

1993—2022年沟蚀监测技术与方法研究进展 ——基于CiteSpace计量分析

肖智财^{1,2}, 郭明明², 万兆凯³, 陈强¹

(1.哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江哈尔滨150025; 2.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨150081; 3.吉林农业大学资源与环境学院, 吉林长春130118)

摘要: [目的] 分析1993—2022年全球沟蚀研究技术与方法领域的研究现状、进展和前沿热点的变化趋势, 梳理研究技术与方法的发展态势, 为促进沟蚀研究方法和技术的发展与突破提供参考。[方法] 以Web of Science核心合集中的376篇英文文献为对象, 采用文献计量方法, 运用CiteSpace软件进行知识图谱分析。[结果] ①1993—2022年沟蚀研究技术与方法的研究呈上升趋势, 2013年后快速发展, 2020年文献量达到最高(47篇)。②研究主力国家中, 中国(20.25%)、美国(10.44%)发文量最大, 英国(70.85次)、比利时(72.89次)均被引频次最高; 该领域影响力前10的研究机构中, 中国机构有4家机构(中国科学院、北京师范大学、西北农林科技大学、西华师范大学)。发文影响力最高的作者是Poesen Jean, 仅有1名中国学者发文量位居前10。③关键词共现表明目前沟蚀研究技术与方法主要应用于侵蚀沟的时空分布及变化、影响因素、作用机制等方面。沟蚀研究技术与方法趋于多样化, 2D平面测量正被3D立体测量所取代, 多技术的融合使用成为该领域发展的新趋势。[结论] 沟蚀监测技术与方法发展前景光明, 应重视多种技术的结合使用, 提高测量精度, 促进学科发展。

关键词: 沟蚀; 技术与方法; 研究进展; CiteSpace

文献标识码: C

文章编号: 1000-288X(2024)04-0265-12

中图分类号: S157.2

文献参数: 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[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 265-276. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.028; Xiao Zhicai, Guo Mingming, Wan Zhaokai, et al. Research progress on gully erosion monitoring techniques and methods from 1993 to 2022 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 265-276.

Research Progress on Gully Erosion Monitoring Techniques and Methods from 1993 to 2022 —A Bibliometric Analysis Based on CiteSpace

Xiao Zhicai^{1,2}, Guo Mingming², Wan Zhaokai³, Chen Qiang¹

(1. College of Geographical Science, Harbin Normal University,

Harbin, Heilongjiang 150025, China; 2. Northeast Institute of Geography and
Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin, Heilongjiang 150081, China;

3. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118, China)

Abstract: [Objective] In order to provide references for promoting the development of breakthrough research methods and techniques for monitoring of gully erosion, the status quo, progress, and trends of the research technologies and methods for monitoring of gully erosion in the world from 1993 to 2022 were analysed and the development trend of the research technologies and methods were summarised. [Methods] A total of 376 English language research articles from the Web of Science were selected via a bibliometric approach using the CiteSpace software for knowledge map analysis. [Results] ① Research on gully erosion shows an upward

收稿日期: 2024-01-31

修回日期: 2024-06-01

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“典型黑土区侵蚀沟沟岸裂隙形成、发育过程及其失稳机制”(42107356)、“东北冷凉区黑土农田条耕土壤水热效应研究”(42101281); 中国科学院东北地理与农业生态研究所青年科学家小组项目“典型黑土区多外营力驱动的坡沟系统土壤侵蚀机制与阻控对策研究”(22023QNXZ03)

第一作者: 肖智财(2001—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 硕士研究生, 主要研究方向为沟蚀动态监测。Email: xiaozhicai@stu.hrbnu.edu.cn.

通信作者: 陈强(1987—), 男(汉族), 黑龙江省伊春市人, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。Email: chenqiang2016@hrbnu.edu.cn.

trend during 1993—2022, with a rapid development after 2013, especially in 2020 (47 articles). ② China (20.25%) and the United States (10.44%) had the highest publication outputs among the main research countries. In terms of the citation frequency, the United Kingdom (70.85 times) and Belgium (72.89 times) had the highest citation frequencies. Among the top 10 influential research institutions in this field, there were four institutions from China (Chinese Academy of Sciences, Beijing Normal University, Northwest University of Agriculture and Forestry, and China West Normal University). The most influential author is Poesen Jean, with only one Chinese scholar in the top 10 in terms of publications. ③ Co-occurrence of keywords indicated that current research on gully erosion mainly focus on the spatiotemporal distribution and changes, influencing factors, and mechanisms of gully erosion. The diversity of techniques and methods had been gradually increasing, with 2D plane measurements being replaced by 3D volumetric measurements, and the integration of multi-technology had become a new trend in the field of gully erosion. [Conclusion] The development of techniques and methods for the study of gully erosion has a bright future, emphasizing the combined use of a variety of techniques to improve the accuracy of the measurements, which is conducive to the development of the discipline.

Keywords: gully erosion; techniques and methods; research progress; CiteSpace

沟道侵蚀是土地退化最严重的表现形式^[1],也是水土流失的重要途径,在细沟、浅沟、切沟、冲沟 4 个发育阶段呈现出不同的形态特征和侵蚀速率^[2]。由于高强度人类活动和极端降雨的影响^[3],沟道侵蚀已在全球范围内成为一种重要的侵蚀方式,在某些地区的坡地和山地甚至成为主导类型,改变了原有泥沙输移模式^[4],充当着微观地形、地貌的重塑器。在黑龙江省海伦市,沟壑发育,沟蚀强烈,沟壑密度为 1.16 km/km²^[5];在中国西南的金沙江干热河谷,冲沟相当活跃,29 条冲沟侵蚀量在 8.83~2 375.95 m³/a^[6]。在澳大利亚昆士兰北部,冲沟贡献了流域内 70% 以上的沉积物来源^[7],在西班牙地中海沿岸地区,流域内 50% 的产沙量来源于一条谷底沟^[8]。沟蚀损毁道路,破坏梯田,造成农作物减产^[9-11],阻碍了农业的高质量发展和生产建设的顺利推进,其负面影响不容忽视。同时侵蚀沟动态活跃,其形态演化的时空异质性显著^[12],因此,高效、简易的沟蚀研究技术与方法对研究侵蚀沟的形成、发展、演化、修复等至关重要^[13]。

现阶段,全球的沟蚀研究更多倾向于沟蚀的驱动因子、沟道动态监测、侵蚀沟建模及径流泥沙输送和污染物运移等方面^[13-15]。沟道侵蚀是在地形、气候、时间、土壤、人类活动的综合作用下形成的^[16-17],是沟蚀影响因子的函数。尤其是近现代以来,矿山开采、高强度农作活动、无序放牧^[18-19]以及极端气候事件的偶发加剧了沟蚀的速率。近 10 a 来,研究者们^[20]对沟道的形态特征、演化机理、反馈作用等方面进行了系统探究,这为研究沟道侵蚀奠定了坚实基础。伴随着时间的推进,沟蚀研究技术与方法多样化,有学者将沟蚀研究技术与方法分为传统和新兴技术与方

