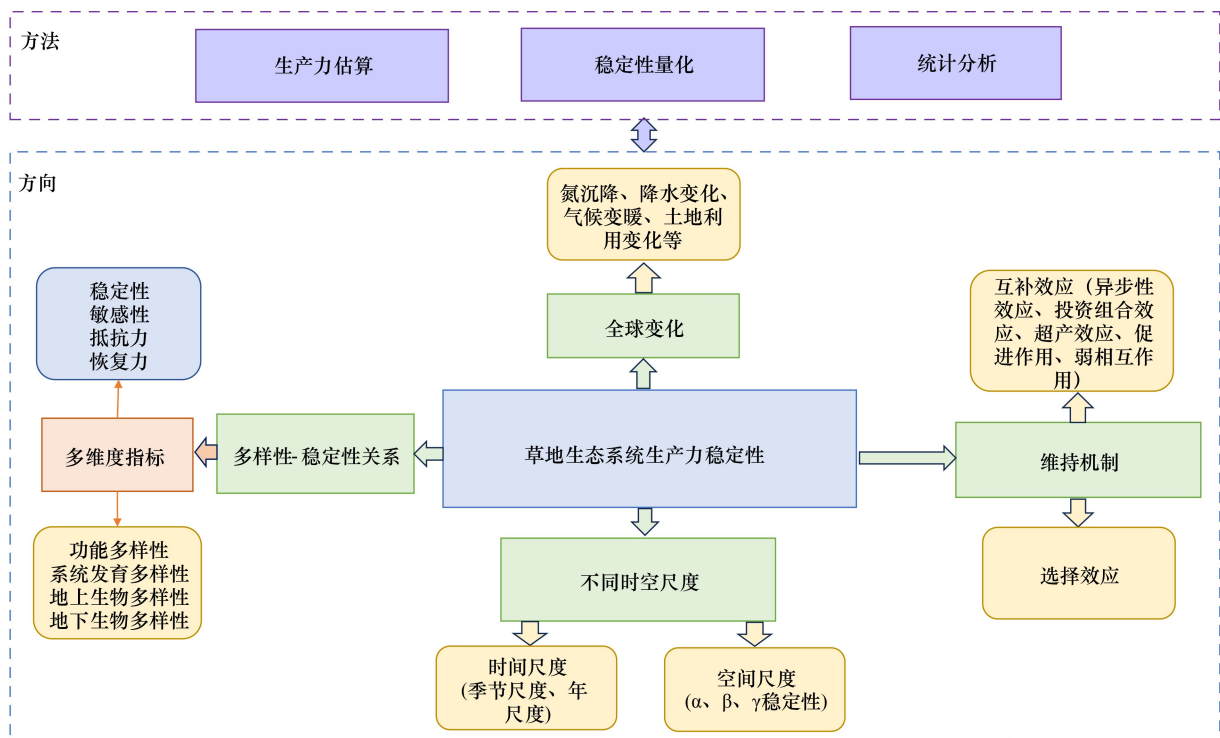


图 8 草地生态系统生产力稳定性的研究进展框架图

Fig.8 Framework diagram of research progress on productivity stability of grassland ecosystem

态的稳固性;恢复力则是草地在受干扰后恢复至原有状态或适应新平衡的能力,体现系统的自我修复和调节能力;敏感性则指草地对外部干扰或环境变化的反应强度和易受影响的程度,是系统脆弱性的重要表征。不同指标的计算见公式 1—3。单一维度的量化方法在评估草地稳定性方面存在局限性,因此,综合考虑多个指标对于深入理解草地生态系统稳定性至关重要,例如 Zhang 等^[23]研究发现,在未退化的草地中,氮富集降低了生产力稳定性和抵抗力但增强了韧性;而在严重退化草地中,氮富集降低了草地恢复力和韧性,对生产力稳定性和抵抗力无影响,这说明表征稳定性的不同指标对外部干扰的响应存在差异。:

$$\text{稳定性} = \frac{1}{CV} = \frac{\mu}{\sigma} \quad (1)$$

$$\text{抵抗力} = \left| \frac{\bar{Y}_n}{Y_e - \bar{Y}_n} \right| \quad (2)$$

$$\text{恢复力} = \left| \frac{Y_e - \bar{Y}_n}{Y_{e+1} - \bar{Y}_n} \right| \quad (3)$$

