

DOI: 10.11766/trxb202412200499

CSTR: 32215.14.trxb202412200499

赵雯, 黄来明, 邵明安. 基于文献计量的草地土壤质量研究热点与趋势[J]. 土壤学报, 2026, 63 (1): 195–209.

ZHAO Wen, HUANG Laiming, SHAO Ming'an. Bibliometric Analysis of Research Hotspots and Trends in Grassland Soil Quality[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63 (1): 195–209.

基于文献计量的草地土壤质量研究热点与趋势*

赵 雯^{1, 2}, 黄来明^{1, 2†}, 邵明安^{1, 2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所现代农业工程实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘 要: 草地约占地球陆地表面的 40.5%, 在维持全球碳循环和调节气候变化方面发挥着关键作用。然而, 随着人类活动持续加剧和气候变化影响日益显现, 全球草地生态系统正经历不同程度的退化, 草地土壤质量也随之下降。尽管已有大量研究关注不同地区或时期草地土壤质量的变化, 但针对其研究脉络与发展趋势的文献计量分析仍较为匮乏。基于此, 采用文献计量学方法, 对 Web of Science 科学引文索引数据库 (Science Citation Index Expanded) 1990—2022 年间发表的 8 089 篇文献进行了定量分析, 涵盖逐年发文量变化、研究主题演变、国家间合作网络、核心作者分布以及主要发文期刊。结果表明: (1) 1990—2022 年间关于“草地土壤质量”的总发文量逐年增加, 研究历程可划分为萌芽阶段、快速发展阶段和日益成熟阶段。(2) 热门研究主题和地区随时间推移发生变化, 当前研究热点聚焦于“人类活动对草地土壤质量的影响”, 而“草地退化严重、土壤质量较低的地区”成为研究的重点区域。(3) 草地土壤质量研究内容主要包括构建评价指标体系、解析影响因素或关键过程、阐明评价目的及重要性。当前, 全球草地土壤质量研究已从“时空格局解析”转向“微观机制探索”。(4) 美国和中国在该领域的研究实力居于世界领先地位, 全球国际合作紧密。(5) Richard D. Bardgett 是目前该领域篇均被引频次最高的研究者, *Agriculture, Ecosystems & Environment* 是发文量最高的期刊, 而 *Soil Biology & Biochemistry* 是被引频次最高的期刊。本研究可为推动全球草地土壤质量研究、强化区域草地管理实践以及提升草地生态系统韧性提供数据支撑。

关键词: 草地生态系统; 土壤质量评价; 文献计量学; 研究热点; 可持续发展目标

中图分类号: S158 文献标志码: A

Bibliometric Analysis of Research Hotspots and Trends in Grassland Soil Quality

ZHAO Wen^{1, 2}, HUANG Laiming^{1, 2†}, SHAO Ming'an^{1, 2}

(1. Modern Agricultural Engineering Laboratory, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] Grasslands cover approximately 40.5% of the Earth's terrestrial surface and play a crucial role in

* 国家自然科学基金项目 (42377302)、第三次新疆综合考察项目 (2022XJKK0904) 和中国科学院青年创新促进会项目 (2019052) 共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42377302), the Third Xinjiang Scientific Expedition Program of China (No. 2022XJKK0904), and the Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences (No. 2019052)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: huanglm@igsnr.ac.cn

作者简介: 赵 雯 (2000—), 女, 陕西渭南人, 博士研究生, 主要从事土壤质量研究。E-mail: zhaowen0329@igsnr.ac.cn

收稿日期: 2025-12-20; 收到修改稿日期: 2025-08-11; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-09-25

maintaining the global carbon cycle and regulating climate change. However, with the intensification of human activity and the growing impacts of climate change, grassland ecosystems are experiencing varying degrees of degradation worldwide, leading to a decline in grassland soil quality. Although numerous studies have examined changes in grassland soil quality and their influencing factors across regions and over time, bibliometric analyses exploring the research trajectory and development trends in this field remain limited. 【Method】 To fill this gap, the present study conducted a bibliometric analysis of 8 089 articles published between 1990 and 2022 in the Science Citation Index Expanded database of Web of Science. The literature retrieval was based on the research topic “TS=(grassland) OR TS=(rangeland) OR TS=(meadow) OR TS=(savanna) OR TS=(steppe) OR TS=(prairie) OR TS=(pasture) OR TS=(grazing land) AND TS=(soil quality)”, and the retrieval period was set from January 1, 1990 to December 31, 2022. The analysis was conducted using the Bibliometrix package in R 3.6.3, VOSviewer 1.6.20, and CiteSpace 5.7.R1 software, focusing on annual publication trends, evolving research themes, international collaboration networks, core contributing authors, and leading journals. In addition, CiteSpace 5.7.R1 was used to perform co-citation analysis and thematic clustering on the 8 089 published articles. The results were visualized using ArcGIS 10.6 and Scimago Graphica 1.0.43. 【Result】 The results revealed that: (1) The total number of publications on “grassland soil quality” has steadily increased from 1990 to 2022, and the development of the field can be divided into three phases, including the initial stage (1990-2005), the rapid development stage (2006-2010), and the increasing maturity stage (2011-2022); (2) The research hotspots of “grassland soil quality” have shifted from “the impact of soil carbon on grassland soil quality” to “the effects of human activities on grassland soil quality”, and the focal research regions have shifted from “areas with sustainable livestock development and relatively high soil quality” to “areas with severe grassland degradation and poor soil quality”; (3) The grassland soil quality research predominantly encompasses establishing assessment indicator frameworks, analyzing driving factors or key processes, and clarifying assessment purposes and ecological significance. Currently, global studies of grassland soil quality have transitioned from analyzing spatio-temporal patterns to exploring the underlying microscopic mechanisms; (4) The United States and the People’s Republic of China hold leading positions in this field, with extensive global collaboration; (5) Richard D. Bardgett has the highest average citation frequency among researchers, *Agriculture Ecosystems & Environment* has the highest number of publications, while *Soil Biology & Biochemistry* is the most frequently cited journal. 【Conclusion】 This study elucidates the historical development and current status of research on grassland soil quality, which provides data-driven support for advancing global research on grassland soil quality, enhancing regional grassland management practices, and improving the resilience of grassland ecosystems.

Key words: Grassland ecosystem; Soil quality assessment; Bibliometrics; Research hotspot; Sustainable development goals

土壤质量是指土壤在生态系统和土地利用边界内发挥作用,以维持生物生产力、保障环境质量、促进植物生长和动物健康的能力^[1]。土壤质量不仅决定了生态系统的生产力和可持续性,还在水资源管理和养分循环等关键生态过程中发挥着重要作用^[2]。高质量的土壤能够有效涵养水源、过滤污染物、缓解气候变化和保障粮食安全,并为人类福祉提供健康的生存环境^[2-4]。因此,维持和提升土壤质量对于保障生态系统服务与功能的发挥,以及推动全球可持续发展至关重要^[5]。精确量化土壤质量,准确预估其变化趋势,是实现土壤质量可持续管理的前提。当前,已有大量研究对土壤质量的概念^[1]、评价方法^[6]以及影响因素^[7]进行了系统的分析和总

结。然而,这些研究大多集中于耕地土壤质量,主要关注提升耕地生产力,而针对草地土壤质量的研究相对匮乏。

草地是陆地生态系统的重要组成部分,约占地球陆地总面积的 40.5%(不包括格陵兰岛和南极)^[8]。草地储存了陆地生态系统 34%的有机碳,维持了全球近 30%的净初级生产力和 30%~50%的畜产品,在全球碳循环、气候调节和粮食安全等方面发挥着关键作用^[9-10]。早在 5 000~6 000 年前,内蒙古地区的早期先民已开始重视并利用草地^[11],而中东两河流域和黎凡特地区的草地利用历史则可追溯至公元前 8500—公元前 4000 年^[12]。然而,随着人类活动强度的不断增加和气候变化影响的日益加剧,全