法^[21],或接触与非接触测量两大类^[22],近年来也有学者按照监测技术和方法的维度分为 2D 平面和 3D 立体测量两类^[23]。但研究逐步深入,早期的研究技术与方法已不能适应沟蚀研究的高精度、定量化需要,新的技术应运而生并在实践中大量使用,如无人机摄影测量技术(UAV photogrammetry)较早于 2011 年运用在沟蚀监测^[24];2014 年 SFM 摄影测量技术(Structure from motion photogrammetry)被首次使用^[25]。此前,学者们^[26-28]基于已有技术与方法,结合地形因子(坡度、坡向、比降等),运用通用土壤流失方程建立沟道侵蚀的估算模型,力求探究沟蚀发生发展的影响因子,揭示其发展规律。目前,沟蚀研究的技术与方法领域还缺少系统的文献计量分析,因此,归纳沟蚀研究技术与方法的研究历程,梳理该领域的研究现状、热点和动态对于未来沟蚀研究技术和方法的优化、创新及监测技术的研发具有重要指导意义。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文以沟蚀研究方法与技术(Gully erosion research techniques and methods)为主题,由于近年来,沟蚀领域的学术发展态势迅猛,文献的学术性和权威性是首要的,故数据源来自 Web of Science 核心合集数据库。检索文献时间自 1993 年 1 月起至 2022 年 12 月。其次为确保文献的准确性、全面性和代表性,经综合考量,检索式以“(TS=(what) AND TS=(what) NOT TS=what)”为主题(表 1)。经过筛选处理,对会议类论文,重复文献和无作者(关键词)文献予以剔除,最终得到英文文献 376 篇。

表 1 Web of Science 核心合集数据检索策略
Table 1 Web of science core collection data retrieval strategy

序号	检索策略
1	TS=(gully erosion) AND (volume measurement) NOT Mars)
2	TS=(gully erosion) AND (erosion pin) NOT Mars)
3	TS=(gully erosion) AND (total station) NOT Mars)
4	TS=(gully erosion) AND (ruler OR rulers OR tapes) NOT Mars)
5	TS=(gully erosion) AND (profiler OR profilemeter) NOT Mars)
6	TS=(gully erosion) AND (aerial photo) NOT Mars)
7	TS=(gully erosion) AND (satellite image OR Landsat) NOT Mars)
8	TS=(gully erosion) AND (3D photo-reconstruction OR PR) NOT Mars)
9	TS=(gully erosion) AND (airborne LiDAR) NOT Mars)
10	TS=(gully erosion) AND (terrestrial LiDAR) NOT Mars)
11	TS=(gully erosion) AND (digital photogrammetry) NOT Mars)
12	TS=(gully erosion) AND (UAV photogrammetry OR unmanned aerial) NOT Mars)
13	TS=(gully erosion) AND (SFM photogrammetry) NOT Mars)
14	TS=(gully erosion) AND (DGPS OR RTK-GPS OR differential GPS OR differential global system OR real-time kinematic) NOT Mars)
15	TS=(gully erosion) AND (GPS) NOT ('DGPS' OR 'RTK-GPS' OR 'differential GPS' OR 'differential global system' OR 'real-time kinematic' OR 'Mars')

1.2 研究方法

本文采用文献计量方法进行相关分析,将所搜索的文献数据从 Web of Science 中以 txt 格式导出,并在 CiteSpcae 软件(6.1.R6)中进行可视化分析。CiteSpcae 可用于文献的合作网络分析、共现分析、引证检索及耦合分析,本文从国家、机构、作者 3 个层面的合作网络进行分析,同时对关键词聚类 and 突显强度加以分析。知识图谱是采用数学的方法对科学文献的知识单元进行可视化,显示学科发展进程与结构关系的一种分析方法和工具^[29]。本文将国家、作者、机构合作网络知识图谱和关键词共现网络及聚类的时间切片均设置为 1 a,其他均为默认设置。

1.3 主要指标

(1) 被引次数。论文被其他论文所引用的次数,论文被引频次越高,表明具有较高的参考价值和受关注度。同一年同一个 ESI 学科中发表的所有论文按被引用次数由高到低进行排序,排在前 1% 的论文被视为高被引论文。

(2) 共被引频次。共被引指一种通过文献的外部感知来探究文献关联的方法。共被引是指两个作者的文献同时被第 3 个作者的文献引用,则称这两个作者存在被共引,其被引次数越高,表明该论文在研究领域的受关注度越高,表明该论文具有较高学术话语权与参考价值^[30],也间接体现了作者的学术影响力和权威性。

(3) H 指数^[31]。一种混合量化指标,量纲化的阈值,是在填补引用数和影响因子缺陷下产生的一个量化指标。即一个人在其所有学术文章中有 N 篇论文分别被引用了至少 N 次,他的 H 指数就是 N 。 H 指数越

大,该作者在研究领域中的影响力和受关注度越高。

(4) 节点中介中心性是表征节点在关系网络中重要性的指标^[32],是指示和评价节点重要程度的参数,其计算公式为:

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

式中: 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^[33]。

2 结果与分析

2.1 年度发文量与时间序列分析

1993—2022 年,沟蚀研究技术与方法领域共计发文 369 篇,发文量总体呈现增长趋势(图 1)。1993—2002 年,沟蚀研究技术与方法有关的论文发文数量增长极为缓慢,总体数量小,年均发文量仅为 1.3 篇,总计 13 篇,表明仍处于研究起步阶段,尚未受到全球关注。2003—2012 年,沟蚀研究技术与方法领域论文发文规模迅速扩张,总计 75 篇,年均 7.5 篇,较前一阶段增长近 6 倍,表明进入新世纪以来沟蚀相关研究得到重视,正步入提速发展阶段。2013—2022 年,相关论文发文数量呈现“爆炸式”增长,年均发文量已达 28.8 篇,总计 288 篇,较前两阶段增长了 3~22 倍。急剧增加的发文章表明沟蚀研究技术与方法领域逐步转向成熟阶段。这 3 个阶段发文量比例分别为 3.45%, 19.94% 和 76.59%,2013—2022 年所占比例最大,表明近 10 a 国际上对该研究领域愈加关注,推动了沟蚀监测技术与方法的快速发展。基于近 30 a 论文发文的总体趋势,未来沟蚀监测技术与方法领域的发文数

量仍将保持增长态势,将会呈现出更大规模的发文量。

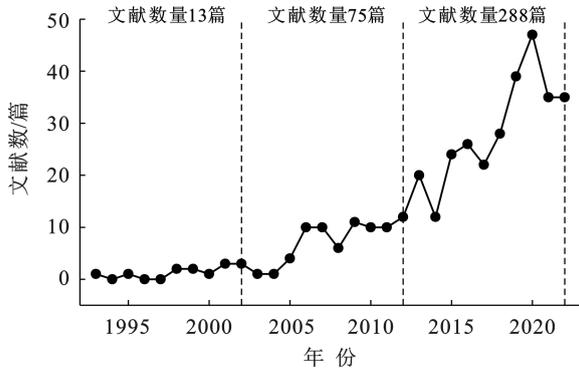


图 1 1993—2022 年在沟蚀领域研究论文发文数量及年度变化趋势

Fig.1 Number of papers issued and yearly trends in field of gully erosion from 1993 to 2022