式中: CV 指变异系数, μ 为某时间段内群落生产力的平均值, σ 表示相应时间段内生产力的标准差, $\bar{Y}_n$ 、 Y_e 、 Y_{e+1} 分别为表示在正常年份(所有非事件年份的平均值)、事件期间以及事件后一年的群落生产力。

3.1.3 统计分析的进步

分析方法的进步提升了对生态系统生产力稳定性的解析能力线性回归、主成分分析、冗余分析和方差分析等多元统计方法的应用为揭示草地生态系统中各变量之间的关系提供了重要基础。近年来结构方程模型得到了广泛的应用,它可以揭示变量之间的因果关系且考虑多个变量之间相互作用^[24]。例如, Ma 等^[25]在青藏高原草地进行的模拟不同浓度氮沉降实验,利用结构方程模型分析发现低氮条件下常见种稳定性对群落稳定性贡献更大,而高氮条件下物种异步性成为群落稳定性的主导机制。这些研究方法的不断拓展不仅提升了

对草地生态系统动态变化的理解,也深化了对其复杂因果关系的全面解析。

3.2 研究方向的延伸与深化

3.2.1 生物多样性与草地生产力稳定性的关系

多样性—稳定性理论最早由 MacArthur 和 Elton 提出,他们发现生物多样性与稳定性的正相关关系。Tilman 等通过控制实验也验证了这一结论^[26],由此生物多样性有助于提升生态系统稳定性的普遍性结论愈加确立。机制包括生态位互补效应、选择效应等。例如早期 Tilman 等发现不同物种间的生态位分化能够提升生态系统的整体功能^[27];Loreau 等发现选择效应和互补效应共同作用从而提升草地生态系统稳定性^[28]。随着研究的发展,生物多样性概念扩展至多维度指标,像功能多样性和系统发育多样性等。Cadotte 等发现系统发育多样性较高时,物种对环境波动的反应差异大,由于不同物种之间竞争较弱,从而抵消一部分种间波动,提升群落整体稳定性^[29]。生态系统稳定性也有不同的指标衡量,例如抵抗力、恢复力等。一般多样性越高的草地,其抵抗力和对外来入侵物种的防御力越强^[30]。Isbell 等基于北美和欧洲的草地实验数据,发现生物多样性增强了在面对极端气候事件时草地生态系统的抵抗力^[2]。

近年来,地上和地下过程的生态联接也是研究生物多样性和生态系统稳定性的热点领域^[31]。土壤微生物群落结构和多样性在维持植物多样性与生产力、促进生态系统养分循环和提高植物养分获取能力方面发挥着重要作用^[32–34]。地下生物多样性对草地稳定性同样具有积极作用。本领域学者提出了土壤微生物多样性影响生态系统稳定性的潜在机制^[35]:土壤微生物群落可能通过直接或间接作用调节植物多样性和群落组成^[36–37];通过促进植物水分和养分的吸收从而影响地上净初级生产力^[32,38];通过调节植物物种异步性这三个途径来影响生态系统稳定性^[39]。在全球变化背景下,生物赖以生存的生态环境发生改变,将影响植物与微生物的耦合关系^[40],进而影响草地生态系统稳定性。微生物多样性和植物多样性在维持生态系统稳定性方面均起到十分重要的作用^[34,41]。例如,一项有关全球陆地生态系统的研究发现植物生产力稳定性与腐生真菌多样性呈正相关,但与植物真菌病原体的丰富度呈负相关^[42]。

3.2.2 全球变化对草地生产力稳定性的影响

草地生态系统的生产力稳定性受诸多全球变化因子的胁迫,研究者越来越关注生态系统稳定性对环境扰动的响应模式。自 18 世纪工业革命以来,人类的不当利用加剧了氮沉降、降水变化、全球变暖及土地利用变化等问题,这些因素深刻影响草地群落的结构、种群组成和生产力稳定性。

近年来,氮沉降和降水利用效率成为研究的新焦点(图 7)。研究表明,氮沉降会通过降低物种丰富度、物种异步性和优势种稳定性降低群落的生产力稳定性^[25,43]。然而,少数研究指出氮沉降对草地稳定性没有显著影响,主要因为氮沉降增强了优势种的稳定性从而维持群落的稳定性^[44]。此外,Carlsson 等研究表明,在干旱胁迫下施氮可以提高草地的抵抗力和恢复力^[45];Xu 等研究则首次发现,水分的增加可以提升草地地上生产力的稳定性,但削弱地下生产力的稳定性,而氮沉降则呈现相反的效果,即降低地上生产力的稳定性但增强地下生产力的稳定性^[46]。不同的全球变化因子对草地生态系统稳定性的影响机制不同,因此需要进一步深入探索不同因子之间的交互作用及其对生产力稳定性的影响机制。