球约 49%的草地出现不同程度的退化, 草地土壤质量也随之下降, 威胁区域生态安全和经济社会可持续发展^[13]。因此, 自 20 世纪 60 年代以来, 国际相关组织和各国政府相继实施了一系列草地保护和恢复工程。例如, 中国开展了退耕还林草工程^[14], 美国实施了保护性休耕项目^[15], 而欧洲推行了可持续放牧计划^[16]。这些措施在遏制草地退化、恢复草地生态功能以及提升草地土壤质量等方面取得了一定成效。回顾研究历史, 各国和地区在不同阶段均发表了大量关于草地土壤质量的研究, 这些研究涉及草地土壤质量状况、影响因素及恢复成效等多个方面, 形成的知识体系较为松散。因此, 有必要对现有研究进行系统梳理和分析, 探究草地土壤质量研究热点和发展趋势, 从而为推动草地土壤质量研究领域的发展提供科学依据。

文献计量学方法作为一种基于文献数据的定量分析方法, 可为系统梳理草地土壤质量研究领域发展历程提供技术支撑。该方法能够系统揭示研究领域的演变过程、科学前沿和发展趋势^[17], 并已广泛用于生态学^[18]、环境科学^[19]及农业科学^[20]等领域。与传统分析方法相比, 文献计量学的优势在于其能够系统整合学科领域分散的知识体系, 有助于更好地总结研究现状和发展态势, 对未来研究方向的确定具有重要参考价值^[21]。基于此, 本研究采用文献计量学方法, 对 1990—2022 年间草地土壤质量相关文献进行了系统分析。通过梳理近 33 年草地土壤质量研究历程和发展趋势, 旨在为学科领域的深入发展及草地生态系统的可持续管理提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源

文献计量学分析的有效性和准确性与所使用的数据来源密切相关^[19]。为深入了解“草地土壤质量”研究的历史、发展阶段、主要研究力量及合作网络, 本研究基于 Web of Science(<https://webofknowledge.com/>) 数据库中的科学引文索引 Science Citation Index Expanded(SCI-EXPANDED), 以检索式“TS=(grassland) OR TS=(rangeland) OR TS=(meadow) OR TS=(savanna) OR TS=(steppe) OR TS=(prairie) OR TS=(pasture) OR TS=(grazing land) AND TS=

(soil quality)”为基础, 设定检索时间范围为 1990 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日。检索内容仅限于研究论文和综述。鉴于该数据库已相对覆盖中国学者在该领域的代表性研究成果, 且额外纳入中文文献可能导致中国机构和学者在分析结果中占比过高, 影响结论的代表性与全球性, 故本研究未进一步检索中文文献。在对所得文献进行全面核查并删除无关论文后, 本研究最终收集了 8 089 篇英文文献作为数据来源。在此基础上, 导出了所选取文献的“全记录及引用的参考文献(Full record and cited references)”以构建研究数据集。

1.2 统计分析方法

本研究通过 R 3.6.3 中的 Bibliometrix 包^[22]对 1990—2022 年间“草地土壤质量”领域逐年发文量、年均被引数量及热点关键词年际变化规律进行了统计分析, 并使用 Origin 2019 进行绘图。利用 VOSviewer 1.6.20 软件分析该主题在研究期内的主要研究国家及其合作网络, 并使用 ArcGIS 10.6 和 Scimago Graphica 1.0.43 软件对研究结果进行可视化。在不同国家的合作网络图中, 圆圈的大小代表该国的发文量, 圆圈越大, 表示该国发文量越多; 两国之间的连线代表国家间存在的合作关系, 连线越粗则代表合作越频繁; 具有相同颜色的国家组表示其合作关系更为紧密。此外, 利用 VOSviewer 软件对该领域的主要研究人员和发文期刊进行统计分析, 以期对相关文献的阅读和发表提供参考。利用 CiteSpace 5.7.R1 对 8 089 篇文章进行文献共被引分析和主题聚类分析, 以探究“草地土壤质量”热门研究主题随时间变化的规律。在共被引网络和主题聚类分析图中, 多边形代表不同的研究主题, 其颜色变化显示热门主题在不同阶段的演变; 圆圈代表共被引文献, 圆圈越大表明该文献的共被引次数越高; 具有高中介中心性的文献以紫色外圈进行标注, 紫色外圈越厚表明该文献的中介中心性越高, 即该文献的影响力越高; 文献间的连线表示共被引关系, 连线越粗表明文献间的共被引次数越高。

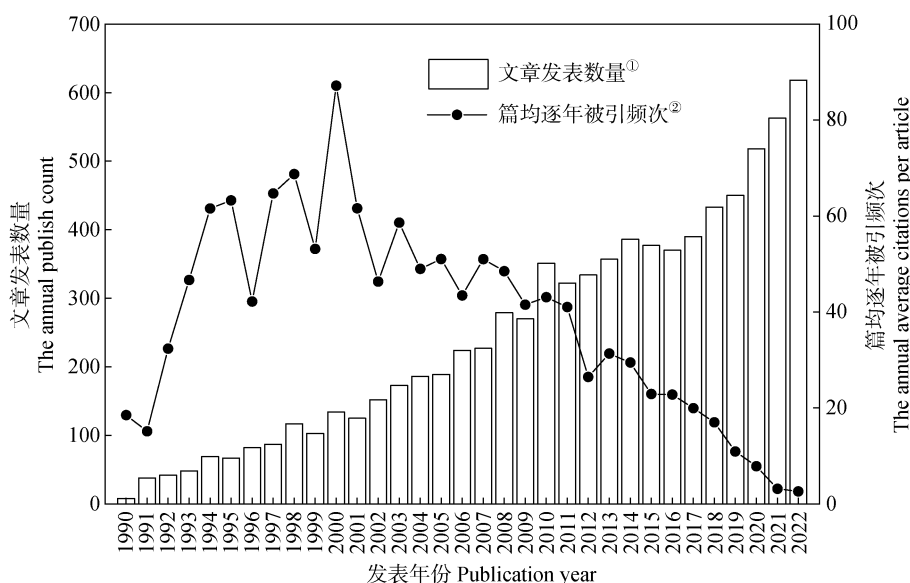
2 结果与讨论

2.1 文章发表与引用趋势

对 1990—2022 年间“草地土壤质量”研究主题

的逐年发文量及篇均被引频次进行了统计,以反映该主题在过去 33 年间的发展速度、发展规模及研究热度。如图 1 所示,全球研究人员在 1990—2022 年期间围绕“草地土壤质量”共发表了 8 089 篇文章,年均发文量为 245 篇。总体上,该主题的逐年发文量呈上升趋势(图 1),平均年增长速率达到 22%,显著高于“草地土壤”研究主题的年均增长率(8%)。该结果表明,“草地土壤质量”已成为草地土壤学领域中的热门议题,受到了全球科研人员的广泛关注。

值得注意的是,2019—2022 年间“草地土壤质量”主题的年发文量快速增加(图 1),年均增加 56 篇,远高于过去 33 年的平均年增长量(每年 19 篇)。2019 年 3 月,联合国大会宣布启动“联合国生态系统恢复十年(2021—2030 年)”倡议,极大推动了全球各国对退化生态系统恢复、土地生产力提升、土壤质量改善以及经济社会可持续发展的重视^[23]。上述倡议的提出可能是该主题在 2019—2022 年间年发文量迅速增加的关键原因。



① The annual publication count, ② The annual average citations per article.

