

基于文献计量学的 1993—2023 年水土流失 监测技术研究进展

钟云飞^{1,2}, 王迪晨¹, 肖智财³, 常诚¹, 李丹¹, 房含¹, 高海宁¹

(1. 松辽水利委员会松辽流域水土保持监测中心站, 吉林 长春 130021;

2. 华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450045; 3. 哈尔滨师范大学 地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150025)

摘要: [目的] 分析 1993—2023 年全球水土流失监测技术领域的研究现状、进展及前沿热点的演变趋势, 梳理其发展态势, 为促进水土流失监测技术的创新与发展提供参考。[方法] 选取 Web of Science 的 Core Collection 数据库和中国知网 (CNKI) 数据库中 1993—2023 年水土流失监测技术领域的 943 篇文献, 利用 CiteSpace 文献计量软件对文献发表的发文趋势、国别、结构、作者合作网络、关键词聚类、关键词突现进行可视化分析。[结果] ① 全球发文量持续增长, 2010 年后研究步入发展的快车道, 中国是全球发文量的质心, 中国和美国在世界范围内对水土流失监测技术领域的学术影响力最大。② 中国科学院、北京师范大学等机构研究范围和合作网络较为广泛; 刘宝元、Poesen Jean 等是该领域发文量享有较高声誉的学者。③ 两大数据库中的研究热点都聚焦于黄土高原、东北地区两大水土流失严重区域, 沟蚀和坡面侵蚀是重点关注的水土流失类型。[结论] 水土流失监测技术由传统测量转变为现代测量, 多技术融合已成为该领域的发展趋势, 并推动水土流失监测成效提升。

关键词: 水土流失; 监测技术; CiteSpace; 文献计量学

文献标识码: C

文章编号: 1000-288X(2025)06-0140-09

中图分类号: S157.1

文献参数: 钟云飞, 王迪晨, 肖智财, 等. 基于文献计量学的 1993—2023 年水土流失监测技术研究进展 [J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 140-148. Zhong Yunfei, Wang Dichen, Xiao Zhicai, et al. A bibliometric analysis on research progress of soil and water loss monitoring technology during 1993—2023 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 140-148.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.027

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.027

A bibliometric analysis on research progress of soil and water loss monitoring technology during 1993—2023

Zhong Yunfei^{1,2}, Wang Dichen¹, Xiao Zhicai³, Chang Cheng¹, Li Dan¹, Fang Han¹, Gao Haining¹

(1. Soil and Water Conservation Monitoring Center of Songliao River

Basin, Songliao Water Resources Commission, Changchun, Jilin 130021, China;

2. College of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou,

Henan 450045, China; 3. College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin, Heilongjiang 150025, China)

Abstract: [Objective] The research status, progress, and evolutionary trends of research frontiers and hotspots in the field of global soil and water loss monitoring technology from 1993 to 2023 were analyzed, and its development trends were outlined, in order to provide references for promoting innovation and advancement in soil and water loss monitoring technology. [Methods] A total of 943 publications in the field of soil and water loss monitoring technology from 1993 to 2023 were selected from the Web of Science Core Collection and the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) databases. CiteSpace bibliometric software was employed to conduct visual analysis of publication trends, country and institutional distribution, author collaboration networks, keyword clustering, and keyword bursts. [Results] ① The global publication volume exhibits continuous growth, and research had entered a stage of rapid development after 2010. China was the center of global publication

收稿日期: 2025-07-14

修回日期: 2025-08-18

采用日期: 2025-08-21

资助项目: 国家重点研发计划项目“黑土地沟蚀发展演变及防控体系构建与示范”(2024YFD1501200)

第一作者: 钟云飞(1981—), 男(汉族), 吉林省辽源市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水土保持监测与规划研究。Email: 65764062@qq.com。

通信作者: 肖智财(2001—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 硕士研究生, 研究方向为沟蚀动态监测。Email: xiaozhicai@stu.hrbnu.edu.cn。

volume, and both China and the United States exerted the greatest academic influence worldwide in this field. ② Institutions including the Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University had relatively broad research scopes and extensive collaboration networks. Scholars such as Liu Baoyuan and Poesen Jean were highly reputed authors with significant publication volume in this field. ③ Research hotspots in both databases were concentrated in the Loess Plateau and northeast China, two regions severely affected by soil and water loss. Gully erosion and slope erosion were the primary types of soil loss receiving significant attention. [Conclusion] Soil and water loss monitoring technology has transitioned from traditional to modern measurement. The integration of multiple technologies has become a key trend in this field, thereby enhancing monitoring effectiveness.

Keywords: soil and water loss; monitoring technology; CiteSpace; bibliometrics

水土流失是在水力等外营力作用下水土资源和土地生产力的破坏和损失,水土流失发生形式多样,且各形式间的时空分异显著。中国是世界上水土流失最严重的国家之一,水土流失引发了土地退化、耕地破碎化等一系列生态环境问题,严重制约着我国社会、经济、环境的协调发展^[1]。因此,开展水土流失监测技术的研究具有重要的现实意义。

水土流失监测技术以水土流失理论为基础,以物理监测为主,辅以元素化学示踪和生物示踪等方法,并结合宏观、微观和典型的监测体系^[2]。早期的水土流失监测依赖于实地观测与传统的地图制图^[3],但其耗时耗力,工作开展易受环境因素限制的缺点是明显的^[4]。得益于世界科学技术的发展和进步,水土流失监测新技术层出不穷,并被广泛应用于水土流失监测工作中。较早的水土流失监测技术主要是传统测量^[5],如测针法、全站仪法、直尺测量法、激光剖面仪法等^[6],这些技术的应用在20世纪水土流失监测工作中发挥了巨大作用,为水土保持积累了宝贵的资料和记录。但随着水土流失监测研究的逐步深入,原有的监测技术已不能满足高精度、量化的研究需求^[7]。新监测技术的出现和完善,打破了这一窘境,如遥感(remote sensing)^[8]、摄影测量技术(photogrammetry)^[9]、激光扫描仪(LiDAR)等^[10-11]技术。这些技术在水土流失监测中的应用,将水土保持工作中从繁琐、恶劣的工作环境中解放出来,不仅改善了数据质量,也拓宽了数据的可用性。目前,水土流失监测技术领域系统的文献计量分析尚处空白,因此,归纳水土流失监测技术的研究与发展历程,厘清这一领域的研究现状、热点和动态对于未来水土流失监测技术的创新、进步具有重要的指导意义。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