2.2 合作图谱分析

2.2.1 国家发文量分析 图 2 给出了沟蚀领域主要研究国家(发文量前 10 的国家)在不同年限发文量的变化趋势。这 10 个国家发表量(339 篇)比例超近 30 a 发文总数的 72%。就发文数量而言,中国、美国、德国、意大利、西班牙、澳大利亚、英国、比利时、巴西、伊朗。中、美两国发文数量占据优势地位。中国发文数量最大,为 95 篇,占发文总量的 20.25%,主要研究区域位于黄土高原(37 篇,所占比例为 38.9%)、东北黑土区(11 篇,比例为 11.5%)、西南干热河谷(10 篇,比例为 10.5%)。其次为美国的 49 篇,占发文总量的 10.44%,研究区域主要集中在爱荷华州、田纳西州、密苏里州,即中央大平原和密西西比河流域。德国研究重心位于非洲的埃塞俄比亚、摩洛哥和美洲的巴西、墨西哥。在 1993—2002 年阶段中国与美、德等国的论文发文数量相近;在 2003—2012 年,发文数量少于美国;在 2013 年后,中国在该领域取得较大突破,论文发文数量大幅增长并保持绝对领先优势。

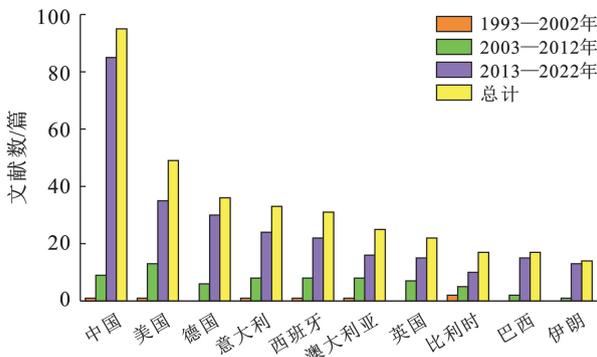


图 2 沟蚀领域主要研究国家不同年限发文量变化趋势
Fig.2 Trends in number of publications by year in major research countries in field of gully erosion

2.2.2 国家合作网络知识图谱特征 国家间在沟蚀研究方法与技术领域的合作是促进研究进展和学术创新的重要环节,国家合作网络知识图谱能直观体现某一段时间内各国对该研究领域的研究热度和国家间交流合作紧密程度。本文基于文献耦合关系对国家间合作强度进行分析,以最小发文量 5 作为选取条件,最终从 58 个国家中选取 25 个国家,即图 3 所示的 25 个节点,141 条连线和 7 个集群。

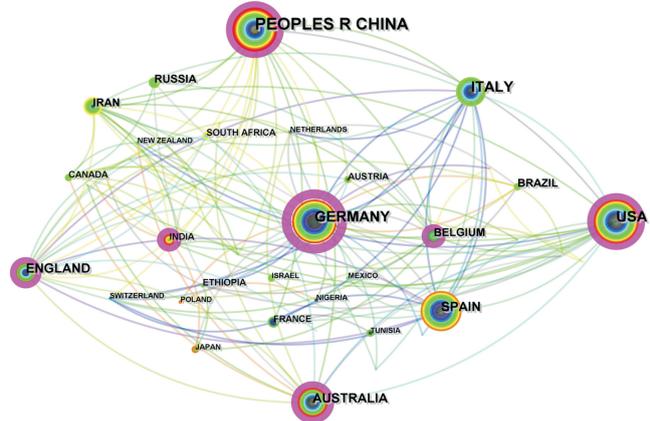


图 3 各国家在沟蚀领域研究合作联结强度知识图谱
Fig.3 Knowledge graph of strength of cooperation links across countries in field of gully erosion

图中节点大小与该国发文量正相关,节点间连线数量与合作强度正相关。发文量最大的是中国(95 篇),中介中心性为 0.17,较大的发文量和较高的中心性反映出中国在该领域具有一定的研究深度,与其他国家合作密集程度以及国际影响力。中介中心性最高的是德国(37 篇)0.41,表明其在该领域有很强的学术影响力,保持了与其他国家的紧密合作。此外美国(49 篇)、澳大利亚(27 篇)、英国(21 篇)、比利时(19 篇)中介中心性均 > 0.01 。与中国联系较为密切的国家是美国和澳大利亚;德国则与欧洲国家保持了紧密联系;和美国联系较多的国家有中国、伊朗、新西兰。表 2 给出了发文量前 10 国家的被引信息以及总联结强度,德国的论文总被引强度最高(2 438 次),其次为中国(1 935 次),美国(1 677 次)位居第 3 位。就联结强度而言,最高的是中国(183 825),其次为德国(91 871),第 3 位的是美国(82 173)。从篇均被引频次而言,比利时以 72.89 位居第一,高于英国(70.85 次/篇)和德国(67.10 次/篇)。中国虽有着较高的总被引次数和总联结强度,但论文篇均被引次数在这些国家中排名靠后。综上所述,在沟蚀研究技术与方法领域,比利时、英国、德国等国家的发文量虽明显小于中、美两国,但仍展现出较强的国际影响力,也反映出它们的研究层次更深,在研究网络中所受的关注度较

大。而中国虽然有着最大的发文量,但其影响力不如前者,对此,中国应拓展其研究的国际视野,加强研究技术与方法的创新,在下一阶段获得更强的学术影响力和话语权,打造国际沟蚀研究领域的中国核心极。

的合作关系。美国集群以美国地质勘探局(中介中心性 0.08)为核心,与美国农业部、爱荷华州立大学等进行合作研究。表 3 展示了发文量前 10 的机构依次是中国科学院、北京师范大学、鲁汶大学、巴勒莫大学、西北农林科技大学、科尔多瓦大学、埃斯特雷马杜拉大学、西华师范大学、兰卡斯特大学。发文量最高的是中国科学院,发表相关文献 26 篇,但总被引频次、篇均被引频次和 H 指数都较为靠后。而鲁汶大学、科尔多瓦大学、特里尔大学的发文量远小于中国科学院等机构,却有着很高的总被引频次、篇均被引频次,此外还有着相当数量的高被引论文。综上所述,各机构的合作呈现出显著的区域性,除欧洲集群外,研究机构的跨国、跨洲际合作并不频繁。中国研究机构的国际影响力还有待提高,需加强与其他研究集群的交流合作,拓展研究的范围和视野。此外,图谱分析还体现了政府部门参与研究的重要性,如中国水利部、美国农业部等,它们对研究提供了基金、政策等多方面的支持,使研究顺利推进。

表 2 在沟蚀领域国家合作关系联结总强度前 10 位

Table 2 Overall strength of country partnership linkages in field of gully erosion (Top 10)