图 1 1990—2022 年间“草地土壤质量”研究逐年发文量和篇均被引频次

Fig. 1 The annual publication count and average citations per article in the study "grassland soil quality" from 1990 to 2022

此外,1990—2022 年间“草地土壤质量”研究主题的总被引量为 241 116 次,篇均被引量为 29.8 次。为进一步分析不同年份发表文章的引用情况,本研究将各年份发表的文章按篇均被引量进行分类。如图 1 所示,1990—2000 年间篇均被引量整体呈上升趋势,并在 2000 年达到顶峰(每篇 87 次),之后快速下降。该趋势的形成与学术文献的生命周期特征及学科发展进程密切相关:(1)文献引用存在显著滞后效应,篇均被引量峰值通常出现在发表后 8~10 年;(2)领域内文献总量快速增长稀释了单篇被引频次,同时新兴技术的发展(如神经网络和人工智能预测)分流了部分传统评价方法的引用。因此,在未来的研究中,应注重提出创新性观点,并加强对已发表成果的推广宣传和学术交流,以提

高文章的影响力和被引率。

2.2 主要研究力量与合作情况

2.2.1 主要研究国家与合作网络 对 1990—2022 年全球不同国家围绕“草地土壤质量”主题发文数量和总被引量进行了统计分析。如图 2 所示,美国(2 094 篇)和中国(1 143 篇)的总发文量在研究期间均超过 1 000 篇,是该领域最活跃的两个国家。巴西(823 篇)、英国(592 篇)、德国(587 篇)、澳大利亚(559 篇)和加拿大(520 篇)的发文量均超过 500 篇,表明这些国家在该研究领域的活跃度较高(图 2)。研究期内,美国的总被引量达到 88 116 次,位居世界第一,表明其在“草地土壤质量”研究领域具有最高的活跃程度和影响力。英国(30 769 次)、中国(24 249 次)、德国(22 694

次)、澳大利亚(14 839 次)、新西兰(14 743 次)和巴西(14 345 次)的总被引量均超过 10 000 次,表明这些国家在该领域的影响力也较强(图 2)。值得注意的是,印度在研究期间发表了 117 篇文章,全球排名第 18,但总被引量为 1 678 次,未能进入

全球前 20 名,表明印度虽然在该领域较为活跃,但其研究影响力尚需提升。相比之下,肯尼亚尽管仅发表了 73 篇文章,未进入全球前 20 名,但其总被引量达到 2 693 次,位列全球第 19 名,表明该国尽管发文量有限,但其研究成果的引用率相对较高。

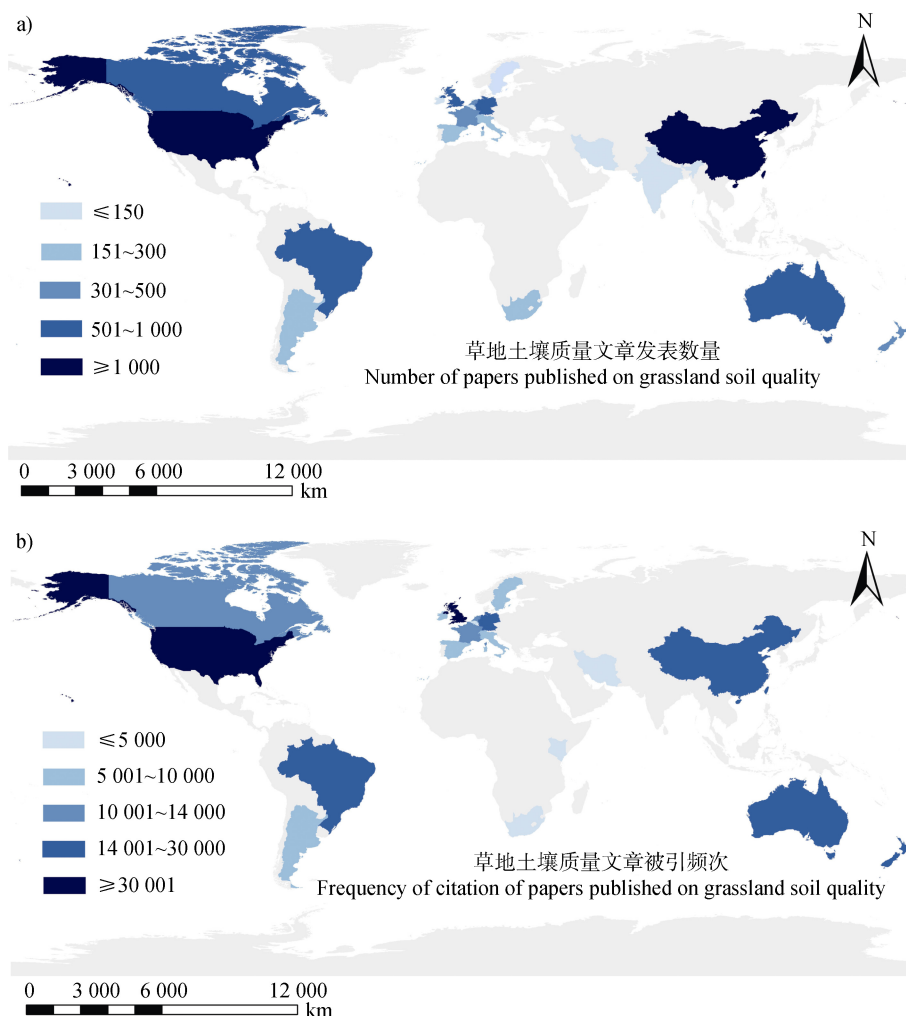


图 2 1990—2022 年间“草地土壤质量”研究主题文章发表数量 (a) 及被引频次 (b) 的空间分布

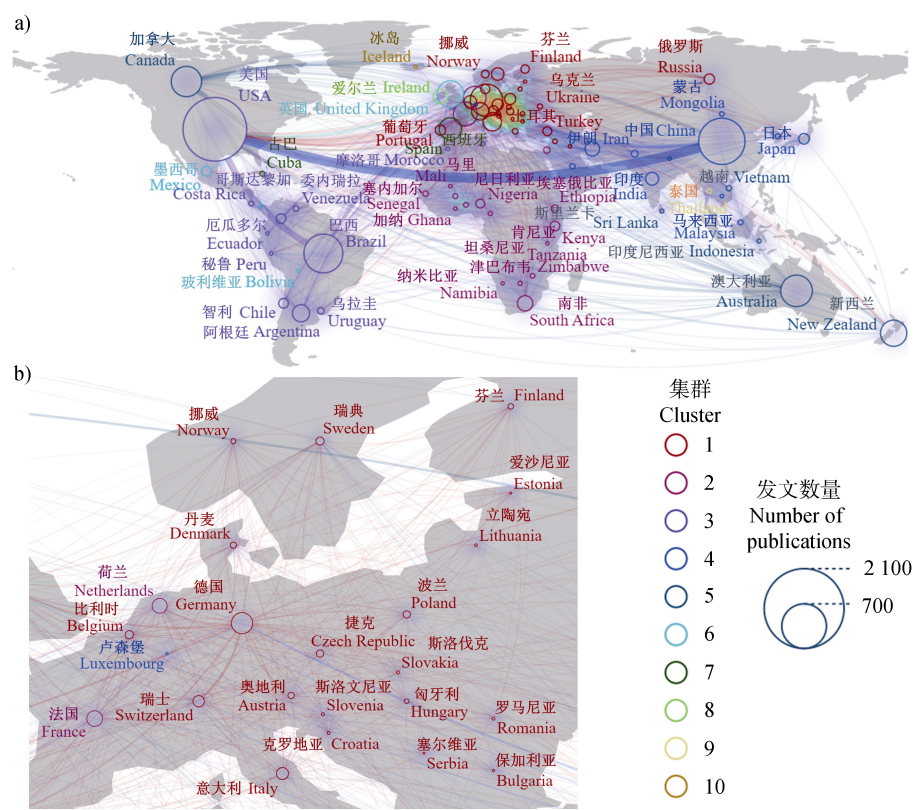
Fig. 2 Spatial distribution characteristics of the number of published papers (a) and citation frequency (b) on the research topic of "grassland soil quality" from 1990 to 2022

对研究期内不同国家间的合作关系进行了可视化分析。如图 3 所示,研究期内形成了以德国、法国、美国、中国、澳大利亚、英国、西班牙、爱尔兰、泰国和冰岛为主导的 10 个主要研究集群。其中,前 5 大研究集群包含世界上大多数国家。就欧洲大陆而言,一方面形成了以德国为中心,包含意大利、瑞士和波兰等 27 个国家在内的全球最大研究集群;另一方面,位于欧洲的法国和荷兰与非洲国家(如南非和肯尼亚)合作也十分密切,形成了包含 17 个

