

# 1991—2020 年全球沟蚀研究进展

罗丽<sup>1</sup>, 段胜丹<sup>2</sup>, 郭文召<sup>3,4</sup>, 刘恒<sup>2</sup>, 孙昊泽<sup>3</sup>, 杨硕<sup>3</sup>

(1.西北农林科技大学, 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学, 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学, 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710061)

**摘要:** [目的] 分析 1991—2020 年国内外沟蚀领域不同时期的国际研究形势、研究现状以及研究热点的变化趋势, 定量分析沟蚀测量技术和沟蚀模型的发展趋势, 旨在促进沟蚀研究的深入发展并为相关领域学者提供参考信息。[方法] 采用 Web of Science 核心合集中 1991—2020 年的 2 568 篇沟蚀相关文献进行计量分析, 使用 VOSviewer 软件对国家和机构研究形势以及沟蚀研究热点变化趋势进行可视化分析。[结果] 近 30 a 沟蚀的研究呈现上升趋势, 且在 2011—2020 年迅猛上升。中国(23.7%)和美国(20.8%)为沟蚀研究的主要国家, 发文量占全球的 44.5%, 且两国间合作更密切。全球沟蚀研究排名前 10 的机构中, 中国的机构占 3 所(中国科学院、西北农林科技大学和北京师范大学)。沟蚀研究涉及多个学科领域, 以地质学最多。沟蚀影响因子、沟蚀测量技术和沟蚀研究模型为沟蚀领域主要研究热点。径流、土地利用、植被、降雨和土壤等影响因子一直是沟蚀研究的重点。近些年气候变化特别是极端降雨对沟蚀的影响越来越受重视。高精度的 3 D 立体测量技术逐步替代 2 D 平面测量技术, 并得到广泛应用。经验模型应用早, 应用最广泛, 2000 年之后基于定量分析的估算模型开始建立, 提高了沟蚀监测及预报的精度。[结论] 未来沟蚀研究应在植被恢复后极端降雨下沟蚀的形成、不同因素对于沟蚀过程的交互影响、沟蚀监测新方法的开发以及沟道侵蚀过程预测模型等方面加强工作。

**关键词:** 土壤侵蚀; 浅沟; 切沟; VOSviewer; 测量技术; 监测预报; 估算模型

**文献标识码:** C

**文章编号:** 1000-288X(2023)03-0265-12

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.031; 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.

## Global Research Progress Regarding Gully Erosion from 1991 to 2020

Luo Li<sup>1</sup>, Duan Shengdan<sup>2</sup>, Guo Wenzhao<sup>3,4</sup>, Liu Heng<sup>2</sup>, Sun Haoze<sup>3</sup>, Yang Shuo<sup>3</sup>

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Natural Resources and

Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water

Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. State Key Laboratory of Loess and

Quaternary Geology, Institute of Earth Environment Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The international research situation, current research status, and trends in research hotspots in the field of gully erosion at home and abroad from 1991 to 2020 were analyzed, and the development trends of gully erosion measurement techniques and models were analyzed quantitatively in order to promote the in-depth development of gully erosion research and provide reference information for scholars in related fields. [Methods] We acquired 2 568 research papers dealing with gully erosion from the Web of Science from 1991 to 2020. We used a bibliometric analysis method and VOSviewer software to analyze the research situation of countries and institutions and the change trend of hotspots for gully erosion research. [Results] The number of papers published on gully erosion research presented an upward trend in the recent 30 years,

**收稿日期:** 2022-08-21

**修回日期:** 2022-11-15

**资助项目:** 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“典型退耕还林(草)小流域黄土滑坡关键致灾因子及其群发机理”(2023-JC-QN-0361); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金“强降雨下黄土沟坡根土层浅层滑坡破坏机制研究”(SKLLQG2215)

**第一作者:** 罗丽(1988—), 女(汉族), 陕西省渭南市人, 博士, 主要从事水土保持、土壤侵蚀方面研究。Email: luoli881206@163.com。

**通信作者:** 郭文召(1987—), 男(汉族), 河南省洛阳市人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: wenzhaoguo@nwafu.edu.cn。

and rose rapidly from 2011 to 2020. China (23.7% of papers) and the United States (20.8%) were the main countries conducting and publishing gully erosion research, with 44.5% of the word's publications, and close cooperation between the two countries. Among the top ten institutions conducting global gully erosion research, three institutions (the Chinese Academy of Sciences, Northwest University of Agriculture and Forestry, and Beijing Normal University) were located in China. This field of research involved many disciplines, most of which were related to geology. Influencing factors, measurement techniques, and gully erosion research models were the main research focuses in the field of gully erosion. The impact factors of runoff, land use, vegetation, rainfall and soil had always been the focus of gully erosion research. The impact of climate change, especially extreme rainfall, received greater attention in recent years. High precision 3D stereo measurement technology gradually replaced 2D plane measurement technology, and was widely used. Empirical models were applied early and widely. Estimation models based on quantitative analysis began to be established after 2000, and this development improved the accuracy of gully erosion monitoring and prediction. [Conclusion] Future gully erosion research should focus on the formation of gully erosion under extreme rainfall after vegetation restoration, interaction of different factors on the gully erosion process, development of new methods for gully erosion monitoring, and developing prediction models of gully erosion processes.

**Keywords:** soil erosion; ephemeral gully erosion; gully erosion; VOSviewer; measurement technology; monitoring and prediction; Estimation models

沟蚀是集成的线状水流对地表进行的侵蚀,切入地面形成侵蚀沟的一种水土流失形式,按其发育的阶段和形态特征又可细分为浅沟、切沟、冲沟等<sup>[1-3]</sup>。受特殊侵蚀环境和人类扰动的双重影响,沟蚀是某些地区重要的侵蚀类型,特别是切沟侵蚀,对流域产沙有重要贡献,其发生发展过程对现代地貌特征及其演变过程具有重要影响<sup>[4]</sup>。如在中国黄土高原丘陵沟壑区,切沟侵蚀产沙量占流域产沙量的 50% 以上<sup>[5]</sup>;在东北地区,沟蚀严重,沟壑密度可达 1.70~5.04 km/km<sup>2</sup><sup>[6]</sup>。在澳大利亚西北部,河流中大约 80% 的产沙量来自沟蚀<sup>[7]</sup>。在巴塔哥尼亚东北部,沟蚀产沙量占盐湖底沉沙量的 58% 左右<sup>[8]</sup>。沟蚀破坏耕地,减少作物产量,损坏道路和建筑等基础设施<sup>[9-10]</sup>,严重影响着人类农业活动的发展,所引起的生态环境问题逐渐受到高度重视。

国内外沟蚀研究主要集中于沟蚀的影响因素、监测手段、预报模型及其侵蚀产沙等方面。沟蚀是地质、地形地貌、土壤、人类活动、植被以及气候变化等多种因子综合影响的结果<sup>[11-12]</sup>,过度放牧、土地利用变化、极端气候事件和不当农业活动等也会加速沟蚀发生<sup>[12-15]</sup>。近年来,沟蚀监测方法的研究成果颇丰,学者们将沟蚀监测方法分为接触与非接触测量法<sup>[16-17]</sup>,或传统和现代测量法<sup>[4-5,18]</sup>。随着时间的推移,受精度、地形等局限的传统测量不再满足当前高精度的定量监测,高新测量技术开始出现,并得到重视,如 SfM 摄影测量技术<sup>[19]</sup>于 2014 年首次应用于沟蚀研究。国内学者对沟蚀研究的综述多集中于侵蚀预报模型<sup>[17,20]</sup>,学者们基于沟蚀的监测方法,结合沟