3.2.3 草地生产力稳定性的维持机制

草地生产力稳定性由多种机制共同维持,主要包括互补效应和选择效应,其中互补效应又可以细分为异步性效应、投资组合效应、超产效应、促进作用和弱相互作用。其中,互补效应主要指物种异步性,即不同物种在特定时间内的生长、繁殖或其他生态活动不同步,这降低了种间竞争中的协方差,从而增强了生态系统稳定性^[44]。Tilman 等发现投资组合效应是生态系统稳定性的主要机制之一,研究表明随着物种丰富度增加,生物量波动减小,从而提高了群落的稳定性^[27]。超产效应则说明,群落中由于物种间的互补性或协同作用,总生产力超过了各物种单独生长时的总和,并增加了低产物种的生物量^[8]。Downing 等^[47]提出的促进作用表示群落可以通过改善资源利用和减少个体波动,从而提高群落稳定性,使生态系统更具韧性。弱相互作用通过降低生态系统中的级联效应、增加功能冗余度和维持物种多样性,维持生态系统的稳定^[47–48]。

选择效应,也称为优势度效应,是 Tilman 和 Downing 在 90 年代提出的理论。他们指出在群落中由于某些物种的特性在特定环境条件下表现得更加突出,这些物种会在群落中占据主导地位,从而显著影响整个群落的功能表现^[26,49,50]。当群落受到扰动或环境变化时,群落可能从某些物种占据较少优势的状态,转变为某些物种占据更大优势的稳定状态,表明优势物种的稳定性是决定群落整体稳定性的关键因素^[44,47,49,50]。

3.2.4 不同时空尺度下草地生产力稳定性的转变

早期对草地生态系统生产力稳定性的研究主要集中在局域尺度,局域稳定性通常反映某一小范围内的种群波动和功能的变化^[26]。随着景观生态学的兴起由于单一尺度难以全面反映生态系统的复杂变化,研究者们开始深入探讨更大尺度上生态系统稳定性的维持机制。Levin 强调,生态过程在不同时间和空间尺度上表现不同,小尺度现象可能显现为随机性,而大尺度则可能呈现清晰模式^[51]。Wang 和 Loreau 基于生物多样性的空间分解理论提出了 α 稳定性(局域生态系统时间稳定性)、 β 稳定性(不同局域生态系统的时间波动的异步性)和 γ 稳定性(区域生态系统时间稳定性)的概念,将区域群落的 γ 稳定性分解为局域的 α 稳定性和 β 稳定性^[52-53]。Wang 等分析全球 39 个草地群落实验数据显示: β 多样性可以通过增加空间异步性来提升区域尺度生态系统的稳定性, α 多样性通过提高局域群落的稳定性,从而增强整个区域的稳定性^[54]。

在不同时间尺度上,生态系统生产力稳定性的变化也不同。短时间尺度草地生产力稳定性主要受气候波动、季节变化和短期扰动(如放牧、火灾等)的影响,通常导致暂时性变化,但生态系统能迅速恢复;长时间尺度草地生产力稳定性受长期气候变化、土地利用和物种迁移等复杂因素影响,可能引发持久变化,甚至改变其整体结构和功能。因此,研究草地生态系统稳定性需关注不同时间尺度的变化。

4 总结与展望

本文以 1998 年至 2024 年 8 月 Web of Science 核心数据库中有关草地生态系统生产力稳定性的 1632 篇论文为研究对象,运用文献计量方法,研究该领域的发文数量、国家、研究机构、发文作者、以及关键词等对当前草地生态系统稳定性研究的现状及趋势。研究发现草地生态系统稳定性的研究论文数量呈现出稳步增长的趋势,并且研究方法不断进步,研究方向逐渐丰富。未来应加强以下几个方面的研究:首先,探讨生物多样性对生态系统稳定性的影响依然是核心议题,地上、地下生物多样性对维持草地生态系统功能和稳定性均起着十分重要的作用。其次,极端气候变化对草地生态系统的影响成为研究热点,例如温度和降水等因素对草地生产力、稳定性、抵抗力和恢复力的长期影响需进一步研究。同时,推进长时间尺度的实验研究,以获取更具代表性的长期数据,解析草地生态系统在全球变化背景下的动态响应。此外,跨学科和国际合作有助于数据共享和研究方法的完善,推动草地生态学的深入研究和广泛应用。