本文所采用的数据分为英文文献数据和中文文

献数据。英文文献来自 Web of Science 数据库 Core Collection 中的 SCIE 和 SSCI,检索方式为 TS="soil and water loss" OR "soil and water conservation" OR "("soil erosion" NOT "wind erosion")" OR "water erosion" OR "gully erosion" OR "freeze-thaw erosion" AND "monitoring technology" OR "method" OR "UAV" OR "remote sensing" OR "Laser scanning" OR "satellite" OR "Total station" OR "radionuclide tracer technique" OR "GPS"。中文文献来自 CNKI 文献数据库中的北大核心、CSCD 和 CSSCI,选择高级检索中的专业检索,检索方式为"水土流失"+"水土保持"+"沟蚀"+"水蚀"+"冻融侵蚀"+"土壤侵蚀 NOT 风蚀"+"水力侵蚀"AND "监测技术"+"方法"+"无人机"+"遥感"+"激光扫描"+"卫星"+"全站仪"+"RTK"+"核素示踪"+"GPS"。两者检索时间范围均为 1993 年 1 月 1 日至 2023 年 12 月 31 日,检索结果剔除会议论文、综述论文、书籍,共检索到英文文献 722 篇,中文文献 221 篇。

1.2 研究方法

采用文献计量方法进行相关分析,将搜集、检索到的文献分别从 CNKI 和 Web of Science 平台中以 txt 格式导出,可视化分析在 CiteSpace 软件(R6.1. R6)中完成。CiteSpace 在文献的关键词共现分析、引证检索、耦合分析以及多元合作网络分析等方面具有优势。其生成的知识图谱具有“图”和“谱”的双重特点,不仅是可视化的知识图形,又是序列化的知识谱系,能够突显知识单元或知识群中的网络、结构、交叉等诸多隐藏的复杂关系,从而进一步揭示其中蕴含的或正在孕育的新知识领域^[12]。本文从机构、作者两个层面进行合作网络分析,同时辅以关键词聚类及突显强度的相关分析。将机构、作者合作知识图谱、关键词共现网络及聚类的时间切片均设置为 1 a, g-index 和 TOP N 分别设置为 25 和 50。由此生成相应的知识图谱。在所有类别的知识图谱中,节点的大小代表其影响力的高低,节点越大,其在网

络中的出现频率越高;节点的颜色代表该信息出现的时间,各颜色环的直径代表相应年份该信息出现的次数;节点间的连线代表两者之间共现度的高低,连线越粗,其共现度越高。节点中介中心性是表征节点在所处的关系网络中重要程度以及影响力大小的指标^[13],其计算公式为

$$BC_i = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{n_{st}^i}{g_{st}} \quad (1)$$

式中: BC_i 为中介中心性; g_{st} 为节点 s 到节点 t 的最短路径数目; n_{st}^i 为从节点 s 到节点 t 的 g_{st} 条最短路径中经过节点 i 的最短路径数目^[14]。

2 结果与分析

2.1 年度发文量及变化趋势

1993—2023年水土流失监测技术领域发文统计结果(图1)表明,英文文献以76.5%的文献总数占比远超中文文献。两者发文量均呈上升趋势,但中文文献的发文趋势呈现出明显的波动趋势,英文文献则有着更强的增势。20世纪90年代至21世纪初,英文文献发文量极少,水土流失监测技术在国际上尚处探索初期,研究热度受限于当时匮乏的科技水平。第一个发文量小高峰出现于2005年,该时期科研成果较为显著,这与遥感卫星等先进观测设备和技术应用于水土流失监测领域密切相关。2005年后,年均发文量激增至47.2篇,凸显科学界对水土流失的高度关注;激光雷达、核素示踪、无人机等新技术应运而生,有效弥合了监测需求增长与技术滞后(装备简陋、能力薄弱、网络覆盖不足)间的矛盾。中文文献的发文量大致可分为2个阶段:20世纪90年代至2010年为起步期,发文量少,研究聚焦黄土高原;2010年后,政府推进黑土地保护、崩岗治理、黄土高原综合整治等政策并设立专项资金,促使水土流失监测领域研究投入显著增加,推动监测技术创新与应用进入快速发展阶段。

2.2 国家发文量及机构合作情况

2.2.1 国家发文量

本节仅分析英文文献的国家发文量,国际合作文献的所有参与国均视为拥有发文量“1”。图2显示了发文量前10的国家(共753篇,占总量76.2%),依次为中国(431篇,43.6%)、美国(98篇,9.9%)、德国、意大利、西班牙、澳大利亚、英国、伊朗和印度。中美研究热点区域分别为黄土高原、东北黑土区、西南岩溶区与中央大平原。

国际合作是水土流失监测领域学术交流与技术创新的重要途径。图3的国家合作网络图谱(含69个节点,190条连线)能直观地展示各国对该领域

的关注度和交流合作的频度和紧密度。中国发文量最高(431篇)且中介中心性领先(0.5),凸显其研究深度与国际影响力;德国(42篇,中心性0.25)、美国(89篇,中心性0.19)虽发文量少于中国,但学术影响力显著。中国、美国、欧洲构成全球三大核心研究力量。合作广度上,中美合作网络几乎涵盖所有国家,欧洲则侧重区域内合作。