蚀影响因子建立了大量确定坡度和坡长等临界条件的侵蚀临界模型<sup>[21-23]</sup>,以此总结、分析沟蚀的发生临界条件,监测沟蚀的发展历程,揭示其发育规律。因此,现在亟需梳理近年来沟蚀研究的发展历程,研究现状、热点和趋势等方面。

本文运用文献计量法,借助 VOSviewer 软件,讨论近 30 a(1991—2020 年)沟蚀领域不同时期的国际研究形势、研究现状以及研究热点的变化趋势,明确主要研究国家、机构的研究态势,同时利用 Web of Science 的高级检索功能定量分析沟蚀测量技术和沟蚀模型的发展趋势,客观地描述沟蚀研究的发展历程和研究重点的转变,以期促进沟蚀研究的深入发展并为相关领域学者提供参考信息。

## 1 研究方法和数据来源

本文以沟蚀(gully erosion)为主题,选择 Web of Science 核心合集为数据库,对 1991—2020 年的时间段进行检索,删除,剔除与主题不相关的文献,最终得到 2 568 篇文献(79 篇为综述论文,2 489 篇研究论文;其中研究论文中有全文的会议论文 137 篇)。2 568 篇文献中,浅沟侵蚀/临时性切沟侵蚀(ephemeral gully erosion)293 篇,其余文献均为切沟侵蚀。并将 30 a 分为 1991—2000,2001—2010,2011—2020 年 3 个时间段。

文献计量学是采用数学、统计学、文献学等定量研究的方法,分析某一领域文献的分布特点、数量关系、变化规律和定量管理,进而探讨该领域研究的发展趋势、特征、规律以及研究热点等<sup>[24-25]</sup>。使用

VOSviewer 软件,就国家合作关系、机构合作关系以及关键词等方面进行可视化分析。以文本格式导出 Web of Science 中文献的完整记录作为数据,再导入 VOSviewer 软件中进行分析。VOSviewer 的标签视图中,不同颜色的圆圈或标签的大小表示发文量的多少,越大说明发文量越多,圆圈或标签之间连线的粗细代表不同国家、机构的关系紧密程度,连线越粗合作越密切,同一颜色的圆圈或标签组成一个聚类<sup>[25-26]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 论文发布数量的年度变化趋势

1991—2020 年沟蚀领域相关研究论文总计 2 568 篇,发布量总体呈现增长趋势(图 1)。1991—2000 年期间,沟蚀相关论文的发布数量增长相当缓慢,平均每年论文发表数量为 23,总计 228 篇,该时间段为沟蚀研究缓慢发展阶段。2001—2010 年,沟蚀相关论文发布数量快速增长,平均每年发表数量约为 69,总计 688 篇,该时间段为沟蚀研究快速发展阶段。2011—2020 年,沟蚀相关论文发表数量急剧增长,平均每年发表量约为 165,总计 1 667 篇,较前两阶段,发文量增加了 2~7 倍。该阶段为沟蚀研究急速发展阶段。

1991—2000 年期间的发文量仅占近 30 a 总数的 8.9%,2001—2010 年占比 26.8%,2011—2020 年占比最大,为 64.3%。可见,近 10 a 以来,沟蚀研究受到了广泛关注,促进了该领域研究的飞速发展。由近 30 年发文量趋势可以看出,沟蚀领域论文发布数量将来仍会呈现增长趋势。

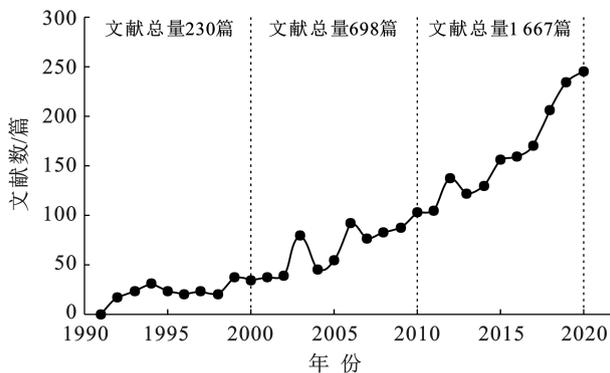


图 1 1991—2020 年沟蚀研究领域论文数量年度变化趋势

Fig.1 Trend of published SCI papers in gully erosion research field during 1991—2020

### 2.2 沟蚀领域国际研究形势

2.2.1 主要研究国家分析 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(2 505 篇)比例超

过近 30 a 论文总数的 95%。就发文量而言,中国>美国>澳大利亚>英格兰>西班牙>比利时>德国>意大利>法国>伊朗。中国和美国发文量在所有研究国家中占领先地位。中国发表论文数量最多,为 608 篇,占总发文量的 23.7%,主要集中在黄土高原地区(334 篇,占比 54.9%)。美国发文量第二,为 534 篇,占总发文量的 20.8%,其中 268 篇论文研究沟蚀模型的建立、修正以及验证。美国沟蚀研究主要地区为堪萨斯州、俄克拉荷马州、爱尔华州以及密西西比河等,澳大利亚沟蚀研究主要地区为巴宾达、达林唐斯地区和瓦加等<sup>[27]</sup>。在 1991—2000 年和 2001—2010 年这两个阶段,中国的沟蚀研究明显少于美国、澳大利亚和英格兰,然而在 2011—2020 年,中国的发文量呈现飞跃式大幅度增长,迅速超过美国、澳大利亚和英格兰,成为全球第一。

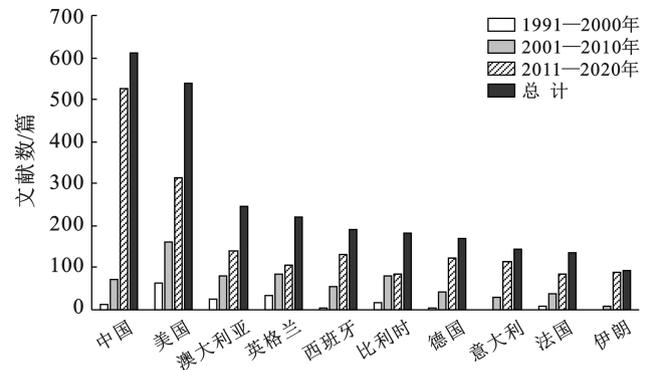


图 2 沟蚀领域主要研究国家不同年限发文量变化趋势(发文量前 10)

Fig.2 Trends of publications in gully erosion research field by main research countries in different years (top 10 publications)

$H$  指数是一种用来描述研究人员的科学成果的方法,指一个作者最多有  $H$  篇论文被引用了不少于  $H$  次, $H$  指数越大,其论文的影响力越大<sup>[28-29]</sup>。在 10 个国家中(表 1),美国的论文总引频次数最多(18 668 次),其次是中国(15 988 次),比利时排名第三。就每篇平均被引频次数而言,比利时排名第一,高达 81.4 次/篇,高于西班牙(50.8 次/篇)和英格兰(45.7 次/篇),而中国论文均篇被引次数排名靠后。从高引频论文数来看,被引频 $\geq 100$  次的论文超过 30 篇的国家只有比利时和美国;对于  $H$  指数,比利时排名第一(70),其次为美国(66),而中国仅为 53。

综上所述,比利时、美国和西班牙等国家在沟蚀领域的论文影响力较高,在沟蚀领域的发展更深入。中国虽在发文量方面占据优势,但其论文综合影响力有待提高,沟蚀领域研究有待加强以及拓展。