序号	国家	发文量	被引频次	篇均被引频次	总联结强度
1	中国	95	1 935	20.36	183 825
2	美国	49	1 677	34.22	82 173
3	德国	37	2 483	67.10	91 871
4	意大利	34	1 139	33.50	38 726
5	西班牙	33	1 513	45.84	49 929
6	澳大利亚	27	565	20.92	15 255
7	英国	21	1 488	70.85	31 248
8	比利时	19	1 385	72.89	26 315
9	巴西	17	136	8.00	2 312
10	伊朗	16	645	40.31	10 320

2.2.3 机构合作网络知识图谱特征 从宏观层面来讲,研究机构的论文发文数量能反映出该机构的科研水平和实力,分析机构间合作网络知识图谱特征,梳理各研究机构的合作关系,对衡量和评估各研究机构发展历程和研究成效是有利的。本文以最小发文量 4 为阈值,最终从 547 个机构中选取 38 个代表机构,即图 4 所示的 38 个节点和 255 条连线。研究机构合作关系集群可分为中国、欧洲和美国 3 个核心。中国科学院(中介中心性 0.21)节点连接了最多的连线,主要与北京师范大学、西北农林科技大学等保持了紧密的合作关系,与该集群合作密切的外国机构主要位于澳大利亚和美国。欧洲集群以鲁汶大学(中介中心性 0.13)为中心,与巴勒莫大学、特里尔大学保持了较



图 4 在沟蚀领域机构合作关系知识图谱
Fig.4 Institutional partnerships knowledge graph in field of gully erosion

表 3 主要研究机构在沟蚀领域文献被引频次前 10 位

Table 3 Cited literature frequencies of major research institutions in field of gully erosion (Top 10)

序号	机构	篇数	总被引频次	篇均被引次数	高被引论文	H 指数
1	中国科学院	26	450	17.30	0	6
2	北京师范大学	20	682	34.10	2	12
3	鲁汶大学	14	942	67.28	4	12
4	巴勒莫大学	14	559	39.92	2	10
5	西北农林科技大学	13	234	18.00	0	6
6	科尔多瓦大学	9	744	82.66	3	8
7	埃斯特雷马杜拉大学	8	218	27.25	1	6
8	西华师范大学	8	63	7.87	0	3
9	兰卡斯特大学	8	684	85.50	2	7
10	特里尔大学	7	1026	146.57	3	6

2.2.4 作者合作网络知识图谱特征 作者合作网络知识图谱能够直观体现某一研究领域中的研究者的合作关系以及领域内的领军人物和权威学者,本文以最小发文量 3 为阈值,所得图谱(图 5)所示 48 个节点,172 条连线。表 4 列出了主要研究者的文献被引信息,发文量最多的是波森·简(Poesen Jean),共发文 9 篇,总被引次数 921 次,均被引频次 102.3 次/篇,其

余作者的发文次数、被引频次和 H 指数均体现了他们在领域内不俗的影响力。而中国作者与前者差距不仅体现在个人发文数量更体现在被引频次上,中国作者发文量最大的是西华师范大学的张斌(7 篇),均被引频次 9 次/篇。这表明中国还缺少具有国际核心影响力的研究者,在该领域还有很大的发展前景,因此,中国学者需加强国内外合作。

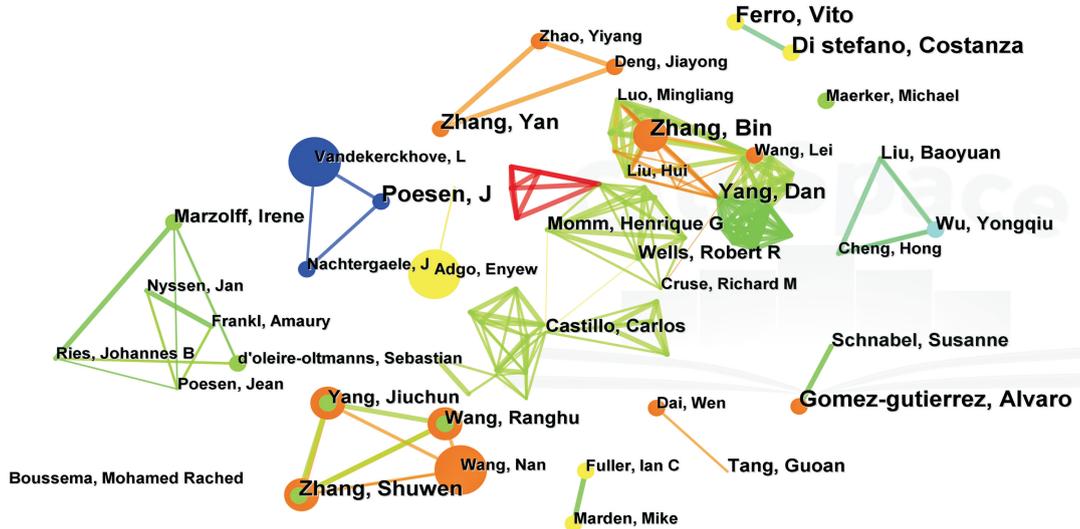


图 5 作者合作联结强度知识图谱

Fig.5 Author collaborative link strength knowledge graph

表 4 主要研究者文献被引次数前 10 位

Table 4 Number of citations to the principal investigator's literature (Top 10)

序号	作者	篇数	总被引频次	篇均被引次数	总被引次数	H 指数
1	Poesen Jean	9	921	102.3	177	9
2	Marzloff Irene	6	719	119.8	73	6
3	Castillo Carlos	7	631	90.1	85	7
4	Eltner Anette	4	525	131.2	45	4
5	Kaiser Andreas	3	463	154.3	39	3
6	Casali Javier	5	381	76.2	42	5
7	Di Stefano Costanza	10	332	33.2	35	9
8	Vandekerckhove L	3	304	101.3	82	3
9	Nachtergaele J	3	299	99.6	57	3
10	Frankl A	3	203	67.6	69	3

2.3 研究热点与研究前沿分析

2.3.1 关键词共现分析 关键词是文献核心主题的凝练表述,是文献内容的直观体现,出现频次高的关键词反映了该研究领域的发展趋势和前沿。对文献关键词的分析,有助于我们把握该领域的研究热点和发展动态。

设置关键词最小共现频次为 15,从 497 个关键词中筛选出 24 个最具代表性的关键词。所得关键词共现网络包含了 335 个节点和 1 202 个连接(图 6)。节

点越大表明关键词频率越高,节点间连线密集程度与不同关键词亲缘关系成正比。其中“gully erosion”“soil erosion”作为网络的中心且存在较高的亲缘性,表明沟蚀已成为土壤侵蚀的重要方式^[34]。“photogrammetry”“digital elevation model”“structure form motion”“unmanned aerial vehicle”向两个中心关键词靠拢,彼此间保持着较为密集的连线,说明新兴技术逐步被运用到沟蚀领域且交叉融合使用的趋势愈加明显。