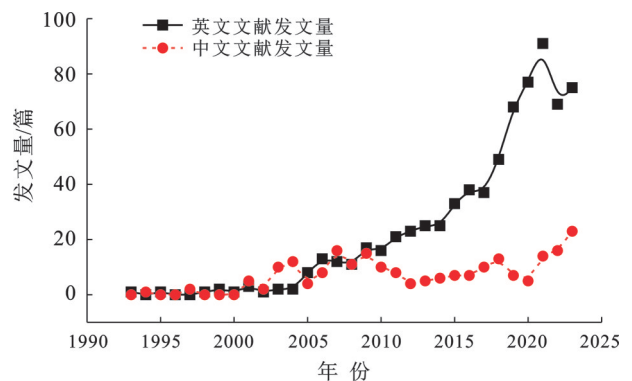


图1 1993—2023年水土流失监测技术领域发文量变化
Fig.1 Changes in publication volume in field of soil and water loss monitoring technology during 1993—2023

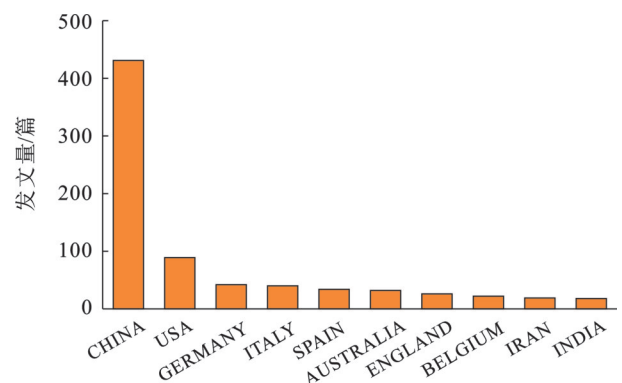


图2 1993—2023年该领域主要研究国家的发文量
Fig.2 Publication volume of major research countries in related field during 1993—2023

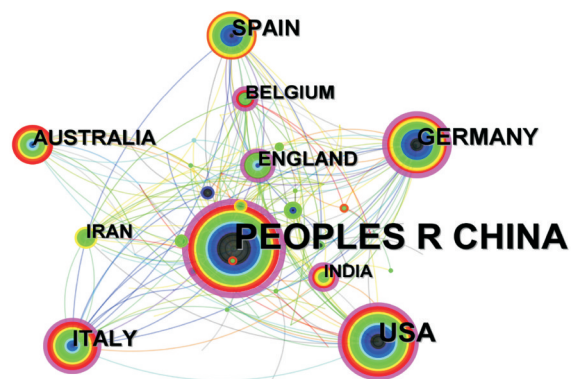


图3 1993—2023年各国家在该领域研究合作联结强度知识图谱

Fig.3 Knowledge graph of strength of cooperation linkage among countries in related research field during 1993—2023

2.2.2 机构合作网络特征

研究机构发文量及合作网络分析可反映科研水平与发展脉络。为了避免重复统计和混淆,文献署名的第一单位被视为文献发表的唯一发表机构。其中,英文文献有 451 个发文机构,635 条连线,连线多于节点,表明合作关系较为紧密,机构合作网络(图 4,表 1)呈现三大集群,以 Chinese Acad. Sci(中国科学院)和 Beijing Normal Univ.(北京师范大学)为核心的中国集群规模最大;Univ. Palermo(巴勒莫大学)和 Katholieke Univ Leuven(鲁汶大学)领衔的欧洲集群次之;USGS(美国地质调查局)、Iowa State University(艾奥瓦州立大学)、USDA(美国农业部)构成的美国集群位列第三。

中文文献分析表明,研究机构较少且规模有限,表 2 显示了中文发文量前 10 的机构中,仅 4 个机构发文超 10 篇。但节点中心性表明中国科学院仍居核心地位,体现其国家战略科技力量角色。值得注意的

是,水利部、农业农村部、自然资源部等政府部门深度参与科研合作,通过资金、政策支持有效推动产学研协同创新。

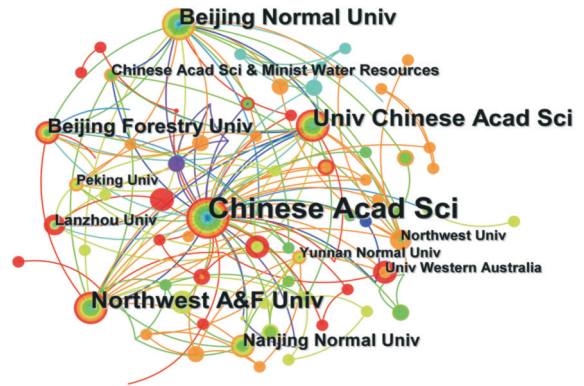


图 4 1993—2023 年水土流失监测技术领域机构合作知识图谱
Fig.4 Knowledge graph of institutional collaboration in field of soil and water loss monitoring technology during 1993—2023

表 1 1993—2023 年水土流失监测技术领域英文文献主要发文机构
Table 1 Major publishing institutions of English publications in field of soil and water loss monitoring technology during 1993—2023

研究机构	发文量/篇	中心性	研究机构	发文量/篇	中心性
Chinese Acad. Sci.	148	0.4	Univ. Palermo	9	0.01
Beijing Normal Univ.	51	0.12	Katholieke Univ. Leuven	9	0.02
Univ Chinese Acad Sci.	37	0.01	Univ. Western Australia	8	0.01
Northwest A&F Univ.	36	0.06	Catholic Univ. Louvain	6	0.03
Beijing Forestry Univ.	23	0.03	Goethe Univ. Frankfurt	6	0.01
Nanjing Normal Univ.	14	0.05	ARS	6	0.02
Minist. Water Resources	13	0.02	Minist. Nat. Resources	6	0.01
China Univ. Geosci.	13	0.01	Russian Acad. Sci.	5	0.01
Peking Univ.	12	0.01	Landcare Res.	4	0.02
Lanzhou Univ.	11	0.01	Bahir Dar Univ.	4	0.02