表 1 沟蚀领域主要研究国家文献被引频次(按发文量排名)

Table 1 Cited frequency of mainly countries studied in field of gully erosion (ranking by number of publications)

序号	国家	文献总数	总被引次数	每篇平均被次数	被引频次 $\geq 100$ 的论文	H 指数
1	中国	608	15 988	26.3	23	56
2	美国	534	18 668	35.0	37	66
3	澳大利亚	241	8 953	37.2	16	57
4	英格兰	219	10 004	45.7	20	54
5	西班牙	189	9 594	50.8	23	53
6	比利时	178	14 484	81.4	42	70
7	德国	167	6 928	41.5	17	47
8	意大利	144	6 104	42.4	12	45
9	法国	133	4 434	33.3	7	40
10	伊朗	92	3 522	38.3	7	37

2.2.2 主要研究机构分析 类似地,按照研究机构统计分析可得出,发文量前十的机构分别是:中国科学院>美国农业部>鲁汶大学>西北农林科技大学>法国国家科学研究中心>联邦科学工业研究组织(澳大利亚)>最高科研理事会(西班牙)>北京师范大学>法国国家农业食品与环境研究院>法国研究与发展研究所(图 3)。其中,中国科学院的发文量最多,为 332 篇,占总发文量的 12.9%,高于美国农业部(155 篇)和鲁汶大学(129 篇)。由此可见,中国科学院在沟蚀领域发文量方面占领先地位。发文量前十的机构中属于中国的机构有 3 所,分别是中国科学院、西北农林科技大学和北京师范大学。中国的科研机构在不同年限关于沟蚀研究的论文发表量皆呈现飞跃式大幅度增长,且 2011—2020 年的发文量占该机构总发文量的 75%以上。

在这些机构中(表 2),鲁汶大学的文献总引频次(11 953 次)最多,中国科学院排名第二,为 8 626 次,美国农业部排名第三,为 4 928 次;对均篇引频次而言,鲁汶大学占领先地位(92.7 次/篇),其次为最高科研理事会(70.5 次/篇)和法国研究与发展研究所(53.4 次/篇);从高引频论文数来看,鲁汶大学被引频

$\geq 100$  次的论文数最多(34 篇),其次为中国科学院(15 篇)和最高科研理事会(13 篇);就 H 指数方面,鲁汶大学排名第一(62),大于其他机构。

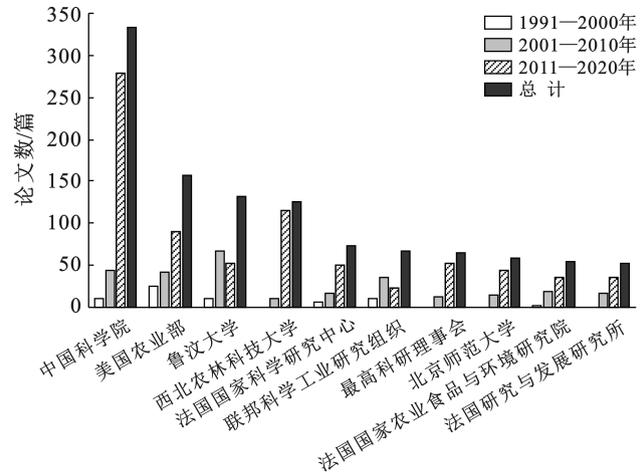


图 3 沟蚀领域研究机构不同年限发文量变化趋势(发文量前 10)

Fig.3 Trends of publications in gully erosion research field by main research institutions in different years (top 10 publications)

表 2 沟蚀领域主要研究机构文献被引频次(按发文量排名)

Table 2 Cited frequency of mainly research institutions in field of gully erosion (ranking by number of publications)

序号	机构	总计	总引频次	每篇平均引频次	篇被引频次 $\geq 100$ 的论文	H 指数
1	中国科学院	332	8626	26.0	15	47
2	美国农业部	155	4 928	31.8	8	38
3	鲁汶大学	129	11 953	92.7	34	62
4	西北农林科技大学	126	3 023	24.0	4	29
5	法国国家科学研究中心	73	2 301	31.5	2	31
6	联邦科学工业研究组织	66	3 365	51.0	6	37
7	最高科研理事会	66	4 652	70.5	13	33
8	北京师范大学	58	1 917	33.1	3	26
9	法国国家农业食品与环境研究院	53	1 992	37.6	3	29
10	法国研究与发展研究所	49	2 616	53.4	3	27

综上所述,中国和美国的发文量和文献总引频次均较高,是沟蚀研究的主力国家;比利时鲁汶大学的文献均引频次数最高,在沟蚀研究领域同样有不俗的影响力。

**2.2.3 沟蚀领域研究国家和机构合作关系** 通过对沟蚀论文单位所在国家分析,可得到国家间的合作关系(图4)。研究国家的标签分为5个聚类,分别是与中国、澳大利亚、意大利、美国以及法国为核心的聚类。各聚类内部的国家合作较多(连线,较多);聚类间:中国与美国之间的连线最粗,说明中国与美国关于沟蚀领域研究的合作关系最密切,且密切程度超过其他国家之间(其连线明显粗于其他)。中国和美国都与英格兰,澳大利亚、比利时、伊朗、意大利等主要研究国家之间存在较为密切的合作关系(连线,较粗),中国与西班牙、法国、德国之间的合作关系较弱(连线,较细)。

进一步,对研究机构的合作关系进行分析(图5),出现15次以上的机构一共有55所,可大致分为5个集群。分别以中国科学院、美国地质研究局、鲁汶大学、巴哈达尔大学(伊朗)、塔比阿特莫达勒斯大学为核心。其中以中国科学院为核心的机构集群最集中,说明集群内的机构联系紧密,合作关系也十分密切(连线,很粗很多)。各个机构集群之间的合作关系很弱(连线,很少且细)。沟蚀领域研究的机构中,国内机构更集中,合作更密切,而国外机构比较多,比较分散,与国内机构的合作却较少。

研究该领域的国内机构多为与中国科学院有着密切合作关系的中国高校以及研究所,而国外研究国家众多,机构分布较广、较分散。沟蚀领域的研究可多重视国家和机构间的合作,交流研究进展,推进沟蚀研究的发展以及研究进程,以发现更多的潜在问题。

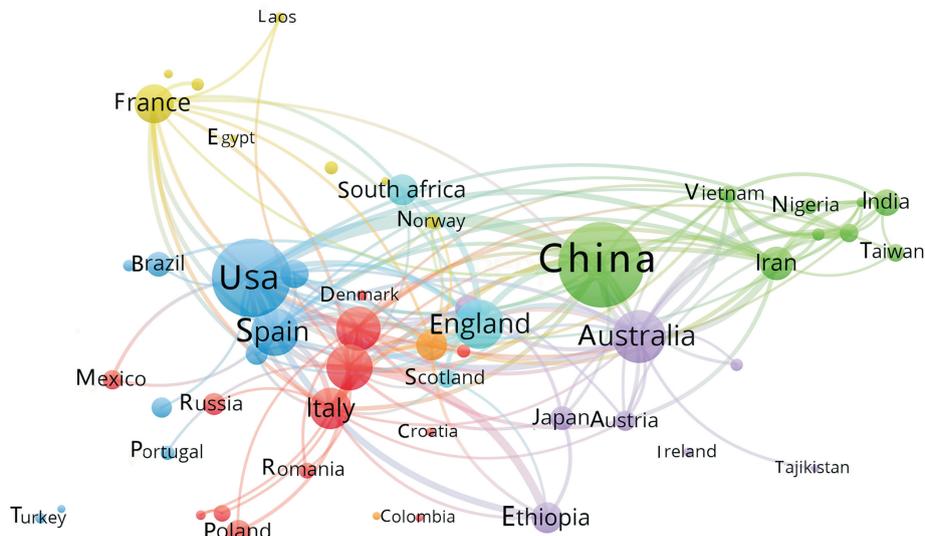


图4 沟蚀领域研究国家合作关系标签图

Fig.4 Label map of cooperative relationship between countries in field of gully erosion research