国家的第二大研究集群。美洲的研究由美国主导,与其他美洲国家(如巴西和阿根廷)合作较为密切,是全球第三大研究集群。在亚洲,研究以中国为主导,与其他亚洲国家(如印度和日本)合作较为密切,形成了全球第四大研究集群。此外,东南亚国家(如越南和印度尼西亚)与澳大利亚、新西兰和加拿大的合作也较为密切,形成了全球第五大研究集群。值得注意的是,中美两国的合作交流十分频繁(图 3),在全球形成了该研究领域的“双核技

术枢纽”格局。作为该领域最为活跃的两个国家(图2),中国和美国的频繁合作有助于增强学科活

力,促进学科创新,对该研究领域的繁荣发展具有重要意义。



注:圆圈的大小代表该国发文量,圆圈越大则表明该国发文量越多;两国间的连线代表国家间存在合作关系,连线越粗则表明两国间合作越频繁;具有相同颜色的线条代表该组国家合作较为紧密。Note: The size of the circles represents the number of publications from each country, with larger circles indicating higher publication volumes. The lines connecting countries represent collaborative relationships, with thicker lines indicating more frequent collaborations. Lines of the same color represent groups of countries that collaborate more closely.

图3 草地土壤质量研究国际合作网络(a.全球;b.欧洲)

Fig. 3 The international collaboration network in grassland soil quality research (a. The whole world; b. Europe)

2.2.2 主要作者 分别对1990—2022年间“草地土壤质量”研究主题文章发表数量(表1)和被引用量(表2)排名前10位的作者进行了统计分析。如表1所示,在发文量排名前10位的作者中,5位来自英国,其余分别来自印度、巴西、加拿大、爱尔兰和美国。同时,在被引用量排名前10位的作者中,5位来自英国,3位来自美国,其余分别来自印度和瑞典(表2)。该结果表明,英国和美国学者对“草地土壤质量”研究主题的关注度较高。Richard McDowell(62篇)、Rattan Lal(55篇)和 Marcos Gervasio Pereira(32篇)是该主题发文量最高的三位作者(表1)。其中,Rattan Lal(5 829次)和 Richard McDowell(1 413次)等围绕该主题发表的文章总

被引量均位居全球前10名。整体而言,研究期内该主题文章的总被引数量排名前三的作者分别为: Rattan Lal(5 829次)、Richard D. Bardgett(3 502次)和 Philip Matthew Haygarth(2 175次)。篇均被引数量排名前三的作者分别为: Richard D. Bardgett(每篇219次)、David A. Wardle(每篇212次)和 William J. Parton(每篇159次)。
2.2.3 主要研究期刊 表3和表4分别列出了1990—2022年间“草地土壤质量”研究主题发文量和被引数量排名前10的期刊。如表3所示,在文章发表量排名前10的期刊中,6个期刊被期刊引证报告(Journal Citation Report, JCR)分区标准划分为一区期刊,且其2022年影响因子均超过6.0。同时,

表 1 1990—2022 年围绕“草地土壤质量”研究主题发文量排名前十的作者

Table 1 The top 10 authors ranked by the number of publications on the research topic of “grassland soil quality” between 1990 and 2022

序号	作者	机构	文章发表数量
Ordinal	Author	Institute	Number of publications
1	Richard McDowell	林肯科学中心 Lincoln Science Centre	62
2	Rattan Lal	莫汉拉尔·苏卡迪亚大学 Mohanlal Sukhadia University	55
3	Marcos Gervasio Pereira	里约热内卢联邦农村大学 Federal Rural University of Rio de Janeiro	32
4	Sukhdev S. Malhi	阿尔伯塔大学 University of Alberta	31
5	Hong Jie Di	林肯大学 Lincoln University	27
6	Philip Matthew Haygarth	兰卡斯特大学 Lancaster University	27
7	Owen Fenton	约翰斯敦城堡环境研究中心 Johnstown Castle Environment Research Centre	25
8	Kristofor R. Brye	阿肯色大学 University of Arkansas	24
9	Keith C. Cameron	林肯大学 Lincoln University	24
10	Leo M. Condrón	林肯大学 Lincoln University	24

表 2 1990—2022 年间“草地土壤质量”研究主题文章总被引频次排名前十的作者

Table 2 The top 10 authors ranked by the citation frequency of articles on the research topic of “grassland soil quality” between 1990 and 2022

序号	作者	机构	文章发表数量	总被引频次
Ordinal	Author	Institute	Number of publications	Frequency of citation
1	Rattan Lal	莫汉拉尔·苏卡迪亚大学 Mohanlal Sukhadia University	55	5 829
2	Richard D. Bardgett	曼彻斯特大学 The University of Manchester	16	3 502
3	Philip Matthew Haygarth	兰卡斯特大学 Lancaster University	27	2 175
4	David A. Wardle	乌梅奥大学 Umea University	9	1 907
5	William J. Parton	科罗拉多州立大学 Colorado State University	12	1 902
6	Keith C. Cameron	林肯大学 Lincoln University	24	1 698
7	Patrick Lavelle	索邦大学 Sorbonne University	14	1 694
8	Andrew Sharpley	阿肯色大学 University of Arkansas	23	1 644
9	Hong Jie Di	林肯大学 Lincoln University	27	1 478
10	Richard McDowell	林肯科学中心 Lincoln Science Centre	62	1 413

在被引数量排名前 10 的期刊中，7 个期刊被 JCR 分区标准划分为一区期刊，其 2022 年影响因子为 4.8 至 11.6（表 4）。上述结果表明，该主题的研究成果质量相对较高，受到了行业内高水平期刊的认可。*Agriculture , Ecosystems & Environment* 和 *Soil Biology & Biochemistry* 是该主题研究期内发文量和

被引数量最高的两个期刊（表 3 和表 4）。此外，*Science of the Total Environment*、*Journal of Environmental Quality*、*Soil & Tillage Research*、*Geoderma* 和 *Applied Soil Ecology* 也位列该主题发文量和被引量前 10 位（表 3 和表 4）。上述研究结果为该领域的文献分析提供了重要参考。

表 3 1990—2022 年间围绕“草地土壤质量”研究主题发文量排名前十的期刊

Table 3 The top 10 journals ranked by the number of publications on the research topic of “grassland soil quality” between 1990 and 2022

序号	来源期刊	发文量	JCR 分区	2022 年影响因子
Ordinal	Source journal	Number of publications	JCR quartile ranking	Impact factor of 2022
1	<i>Agriculture, Ecosystems & Environment</i>	299	1	6.6
2	<i>Soil Biology & Biochemistry</i>	202	1	9.7
3	<i>Science of the Total Environment</i>	196	1	9.8
4	<i>Journal of Environmental Quality</i>	186	3	2.4
5	<i>Soil & Tillage Research</i>	161	1	6.5
6	<i>Geoderma</i>	148	1	6.1
7	<i>Applied Soil Ecology</i>	136	2	4.8
8	<i>Plant and Soil</i>	130	2	4.9
9	<i>Revista Brasileira de Ciência do Solo</i>	113	4	1.7
10	<i>CATENA</i>	108	1	6.2

注：JCR，被期刊引证报告。下同。 Note: JCR, Journal citation reports. The same below.