表 2 1993—2023 年水土流失监测技术领域中文文献发文量前 10 机构

Table 2 Top 10 institutions by publication volume of Chinese publications in field of soil and water loss monitoring technology during 1993—2023

研究机构	发文量/篇	中介中心性
中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所	11	0.01
中国科学院研究生院	10	0.01
中国科学院水利部水土保持研究所	10	0.04
南京师范大学地理科学学院	10	0
北京林业大学水土保持学院	9	0.01
南京大学城市与资源学系	8	0
中国科学院大学	7	0.04
中国科学院南京土壤研究所	6	0.02
水利部水土保持监测中心	6	0.01
中国科学院青海盐湖研究所	4	0.01

2.2.3 作者发文情况

作者合作网络知识图谱能够直观体现某一研究领域研究者的合作关系以及领域内的权威学者。作者合作关系知识图谱(图 5,图 6)中,节点大小与作者发文量和中介中心性成正比,节点间密集的连线则展示出频繁而深入的合作。参与发表英文文献的学者共 574 人,其中发文量最多的是中国的刘宝元、吴淑芳、冯浩,澳大利亚的 Kadambot·H·M·Siddique,发文量均为 7 篇。参与中文文献发表的学者共有 486 人,发文量较大的有杨浩(中介中心性最高,为 0.01)、张信宝、杨明义,均为 10 篇及以上。这些学者在合作网络中的中心性较高,所衍生的连线也较为密集,是国内外该领域享有较高学术声誉和权威的学者,对领域的发展有着举足轻重的作用。

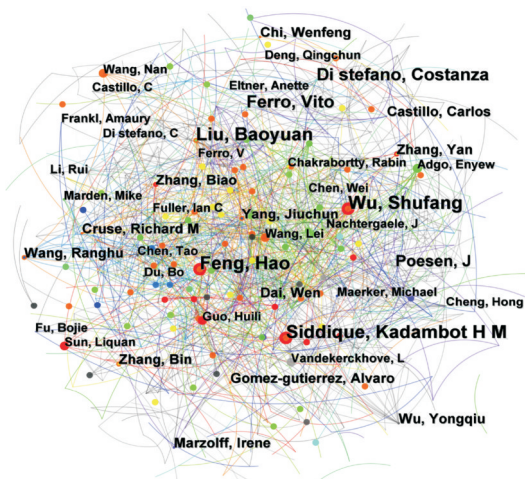


图 5 1993—2023年水土流失监测技术领域英文文献作者合作关系网络

Fig.5 Author collaboration network in English publications in field of soil and water loss monitoring technology during 1993—2023

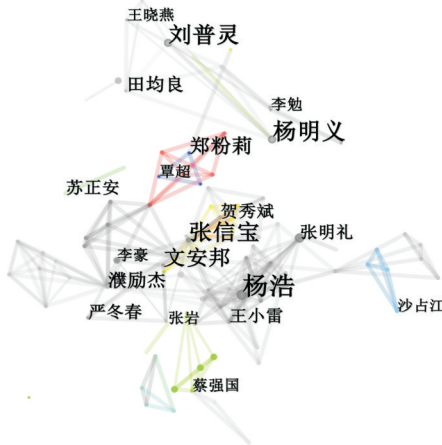


图 6 1993—2023年水土流失监测技术领域中文文献作者合作关系网络

Fig.6 Author collaboration network in Chinese publications in field of soil and water loss monitoring technology during 1993—2023

2.3 关键词共现及研究前沿

2.3.1 关键词共现分析

关键词是文献核心主题的抽象凝练,简明扼要地传达出文章侧重点。高频次关键词折射出领域发展的新趋势和前沿成果。在该知识图谱中,节点大小与关键词频次成正比,节点间连线越多,节点间的亲缘性越强。

英文关键词共现网络(图7)含550节点,3516连线,筛选出最小频次 ≥ 18 的47个关键词。在该网络中,核心节点“soil erosion”(中心性0.15)与“gully erosion”强关联,凸显沟蚀作为水土流失重点监测的形式。次节点“catchment”“area”“loess plateau”、“Northeast China”紧密聚集,揭示黄土高原及东北黑土区为热点区域。次级中心“model”“GIS”“UAV”

“DEM”“remote sensing”“SFM”共同指向核心,体现无人机、遥感、摄影测量等技术融合应用趋势。另外,“land use”“dynamics”“impact”等关键词反映对侵蚀过程与机理的关注。

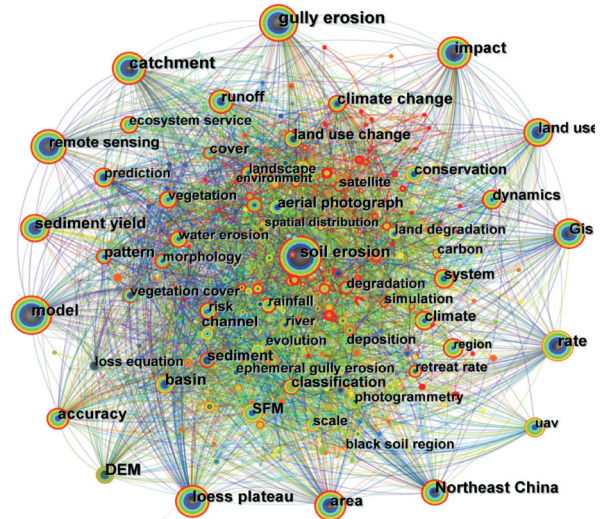


图 7 1993—2023年水土流失监测技术领域英文关键词共现知识图谱

Fig.7 Keyword co-occurrence knowledge graph of English publications in field of soil and water loss monitoring technology during 1993—2023