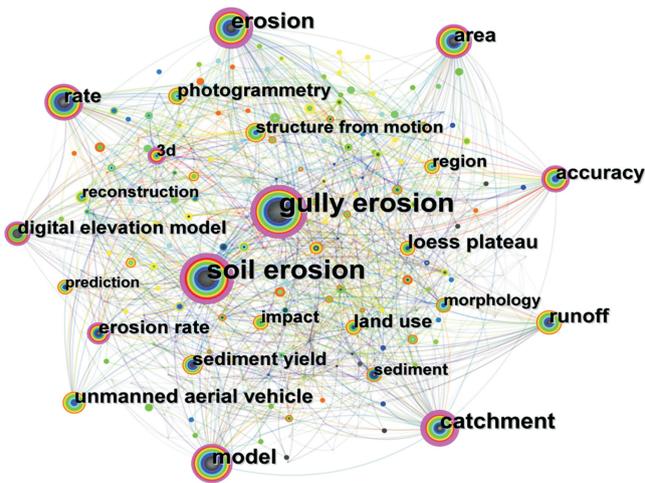


图 6 关键词共现频次知识图谱

Fig.6 Keywords co-occurrence frequency knowledge graph

2.3.2 研究热点 运用 CiteSpace 生成的关键词聚类图谱,可以呈现出该研究领域的研究热点和研究前沿,关键词聚类知识图谱(图 7,表 5)中#为代表性聚类词,#旁数字代表了该聚类的研究热度,其数字越小,该聚类包含关键词范围越大,说明该聚类的研究热度高。Modularity Q(聚类模块值)与 Weoghtde Mean Silhouette S(加权平均轮廓值)的值代表了聚类结构的显著性,一般认为 Modularity $Q > 0.3$, Weoghtde Mean Silhouette $S \geq 0.7$ 则可认为聚类结构性显著^[35]。图中 $Q = 0.6239, S = 0.9151$,均满足标准,说明聚类存在合理性和可信度。

①聚类 0。以 ephemeral gully 为中心,主要关键词有 soil erosion, bank gully retreat, shaped gullies 等。学者们^[36]的研究发现,土壤侵蚀伴随着浅沟发展的全过程,这体现在沟岸崩塌、沟头后退,沟底下切等方面,当沟岸在各种侵蚀力的作用下,沟岸裂隙扩张,土体失稳,在重力作用下崩塌后退,重新塑造沟道形态,浅沟进一步发展为切沟。

②聚类 1。以 loess plateau 为中心,主要关键词有 field investigation, topography, rill development 等。黄土高原除大中型沟壑发育外,细沟的发育也不容忽视,然而黄土高原“千沟万壑,支离破碎”的地形特征限制了摄影测量、激光测量等方法的精度^[37],因此,实地调查是提高数据精度的有效方法^[38]。学者们经过长期实测调查,利用所采集的大量实测数据,提高了侵蚀沟建模的精确度,为采取合适的工程措施和生物措施提供了参考,这有助于打好水土流失预防治理的攻坚战。

③聚类 2。以 gully erosion 为中心,主要关键词有 wet tropics, northern Australia, South Africa 等。全球沟蚀研究技术与方法应用的一个热点地区是热带和亚热带区域,如澳大

利亚北部和南部非洲,这些地区呈现出降水丰沛的气候特点,高强度的降水击溅地表,改变了土体原有的稳定性,当雨强高于土壤下渗强度时,地表径流不断汇聚,裹挟着泥沙冲刷地表,进一步加剧了沟蚀。Daley J S 等人^[39]的研究表明在澳大利亚 Gbrwha 流域,降雨击溅和冲刷可造成冲沟内 $1.60 \times 10^4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的侵蚀量,在埃塞俄比亚高原,受雨季高强度降雨的影响,沟头上游土壤侵蚀率最高可达 $4.00 \times 10^4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ^[40]。这表明降雨对热带、亚热带地区沟道侵蚀有着很高的贡献率。

④聚类 3。以 object based image analysis 为中心,主要关键词有 satellite image, using Landsat, using aerial photography 等。航空遥感和卫星遥感具有强大的数据获取能力^[41-42],如美国的 Landsat 系列卫星,该系列卫星有着高时间分辨率、高空间精度的优点,学者们依托 ArcGIS 等处理软件,能够对影像数据进行存取、管理、分析和使用。基于影像数据能够快速、高效地获取大空间尺度的目标信息,如沟道的空间分布及时间变化,这提高了学者们的研究效率。

⑤聚类 4。以 morphology characteristics 为中心,主要关键词有 gully volume, gully feature extraction, dynamic process 等。学者们在沟蚀研究中关注沟道形态特征,如沟道的体积、长度、宽度、深度等形态参数,沟道形态特征的提取是评估沟道变化的重点,也是沟道动态变化的直观反映。因此,学者们能够客观地分析水土保持措施的效益,也为下一阶段沟蚀治理奠定基础。

⑥聚类 5。以 model 为中心,主要关键词有 erosion modelling, dimensional analysis, volume replacement 等。侵蚀模型是计算沟壑侵蚀率的有效途径,对各因子进行维度分析,在其基础上对因子赋值,是确保模型精确度的必要条件,体积替换是建立模型的常用方法,在实际运用中已取得较好的效果。

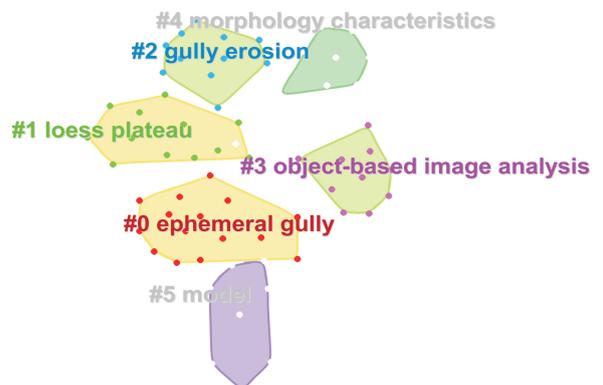


图 7 关键词聚类知识图谱

Fig.7 Keyword clustering knowledge graph

表 5 关键词聚类附属词组

Table 5 Keyword clustering affiliate phrases

聚类	加权平均轮廓值(S)	年份	关键词
0	0.975	2006	ephemeral gully; soil erosion; bank gully retreat; shaped gullies; soil loss
1	0.803	2002	loess plateau; field investigation; topography; rill development; loess-derived soil
2	0.941	2011	gully erosion; wet tropics; northern Australia; South Africa; Ethiopia
3	0.940	2013	object based image analysis; satellite image; using Landsat; using aerial photography; digital photogrammetry
4	0.896	2016	morphology characteristics; gully volume; gully feature extraction; dynamic process; shoulder line
5	0.993	2000	model; erosion modelling; dimensional analysis; volume replacement; empirical modelling; 3D model