## 2.3 沟蚀领域研究热点动态变化分析

**2.3.1 学科领域分析** 通过数据分析,发现沟蚀研究涉及多个学科领域,1991—2020年沟蚀领域研究涉及的学科主要集中在以下10个领域(4 624篇)(表3),远大于检索文献数(2 568篇)。原因是一个期刊能代表多个学科领域,表现出每篇文章可以涉及多个学科领域,说明沟蚀研究是一个多学科交叉的领域。由表3进一步分析可知,各学科领域涉及的文献数量依次为:地质学>生态环境科学>地理学>农学>水资源>工程学>气象学与大气科学>遥感科学>成像科学摄影技术>海洋与淡水生物学。涉及地质学的论文数量超过1 300篇,占近30a总发表数量的

52.5%,其次是生态环境科学,为746篇,占总数量的29.0%。

**2.3.2 沟蚀影响因子研究变化趋势** 影响沟蚀的因素有:气候(降雨、温度),侵蚀动力(地上径流,上方来水,地下潜流),地形(坡度、坡长、坡形,坡向),土壤(性质、组成、类型),岩性,地貌(海拔高程)、植被覆盖,土地利用类型,人类活动(耕作措施,作物类型,林地开垦)等。

利用VOSviewer软件将近30a沟蚀领域的关键词进行可视化分析,提取该领域研究的关键词、合并同义词,最后排序,得到出现次数前20的关键词(表4)。可以看出,随着时间的变化,“测量技术”与“模

型”等词,在 2001—2010 年和 2011—2020 年排名大幅度提升,且占总发文量(2 568 篇)的比例较 1991—2000 年普遍增大(如 1991—2000 年,“模型”占 20.6%,2011—2020 年,占 51.9%)。每个阶段,排名

前 20 的关键词中,沟蚀影响因子的关键词占比超过 40%,故 1991—2020 年沟蚀领域比较突出的 3 个研究热点,分别为沟蚀影响因子、沟蚀测量技术和沟蚀研究模型。

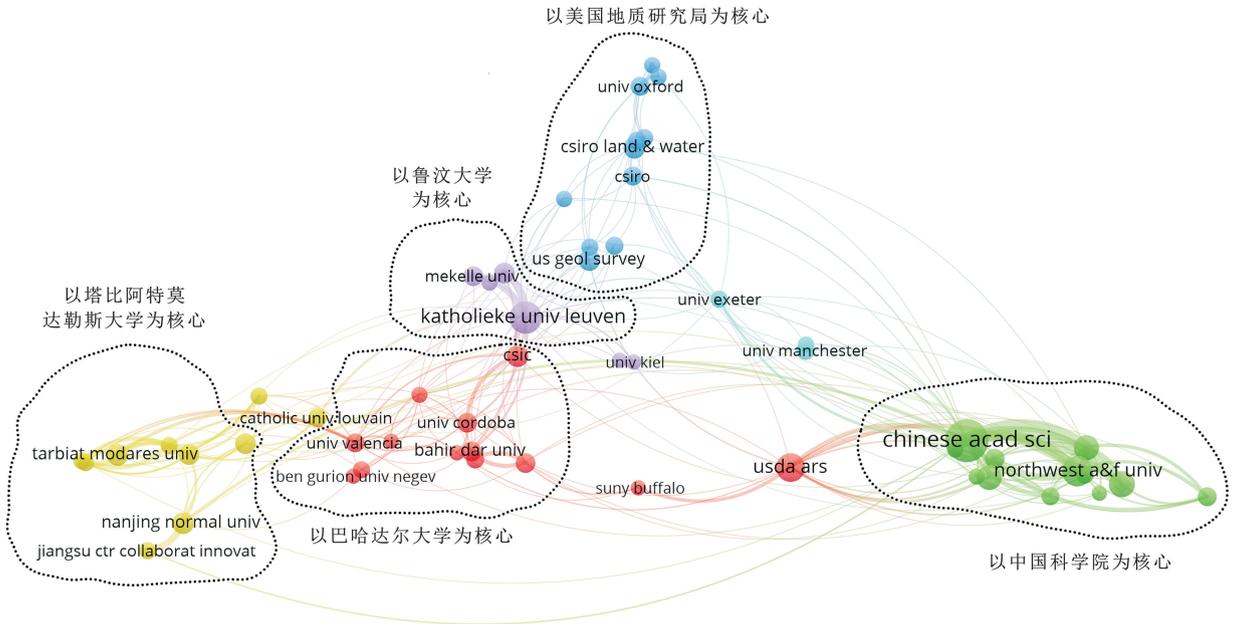


图 5 沟蚀领域研究机构(出现 15 次以上)合作关系标签图

Fig.5 Label map of cooperative relationship between institutions in field of gully erosion research (appeared more than 15 times)

表 3 1991—2020 年沟蚀领域论文重点涉及的学科领域

Table 3 Major research areas of gully erosion research from 1991 to 2020

序号	学科领域	文献数/篇	序号	学科领域	文献数/篇
1	地质学	1 349	6	工程学	174
2	生态环境科学	746	7	气象学与大气科学	84
3	地理学	706	8	遥感科学	68
4	农学	689	9	成像科学摄影技术	51
5	水资源	671	10	海洋与淡水生物学	41

将关键词进一步处理,提取沟蚀影响因素相关的关键词、合并同义词,最后排序,得到出现次数前 10 的关键词(表 5)。1991—2020 年,沟蚀影响因子的相关关键词前 10 名均出现径流、土地利用、植被、降雨和土壤等,说明这些影响因子一直是沟蚀研究的重点。降雨主要通过降雨量和降雨强度对沟蚀造成影响,而降雨进一步引起地面径流增加,增强地面冲刷,造成沟头溯源、沟底下切和沟岸扩张等<sup>[4-5]</sup>。土壤性质也显著影响沟蚀速率,研究表明正在发育的侵蚀沟土壤容重小、孔隙度大、土质疏松,在降雨径流的作用下更易造成侵蚀<sup>[30-32]</sup>。植被是影响切沟发育的重要因素,植被生长具有截留降水的作用,降低径流流速,同时改良土壤物理化学性质,增强其抗蚀性<sup>[11]</sup>。另外,不合理的土地利用导致土壤肥力衰退、有机质减

少以及土壤团聚体稳定性降低,引起土壤入渗下降、坡面产流增大,促进切沟发育<sup>[33]</sup>。

同时,关于地形因子的研究迅速增多(1991—2000 年,占比 9.2%,2011—2020 年占 13.3%),地形因素决定地表径流的汇集情况,影响着沟蚀的分布、发生以及侵蚀程度,从而影响沟蚀的发生发展<sup>[20,34-35]</sup>;学者们通过研究沟蚀发生的临界地形条件,结合临界模型,可以很好地预测沟蚀的发生条件。

