

DOI: 10.11766/trxb202002240070

史志华, 刘前进, 张含玉, 王玲, 黄萱, 方怒放, 岳紫健. 近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1117-1127.

SHI Zhihua, LIU Qianjin, ZHANG Hanyu, WANG Ling, HUANG Xuan, FANG Nufang, YUE Zijian. Study on Soil Erosion and Conservation in the Past 10 Years: Progress and Prospects[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1117-1127.

近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望*

史志华¹, 刘前进², 张含玉², 王玲¹, 黄萱³, 方怒放⁴, 岳紫健⁴

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 临沂大学资源与环境学院, 山东临沂 276000; 3. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098; 4. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘 要: 在当今生态文明背景下, 土壤侵蚀与水土保持研究迎来了新的发展机遇和挑战。本文首先采用文献计量学方法, 定量分析了近 10 年来国内外土壤侵蚀与水土保持学科发展现状。在此基础上, 结合社会需求的变化, 阐明了学科发展需求与存在问题。最后, 提出了本学科研究的重点领域与方向: 水文过程与侵蚀产沙机理, 土壤侵蚀过程及其定量模拟, 全球变化下土壤侵蚀演变及其灾变机理, 社会经济系统—水土流失的互馈过程, 以生态功能提升为主的土壤侵蚀防治, 以及土壤侵蚀研究新技术与新方法等。

关键词: 土壤侵蚀; 水土保持; 文献计量; 重点研究领域

中图分类号: S157 **文献标志码:** A

Study on Soil Erosion and Conservation in the Past 10 Years: Progress and Prospects

SHI Zhihua¹, LIU Qianjin², ZHANG Hanyu², WANG Ling¹, HUANG Xuan³, FANG Nufang⁴, YUE Zijian⁴

(1. College of Resources & Environment of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276000, China; 3. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Under the background of ecological civilization, soil erosion and conservation face new opportunities and challenges nowadays. We employed a bibliometric analysis on the research of soil erosion and conservation in the past ten years. The results summarized the research tendency and hotspots, and presented China's main achievements and international status in this field. Considering social needs, we pointed out the main existing problems for scientific researches on soil erosion and conservation. Then, we identified the front scientific issues, including the coupling mechanisms of hydrology and soil erosion, the soil erosion process and modeling, the soil erosion evolution and its catastrophic mechanism under global change, the mutual feedback between socio-economy and soil erosion, the soil conservation for ecological function improvement, and the new technologies and methods for soil erosion research.

* 国家杰出青年科学基金项目 (41525003) 资助 Supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (No. 41525003)

作者简介: 史志华, 男, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持教学和研究工作。E-mail: pengshi@mail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2020-02-24; 收到修改稿日期: 2020-04-28; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-06-04

Key words: Soil erosion; Soil conservation; Bibliometric; Key research issues

土壤侵蚀是土壤及其母质在外营力作用下, 被破坏、分离、搬运和沉积的过程; 水土保持指对外营力造成的土壤侵蚀所采取的预防和治理措施, 以保护水土资源、维持土地生产力, 并建立良好生态环境的综合性科学技术^[1]。土壤侵蚀与水土保持学科以土壤侵蚀过程为研究对象, 揭示其发生发展规律, 提出水土保持措施及相关对策^[2]。随着认识的深入和社会需求的变化, 本学科从对土壤侵蚀现象与影响因子的描述, 拓展到对土壤侵蚀过程、预报模型、水保措施防蚀机理及其适应性的研究, 并逐步延伸至面源污染、物质循环与全球变化等科学问题^[3]。坡面是土壤侵蚀发生的基本单元, 流域是水土保持的基本单元, 因此, 本学科目标是通过主控要素识别和关键过程剖析, 揭示坡面和流域尺度上土壤侵蚀过程的发生发展规律并建立预报模型, 阐明水土保持措施的防蚀机理与其适应性, 提出适用于不同区域的水土保持范式, 为土壤侵蚀评价与防治提供科学依据, 服务于生态文明建设和绿色发展^[4]。本文利用文献计量法, 总结分析了坡面和流域尺度上土壤侵蚀与水土保持学科近 10 年研究的核心方向与热点, 明确了我国取得的主要成就及国际地位, 探讨了未来研究的重点领域与方向, 为有针对性开展土壤侵蚀过程与机理研究、解决水土保持关键技术与瓶颈问题提供参考。

1 学科发展现状

1.1 文献计量研究方法 with 数据来源

本文以 Web of Science (WoS) 数据库核心合集作为数据源, 分别制定坡面和流域尺度上土壤侵蚀与水土保持研究的检索式 $TS = ((\text{"soil erosion"} \text{ or } \text{"soil loss"}) \text{ and } (\text{"hillslope"} \text{ or } \text{"field"} \text{ or } \text{"plot"}))$ 和 $TS = ((\text{"soil erosion"} \text{ or } \text{"soil loss"} \text{ or } \text{sediment}) \text{ and } (\text{watershed} \text{ or } \text{catchment} \text{ or } \text{basin}))$ 。根据上述检索式在 WoS 数据库中检索到近十年 (2010—2019 年) 土壤侵蚀领域分别在坡面和流域尺度上共发表英文文献 6 981 和 7 866 篇。