参考文献(References):

- [1] White R P, Murray S, Rohweder M. Pilot analysis of global ecosystems: grassland ecosystems.
- [2] Isbell F, Craven D, Connolly J, Loreau M, Schmid B, Beierkuhnlein C, Martijn Bezemer T, Bonin C, Bruehlheide H, de Luca E, Ebeling A, Griffin J N, Guo Q F, Hautier Y, Hector A, Jentsch A, Kreyling J, Lanta V, Manning P, Meyer S T, Mori A S, Naeem S, Niklaus P A, Wayne Polley H, Reich P B, Roscher C, Seabloom E W, Smith M D, Thakur M P, Tilman D, Tracy B F, van der Putten W H, van Ruijven J, Weigelt A, Weisser W W, Wilsey B, Eisenhauer N. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, 2015, 526 (7574): 574-577.
- [3] Bardgett R D, Bullock J M, Lavorel S, Manning P, Schaffner U, Ostle N, Chomel M, Durigan G, Fry E L, Johnson D, Lavelle J M, Le Provost G, Luo S, Png K, Sankaran M, Hou X Y, Zhou H K, Ma L, Ren W B, Li X L, Ding Y, Li Y H, Shi H X. Combating global grassland degradation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(10): 720-735.
- [4] Bai Y F, Han X G, Wu J G, Chen Z Z, Li L H. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 2004, 431 (7005): 181-184.
- [5] Balvanera P, Pfisterer A B, Buchmann N, He J S, Nakashizuka T, Raffaelli D, Schmid B. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters*, 2006, 9(10): 1146-1156.