表 4 1990—2022 年间 “草地土壤质量” 研究主题文章总被引频次排名前十的期刊

Table 4 The top 10 journals ranked by citation frequency of articles on the research topic of “grassland soil quality” between 1990 and 2022

序号	来源期刊	发文量	总被引频次	JCR 分区	2022 年影响因子
Ordinal	Source journal	Number of publications	Frequency of citation	JCR quartile ranking	Impact factor of 2022
1	<i>Soil Biology & Biochemistry</i>	202	18 121	1	9.7
2	<i>Agriculture, Ecosystems & Environment</i>	299	11 124	1	6.6
3	<i>Journal of Environmental Quality</i>	186	7 465	3	2.4
4	<i>Soil & Tillage Research</i>	161	6 564	1	6.5
5	<i>Science of the Total Environment</i>	196	5 934	1	9.8
6	<i>Ecology</i>	37	5 788	1	4.8
7	<i>Applied Soil Ecology</i>	136	5 725	2	4.8
8	<i>Global Change Biology</i>	63	5 607	1	11.6
9	<i>Geoderma</i>	148	5 279	1	6.1
10	<i>Soil Science Society of America Journal</i>	98	4 954	3	2.9

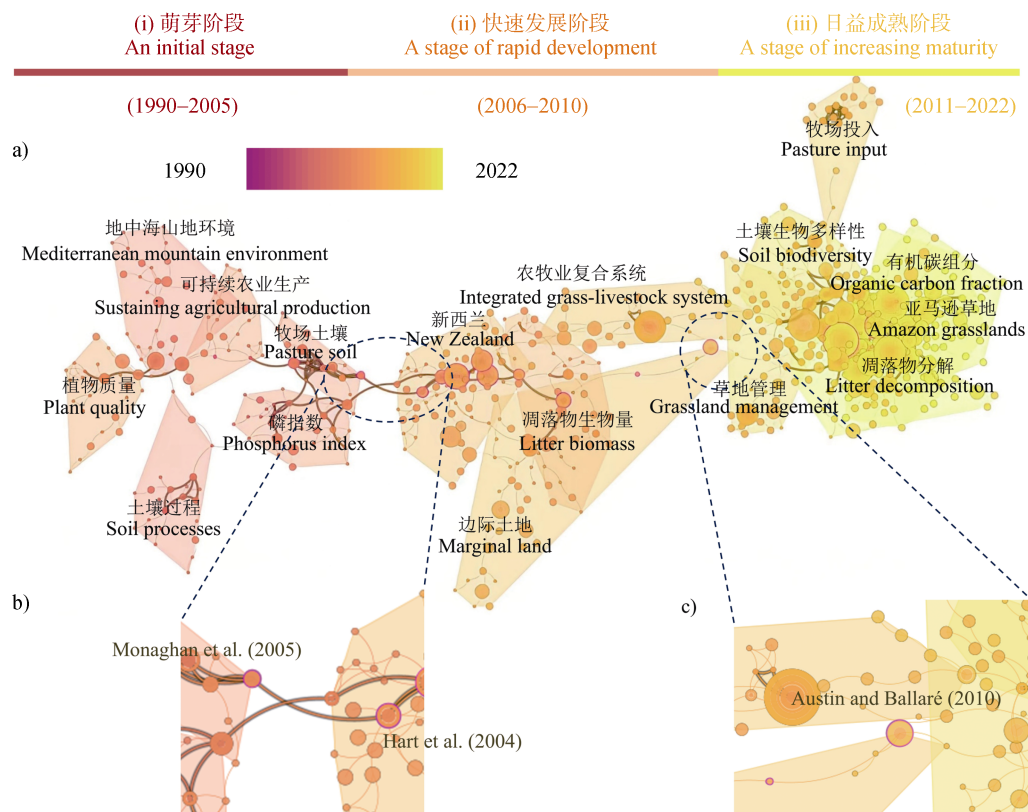
2.3 研究热点与前沿

2.3.1 草地土壤质量研究的阶段性特征 根据研究主题的变化和发展情况，将 1990—2022 年间“草地土壤质量”研究划分为三个阶段：萌芽阶段（1990—2005 年）、快速发展阶段（2006—2010 年）和日益成熟阶段（2011—2021 年）（图 4）。值得注意的是，通过对比分析国内外相关研究的发展轨迹，

发现这一阶段划分不仅适用于全球，也与中国该领域的发展进程高度一致。这种同步性反映了草地土壤质量研究作为全球性科学议题的普遍性特征，同时也表明中国在该领域的研究已逐步融入国际学术主流，并与全球研究趋势保持紧密互动。在萌芽阶段中，虽然聚类主题数量（6 个）略高于快速发展阶段（4 个），但被引文献数量和单篇文献的被引频

次均相对较低（图 4）。上述结果表明，萌芽阶段研究人员对“草地土壤质量”的关注度相对较低，且研究主题相对较为分散。萌芽阶段被引频次最高的三篇文章分别为 Conant 等^[24]（13 次），Post 和 Kwon^[25]（12 次）和 Guo 和 Gifford^[26]（9 次）（表 5）。上述研究表明，通过优化草地管理措施（如精准施肥、科学放牧）以及实施退耕还草工程能够促进土壤碳固存，并提高土壤碳储量。作为衡量草地土壤质量的关键指标，土壤碳含量的增加不仅反映了土壤肥力的提升，也预示着生态系统功能的改善。具体而言，萌芽阶段草地土壤质量研究涵盖了 6 个重要主题：土壤过程、植物质量、地中海山地环境、维持农业生产、磷指数和牧场

土壤。研究表明，土壤支撑过程（如成土过程、水分循环、生物活动和养分循环）、土壤退化过程（如沙化、盐碱化、侵蚀和压实）以及植物生长过程直接影响土壤结构和理化性质，进而影响土壤质量、生态系统服务与功能^[27]。因此，加强对土壤过程和植物质量的研究，可为草地土壤质量提升和可持续利用提供理论依据。地中海山地环境脆弱，草地土壤有机质含量极低（ $\leq 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ），抗蚀抗冲性差，土壤形成与剥蚀速率失衡^[28]。同时，该地牧场曾因过度放牧和农业侵占而遭到破坏^[28]，使得“草地土壤质量”研究成为焦点。牧场土壤和磷指数的研究表明，畜牧管理和土壤磷含量是影响草地土壤质量的重要因素。



注：多边形代表研究主题，颜色变化表明研究主题在不同阶段发生变化；圆圈代表共被引文献，圆圈大小表明共被引频率；外层为紫色的圆圈表示共被引文献具有较高的中介中心性，即该文章在共被引网络中具有较高的影响力；连接线表示共引文献之间存在联系，连接线越粗表明共引频率越高。Note: Polygons represent research themes, and the color variations represent changes of research themes during different stages. Circles represent co-cited references, and the size of circles represents the frequency of co-citation; a circle with an outermost purple ring indicates that the co-cited reference has a high intermediary centrality, suggesting a large influence of the article in the co-cited networks. Connecting lines represent the links among co-cited references, with a thicker line representing a higher frequency of co-citation.

图 4 基于 Web of Science 的共被引文献聚类分析图（a）和共引网络图（b 和 c）

Fig. 4 Co-cited references based on the Web of Science for the clustering analysis map (a) and co-citation network maps (b and c)

表 5 草地土壤质量不同研究阶段被引频次较高的文章

Table 5 Articles with high citation frequencies at different stages of grassland soil quality research

研究阶段	作者	期刊	发表年份	被引频次
Stage	Author	Journal	Publication year	Citation frequencies
萌芽阶段	Conant 等 Conant et al.	<i>Ecological Applications</i>	2001	13
An initial stage	Post 和 Kwon Post and Kwon	<i>Global Change Biology</i>	2000	12
(1990-2005)	Guo 和 Gifford Guo and Gifford	<i>Global Change Biology</i>	2002	9
快速发展阶段	Carneiro 等 Carneiro et al.	<i>Revista Brasileira de Ciência do Solo</i>	2009	22
A stage of rapid development	Gassman 等 Gassman et al.	<i>Transactions of the ASABE</i>	2007	16
(2006-2010)	Bilotta 等 Bilotta et al.	<i>Advances in Agronomy</i>	2007	16
日益成熟阶段	Bünemann 等 Bünemann et al.	<i>Soil Biology & Biochemistry</i>	2018	55
A stage of increasing maturity	Abdalla 等 Abdalla et al.	<i>Agriculture, Ecosystems & Environment</i>	2018	31
(2011-2021)	Wiesmeier 等 Wiesmeier et al.	<i>Geoderma</i>	2019	29