2.3.3 研究前沿分析 研究前沿可视为该领域发展的风口,对前沿的把握,有助于明确学科未来研究方向与发展态势,推动理论创新与飞跃。就现阶段而言,沟蚀监测技术与方法领域的前沿表征于学者所发表文献的关键词,是研究主题这一本质的直观体现。关键词突现体现了研究主题受关注度随时间的变化情况。本文利用 CiteSpace 软件的 burst 功能,对突现强度前 15 的关键词进行提取(图 8)。突现强度较高的有 channel, digital elevation model, gully morphology, land use 等,表明这些是某个时间段内学者们重点关注的,在沟蚀研究方法与技术领域发挥重要的阶段性作用。其中,impact 作为近些年突现强度较高的关键词,说明总结沟蚀作用机制,促进水土流失防治和修复在近些年受到较多关注,可能是该领域研究前沿与热点。就时间尺度而言,生命周期较长的关键词有“ephemeral gully(17 a)”、“channel(15 a)”、说明这些在很长时间内都是学者们研究的焦点。根据上述基本分析,可将沟蚀研究技术与方法领域从

1993—2022 年划分为沟道分类体系建立、研究量化、发生和影响机理阐述 3 个阶段。① 沟道分类体系建立阶段。时间为 1999—2011 年,主要关键词是 ephemeral gully, channel, digital elevation model, classification 和 badland。这些关键词反映了这个阶段研究重点是借助数字地形模型,提高沟道识别、分类的效率,建立并完善浅沟—冲沟—冲沟的现代沟道分类体系。② 研究量化阶段。时间为 2012—2017 年,主要关键词是 digital photogrammetry, model, gully morphology 等。这些关键词反映了这个阶段的研究重点是利用摄影测量、照片重建等技术,获取沟道形态参数,确定沟道的规模,如中国于 2011 年左右进行的全国水利普查,解译出东北黑土区约 29.6 万条侵蚀沟及相关形态参数。③ 发生和影响机理阐述阶段。时间为 2018—2022 年,主要关键词有 impact, land use, topography 等。这些关键词反映了地形、土地利用、区域等对沟蚀的影响,同时对沟蚀对这些因子的反作用予以重点关注,力求探究沟蚀的发生和影响机理。

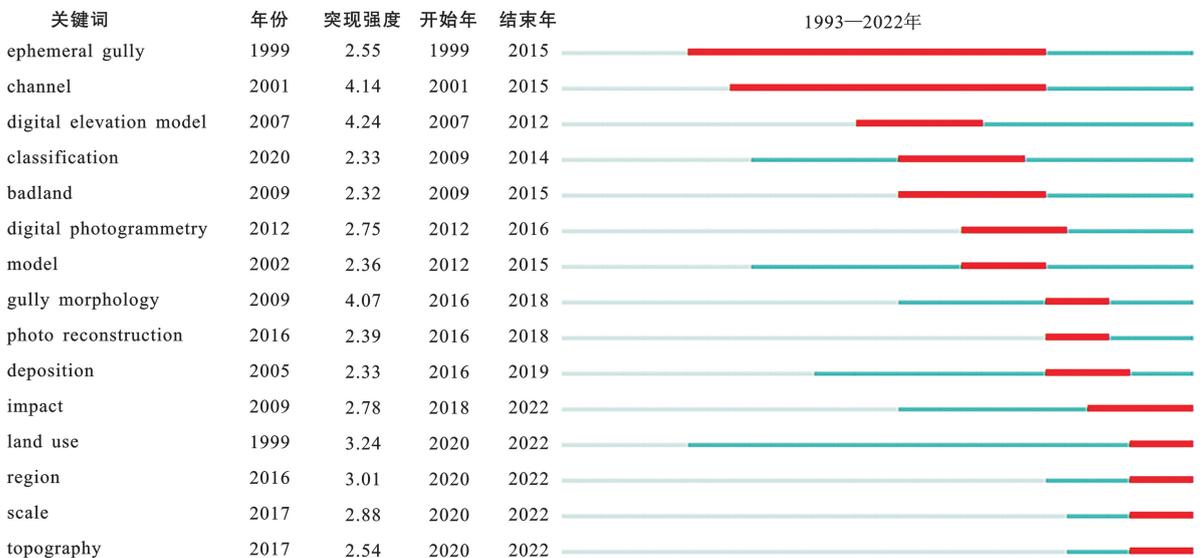


图 8 1999—2022 年有关沟蚀研究突现强度排名前 15 的关键词变化特征

Fig.8 Change characteristics of top 15 keywords related to gully erosion in strongest citation bursts from 1999 to 2022

2.4 沟蚀研究方法和技术变化情况

2.4.1 分类体系 沟蚀研究技术与方法的分类体系多样,不同学者提出了不同的分类体系,如传统和新兴技术与方法分类体系、接触和非接触技术与方法分类,本文采用 2D 平面测量和 3D 立体测量分类体系。2D 平面测量包括体积测量法、测针法、全站仪法、直尺测量法和激光剖面仪法 5 种,后者则包括遥感测量法、摄影测量法、激光扫描法、GPS 法、3D 照片重建法 5 大类 10 种。

2.4.2 沟蚀研究技术与方法时间变化趋势 表 6 展示了沟蚀技术与方法在 1993—2022 年的运用情况。2D 平面测量法呈现出运用时间较早且种类单一的特点,如测针法和体积测量法首次运用于 1999 年,直尺

测量法首次运用于 2003 年,这是受时代局限性导致的,即在早期研究中,科技水平较低。2D 平面测量法有关文献仅占总数的 19.8%。随着科技水平的提高,新的方法与技术不断涌现,如卫星平台和航空平台搭载的遥感测量方法最早在 1995 年运用在苏格兰高地的土壤侵蚀研究中,并在此后成为沟蚀研究技术与方法的主流之一。摄影测量法、GPS 法等则稍晚于遥感测量法,摄影测量法大致在 2010 年后才被运用于沟蚀研究,但普及速度相当快,重要性逐渐超过遥感测量法,成为运用最多的方法,相关文献占总数的 31.9%。综上所述,得益于科学技术的快速发展,3D 立体测量法替代 2D 平面测量法是沟蚀研究技术与方法领域的发展趋势之一。

表 6 不同沟蚀研究技术与方法在不同年限的运用

Table 6 Different gully erosion study techniques and methods at different stages

类名	属名	种名	文献数/篇			合计
			1993—2002 年	2003—2012 年	2013—2022 年	
2D 平面 测量	体积测量法	体积测量法	3	8	25	36
	测针法	测针法	2	12	15	29
	全站仪法	全站仪法	0	5	15	20
	断面测量法	直尺测量法	0	1	3	4
		激光剖面仪法	0	1	3	4
	3D 立体 测量	遥感测量法	航空遥感测量法	7	13	13
卫星遥感测量法			1	18	57	76
3D 照片重建法		3D 照片重建法	0	2	14	16
激光扫描仪法		机载激光扫描仪法	0	11	12	23
		地面激光扫描仪法	0	3	26	29
		数字摄影测量法	1	10	25	35
摄影测量法		无人机摄影测量法	0	4	67	71
		SFM 摄影测量法	0	0	44	44
GPS 法		差分 GPS 法	0	8	13	21
		手持 GPS 法	0	14	14	28