- [6] Hooper D U, Chapin F S III, Ewel J J, Hector A, Inchausti P, Lavorel S, Lawton J H, Lodge D M, Loreau M, Naeem S, Schmid B, Setälä H, Symstad A J, Vandermeer J, Wardle D A. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 2005, 75(1): 3-35.
- [7] Ives A R, Carpenter S R. Stability and diversity of ecosystems. *Science*, 2007, 317(5834): 58-62.
- [8] Loreau M, de Mazancourt C. Biodiversity and ecosystem stability: a synthesis of underlying mechanisms. *Ecology Letters*, 2013, 16(Suppl 1): 106-115.
- [9] Van Raan A. The use of bibliometric analysis in research performance assessment and monitoring of interdisciplinary scientific developments. *TATuP-Zeitschrift Für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis*, 2003, 12(1): 20-29.
- [10] 安源, 张玲. 文献计量学在我国图书情报领域的应用研究进展综述. *图书馆*, 2014(5): 63-68.
- [11] 严陶韬, 薛建辉. 中国生物多样性研究文献计量分析. *生态学报*, 2021, 41(19): 7879-7892.
- [12] 周元慧, 胡刚, 张忠华, 陶旺兰, 王俊丽, 付瑞玉. 基于 Web of Science 的国际海草研究文献计量评价. *生态学报*, 2019, 39(11): 4200-4211.
- [13] 张增可, 王齐, 吴雅华, 刘兴诏, 黄柳菁. 基于 CiteSpace 植物功能性状的研究进展. *生态学报*, 2020, 40(3): 1101-1112.
- [14] Naeem S, Thompson L J, Lawler S P, Lawton J H, Woodfin R M. Declining biodiversity can alter the performance of ecosystems. *Nature*, 1994, 368: 734-737.
- [15] Tilman D, Reich P B, Knops J M H. Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature*, 2006, 441(7093): 629-632.
- [16] Tilman D. The ecological consequences of changes in biodiversity: a search for general principles. *Ecology*, 1999, 80(5): 1455.
- [17] Tucker C J, Holben B N, Elgin J H, McMurtrey J E. Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 1981, 11: 171-189.
- [18] Pettorelli N, Laurance W F, O'Brien T G, Wegmann M, Nagendra H, Turner W. Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 51(4): 839-848.
- [19] Xia X S, Liang W, Lv S H, Pan Y Z, Chen Q. Remote sensing identification and stability change of alpine grasslands in Guoluo Tibetan autonomous prefecture, China. *Sustainability*, 2024, 16(12): 5041.
- [20] 陆丹丹. 基于 CENTURY 模型的内蒙古荒漠草原区 ANPP 及其对气候变化的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016.
- [21] 李倩. 基于深度学习的草地产草量预测方法研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.
- [22] Pimm S L. The complexity and stability of ecosystems. *Nature*, 1984, 307: 321-326.
- [23] Zhang H J, Wang W. Grassland degradation alters the effect of nitrogen enrichment on the multidimensional stability of plant community productivity. *Journal of Applied Ecology*, 2023, 60(11): 2437-2448.
- [24] Grace J B. Structural equation modeling and natural systems. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006.
- [25] Ma F F, Zhang F Y, Quan Q, Song B, Wang J S, Zhou Q P, Niu S L. Common species stability and species asynchrony rather than richness determine ecosystem stability under nitrogen enrichment. *Ecosystems*, 2021, 24(3): 686-698.
- [26] Tilman D, Downing J A. Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 1994, 367: 363-365.
- [27] Tilman D, Lehman C L, Bristow C E. Diversity-stability relationships: statistical inevitability or ecological consequence? *The American Naturalist*, 1998, 151(3): 277-282.
- [28] Loreau M, Hector A. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 2001, 412(6842): 72-76.
- [29] Cadotte M W, Dinnage R, Tilman D. Phylogenetic diversity promotes ecosystem stability. *Ecology*, 2012, 93(sp8): S223-S233.
- [30] Oliver T H, Heard M S, Isaac N J B, Roy D B, Procter D, Eigenbrod F, Freckleton R, Hector A, David L Orme C, Petchey O L, Proença V, Raffaelli D, Blake Suttle K, Mace G M, Martín-López B, Woodcock B A, Bullock J M. Biodiversity and resilience of ecosystem functions. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(11): 673-684.
- [31] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, Setälä H, van der Putten W H, Wall D H. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [32] Wagg C, Bender S F, Widmer F, van der Heijden M G A. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(14): 5266-5270.
- [33] Delgado-Baquerizo M, Reich P B, Trivedi C, Eldridge D J, Abades S, Alfaro F D, Bastida F, Berhe A A, Cutler N A, Gallardo A, García-Velázquez L, Hart S C, Hayes P E, He J Z, Hseu Z Y, Hu H W, Kirchmair M, Neuhauser S, Pérez C A, Reed S C, Santos F, Sullivan B W, Trivedi P, Wang J T, Weber-Grullon L, Williams M A, Singh B K. Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(2): 210-220.
- [34] Yang G W, Ryo M, Roy J, Hempel S, Rillig M C. Plant and soil biodiversity have non-substitutable stabilising effects on biomass production.