所得中文关键词共现网络中包含了262个节点,以及617条连线(图8),设置关键词最小共现频次为3,筛选出最具代表性的35个关键词。与英文文献的关键词网络相似,在该网络中,“土壤侵蚀”仍作为核心(节点中心性0.96),黄土高原和黑土区仍是研究的热点区域,摄影测量、无人机、遥感等技术手段也普遍应用于水土流失监测中。

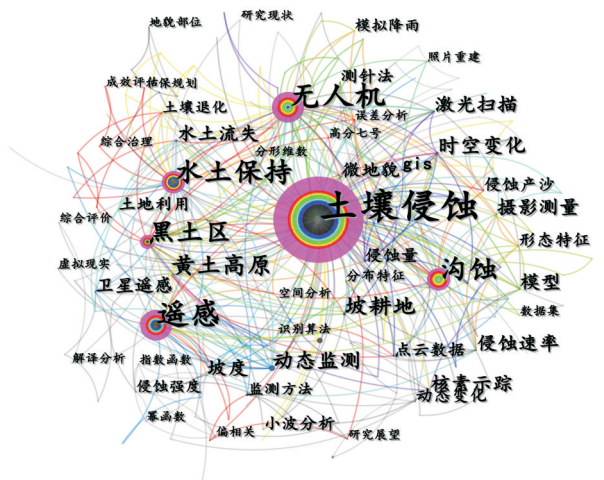


图 8 1993—2023年水土流失监测技术领域中文关键词共现知识图谱

Fig.8 Keyword co-occurrence knowledge graph of Chinese publications in field of soil and water loss monitoring technology during 1993—2023

2.3.2 研究前沿

研究前沿作为该领域发展的风口,有助于把握学科领域未来的研究方向和发展趋势,促进学术研究的创新和升华,是某阶段研究者们发表和应用的文献背后所折射出的研究主题。而关键词突现则是指相应时间内该研究主题受关注程度的变化情况。

由图 9 可知,突现强度较高的关键词有“模型”(model)、“沟蚀”(gully erosion)、“无人机”(UAV)、“遥感”(remote sensing)等,这些关键词是过去 30 a 内学者较为关注的前沿主题。从持续时间来看,“ephemeral gully erosion”(10 a),“channel”(14 a),“坡耕地”(7 a),“地貌部位”(7 a)。1993—2010 年前

后,中国水土流失监测逐步与国际接轨,如引入 USLE 模型,使用外国先进的卫星影像产品等进行动态监测。

20 世纪 90 年代,4 次超强型“中部型厄尔尼诺”接踵而至。期间发生多次特大洪灾,引起了中国社会的广泛关注,因此研究者们注重于水土流失、侵蚀沟等的防治。2010 年后,中国相继组织了 2 次全国水利普查,利用遥感影像解译出的东北地区侵蚀沟数量由 29.6 万条上升为 66.67 万条,印证了全国水土流失的加剧,而传统的监测技术已无法满足水土流失动态监测需求,因此该时期激光扫描、无人机等技术的出现,一定程度上解决了这一难题。

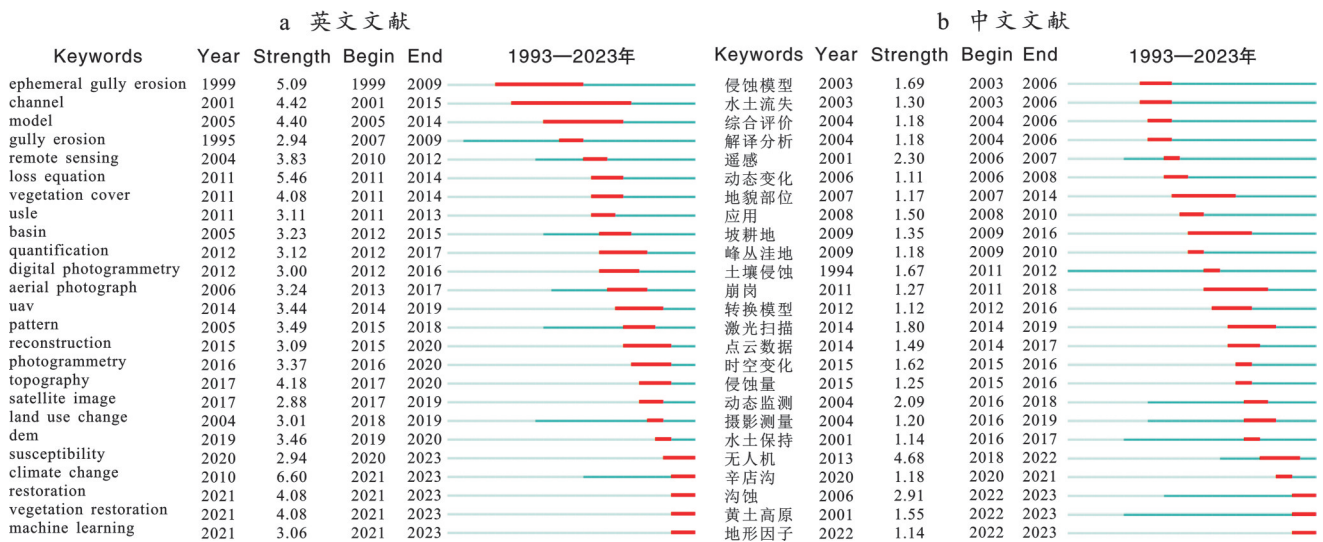


图 9 1993—2023 年水土流失监测技术领域中/英文文献突现关键词
Fig.9 Keywords with strongest citation bursts in Chinese and English publications in field of soil and water loss monitoring technology during 1993—2023

2.4 研究热点

CiteSpace 聚类图谱(图 10,图 11)可呈现研究热点与前沿,其中聚类标签(#+数字)的数值与研究热度及关键词群规模成反比。聚类显著性由模块值(Q)和加权轮廓值(S)判定,当 $Q > 0.3$ 且 $S \geq 0.7$ 时结构显著。中英文文献聚类 Q 值和 S 值均高于阈值(表 3,表 4),表明聚类结构有效。