利用文献可视化软件 CiteSpace 分析文献中的关键词并生成关键词共现网络图谱, 在图谱的基础

上采用综合定量分析方法绘制关键词聚类视图, 展示土壤侵蚀与水土保持领域的研究热点与前沿。图谱中每个节点大小代表关键词出现的影响力, 节点越大代表该关键词出现的次数越多; 节点的颜色代表关键词出现的年份, 不同颜色的粗细代表频率; 节点之间的连线代表两个关键词共现频率的高低, 连线越粗代表共现频率越高^[5]。

1.2 近十年本学科国际研究核心方向与热点

(1) 坡面侵蚀过程与机理。坡面侵蚀研究关注的热点包括土壤侵蚀动力机制与过程模拟、土壤侵蚀与物质迁移、土壤侵蚀与气候变化以及风蚀机理与防治 (图 1)。雨滴打击可直接分散土壤颗粒, 也可通过改变径流能量影响土壤分离过程; 土壤分离与输移过程存在线性互馈机制, 其中利用水流剪切力、水流功率等表征水动力学特性, 土壤抗蚀性与临界剪切力刻画土壤抗蚀性, 挟沙力描述输沙能力^[6]。降雨能量越大, 土壤分离出泥沙中的细颗粒含量越高, 可吸附更多的养分与污染物^[7]; 侵蚀泥沙呈现双峰分布, 悬移-跃移和推移搬运机制在不同粒径泥沙颗粒上的贡献率有所差异^[8-9], 可导致土壤养分、农药、重金属等物质随径流泥沙运移的形态与途径不同。土壤侵蚀驱动下, 碳氮元素转化以及温室气体排放均可能影响全球气候变化, 但影响程度随降雨、地形、植被、土壤、人为管理等不同而异^[10-11]。气候变化则可通过改变降雨径流、植被覆盖和人类活动直接或间接地影响侵蚀过程; 气候变化模式与土壤侵蚀模型耦合, 可预测未来土壤侵蚀的变化与碳循环响应, 及其对气候变化的反馈^[12-13]。风沙流中沙粒的水平速度均服从 Gaussian 分布, 风速、颗粒粒径是影响跃移沙粒平均速度的重要因子^[14], 而输沙率主要受到颗粒含水率、范德华力、风沙电场等因素的控制^[15]。保护性耕作措施的推广、地表植被建设、沙障布设等措施可在一定程度上抑制风蚀危害^[16]。借助风能示踪技术, 结合全球气候变化, 有助于风蚀模拟预报与风蚀防治^[17]。

(2) 流域侵蚀产沙过程。流域侵蚀产沙关注的核心方向包括侵蚀产沙与景观要素、侵蚀与产沙耦合机制、侵蚀产沙过程模拟以及现代新技术应用 (图 2)。降雨作为侵蚀产沙的驱动因子, 其强度、