快速发展阶段的单篇文章被引频次逐渐增加 (表 5), 表明“草地土壤质量”研究的热度不断上升。该阶段, 被引频次最高的三篇文章分别为: Carneiro 等^[29] (22 次)、Gassman 等^[30] (16 次) 和 Bilotta 等^[31] (16 次) (表 5), 显示出在该阶段“草地土壤质量”研究的影响力有所增强。该阶段热门研究主题包括: 新西兰、边际土地、凋落物生物量及草畜复合系统。新西兰作为畜牧业大国, 对草地土壤质量的调查和监测十分重视, 因此成为该阶段的研究热点^[32]。边际土地是一种介于生产性土地和非生产性土地之间的过渡性土地利用类型, 其生产力较差、经济效益低^[33]。传统土壤质量评价方法通常仅考虑土壤的生态价值, 而忽略其社会经济效益, 这导致在区分边际土地、非生产性土地和生产性土地时面临挑战。因此, 如何改进土壤质量评价方法, 科学识别边际土地范围是当前尚未解决的难题。草畜复合系统可有效促进养分循环、增加凋落物生物量和提高草地管理效率, 这些过程均会影响土壤养分含量、周转速率和土壤质量^[34]。因此, 草畜复合系统、草地管理和凋落物生物量也是快速发展阶段的热门研究主题。

在日益成熟阶段, 单篇文章的被引频次显著增加 (表 5), 这表明与前两个阶段相比, 研究人员对于“草地土壤质量”的兴趣进一步加深。同时, 该阶段的各研究主题之间重叠度较高, 联系也更加紧密 (图 4)。日益成熟阶段被引频次最高的三篇文章

分别为: Bünemann 等^[35] (55 次), Abdalla 等^[36] (31 次) 和 Wiesmeier 等^[37] (29 次) (表 5)。其中, Bünemann 等^[35]对土壤质量的概念、评价方法和指标进行了综述, 为后续“草地土壤质量”研究奠定了基础。成熟阶段的热门研究主题包括: 亚马逊草原、草地管理、牧草投入、土壤生物多样性、有机碳组分和凋落物分解。亚马逊草原在陆地碳、水循环中发挥着重要作用, 吸引全球研究人员对其土壤质量的广泛关注^[38-39]。草地管理与牧草投入两大研究主题关注度的提升表明人类活动对草地土壤质量的影响逐渐受到重视。研究显示, 土地利用转换、过度放牧和草地管理不善已在全球范围内造成了严重的土地退化和土壤质量恶化^[7, 40]。因此, 未来应积极借鉴亚马逊草地恢复经验, 推进退化草地生态恢复工程建设, 实现退化草地土壤质量的恢复与提升。此外, 在日益成熟阶段, 研究人员对于土壤生物多样性、有机碳组分和凋落物分解的研究兴趣也与日俱增, 这表明全球“草地土壤质量”研究已从时空格局转向微观机制的探索。

如图 4b 所示, 在萌芽阶段与快速发展阶段之间存在共被引频次较高 (即连接线较粗) 的两篇文章 (Monaghan 等^[41]和 Hart 等^[42]), 且这两篇文章的中介中心性较高 (分别为 0.25 和 0.23)。该结果表明, Monaghan 等^[41]和 Hart 等^[42]在两个阶段分别具有较大的影响力, 两阶段的研究主题之间也存在一定的继承性。尽管发展阶段后期也有文章具有较高的中

介中心性 (0.36) (Austin 和 Ballaré^[43]), 但在日益成熟阶段并未出现类似的高中介中心性文章 (图 4c)。因此, 快速发展阶段与日益成熟阶段的研究主题相对独立。

综上所述, 当前“草地土壤质量”前沿研究主题主要包括以下三个方面: (1) 在影响因素与驱动机制解析方面, “土壤生物多样性”、“有机碳组分”和“凋落物分解”等主题的研究热度持续上升; (2) 在人类活动影响方面, 优化“草地管理”和“牧草投入”等措施以提升草地土壤质量, 近年来受到广泛关注; (3) 在退化草地恢复与管理方面, 生态脆弱、土壤质量退化严重区域 (如“亚马逊草原”) 已成为草地土壤质量评价和生态恢复的热门研究主题。纵观该领域不同研究阶段主题发展变迁过程具有两个显著特点: (1) 热门研究主题不断发生变化, 由最初关注“土壤碳对草地土壤质量的影响”转变为近期关注“人为因素对草地土壤质量的影响”; (2) 热点研究区域也在发生变化, 从最初关注“畜牧业可持续发展、草地土壤质量相对较高的区域”转变为近期关注“土地退化严重、草地土壤质量相对较低的区域”。这种双重转变实质上反映了全球变化背景下学科需求的动态调整: 在气候变化和人类活动加剧的共同作用下, 越来越多的研究聚焦于如何通过人为干预措施提升草地土壤质量, 这可能是导致研究热点转变的关键驱动因素。与此同时, 土地严重退化区域的生态脆弱性进一步加剧了相关研究的紧迫性, 并促使热门研究区域发生转移。此外, 研究主题的转变也是该领域不断发展的必然结果, 标志着研究目标从理论基础向恢复实践迈进, 从探索自然规律到生态系统管理和调控转变。未来应进一步完善草地土壤质量研究体系, 加强学科交叉与国际合作, 推动全球或区域草地土壤质量监测网络的建立与完善, 在此基础上揭示草地土壤质量时空格局与驱动机制, 为草地土壤健康与管理提供科学依据。

2.3.2 草地土壤质量研究发展趋势 图 5a 对 1990—2022 年间热门关键词的多年累计出现次数及标准化频次进行了统计分析。如图 5a 所示, 累计出现次数较高的关键词 (除“草地”、“土壤质量”和“土壤”外) 可分为三类: (1) 土壤质量评价指标 (如“有机质”、“氮”、“磷”、“微生物生物量”和“碳”); (2) 影响土壤质量的因素或过程 (如“土地利用”、“土地利用变化”、“分解”、“侵蚀”、“气候变化”、

“生物多样性”、“农业”、“碳固存”、“土壤性质”、“径流”、“土壤肥力”和“养分循环”); (3) 开展土壤质量评价的目的或重要性 (如“草地管理”、“生态系统服务”和“可持续性”)。图 5b 以关键词的中心度 (表示该关键词与草地土壤质量研究的相关性) 为横轴, 以关键词出现次数 (表示该关键词在草地土壤质量研究中的发展程度) 为纵轴进行作图, 分析了关键词发展态势和变化趋势。如图 5a 所示, “有机质”、“碳”和“固碳”的累计出现次数分别为 461 次、94 次和 101 次, 它们均位于第一象限 (I) (图 5b), 表明这些关键词具有较强的发展势头, 且与“草地土壤质量”研究高度相关。研究表明, 有机质和碳 (固存) 对土壤结构、质地和水力特性具有重要影响^[44], 可作为评价草地土壤质量的关键指标。“氮”、“磷”和“微生物生物量”也是定量评估草地土壤质量的重要指标, 它们的累计出现次数分别为 287 次、257 次和 133 次 (图 5a)。“氮”位于第四象限 (IV) (图 5b), 表明该关键词与“草地土壤质量”研究的相关性较高, 但其发展水平较低。“微生物生物量”位于第三象限 (III) (图 5b), 在 2007 年之后关注度逐渐上升 (图 5a), 表明该关键词是草地土壤质量研究中新兴的常用关键词。总体而言, 草地土壤质量评价所采用的指标种类繁多且缺乏统一标准, 导致不同地区或不同时期的研究结果难以直接比较, 从而削弱了其对草地管理与生态恢复的指导价值。未来应建立科学、统一的草地土壤质量评价体系, 并制定草地土壤退化基准, 这不仅有助于提高草地土壤质量评价精度和评价效率, 还能够为草地土壤保护与可持续管理提供决策支持。