2.4.1 英文关键词聚类

(1) 聚类 0。以 soil erosion 为中心,主要关键词为 gully erosion, sediment yields, spatiotemporal change, risk assessment。沟蚀作为土壤侵蚀最严重形式^[15],其输沙量直接表征侵蚀强度。伴随泥沙迁移导致土壤养分流失,并引发下游面源污染。解析输沙时空变化规律可精准评估侵蚀风险,为防治修复提供科学支撑。

(2) 聚类 1。以 UAV photogrammetry 为中心,主要关键词为 DEM, resolution, gully development,

classification。无人机是近些年广泛应用的水土流失监测技术之一,照片经三维重建之后,能生成高分辨率的数字地形模型(DEM)和影像,其精度可达数厘米,以一定间隔重访所监测的对象,可通过目视解译获取侵蚀沟形态特征参数,能够对侵蚀沟发育状态进行定量分析,在此基础上,按侵蚀沟发展的活跃状态,绘制侵蚀沟类型图。

(3) 聚类 2。以 remote sensing 为核心,主要关键词为 sentinel, spatial distribution, topographic attribute, landscape pattern。遥感是出现较早且较为常用的手段,如 sentinel(哨兵)系列^[16],依托高时空分辨率遥感数据,通过提取地形属性包括坡度、坡长、坡向等关键因子,结合降水、土壤等参数,能实现水土流失风险空间分异规律的定量反演。景观格局指数能更好地揭示人类活动与自然因素对水土流失过程的耦合影响,从而为水土保持规划提供决策支持。

(4) 聚类 3。以 erosion rate 为核心,主要关键词为

sensitivity analysis, multi-factor, erosion maps, uncertainty。侵蚀速率是描述水土流失最直观的指标之一,而通过耦合气候、土壤、地形及植被等多因子驱动机制,构建侵蚀速率空间预测模型。基于敏感性分析识别关键主导因子及其交互作用,可量化参数变化对侵蚀速率的影响强度。并针对模型输出的不确定性,通过生成侵蚀图谱,能显著提升高风险区识别的可靠性。

(5) 聚类 4。以 land use change 为核心,关键词包括 loess plateau, wetland, farmland, black soil region。土地利用变化显著影响水土流失,黄土高原经历高强度开垦后水土流失加剧,经坡沟治理、退耕还林等综合措施后得到有效控制;东北黑土区则因湿地大规模转为耕地(“北大荒”变“北大仓”),半世纪开发后形成 66.67 万条侵蚀沟,构成严峻生态挑战。

(6) 聚类 5。以 modeling 为核心,主要关键词为 deep learning, machine learning models, CSLE, USLE。传统经验模型(如 USLE/CSLE)作为参数化方程可提供侵蚀速率基准评估,但应对复杂需求时存在局限;机器学习模型(随机森林、支持向量机

等)显著增强多因子交互表征能力;深度学习则通过卷积神经网络自动提取遥感影像中的地形纹理与侵蚀特征,推动建模范式从“方程驱动”转向“数据驱动”,实现研究效能跃升。

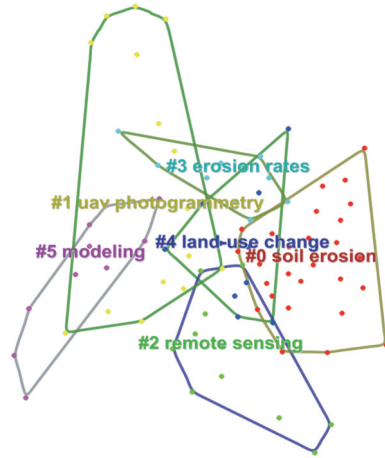


图 10 1993—2023 年水土流失监测技术领域英文关键词 CiteSpace 聚类图谱

Fig.10 Keyword clustering graph of English publications in field of soil and water loss monitoring technology during 1993—2023

表 3 1993—2023 年水土流失监测技术领域英文关键词聚类

Table 3 Keyword clustering of English publications in field of soil and water loss monitoring technology during 1993—2023

聚类	S 值	年份	主要关键词
0	0.917	2006	soil erosion; gully erosion; sediment yields; spatiotemporal change; risk assessment
1	0.908	2014	UAV photogrammetry; DEM; resolution; gully development; classification
2	0.984	2011	remote sensing; sentinel; spatial distribution; topographic attribute; landscape pattern
3	0.882	2010	erosion rate; sensitivity analysis; multi-factor; erosion maps; uncertainty
4	0.969	2018	land use change; loess plateau; wetland; farmland; black soil region
5	0.989	2015	modeling; deep learning; machine learning models; CSLE; USLE

2.4.2 中文关键词聚类

(1) 聚类 0。以模型为核心,主要关键词有地理信息系统、空间尺度、精确度、usle 模型。地理信息系统为 USLE 模型提供了操作和可视化平台,通过集成数字高程模型、土壤矢量数据等,能实现水土流失的图形化表达。但模型精度受空间尺度效应的制约。

(2) 聚类 1。聚焦遥感技术,关键词包括卫星影像、提取、卫星遥感、航空遥感。该技术按平台分为卫星与航空 2 类,卫星遥感通过周期性多光谱影像实现大范围宏观监测;航空遥感凭借高分辨率精准提取细节。二者融合有助于构建星—空协同监测网络,提升水土流失的全域动态感知能力。

(3) 聚类 2。以激光扫描为核心,关键词包括侵蚀量、微地貌、DEM、Las 点云。该技术(包括机载和移动式)通过高密度 Las 点云构建厘米级 DEM,还原侵蚀沟壑与坡面微地貌形态;基于多期点云差分