此外,随着时间的推移,降雨占比增加(1991—2000 年占 17.54%,2011—2020 年占 21.97%)。近年来全球气候变化导致暴雨频率增加,引起沟蚀发育的强烈响应<sup>[4]</sup>。沟蚀领域关于极端降雨事件的研究逐渐被重视。如 2013 年黄土高原延安“7·3 暴雨”<sup>[36]</sup>、2017 年黄土高原绥德“7·26 暴雨”<sup>[37]</sup>以及

2018 年庆阳“7·10 持续强降雨”<sup>[38]</sup>, 这些强降雨均引起了严重的切沟侵蚀。

综上所述, 切沟可以在个别暴雨事件期间形成, 增加水土流失<sup>[39-40]</sup>。从暴雨外围到中心, 随着降雨梯度的增加, 沟蚀发育强度显著增加<sup>[41]</sup>。Tang J<sup>[42]</sup> 指

出在东北黑土区, 极端降雨期间浅沟发育迅速, 单次极端降雨产生的水土流失量占总侵蚀量的 29%~45%。因此, 沟蚀领域对于影响因子的研究, 可以深入探讨沟蚀的发生条件和侵蚀速率, 以更好地揭示沟蚀形成以及加剧的原因<sup>[43]</sup>。

表 4 沟蚀领域不同年限高频关键词(前 20)

Table 4 Top 20 high frequency keywords of gully erosion during different period(top 20)

1991—2020 年	2001—2010 年	2011—2020 年
流域(catchment, 211)	沟蚀(gully erosion, 647)	流域(catchment, 1 169)
沟蚀(gully erosion, 196)	流域(catchment, 580)	沟蚀(gully erosion, 1 134)
产沙量(sediment yeild, 140)	产沙量(sediment yeild, 555)	模型(model, 858)
径流(runoff, 111)*	测量技术(measurement technique, 367)	土壤(soil, 787)*
滑坡(slope, 95)	径流(runoff, 365)*	滑坡(slope, 774)
土壤(soil, 86)*	土壤(soil, 324)*	测量技术(measurement technique, 697)
土地利用(land-use, 62)*	滑坡(slope, 283)	产沙量(sediment yeild, 674)
土壤侵蚀(soil erosion, 57)*	模型(model, 281)	径流(runoff, 661)*
植被(vegetation, 55)*	土地利用(land-use, 258)*	土地利用(land-use, 642)*
气候变化(climate change, 54)*	降雨(rainfall, 171)*	土壤侵蚀(soil erosion, 401)
测量技术(measurement technique, 52)	土壤侵蚀(soil erosion, 144)	降雨(rainfall, 363)*
模型(model, 47)	植被(vegetation, 125)*	气候变化(climate change, 337)*
降雨(rainfall, 40)*	环境变化(environment change, 120)*	植被 vegetation, 272)*
环境变化(environment change, 27)*	侵蚀速率(erosion rate, 107)	地形(topography, 219)*
耕作(cultivation, 26)*	侵蚀过程(erosion process, 94)	侵蚀过程(erosion process, 198)
地形(topography, 21)*	形态学(morphology, 93)	侵蚀速率(erosion rate, 179)
侵蚀过程(erosion process, 18)	气候变化(climate change, 83)*	形态学(morphology, 168)
形态学(morphology, 17)	地形(topography, 73)*	环境变化(environment change, 153)*
水蚀 water erosion, 13)	泥石流(debris, 69)	人类活动(human activity, 116)*
农业 argiculture, 11)	耕作(cultivation, 45)*	土地破坏(land degradation, 110)

注: \* 表示与沟蚀影响因子相关的关键词; 括号内数值为该关键词的出现频率。下同。

表 5 沟蚀领域不同年限有关影响因素的高频关键词(前 10)

Table 5 Top10 high frequency keywords of influence factors of gully erosion during different period(top 10)

1991—2000 年	2001—2010 年	2011—2020 年
径流(runoff, 111)	径流(runoff , 365)	土壤(soil, 787)
土壤(soil, 86)	土壤(soil, 324)	径流(runoff, 661)
土地利用(land-use, 62)	土地利用(land-use, 258)	土地利用(land-use, 642)
植被 vegetation, 55)	降雨(rainfall, 171)	降雨(rainfall, 363)
气候变化(climate change, 54)	植被(vegetation, 125)	气候变化(climate change, 337)
降雨(rainfall, 40)	环境变化(environmental change, 120)	植被(vegetation, 272)
环境变化(environmental change, 27)	气候变化(climate change, 83)	地形(topography, 219)
耕作(tillage, 26)	地形(topography, 73)	环境变化(environment change, 153)
地形(topography, 21)	耕作(tillage, 45)	人类活动(human activity, 116)
入渗(infiltration, 10)	入渗(infiltration, 30)	岩性(lithology, 66)

2.3.3 沟蚀研究方法和技术变化情况 沟蚀研究方法和技术大致分为 2 D 平面测量和 3 D 立体测量。前者包括断面测量法、测针法、体积测量法和全站仪法 4 类, 后者包括遥感测量法、3 D 照片重建法、激光扫描法、摄影测量法和 GPS 法 5 类。为深入研究这

些测量方法近 30 年在沟蚀领域研究的应用情况, 按照不同搭载平台, 将研究方法进行细分, 并编写检索式, 在 Web of Science 中进行检索, 统计不同年限沟蚀测量方法的应用情况(表 6)。

2 D 平面测量普遍出现时间早, 种类较少出现频

次也较少,其中断面测量法应用最少,仅占总论文数(2 595 篇)的 0.4%。3 D 立体测量中,遥感测量法应用最早,且随着时间的推移,出现频次大幅度增加,其中 3 D 照片重建法、激光扫描法、摄影测量法和 GPS 法都是在 2000 年之后才开始使用。摄影测量法虽然出现时间晚(如无人机摄影测量法和 SfM 立体摄影测量都是 2010 年之后开始出现),但应用最多,占总论文数的 5.9%。由此可见,随着科技的发展,高新技术下的 3 D 立体测量逐步代替 2 D 平面测量。

2 D 平面测量均为手工测量,费时费力,总体精度低(多在毫米级别),仅适合小范围的典型沟蚀监测点,测针法极可能受到人类或动物行为的干扰导致误差大;全站仪则需要对人员进行专业培训以完成复杂的操作。但平面测量的仪器普遍轻便,便于携带,可有效节约成本。3 D 立体测量在测量精度上得到大

幅度提升可达到亚毫米级,如 SfM 摄影测量可用于精确测量小流域个体切沟或进行室内的定量测量<sup>[4,16]</sup>。3 D 立体测量在一定程度上弥补了 2 D 平面测量费时、费力、局限性等弱点<sup>[42]</sup>,但仍受到地形、气候的影响<sup>[18]</sup>。特别是无人机摄影测量法,近年来被广泛应用,具有成本低、速度快、测量范围广(用于面积超过 50 km<sup>2</sup> 的区域)、适用于灵活且频繁的沟蚀活动区、能在复杂地形条件下工作等特点。然而,无人机在飞行过程中,很难根据实际地形实时调整其飞行高度和角度,从而在复杂地形下作业容易造成数据缺失<sup>[16,44-45]</sup>,Guan Yabing 等<sup>[45]</sup>人将无人机摄影测量与航空遥感测量相结合,以实现黄土高原边缘沟壑的多尺度监测。因此,可采用多种测量技术相结合的方法,弥补单一测量技术的不足,建立地面和空中相结合的多纬度综合监测,实现更加精确的测量。

表 6 不同沟蚀测量方法在不同年限的应用情况

Table 6 Application of different method of gully erosion measurement in different period