2.4.3 不同方法优缺点对比 随着时代的发展和研究的深入,沟蚀研究逐渐提高了数据精度的阈值。然而,传统的 2D 平面测量法已难以适应研究的需要,如直尺测量法使用尺子或测量带,通常费时费力,加之测量人员的行走,易对土表造成扰动;体积测量法需人工测量沟道的长度、宽度、深度等参数计算体积,再辅以土壤容重测算沟蚀量,工序繁琐,累计误差大;测针法需将测针固定在地表,放置密度是影响测量结果的关键因素,而测量者的行为常给试验带来不确定性,测针的安装与拆解也破坏了原有下垫面性质;全站仪法设备操作难度较大,对操作者的技术门槛要求高,需进行系统的培训和考核;激光剖面仪能获取沟道的整体变化态势,但空间走向感知能力较差。因

此,2D 平面测量法主要操作方式为手工测量,总体呈现出低精度、测量尺度小、时间和人力成本高的缺点,但其经济性好、设备要求较低、操作难度较低的优点是值得肯定的。3D 立体测量适应了研究不断深入的需要,其精度和监测范围获得极大提高,改善了 2D 平面测量法耗时耗力、不确定性大的缺点。利用卫星和航空平台获取研究区的多时相影像,具有监测自动化、采集范围大、长期监测的优点,满足了学者对快速获取数据的需求;地面激光扫描出现时间略晚于航空激光扫描,利用激光反射时长与角度等参数反推立体坐标,其数据格式易与 Dem 转换,扫描精度高,在高精度数据的采集和侵蚀沟建模方面具有良好效果^[22];摄影测量法将采集的多幅影像进行裁剪、拼

接,解译生成全景影像和 Dem,与其他技术相比,摄影测量技术具有过程与机理模拟、泥沙沉积量预测的新特点,尤其是无人机摄影测量技术(2011年)和运动结构恢复技术(2014年)虽出现时间较晚,但发展态势迅猛;GPS法可分为手持GPS和差分GPS,差分GPS克服了早期手持GPS精度有限的不足,通过RTK修正测量数据,已能实现亚厘米级的三维定位精度,其定位精度高,监测作业快;3D照片重建法不同于以往的2D和2.5D照片重建,其在沟道形态细节上的还原效果较好,突出了沟道的空间发展变化。综上所述,2D平面测量因其精度低、耗时耗力等特点逐步被3D立体测量取代,3D立体测量逐渐成为沟蚀研究的主流技术与方法。然而立体测量仍存在不足之处,如SfM摄影测量易受地表覆盖物的影响,无人机摄影测量易受天气状况的制约,GPS在地形陡峭的研究区测距难以确定,人员无法到达。因此多技术的交叉融合使用成为沟蚀研究技术与方法发展的新趋势,如Gillan J等^[43]将SfM与无人机摄影测量结合,获取了圣安德列斯旱地沟道的高精度数据,天地一体化即地面平台和空中平台的融合使用也是弥补单项技术不足,改善数据精度的有效手段。此外3D立体测量经济成本、设备的便携性以及操作难度等都是研究者前期准备阶段需要考虑的。

3 结论

(1) 1993—2022年“沟蚀研究技术与方法”领域发文量总体呈现增长趋势,2013年后迅速增长,发文量最多的是2020年(47篇)。

(2) 中国、美国、德国、比利时等是研究的主力国家,各国合作密切,发文量和总被引频次均较高。以中国科学院为核心的国内机构合作较外国机构合作更为密切。Poesen Jean是该领域享有极高学术影响力的学者。

(3) 关键词共现和聚类均表明,沟蚀监测技术与方法应用的重点在侵蚀沟的时空分布及变化、沟道形态、过程与机理、影响因子、沟蚀作用反馈机制等方面。

(4) 在方法与技术上,高精度的3D立体测量逐渐替代了繁琐的2D平面测量,摄影测量法和遥感测量法应用最多。多种技术融合使用有利于克服单项技术方法应用上不足。研究方法的多样化推动研究进展深入和突破,完善了对沟蚀的认识。在全球沟蚀区域分异明显背景下,科学合理、实用可靠的研究方法是推进研究进展的有效途径。

参考文献 (References)

- [1] 张兴义,刘晓冰.东北黑土区沟道侵蚀现状及其防治对策[J].农业工程学报,2021,37(3):320-326.
Zhang Xingyi, Liu Xiaobing. Current scenario of gully erosion and its control strategy in Mollisols areas of Northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(3):320-326.
- [2] 刘宝元,杨扬,陆绍娟.几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义[J].中国水土保持科学,2018,16(1):9-16.
Liu Baoyuan, Yang Yang, Lu Shaojuan. Discriminations on common soil erosion terms and their implications for soil and water conservation [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018,16(1):9-16.
- [3] 金钊,彭建兵,庄建琦,等.黄土塬沟道侵蚀扩张机理与固沟保塬工程的科学性[J].中国科学:地球科学,2023,53(4):806-822.
Jin Zhao, Peng Jianbing, Zhuang Jianqi, et al. Gully erosion and expansion mechanisms in loess tablelands and the scientific basis of gully consolidation and tableland protection [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2023,53(4):806-822.
- [4] He Yangbo, Gao Yuhao, Li Xinyue, et al. Influence of gully erosion on hydraulic properties of black soil-based farmland [J]. Catena, 2023,232:107372.
- [5] 丁超,张晟旻,胡伟,等.东北黑土区侵蚀沟普查结果实测验证[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(6):77-85.
Ding Chao, Zhang Shengmin, Hu Wei, et al. Field validation of gully survey of national census for soil conservation in the black soil region of Northeast China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021,19(6):77-85.
- [6] 张广贺,王克勤,宋娅丽,等.金沙江干热河谷冲沟形态发育特征及其侵蚀速率估算[J].农业工程学报,2023,39(23):103-112.
Zhang Guanghe, Wang Keqin, Song Yali, et al. Morphological characteristics and erosion rate estimation of gully in hot-dry valley of Jinsha River of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(23):103-112.
- [7] Shellberg J G, Brooks A P, Rose C W. Sediment production and yield from an alluvial gully in Northern Queensland, Australia [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013,38(15):1765-1778.
- [8] Alberto A, Álvaro G, Susanne S. Dynamics of erosion and deposition in a partially restored valley-bottom gully [J]. Land, 2021,10(1):62.
- [9] 陈卓鑫,王文龙,康宏亮,等.特大暴雨下不同土地利用类型坡面切沟发育特征[J].农业工程学报,2020,36(23):