析,直接量化地表侵蚀量三维动态,突破传统监测精度局限,显著提升侵蚀估算准确性,为小微尺度侵蚀机理研究提供高精度技术支撑。

(4) 聚类 3。以坡度为核心,主要关键词有小流域、坡耕地、径流、集水区。坡度作为关键的地形因子,直接调控坡耕地径流动能与水土流失强度,小流域内坡耕地与坡度的空间配置决定了径流路径与泥沙输移格局,坡缓坡长的特征增加了坡耕地的集水区面积,增加了水土流失发生的风险,因此,针对不同的空间配置,合理调整整作方向是减少水土流失的可行之计。

(5) 聚类 4。聚焦水土保持,关键词涵盖监测、应用、土壤侵蚀、侵蚀强度。水土保持的科学部署需依托多源遥感与地面观测网络,系统获取侵蚀强度空间特征并识别热点区域。监测成果能指导水土保持措施应用,并通过“监测—评估—应用”闭环机制提升工程的有效性,为综合治理提供动态决策支持。

(6) 聚类5。聚焦土地利用,关键词包括黑土、侵蚀产沙、有机碳、生态问题。东北黑土区半世纪耕地扩张显著改变地表覆被,加剧侵蚀产沙,导致表层有机碳随径流迁移,其生态影响双重表现为耕地系统内有机质流失,降低黑土地力;流域系统中迁移有机碳与氮磷污染物致使河道富营养化,威胁水生生态。亟需推行保护性耕作等水保措施,统筹黑土区粮食与生态安全。

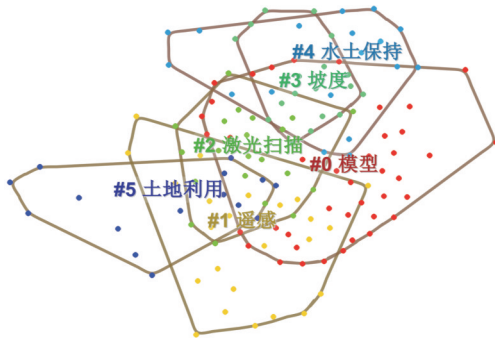


图11 1993—2023年水土流失监测技术领域中文关键词 CiteSpace 聚类图谱

Fig.11 Keyword clustering graph of Chinese publications in field of soil and water loss monitoring technology during 1993—2023

表4 1993—2023年水土流失监测技术领域中文关键词聚类
Table 4 Keyword clustering of Chinese publications in field of soil and water loss monitoring technology during 1993—2023

聚类	S值	年份	主要关键词
0	0.896	2010	模型;地理信息系统;空间尺度;精确度;USLE模型
1	0.811	2015	遥感;卫星影像;提取;卫星遥感;航空遥感
2	0.878	2010	激光扫描;侵蚀量;微地貌;DEM;Las点云
3	0.867	2010	坡度;小流域;坡耕地;径流;集水区
4	0.882	2013	水土保持;监测;应用;土壤侵蚀;侵蚀强度
5	0.911	2012	土地利用;黑土;侵蚀产沙;有机碳;生态问题

2.5 水土流失监测技术变化情况

水土流失监测技术大致可分为两大类,即传统测量和现代测量。前者主要有直尺测量法、测针法、全站仪法,后者包括激光剖面仪、遥感、摄影测量法、激光雷达法、GPS法和照片重建法等。按照搭载平台的不同,又可以细分为卫星遥感、航空遥感、无人机摄影测量、数字摄影测量、SFM摄影测量、手持GPS和差分GPS。

2.5.1 水土流失监测技术发展阶段

水土流失监测技术的发展历程具有鲜明的阶段性特征,可系统性地划分为3个相互关联又各具特色的阶段。①传统实地测量阶段。这是技术发展的奠基时期,起步最早。监测方法以人工实地操作为核心,技术种类相对单一且依赖简易工具(如测针法、

直尺测量、全站仪等)。②现代空天-近地技术融合阶段。始于20世纪后期,在21世纪初迎来爆发式增长,标志着技术范式的重大革新,代表性技术有遥感、摄影测量、激光扫描等。③模型驱动与智能感知阶段。其重心正从“如何更好地获取数据”转向“如何更智能地理解、分析和预测侵蚀过程。未来,CSLE, RUSLE, USLE, WEPP等物理模型将持续改进,人工智能(AI)加快融入监测流程的各个环节,或能实现信息的智能化提取,数据驱动的智能建模与预测,带来智能化、自动化、高效化监测。目前,水土流失监测正处于第二阶段,并加速迈向第三阶段。

2.5.2 应用情况与重要成果

传统测量极度依赖于手工测量,自动化水平有限,费时费力,监测的总体精度较低,监测范围极为有限,适合侵蚀沟、单一坡面、径流小区观测场等小面积的监测。测针法的测针易受干扰,导致精度降低,全站仪对操作人员的要求较高,常需要进行专业培训,但其成本低、携带性良好的优点也是不容忽视的。现代测量的精度得到极大提升,它们在一定程度上弥补了传统测量费时费力,诸多局限性的缺点,但在克服不良天气、崎岖地形上仍有不足。遥感具有监测范围大的优点,通过遥感解译,全国水利普查和东北黑土区侵蚀沟调查工作得以完成,分别解译出29万余条和66.67万条侵蚀沟。近年来,无人机监测发展势头强劲,其成本相对较低、速度快、监测范围广泛,还可以与激光雷达相结合,实现单架次飞行获取多元数据,如在暴雨调查、水土流失短期监测上极具优势。因此,采用多种监测技术相结合的策略,能弥补单一技术的不足,建立空-天-地一体化的监测体系,实现更精确的测量。

3 结论

(1) 1993—2023年水土流失监测技术领域发文量总体呈现增长趋势,2010年后迅猛增长。

(2) 中国、美国、德国等是主要的研究国家,合作密切,发文量和国际影响力较高。中国科学院的研究规模最大,合作联系最为丰富,合作网络最为稠密。水土流失监测技术领域先后涌现出刘宝元、Poesen Jean等一批优秀的科研领军人物。