- Ecology Letters, 2021, 24(8): 1582-1593.
- [35] Yang G W, Wagg C, Veresoglou S D, Hempel S, Rillig M C. How soil biota drive ecosystem stability. Trends in Plant Science, 2018, 23(12): 1057-1067.
- [36] Jing X, Sanders N J, Shi Y, Chu H Y, Classen A T, Zhao K, Chen L T, Shi Y, Jiang Y X, He J S. The links between ecosystem multifunctionality and above- and belowground biodiversity are mediated by climate. Nature Communications, 2015, 6: 8159.
- [37] Teste F P, Kardol P, Turner B L, Wardle D A, Zemunik G, Renton M, Laliberté E. Plant-soil feedback and the maintenance of diversity in Mediterranean-climate shrublands. Science, 2017, 355(6321): 173-176.
- [38] Schnitzer S A, Klironomos J N, Hillerislambers J, Kinkel L L, Reich P B, Xiao K, Rillig M C, Sikes B A, Callaway R M, Mangan S A, van Nes E H, Scheffer M. Soil microbes drive the classic plant diversity-productivity pattern. Ecology, 2011, 92(2): 296-303.
- [39] Pellkofer S, van der Heijden M G A, Schmid B, Wagg C. Soil communities promote temporal stability and species asynchrony in experimental grassland communities. PLoS One, 2016, 11(2): e0148015.
- [40] Isbell F, Reich P B, Tilman D, Hobbie S E, Polasky S, Binder S. Nutrient enrichment, biodiversity loss, and consequent declines in ecosystem productivity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(29): 11911-11916.
- [41] Schuldt A, Assmann T, Brezzi M, Buscot F, Eichenberg D, Gutknecht J, Härdtle W, He J S, Klein A M, Kühn P, Liu X J, Ma K P, Niklaus P A, Pietsch K A, Purahong W, Scherer-Lorenzen M, Schmid B, Scholten T, Staab M, Tang Z Y, Trogisch S, von Oheimb G, Wirth C, Wubet T, Zhu C D, Bruehlheide H. Biodiversity across trophic levels drives multifunctionality in highly diverse forests. Nature Communications, 2018, 9(1): 2989.
- [42] Liu S G, García-Palacios P, Tedersoo L, Guirado E, van der Heijden M G A, Wagg C, Chen D M, Wang Q K, Wang J T, Singh B K, Delgado-Baquerizo M. Phylotype diversity within soil fungal functional groups drives ecosystem stability. Nature Ecology & Evolution, 2022, 6(7): 900-909.
- [43] Wu Q, Ren H Y, Wang Z W, Li Z G, Liu Y H, Wang Z, Li Y H, Zhang R Y, Zhao M L, Chang S X, Han G D. Additive negative effects of decadal warming and nitrogen addition on grassland community stability. Journal of Ecology, 2020, 108(4): 1442-1452.
- [44] Grman E, Lau J A, Schoolmaster D R Jr, Gross K L. Mechanisms contributing to stability in ecosystem function depend on the environmental context. Ecology Letters, 2010, 13(11): 1400-1410.
- [45] Carlsson M, Merten M, Kayser M, Isselstein J, Wrage-Mönnig N. Drought stress resistance and resilience of permanent grasslands are shaped by functional group composition and N fertilization. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 236: 52-60.
- [46] Xu Z W, Jiang L, Ren H Y, Han X G. Opposing responses of temporal stability of aboveground and belowground net primary productivity to water and nitrogen enrichment in a temperate grassland. Global Change Biology, 2024, 30(1): e17071.
- [47] [53] Downing A L, Brown B L, Leibold M A. Multiple diversity-stability mechanisms enhance population and community stability in aquatic food webs. Ecology, 2014, 95(1): 173-184.
- [48] Proulx R, Wirth C, Voigt W, Weigelt A, Roscher C, Attinger S, Baade J, Barnard R L, Buchmann N, Buscot F, Eisenhauer N, Fischer M, Gleixner G, Halle S, Hildebrandt A, Kowalski E, Kuu A, Lange M, Milcu A, Niklaus P A, Oelmann Y, Rosenkranz S, Sabais A, Scherber C, Scherer-Lorenzen M, Scheu S, Schulze E D, Schumacher J, Schwichtenberg G, Soussana J F, Temperton V M, Weisser W W, Wilcke W, Schmid B. Diversity promotes temporal stability across levels of ecosystem organization in experimental grasslands. PLoS One, 2010, 5(10): e13382.
- [49] Hillebrand H, Bennett D M, Cadotte M W. Consequences of dominance: a review of evenness effects on local and regional ecosystem processes. Ecology, 2008, 89(6): 1510-1520.
- [50] Yang Z L, van Ruijven J, Du G Z. The effects of long-term fertilization on the temporal stability of alpine meadow communities. Plant and Soil, 2011, 345(1): 315-324.
- [51] Levin S A. The problem of pattern and scale in ecology: the Robert H. MacArthur award lecture. Ecology, 1992, 73(6): 1943-1967.
- [52] Wang S P, Loreau M. Ecosystem stability in space: α , β and γ variability. Ecology Letters, 2014, 17(8): 891-901.
- [53] Wang S P, Loreau M. Biodiversity and ecosystem stability across scales in metacommunities. Ecology Letters, 2016, 19(5): 510-518.
- [54] Wang S P, Loreau M, de Mazancourt C, Isbell F, Beierkuhnlein C, Connolly J, Deutschman D H, Doležal J, Eisenhauer N, Hector A, Jentsch A, Kreyling J, Lanta V, Lepš J, Polley H W, Reich P B, van Ruijven J, Schmid B, Tilman D, Wilsey B, ... Craven D. Biotic homogenization destabilizes ecosystem functioning by decreasing spatial asynchrony. Ecology, 2021, 102(6): e03332.