大类	类	种	检索式	涉及文献数量/篇		
				1991—2000 年	2001—2010 年	2011—2020 年
2D 平面测量	体积测量法	体积测量法	TS=((gully erosion)AND (volume measurement OR refill )NOT Mars )	8	22	44
	测针法	测针法	TS=((gully erosion)AND (erosion pin)NOT Mars )	1	11	16
	全站仪法	全站仪法	TS=((gully erosion )AND (total station)NOT Mars)	0	3	30
	断面测量法	直尺测量法	TS=((gully erosion)AND (ruler OR rulers OR tapes)NOT Mars )	0	2	5
		激光剖面仪法	TS=((gully erosion)AND (profiler OR profilemeter)NOT Mars )	1	0	3
遥感测量法	航空遥感测量法	TS=((gully erosion )AND (aerial photo )NOT Mars)	3	10	23	
	卫星遥感测量法	TS=((gully erosion )AND (satellite image OR landsat )NOT Mars)	1	15	72	
3D 照片重建法	3D 照片重建法	TS=((gully erosion )AND (3D photo-reconstruction OR PR )NOT ('Mars' OR 'UAV'))	0	0	10	
3D 立体测量	激光扫描法	机载激光扫描法	TS=((gully erosion )AND (airborne LiDAR )NOT Mars )	0	4	30
		地面激光扫描法	TS=((gully erosion )AND (terrestrial LiDAR )NOT Mars )	0	1	20
	数字摄影测量法	TS=((gully erosion )AND (digital photogrammetry )NOT Mars )	0	7	57	
	摄影测量法	无人机摄影测量法	TS=((gully erosion )AND (UAV photogrammetry OR unmanned aerial )NOT Mars )	0	0	59
		SfM 立体摄影测量	TS=((gully erosion )AND (SfM photogrammetry )NOT Mars )	0	0	31
GPS 法	差分 GPS 法	TS=((gully erosion )AND (DGPS OR RTK-GPS OR differential GPS OR differential global system OR real-time kinematic )NOT Mars )	0	5	16	
	手持 GPS 法	TS=((gully erosion )AND GPS NOT ('DGPS'OR 'RTK-GPS'OR 'differential GPS'OR 'differential global positioning system'OR 'real-time kinematic' OR 'Mars'))	0	6	22	

2.3.4 沟蚀研究模型的变化趋势 沟蚀领域相关研究模型可分为经验模型、物理模型和估算模型 3 大类,其中经验模型包括预报模型、生长发育模型、形成模型 3 类;物理模型包括数字地形模型、水文模型、临界模型和敏感性模型 4 类;估算模型包括产沙量估算模型、体积估算模型和定量计算模型 3 类,共 10 类。

编写模型的检索式,在 Web of Science 中进行检索,记录不同模型在不同年限的应用情况(表 7)。

就模型大类而言,经验模型应用较早,应用最广泛,其种类也多;其次是物理模型,应用较早,应用较多;估算模型应用最少,且出现时间普遍较晚(2000 年之后)。就模型小类而言,生长发育模型是研究最

频繁的模式,占总论文数的7.1%,应用的时间也早,说明该模型一直是沟蚀领域研究重点,对沟蚀研究起到十分重要的作用;其次是临界模型,应用较广泛,占2.7%;体积估算模型应用最少,应用时间晚,仅占0.1%。

总的来说,1991—2000年,为沟蚀模型发展初期,经验模型与物理模型初步应用。经验模型简单易行,数据支撑少,是目前国内沟蚀预报的主流模型<sup>[4-5]</sup>,如Whitford J A等<sup>[46]</sup>根据切沟发育特征建立了用于预报切沟形态参数、发育程度以及侵蚀量的经验模型;Yang Dan等<sup>[47]</sup>构建了一系列沟谷体积的经验模型,验证了沟谷长度比其他形态特征更易精准预测。由于一些技术以及理论上的不足,该时期的模型不够精确,如Lentz等<sup>[48]</sup>于1993年提到的侵蚀预测模型,能

预测下游浅沟侵蚀的沉积产沙过程,却不能精确描述某些景观的侵蚀过程。1999年美国农业部建立的浅沟侵蚀模型(EGEM)<sup>[49]</sup>,是专门为浅沟侵蚀估算开发的唯一概念模型,运用十分广泛,可对侵蚀量、侵蚀过程进行简单预测,但无法估算比利时黄土带中单一风暴下的浅沟横截面积,应用有局限性<sup>[50]</sup>。

随着时间的推移,这些传统的经验模型无法精准地对沟蚀进行预测,基于量化分析的估算模型开始出现(2000年之后),如李镇等<sup>[51]</sup>建立了基于高分立体影像的切沟体积估算模型,为切沟侵蚀的定量研究提供依据。目前对沟蚀过程预测的模型较少,沟蚀领域研究由经验计算方式转变为满足深层次研究的精确定量计算方式,这种转变可为沟蚀侵蚀过程的定量描述奠定基础。

表7 沟蚀模型在不同年限的应用情况

Table 7 Application of gully erosion models in different period

沟蚀模型	模型类型	检索式	涉及文献数/篇		
			1991—2000年	2001—2010年	2011—2020年
经验模型	预报模型	TS=((gully erosion) AND (predictive model) NOT ('Mar' OR 'modelling' OR 'soil erosion model' OR EDM OR 'gully erosion model'))	1	8	30
	生长发育模型	TS=((gully erosion) AND (growth model OR a model of gully development) NOT ('Mar' OR 'modelling' OR 'soil erosion model' OR EDM OR 'gully erosion model'))	13	52	119
	形成模型	TS=((gully erosion) AND (initiation model OR formation model) NOT ('Mar' OR 'modelling' OR 'soil erosion model' OR EDM OR 'a gully erosion model' OR 'a digital elevation model' OR 'susceptibility model'))	0	2	2
物理模型	数字地形模型	TS=((gully erosion) AND (A digital terrain model OR DTM) NOT ('Mar' OR 'modelling' OR 'soil erosion model' OR 'DEM' OR 'digital elevation model'))	1	2	11
	水文模型	TS=((gully erosion) AND (hydrologic model OR hydrosedimentologic model) NOT ('Mar' OR 'modelling' OR 'soil erosion model'))	2	6	23
	临界模型	TS=((gully erosion) AND (threshold model) NOT ('Mar' OR 'modelling' OR 'soil erosion model' OR 'predictive model' OR 'EDM' OR 'gully erosion model'))	6	20	43
	敏感性模型	TS=((gully erosion) AND (model OR models) AND (susceptibility model) NOT ('Mar' OR 'modelling' OR 'soil erosion model' OR 'predictive model' OR 'EDM' OR 'gully erosion model'))	0	6	51
估算模型	产沙量估算模型	TS=((gully erosion) AND (sediment budgeting models) NOT ('Mar' OR 'modelling'))	0	2	2
	体积估算模型	TS=((gully erosion) AND (volume budgeting models) NOT ('Mar' OR 'modelling'))	0	1	2
	定量计算模型	TS=((gully erosion) AND (quantitative model OR calculation model) NOT ('Mar' OR 'modelling' OR 'soil erosion model'))	0	5	7

## 2.4 侵蚀沟的防治技术及其效益分析

一般针对侵蚀沟的沟头、沟坡和沟底等3个部位进行防治。沟头一般采取沟头防护工程、沟边埂和防护林等,形成工程措施(如封沟埂、涝池、水窖等)与生物措施相结合的治理体系,疏导沟头水流,减少水流动能,防止沟头溯源侵蚀。针对沟坡的治理措施有护坡工程、梯田、鱼鳞坑、植物措施等,形成以工程措施、耕作措施和生物措施相结合的治理体系,防止沟坡继续扩张。针对沟底,各式谷坊、淤地坝广泛应用,形成