“土地利用”、“土地利用变化”、“草地管理”和“气候变化”的累计出现次数分别为 236 次、189 次、161 次和 146 次 (图 5a)。这些关键词的较高出现次数与其对草地土壤质量的重要影响密切相关。其中, “土地利用”和“草地管理”均位于第四象限 (IV) (图 5b), 表明人类活动的影响是草地土壤质量研究的重要主题, 但其发展程度尚有待进一步提高。值得注意的是, 我国实施的退耕还草、草原禁牧等生态工程作为典型的土地利用和草地管理措施, 其生态环境效应在近年研究中得到系统性评价。研究表明, 黄土高原地区退耕还草工程的实施可使土壤侵蚀量降低 24%^[45], 而禁牧措施的实施能够有效提升青藏高原高寒草甸土壤碳、氮、磷等养分含量^[7]。

通过针对性的开展草地恢复工作,我国草地土壤质量得到了显著提升。“水质”、“侵蚀”和“径流”的累计出现次数分别为319次、146次和92次(图5a),它们均位于第二象限(Ⅱ)(图5b),表明这些关键词与“草地土壤质量”研究的相关性较低。然而,1994年后,关键词“侵蚀”的出现次数快速上升

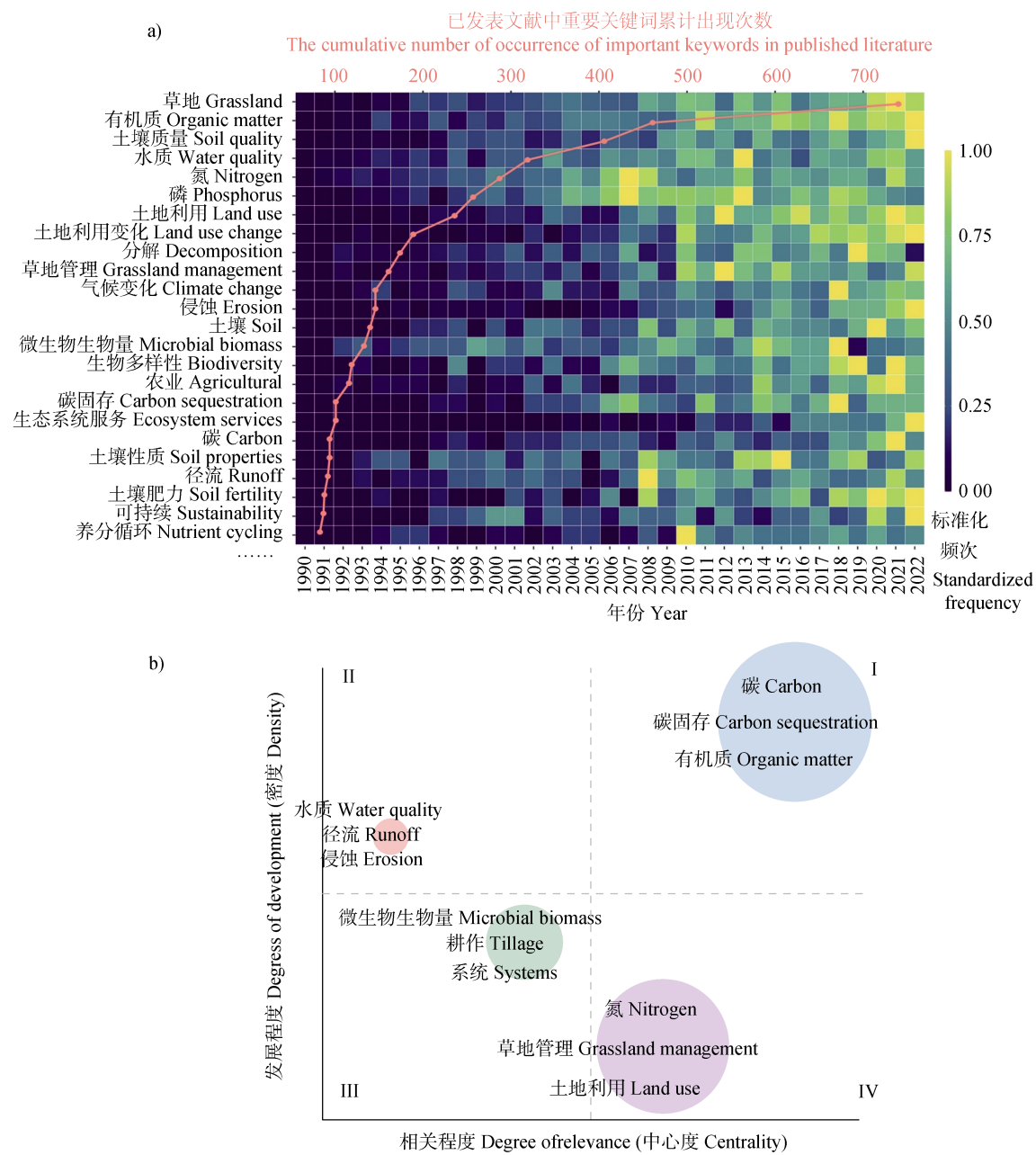


图 5 1990—2022 年间已发表文献中重要关键词累计出现次数和标准化频次 (a), 以及基于密度 (即相对发展程度) 和中心度 (即与草地土壤质量研究的相关程度) 的关键词使用趋势变化特征 (b)

Fig. 5 The cumulative number and normalized frequency of important keywords occurrence in published literature during 1990–2022(a)and the change characteristics of the trend of the use of keywords based on their density (i.e., the relative degree of development) and centrality (i.e., the relative degree of relevance to the study of grassland soil quality) (b)

(图 5a), 表明大面积的土壤侵蚀可能提升了研究人员对于草地土壤质量的关注度。2019—2022 年, “生态系统服务”、“土壤肥力”和“可持续性”等关键词在草地土壤质量研究中的关注度逐渐提升(图 5a), 表明这些关键词已成为当前“草地土壤质量”研究的重点。

综上所述, 当前草地土壤质量研究热点主要集中在以下两个方面: (1) 核心评价指标(如“碳”、“氮”、“磷”和“微生物生物量”)对草地土壤质量的影响机制; (2) 人类活动(如“土地利用变化”和“草地管理”)和全球变化(如“气候变化”)对草地土壤质量的驱动作用。未来我国在开展草地恢复与管理工作时, 应着重从以下两方面进行优化: (1) 创新植被恢复技术: 在总结退耕还草工程成功经验的基础上, 因地制宜扩大实施范围, 通过筛选和种植适生植物, 提升土壤有机质含量, 同时实施碳、氮、磷等养分的精准管理, 维持土壤养分动态平衡; (2) 实施差异化放牧管理策略: 基于土壤侵蚀程度的空间异质性, 分区制定放牧管理措施, 在轻度侵蚀区采用轮牧与禁牧相结合的方式, 重度侵蚀区则延长禁牧周期辅以生态修复工程, 建立可持续的放牧管理体系。通过优化草地土壤管理, 可有效增强草地生态系统韧性和恢复力, 从而提升草地生态系统应对全球气候变化和人类活动干扰的能力。

3 结 论

本研究通过对 1990—2022 年间草地土壤质量领域 8 089 篇文献的计量分析, 系统梳理了该领域的研究脉络、演变趋势及学术格局。“草地土壤质量”研究经历了从初步探索到快速发展, 再到趋于成熟的阶段, 发文量也呈逐年增加趋势; 美国和中国在该领域的研究实力居于全球领先地位, Rattan Lal 和 Richard D. Bardgett 是目前该领域被引频次最高的研究者, *Agriculture, Ecosystems & Environment* 和 *Soil Biology & Biochemistry* 分别是该领域发文量和被引量最高的期刊。“草地土壤质量”研究主题由时空格局与主控因素逐渐转向微观过程与人类干扰机制, 重点区域也呈现出由优质草地向退化草地的空间转移。未来应进一步建立科学、统一的草地土壤质量评价体系, 并制定草地土壤退化基准。同时,