(3) 关键词聚类与关键词共现表明,水土流失监测技术由过去的传统测量转变为现代测量,遥感与无人机成为最常用的监测手段,多技术融合成为改善单一技术在水土流失监测中不足的有效途径。

(4) 在未来的研究中,水土流失监测研究需注重新技术、新方法的探究。深入分析各区域独特的地

形、地质、水文、人类活动等特征,将区域异质性特征深度融合在技术的开发与使用中,让新兴技术更好地赋能水土流失监测、预防和治理全过程。

参考文献(References)

- [1] 李芦頔,吴冰,李鑫璐,等.土壤侵蚀中的片蚀研究综述[J].地球科学进展,2021,36(7):712-726.
Li Ludi, Wu Bing, Li Xinlu, et al. Sheet erosion study in soil erosion: A review [J]. *Advances in Earth Science*, 2021,36(7):712-726.
- [2] 史文海,娄黔方,谢鑫杰,等.中国水力侵蚀监测方法研究进展[J].土壤,2024,56(5):921-927.
Shi Wenhai, Lou Qianfang, Xie Xinjie, et al. Research progresses and prospects of water erosion monitoring methods in China [J]. *Soils*, 2024,56(5):921-927.
- [3] 吴娟,王智允,胡秀娟,等.水土流失遥感研究近30 a文献计量分析与展望[J].安全与环境工程,2025,32(2):333-346.
Wu Juan, Wang Zhiyun, Hu Xiujian, et al. Bibliometric analysis and prospect of remote sensing research on soil erosion in the past 30 a [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2025,32(2):333-346.
- [4] 罗丽,段胜丹,郭文召,等.1991—2020年全球沟蚀研究进展[J].水土保持通报,2023,43(3):265-276.
Luo Li, Duan Shengdan, Guo Wenzhao, et al. Global research progress regarding gully erosion from 1991 to 2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(3):265-276.
- [5] 何涛,史扬子,杨扬,等.切沟侵蚀测量方法研究进展[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(2):151-158.
He Tao, Shi Yangzi, Yang Yang, et al. Research progress on gully erosion measurement methods [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021,19(2):151-158.
- [6] 肖智财,郭明明,万兆凯,等.1993—2022年沟蚀监测技术与方法研究进展:基于CiteSpace计量分析[J].水土保持通报,2024,44(4):265-276.
Xiao Zhicai, Guo Mingming, Wan Zhaokai, et al. Research progress on gully erosion monitoring techniques and methods from 1993 to 2022: A bibliometric analysis based on CiteSpace [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024,44(4):265-276.
- [7] 史明昌,赵永军.新时代水土保持监测技术体系[J].中国水土保持科学(中英文),2023,21(5):146-154.
Shi Mingchang, Zhao Yongjun. Monitoring technology system of soil and water conservation in the new era [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023,21(5):146-154.
- [8] Peter K D, d'Oleire-Oltmanns S, Ries J B, et al. Soil erosion in gully catchments affected by land-levelling measures in the Souss Basin, Morocco, analysed by rainfall simulation and UAV remote sensing data [J]. *Catena*, 2014,113:24-40.
- [9] Lannoeye W, Stal C, Guyassa E, et al. The use of SfM-photogrammetry to quantify and understand gully degradation at the temporal scale of rainfall events: An example from the Ethiopian drylands [J]. *Physical Geography*, 2016,37(6):430-451.
- [10] 吴立新,许志华,范松滔,等.植被稀疏地区沟蚀变化的地面激光扫描监测与沟蚀量估算[J].武汉大学学报(信息科学版),2017,42(10):1343-1349.
Wu Lixin, Xu Zhihua, Fan Songtao, et al. Gully erosion TLS monitoring and estimation in area of sparse vegetation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017,42(10):1343-1349.
- [11] 孙玉柱,郑粉莉,张姣.基于LIDAR和GIS技术的坡面侵蚀沟空间发育分析[J].水土保持研究,2014,21(3):20-24.
Sun Yuzhu, Zheng Fenli, Zhang Jiao. Analysis of gully erosion development based on LIDAR and GIS [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014,21(3):20-24.
- [12] 王洪雨,于寒青.基于文献计量分析的土壤侵蚀与土壤有机碳动态研究进展与展望[J].土壤通报,2023,54(6):1470-1483.
Wang Hongyu, Yu Hanqing. Research prospect and progress of soil erosion and soil organic carbon dynamics based on bibliometric analysis [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023,54(6):1470-1483.
- [13] 万兆凯,宋庆臣,万普强,等.东北黑土区沟蚀研究进展与热点:基于CiteSpace计量分析[J].水土保持研究,2024,31(2):454-463.
Wan Zhaokai, Song Qingchen, Wan Puqiang, et al. Research progress and hotspots of gully erosion in the black soil region of northeast: Bibliometric analysis based on CiteSpace [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(2):454-463.
- [14] 史方颖,张风宝,杨明义.基于文献计量分析的土壤有机碳矿化研究进展与热点[J].土壤学报,2022,59(2):381-392.
Shi Fangying, Zhang Fengbao, Yang Mingyi. Research hotspots and progress of soil organic carbon mineralization based on bibliometrics method [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022,59(2):381-392.
- [15] Frankl A, Poesen J, Scholiers N, et al. Factors controlling the morphology and volume (V) - length (L) relations of permanent gullies in the northern Ethiopian Highlands [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013,38(14):1672-1684.
- [16] Qi Lulu, Shi Pu, Dvorakova K, et al. Detection of soil erosion hotspots in the croplands of a typical black soil region in Northeast China: Insights from sentinel-2 multispectral remote sensing [J]. *Remote Sensing*, 2023,15(5):1402.