以工程措施为主,结合沟底防冲林,形成沟底综合治理措施。该措施可抬高侵蚀基准面,固定沟床,降低沟底比降,从而降低径流流速,减少沟底下切,同时拦泥淤地,为植被恢复创造良好条件<sup>[34,52-53]</sup>。

随着防治技术的实施,沟蚀得到有效的控制,其效益主要分为两种:①生态环境效益:侵蚀沟的治理可有效减少土壤侵蚀,调节地表径流,涵养水源,提高蓄水保土能力<sup>[53-54]</sup>,也可改善侵蚀沟处植被状况,为动物栖息提供良好环境;②社会效益:侵蚀沟的

治理可保护耕地(比如东北黑土区侵蚀沟治理),间接增加粮食产量,同时经济林(比如苹果、枣树等)也可产生经济收益,提高农民收入,提升生活质量<sup>[54]</sup>。侵蚀沟治理后,山洪、泥石流和滑坡等自然灾害爆发频率减少,有利于保护人民生命财产安全,提高居住环境质量<sup>[55]</sup>。

### 2.5 存在不足及亟待加强研究的若干问题

在过去 30 a 的研究中,学者们从沟蚀特征、影响因素、临界模型、预报模型,研究方法与技术等方面探究沟蚀发生发育条件以及发展历程,取得了很多重大的成果,为揭示沟蚀发生发展机制,治理沟蚀打下了基础,加深了人们对于沟蚀以及沟蚀危害的认知。但目前仍有一些研究领域亟待加强。

(1) 加强植被恢复后极端降雨下沟蚀的形成、发育过程及其机理研究。常规降雨条件下,植被恢复坡面很少有侵蚀沟的形成和发育,但植被恢复坡面遭遇极端降雨时,仍有大量的沟蚀形成。因此有必要加强植被恢复后极端降雨下沟蚀的形成、发育过程及其机理研究。

(2) 不同因素对于沟蚀过程的交互影响,亟待加强。目前植被、地形、降雨径流等因素对沟蚀的影响的研究较多,往往忽视了土壤的优先流和壤中流对沟蚀的影响。此外各个因素间存在相互作用。因此,应加强不同因素对于沟蚀过程的交互影响的研究。

(3) 着重加强沟蚀监测的新方法和新技术(如高分辨率航天遥感数据、无人机摄影测量等),并与现场原位监测相结合,来实现沟蚀动态演化的快速化、自动化和系统化的监测。

(4) 加强沟道侵蚀过程预测模型的研究。目前的沟蚀模型多以浅沟和切沟的经验模型为主,而沟道侵蚀过程预测模型较少。而对沟蚀过程进行较高精度的预报,可为更好的沟蚀防治、预防工作提供科学支撑。

## 3 结论

1991—2020 年,沟蚀研究发文量总体呈现上升趋势,特别是 2011—2020 年的发文量比例达到 64.3%。中国和美国为沟蚀研究的主力国家,两国合作密切,发文量和文献总引频次数均较高;相对于较为分散的国外机构,以中国科学院为核心的国内机构间的合作更为密切。1991—2020 年,沟蚀研究重点也发生了一定变化。

(1) 在测量方法上,低效率的 2 D 平面测量进步为高分辨率的 3 D 立体测量,高新的测量技术逐步被推广。此外,多种测量技术的结合,可弥补单一测量

技术的不足,实现更精确的测量。

(2) 在影响因素方面,径流、土地利用、植被、降雨和土壤等一直是沟蚀研究的重点,而近年来,降雨特别是极端降雨对沟蚀的影响研究逐渐得到重视。

(3) 在沟蚀模型方面,早期模型对于沟蚀侵蚀量的精准描述较少,近年来,沟蚀模型逐渐向追求量化的估算模型发展,以便对沟蚀进行高精度的监测及预报。

(4) 沟蚀研究今后的发展方向:①加强植被恢复后极端降雨下沟蚀的形成、发育过程及其机理研究;②不同因素对于沟蚀过程的交互影响研究;③沟蚀监测的新方法和新技术的开发;沟道侵蚀过程预测模型的研究。

### [参 考 文 献]

- [1] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs [J]. *Catena*, 2003, 50(2/3/4): 91-133.
- [2] 张洪江. 土壤侵蚀原理 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2000: 54.
- [3] 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.
- [4] 张光辉. 切沟侵蚀研究进展与展望 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 1-13.
- [5] 郑粉莉, 徐锡蒙, 覃超. 沟蚀过程研究进展 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 48-59.
- [6] 刘宝元, 刘刚, 王大安, 等. 区域沟蚀野外调查方法: 以东北地区为例 [J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(4): 34-40.
- [7] Wasson R J, Caitcheon G, Murray A S, et al. Sourcing sediment using multiple tracers in the catchment of lake argyle, Northwestern Australia [J]. *Environmental Management*, 2002, 29(5): 634-646.
- [8] Coronato F R, del Valle H F. Methodological comparison in the estimate of fluvial erosion in an arid closed basin of Northeastern Patagonia [J]. *Journal of Arid Environments*, 1993, 24(3): 231-239.
- [9] Kakembo V, Xanga W W, Rowntree K. Topographic thresholds in gully development on the hillslopes of communal areas in Ngqushwa Local Municipality, Eastern Cape, South Africa [J]. *Geomorphology*, 2009, 110(3/4): 188-194.
- [10] Harden C. Special focus on new studies of gully erosion [J]. *Physical Geography*, 2016, 37(6): 385-386.
- [11] 刘元保, 朱显谟, 周佩华, 等. 黄土高原坡面沟蚀的类型及其发生发展规律 [J]. *中国科学院西北水土保持研究所集刊*, 1988(1): 9-18.
- [12] Valentin C, Poesen J, Li Yong. Gully erosion: Impacts, factors and control [J]. *Catena*, 2005, 63(2/3):