- 77-84.
- Chen Zhuoxin, Wang Wenlong, Kang Hongliang, et al. Gully development characteristics of the slopes for different land-use types under extreme rainstorms [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(23):77-84.
- [10] 郭晋伟,何亮,裴志林,等.极端暴雨条件下黄土高原水平梯田损毁情况调查分析:以岔巴沟流域“7·26”特大暴雨为例[J].水土保持研究,2019,26(6):107-113.
- Guo Jinwei, He Liang, Pei Zhilin, et al. Investigation and analysis of damage of horizontal terraced fields under extreme rainstorm conditions in the Loess Plateau-Taking the 7·26 torrential rain in the chabagou watershed as an example [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(6):107-113.
- [11] 王念忠,沈波.东北黑土区侵蚀沟发展状况及其对粮食安全的影响[J].中国水土保持科学,2011,9(5):7-10.
- Wang Nianzhong, Shen Bo. Development of gully erosion in Northeast China and its effects on the national food security [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011,9(5):7-10.
- [12] Zhuang Jianqi, Peng Jianbing, Li Zhenhong, et al. The evolution of gully erosion in the Rift Valley of Kenya over the past 50 years [J]. Journal of African Earth Sciences, 2024,209:105099.
- [13] 刘青,范建容.沟蚀监测研究现状及发展展望[J].中国水土保持,2012(8):38-41.
- Liu Qing, Fan Jianrong. Research status of gully erosion monitoring and its development prospect [J]. Soil and Water Conservation in China, 2012(8):38-41.
- [14] 李建军,陈玉兰,焦菊英,等.基于多元非线性空间建模的拉萨河流域沟蚀发生风险探测[J].农业工程学报,2022,38(17):73-82.
- Li Jianjun, Chen Yulan, Jiao Juying, et al. Detecting gully occurrence risks using multivariate nonlinear spatial modeling in the Lhasa River Basin of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(17):73-82.
- [15] 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.
- [16] 何周窃,苏正安,王勇,等.干热河谷冲沟发育区土壤细沟可蚀性及主要影响因素[J].水土保持学报,2020,34(3):8-13.
- He Zhouyao, Su Zheng'an, Wang Yong, et al. Erodibility and main influencing factors of soil rill in gully development area of dry-hot valley [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(3):8-13.
- [17] 王文娟,邓荣鑫,张树文.东北典型黑土区讷谟尔河流域土地利用变化对沟蚀影响研究[J].自然资源学报,2016,31(5):833-844.
- Wang Wenjuan, Deng Rongxin, Zhang Shuwen. Effect of land use change on gully erosion in nemoer river basin of typical black soil region of Northeast China [J]. Journal of Natural Resources, 2016,31(5):833-844.
- [18] Cheng Hong, Wu Yongqiu, Zou Xueyong, et al. Study of ephemeral gully erosion in a small upland catchment on the Inner-Mongolian Plateau [J]. Soil and Tillage Research, 2006,90(1/2):184-193.
- [20] 张光辉,杨扬,刘瑛娜,等.东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J].水土保持学报,2022,36(2):1-12.
- Zhang Guanghui, Yang Yang, Liu Yingna, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of Northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):1-12.
- [21] 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.
- [22] 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,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.
- [23] Yao Yongxiang, Li Jia, Duan Ping, et al. Research on three-dimensional model reconstruction of slope erosion based on sequence images [J]. Optics & Laser Technology, 2019,110:209-218.
- [24] Marzolf I, Ries J B, Poesen J. Short-term versus medium-term monitoring for detecting gully-erosion variability in a Mediterranean environment [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2011,36(12):1604-1623.
- [25] Kaiser A, Neugirg F, Rock G, et al. Small-scale surface reconstruction and volume calculation of soil erosion in complex Moroccan gully morphology using structure from motion [J]. Remote Sensing, 2014,6(8):7050-7080.
- [26] 李镇,秦伟,齐志国,等.东北漫川漫岗和山地丘陵黑土区侵蚀沟形态特征遥感分析[J].农业工程学报,2019,35(14):133-140.
- Li Zhen, Qin Wei, Qi Zhiguo, et al. Remote sensing analysis on gully morphology and spatial distribution in

- rolling hilly region and mountainous and hilly region of Northeast China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(14): 133-140.
- [27] Fashae O, Obateru R, Olusola A, et al. Factors controlling gully morphology on the quartzite ridges of Ibadan, Nigeria [J]. *Catena*, 2022, 212:106127.
- [28] Zhang Shengmin, Han Xing, Cruse R M, et al. Morphological characteristics and influencing factors of permanent gully and its contribution to regional soil loss based on a field investigation of 393 km² in Mollisols Region of Northeast China [J]. *Catena*, 2022, 217:106467.
- [29] 张宇婷, 肖海兵, 聂小东, 等. 基于文献计量分析的近 30 年国内外土壤侵蚀研究进展 [J]. *土壤学报*, 2020, 57(4):797-810.
- Zhang Yuting, Xiao Haibing, Nie Xiaodong, et al. Evolution of research on soil erosion at home and abroad in the past 30 years-Based on bibliometric analysis [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4):797-810.
- [30] 许林玉. 高被引论文核心影响因素判别研究 [J]. *信息管理学报*, 2023, 13(5):137-148.
- Xu Linyu. The identification of the core factors of highly cited papers [J]. *Journal of Information Resources Management*, 2023, 13(5):137-148.
- [31] Hirsch J E. An index to quantify an individual's scientific research output [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(46):16569-16572.
- [32] 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.
- [33] 史方颖, 张凤宝, 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.
- [34] 张光辉. 对土壤侵蚀研究的几点思考 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4):21-30.
- Zhang Guanghui. Several ideas related to soil erosion research [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4):21-30.
- [35] 钟伟金, 李佳, 杨兴菊. 共词分析法研究(三): 共词聚类分析法的原理与特点 [J]. *情报杂志*, 2008, 27(7): 118-120.
- Zhong Weijin, Li Jia, Yang Xingju. The research of co-word analysis(3): The principle and characteristics of the co-word cluster analysis [J]. *Journal of Intelligence*, 2008, 27(7):118-120.
- [36] Prosser I P, Hughes A O, Rutherford I D. Bank erosion of an incised upland channel by subaerial processes: Tasmania, Australia [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(10):1085-1101.
- [37] 赵宇辉, 张建军, 于洋, 等. 晋西黄土区蔡家川小流域切沟的空间分布及形态特征 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38(4):151-158.
- Zhao Yuhui, Zhang Jianjun, Yu Yang, et al. Spatial distribution and characteristics of the gullies in Caijiachuan watershed in loess region of Western Shanxi Province, China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(4):151-158.
- [38] Huo Aidi, Peng Jianbing, Cheng Yuxiang, et al. Hydrological analysis of Loess Plateau highland control schemes in Dongzhi Plateau [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8:637.
- [39] Daley J S, Spencer J R, Brooks A P, et al. Direct rain splash and downwearing of internal surfaces as an important erosion process in alluvial gully development [J]. *Catena*, 2023, 221:106760.
- [40] 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.
- [41] Jan K, Calogero S, Riccardo S, et al. Assessment of gully erosion in the upper aswsh, central Ethiopian highlands based on a comparison of archived aerial photographs and very high resolution satellite images [J]. *Geografia Fisica E Dinamica Quaternaria*, 2016, 39:161-170.
- [42] Liberti M, Simoniello T, Carone M T, et al. Mapping badland areas using Landsat TM/ETM satellite imagery and morphological data [J]. *Geomorphology*, 2009, 106(3/4):333-343.
- [43] Gillan J, Karl J, Elaksher A, et al. Fine-resolution repeat topographic surveying of dryland landscapes using UAS-based structure-from-motion photogrammetry: Assessing accuracy and precision against traditional ground-based erosion measurements [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(5):437.