应加强学科交叉与国际合作, 推动全球或区域草地土壤质量监测网络的建立与完善, 促进草地生态系统的可持续管理。

参考文献 (References)

- [1] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality. 23–35. // Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, et al. (ed.) *Defining soil quality for a sustainable environment*[M]. Madison: Soil Science Society of America, Inc., 1994.
- [2] Qiao L, Wang X H, Smith P, et al. Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12(6): 574–580.
- [3] Duddigan S, Shaw L J, Sizmur T, et al. Natural farming improves crop yield in SE India when compared to conventional or organic systems by enhancing soil quality[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, 43(2): 31.
- [4] do Nascimento A R V J, Cunha G K G, do Nascimento C W A, et al. Assessing soil quality and heavy metal contamination on scheelite mining sites in a tropical semi-arid setting[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2021, 232(9): 375.
- [5] Guo J X, Li G Y, Zhu Q, et al. Exploring the spatial relationship between soil quality index and soil ecosystem services driven by social-ecological factors: A peri-urban case study in Central China[J]. *Catena*, 2024, 245: 108350.
- [6] Fan Y N, Zhang C, Hu W Y, et al. Development of soil quality assessment framework: A comprehensive review of indicators, functions, and approaches[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 172: 113272.
- [7] Liu L K, Zhao G J, An Z F, et al. Effect of grazing intensity on alpine meadow soil quality in the eastern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 141: 109111.
- [8] Suttie J M, Reynolds S G, Batello C. *Grasslands of the World*[M]. No. 34. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2005.
- [9] White R P, Murray S, Rohweder M. *Pilot analysis of global ecosystems: Grassland ecosystems*[M]. Washington, DC: World Resources Institute, 2000.
- [10] Bai Y F, Cotrufo M F. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions[J]. *Science*, 2022, 377(6606): 603–608.
- [11] Wu J G, Zhang Q, Li A, et al. Historical landscape dynamics of Inner Mongolia: Patterns, drivers, and impacts[J]. *Landscape Ecology*, 2015, 30(9): 1579–1598.
- [12] Rollefson G O, Köhler-Rollefson I. Early neolithic

- exploitation patterns in the levant: Cultural impact on the environment[J]. *Population and Environment*, 1992, 13 (4): 243—254.
- [13] Gibbs H K, Salmon J M. Mapping the world's degraded lands[J]. *Applied Geography*, 2015, 57: 12—21.
- [14] Ma Y Q, Huang L, Li J H, et al. Carbon potential of China's Grain to Green Program and its contribution to the carbon target[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, 200: 107272.
- [15] Chen L Y, Blanc-Betes E, Hudiburg T W, et al. Assessing the returns to land and greenhouse gas savings from producing energy crops on conservation reserve program land[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55 (2): 1301—1309.
- [16] Rouet-Leduc J, van der Plas F, Bonn A, et al. Exploring the motivation and challenges for land-users engaged in sustainable grazing in Europe[J]. *Land Use Policy*, 2024, 141: 107146.
- [17] Donthu N, Kumar S, Mukherjee D, et al. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines[J]. *Journal of Business Research*, 2021, 133: 285—296.
- [18] Li G Q, Xie B X, Xie S, et al. Research progress of soil seed bank based on bibliometric analysis[J]. *Soils*, 2022, 54 (1): 103—113. [李国旗, 谢博勋, 解盛, 等. 基于文献计量学的土壤种子库研究进展分析[J]. *土壤*, 2022, 54 (1): 103—113.]
- [19] Xu K K, Xu L Y, Tang W, et al. Environmental remediation applications of modified nanoscale zero valent iron: A bibliometric-based deep analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62 (5): 1405—1419. [徐珂珂, 许琳玥, 唐伟, 等. 改性纳米零价铁环境修复应用: 基于文献计量学的深层剖析[J]. *土壤学报*, 2025, 62 (5): 1405—1419.]
- [20] Sarkar A, Wang H Y, Rahman A, et al. A bibliometric analysis of sustainable agriculture: Based on the Web of Science (WOS) platform[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29 (26): 38928—38949.
- [21] Zi X, Hou H Y, Shen Z Z, et al. Analysis of research on nitrogen emissions and conversion from composting in past 30 years based on bibliometrics [J]. *Soils*, 2024, 56 (2): 281—290. [字晓, 侯红阳, 沈宗专, 等. 基于文献计量的近 30 年堆肥氮排放和转化研究分析[J]. *土壤*, 2024, 56 (2): 281—290.]
- [22] Aria M, Cuccurullo C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis[J]. *Journal of Informetrics*, 2017, 11 (4): 959—975.
- [23] Klaus V H. Pitfalls in global grassland restoration challenge restoration programs and the science-policy dialogue[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 149: 110185.
- [24] Conant R T, Paustian K, Elliott E T. Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon[J]. *Ecological Applications*, 2001, 11 (2): 343—355.
- [25] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential[J]. *Global Change Biology*, 2000, 6 (3): 317—327.
- [26] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8 (4): 345—360.
- [27] Vereecken H, Schnepf A, Hopmans J W, et al. Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15 (5): 1—57.
- [28] García-Ruiz J M, Nadal-Romero E, Lana-Renault N, et al. Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges[J]. *Geomorphology*, 2013, 198: 20—36.
- [29] Carneiro M A C, de Souza E D, dos Reis E F, et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo[J]. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 2009, 33 (1): 147—157.
- [30] Gassman P W, Reyes M R, Green C H, et al. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50 (4): 1211—1250.
- [31] Bilotta G S, Brazier R E, Haygarth P M. The impacts of grazing animals on the quality of soils, vegetation, and surface waters in intensively managed grasslands[J]. *Advances in Agronomy*, 2007, 94: 237—280.
- [32] Schipper L A, Mudge P L, Kirschbaum M U F, et al. A review of soil carbon change in New Zealand's grazed grasslands[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2017, 60 (2): 93—118.
- [33] Csikós N, Tóth G. Concepts of agricultural marginal lands and their utilisation: A review[J]. *Agricultural Systems*, 2023, 204: 103560.
- [34] Lemaire G, Franzluebbers A, de Faccio Carvalho P C, et al. Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 190: 4—8.
- [35] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality-A critical review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 105—125.
- [36] Abdalla M, Hastings A, Chadwick D R, et al. Critical review of the impacts of grazing intensity on soil organic carbon storage and other soil quality indicators in extensively managed grasslands[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 253: 62—81.
- [37] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobley E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales[J]. *Geoderma*, 2019, 333: 149—162.
- [38] Müller M M L, Guimarães M F, Desjardins T, et al. The

- relationship between pasture degradation and soil properties in the Brazilian Amazon: A case study[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 103(2): 279—288.
- [39] Biggs T W, Dunne T, Muraoka T. Transport of water, solutes and nutrients from a pasture hillslope, southwestern Brazilian Amazon[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(12): 2527—2547.
- [40] Raiesi F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 307—320.
- [41] Monaghan R M, Paton R J, Smith L C, et al. The impacts of nitrogen fertilisation and increased stocking rate on pasture yield, soil physical condition and nutrient losses in drainage from a cattle-grazed pasture[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2005, 48(2): 227—240.
- [42] Hart M R, Quin B F, Nguyen M L. Phosphorus runoff from agricultural land and direct fertilizer effects [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(6): 1954—1972.
- [43] Austin A T, Ballaré C L. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(10): 4618—4622.
- [44] Ren P P, Huang F, Li B G. Spatial differentiation characteristics of soil organic matter in dry farmland in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(2): 440—450. [任频频, 黄峰, 李保国. 黄淮海平原旱作农田土壤有机质含量的空间分异特征[J]. *土壤学报*, 2022, 59(2): 440—450.]
- [45] Fu B J, Chen L D, Ma K M, et al. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shaanxi, China[J]. *Catena*, 2000, 39(1): 69—78.

(责任编辑: 陈荣府)