- 132-153.
- [13] Moges A, Holden N M. Estimating the rate and consequences of gully development, a case study of umbulo catchment in Southern Ethiopia [J]. *Land Degradation & Development*, 2008,19(5):574-586.
- [14] Kakembo V, Rowntree K M. The relationship between land use and soil erosion in the communal lands near Peddie town, Eastern Cape, South Africa [J]. *Land Degradation & Development*, 2003,14(1):39-49.
- [15] Yibeltal M, Tsunekawa A, Haregeweyn N, et al. Analysis of long-term gully dynamics in different agro-ecology settings [J]. *Catena*, 2019,179:160-174.
- [16] 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.
- [17] 李镇,张岩,姚文俊.切沟侵蚀监测与预报技术研究述评[J]. *中国水土保持科学*,2012,10(6):110-115.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 武敏,郑粉莉.浅沟侵蚀过程及预报模型研究进展[J]. *水土保持研究*,2004,11(4):113-116.
- [21] 李斌兵,郑粉莉,张鹏,黄土高原丘陵沟壑区小流域浅沟和切沟侵蚀区的界定[J]. *水土保持通报*,2008,28(5):16-20.
- [22] 丁晓斌,郑粉莉,王彬,等.子午岭地区坡面浅沟侵蚀临界模型研究[J]. *水土保持通报*,2011,31(3):122-125.
- [23] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等.东北漫川漫岗黑土区浅沟和切沟发生的地貌临界模型探讨[J]. *地理科学*,2006,26(4):4449-4454.
- [24] 宋长青,谭文峰.基于文献计量分析的近30年国内外土壤科学发展过程解析[J]. *土壤学报*,2015,52(5):957-969.
- [25] 王俊丽,张忠华,胡刚,等.基于文献计量分析的喀斯特植被生态学研究态势[J]. *生态学报*,2020,40(3):1113-1124.
- [26] 高凯.文献计量分析软件 VOSviewer 的应用研究[J]. *科技情报开发与经济*,2015,25(12):95-98.
- [27] Liu Gang, Zheng Fenli, Wilson G V, et al. Three decades of ephemeral gully erosion studies [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021,212:105046.
- [28] 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.
- [29] 吴健,王敏,靳志辉,等.土壤环境中多环芳烃研究的回顾与展望:基于 Web of Science 大数据的文献计量分析[J]. *土壤学报*,2016,53(5):1085-1096.
- [30] Van Zijl G M, Ellis F, Rozanov A. Understanding the combined effect of soil properties on gully erosion using quantile regression [J]. *South African Journal of Plant and Soil*, 2014,31(3):163-172.
- [31] Ollobarren Del Barrio P, Campo-Bescós M A, Giménez R, et al. Assessment of soil factors controlling ephemeral gully erosion on agricultural fields [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018,43(9):1993-2008.
- [32] 秦高远,周跃,杨黎.切沟侵蚀研究初探:以云南省文山州新开门村为例[J]. *水土保持研究*,2007,14(5):84-86.
- [33] Chaplot V, Brown J, Dlamini P, et al. Rainfall simulation to identify the storm-scale mechanisms of gully bank retreat [J]. *Agricultural Water Management*, 2011,98(11):1704-1710.
- [34] 秦伟,殷哲,曹文洪,等.东北黑土区侵蚀沟系统防治现状与未来[J]. *泥沙研究*,2021,46(3):72-80.
- [35] 刘宝元,阎百兴,沈波,等.东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. *中国水土保持科学*,2008,6(1):1-8.
- [36] 黄玉华,武文英,冯卫,等.陕北延安“7·3暴雨”诱发地质灾害主要类型与特征[J]. *西北地质*,2014,47(3):140-146.
- [37] Yang Bo, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. Soil erosion of unpaved loess roads subjected to an extreme rainstorm event: A case study of the Jiuyuangou watershed on the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2019,16(6):1396-1407.
- [38] Guo Wenzhao, Chen Zhuoxin, Wang Wenlong, et al. Telling a different story: The promote role of vegetation in the initiation of shallow landslides during rainfall on the Chinese Loess Plateau [J]. *Geomorphology*, 2020,350:106879.
- [39] López-Vicente M, Quijano L, Gaspar L, et al. Severe soil erosion during a 3-day exceptional rainfall event: Combining modelling and field data for a fallow cereal field [J]. *Hydrological Processes*, 2015,29(10):2358-2372.
- [40] Prosser I P, Soufi M. Controls on gully formation following forest clearing in a humid temperate environment [J]. *Water Resources Research*, 1998,34(12):3661-3671.
- [41] Yuan Mutian, Zhang Yan, Zhao Yiyang, et al. Effect of rainfall gradient and vegetation restoration on gully initiation under a large-scale extreme rainfall event on the hilly Loess Plateau: A case study from the Wuding River basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,739:140066.

- [42] Tang Jie, Xie Yun, Liu Chuan, et al. Effects of rainfall characteristics and contour tillage on ephemeral gully development in a field in Northeastern China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 218:105312.
- [43] Prosser I P, Slade C J. Gully formation and the role of valley-floor vegetation, Southeastern Australia [J]. *Geology*, 1994, 22(12):1127.
- [44] Stöcker C, Eltner A, Karrasch P. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry: A case study from Andalusia, Spain [J]. *Catena*, 2015, 132:1-11.
- [45] Guan Yabing, Yang Shengtian, Zhao Changsen, et al. Monitoring long-term gully erosion and topographic thresholds in the marginal zone of the Chinese Loess Plateau [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104800.
- [46] Whitford J A, Newham L T H, Vigiak O, et al. Rapid assessment of gully sidewall erosion rates in data-poor catchments: A case study in Australia [J]. *Geomorphology*, 2010, 118(3/4):330-338.
- [47] Yang Dan, Mu Kai, Yang Hui, et al. A study on prediction model of gully volume based on morphological features in the Jinsha dry-hot valley region of southwest China [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(5):300.
- [48] Lentz R, Dowdy R, Rust R. Soil property patterns and topographic parameters associated with ephemeral gully erosion [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1993, 48:354-361.
- [49] Casali J, López J J, Giráldez J V. Ephemeral gully erosion in Southern Navarra (Spain) [J]. *Catena*, 1999, 36(1/2):65-84.
- [50] Nachtergaele J, Poesen J, Steegen A, et al. The value of a physically based model versus an empirical approach in the prediction of ephemeral gully erosion for loess-derived soils [J]. *Geomorphology*, 2001, 40(3/4):237-252.
- [51] 李镇, 齐志国, 秦伟, 等. 利用高分立体影像构建东北黑土山地丘陵区切沟体积估算模型[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(7):122-130.
- [52] 张晟旻, 李浩. 东北黑土区的侵蚀沟治理措施与模式[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(3):221-227.
- [53] 王誉闻. 辽阳市东部山区坡耕地侵蚀沟治理体系探索[J]. *水土保持应用技术*, 2022(4):32-33.
- [54] 孙业欣. 典型黑土区侵蚀沟的综合生态治理实践[J]. *水利科学与寒区工程*, 2022, 5(8):83-86.
- [55] 王磊. 营口市侵蚀沟水土保持综合治理方法及效益分析[J]. *地下水*, 2020, 42(2):208-209.

(上接第 264 页)

- [21] Ren Hongrui, Shang Yingjie, Zhang Shuai. Measuring the spatiotemporal variations of vegetation net primary productivity in Inner Mongolia using spatial autocorrelation [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112:106108.
- [22] 原丽娟, 毕如田, 徐立帅, 等. 沁河流域植被覆盖时空分异特征[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(4):1093-1103.
- [23] 蔡思扬, 左德鹏, 徐宗学, 等. 基于 SPEI 干旱指数的东北地区干旱时空分布特征[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(5):15-21.
- [24] 吴金华, 盛芝露, 杜加强, 等. 1956—2017 年东北地区气温和降水的时空变化特征[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3):340-347.
- [25] 侯光雷, 张洪岩, 郭聃, 等. 长白山区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候因子敏感性[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(3):285-292.
- [26] 刘志锋, 南颖, 胡浩, 等. 2000—2008 年长白山地区植被覆盖变化特征[J]. *西北植物学报*, 2010, 30(2):391-398.
- [27] 张建亮, 刘方正, 崔国发. 长白山国家级自然保护区植被时空变化及其驱动因子[J]. *生态学报*, 2016, 36(12):3525-3536.
- [28] 胡孟珂, 于欢, 孔博, 等. 2001—2020 年嘉陵江流域植被覆盖度时空变化特征[J]. *人民长江*, 2022, 53(1):82-89.
- [29] 王慧, 王兵, 牛香, 等. 长白山森工集团天保工程生态效益动态变化[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(5):86-93.
- [30] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 2000—2014 年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(5):1568-1578.
- [31] 李娟, 龚纯伟. 祁连山国家公园植被覆盖变化地形分异效应[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3):228-237.
- [32] 姚镇海, 吴丹娃, 褚荣浩, 等. 安徽省植被覆盖度动态变化及其对地形的响应[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3):283-290.