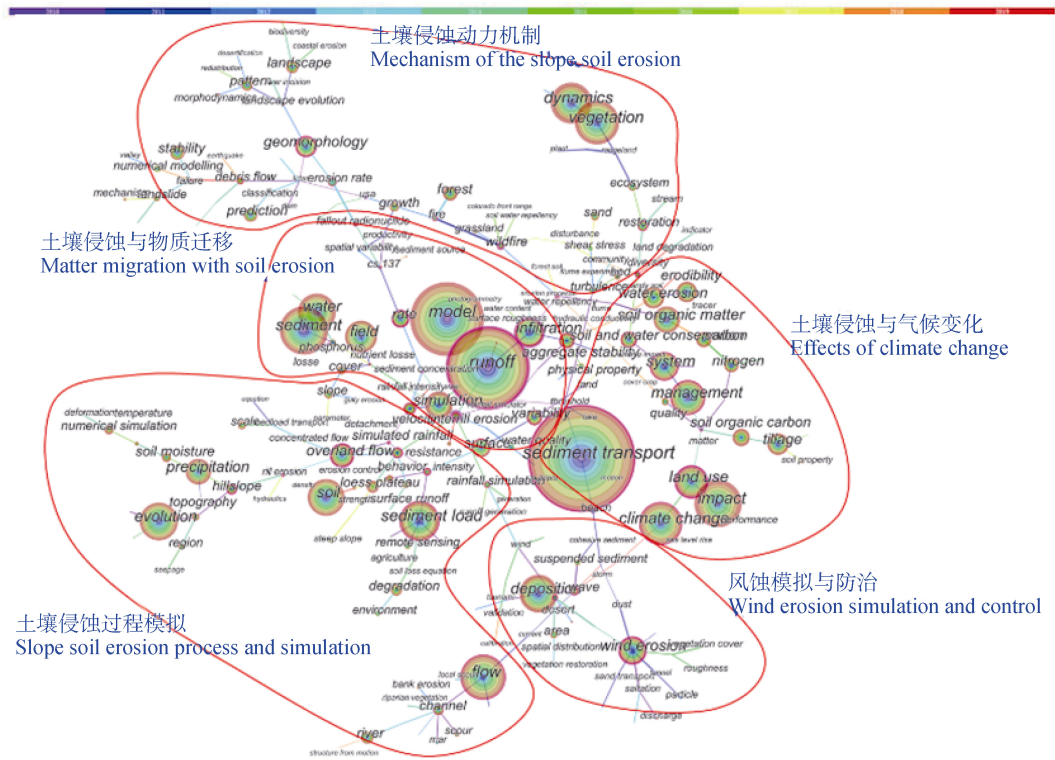


图 1 坡面侵蚀过程与机理相关论文关键词共现关系图
 Fig. 1 The network map of slope soil erosion process and mechanism

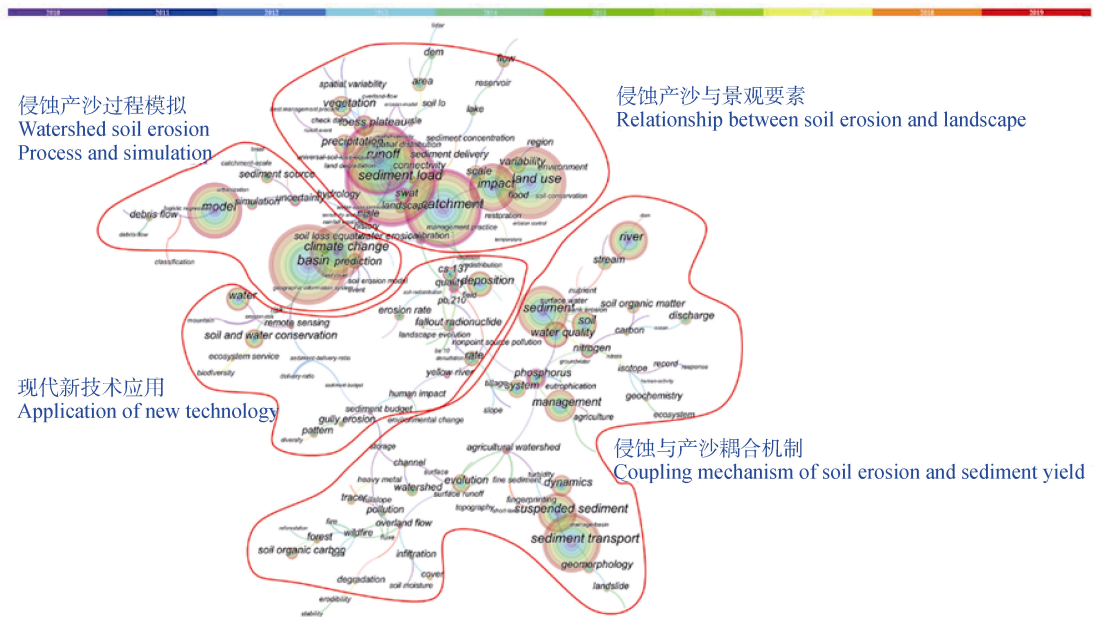


图 2 流域侵蚀产沙过程相关论文关键词共现关系图
 Fig. 2 The network map of watershed soil erosion and sediment yield

历时、时空分布等特征对流域侵蚀产沙具有决定性作用^[18-19]。流域地形决定了地表径流的汇流路径，影响径流速度、汇水来源^[20]；植被影响地表反射率、下垫面粗糙度和水分交换，在多个层次上改变降雨

径流，导致侵蚀产沙过程的变化^[21]。土地利用通过改变植被覆盖、土壤性质、径流速率、地形条件等，引起侵蚀发生及泥沙拦截能力的变化，进而影响侵蚀产沙^[22]。景观异质性会使侵蚀产沙具有复杂的多

尺度变异性,将流域作为一个完整的生态系统,量化流域侵蚀与产沙量的关系,可揭示景观格局对径流和泥沙的作用机制^[23]。将侵蚀产沙作为一个生态过程,建立不同尺度上流域景观与侵蚀产沙过程的关系,利用水文连通性、源汇相对沟口耗费距离等方法,揭示降雨—径流—侵蚀产沙过程及滞后机制,初步实现流域侵蚀产沙系统的综合集成^[24]。采用水流挟沙力公式、泥沙连续方程等,建立注重水沙汇流的侵蚀产沙模型,可深化土壤侵蚀过程与机理的研究,并发现流域侵蚀-输移-产沙系统中的泥沙汇集传递过程及其机制仍有待深入^[25]。技术的发展将推动学科的进步,生物标志物、红外光谱、核素等技术被广泛用于泥沙输移过程和泥沙来源辨识研究,提高了流域侵蚀源区的解析精度^[26];激光雷达和高时空分辨率遥感技术,可实现地表数据的精细化表达,增强土壤侵蚀模拟与可视化^[27]。

1.3 中国土壤侵蚀与水土保持研究主要成就及国际地位

(1) 坡面侵蚀过程与机理。通过分析近十年国际 SCI 发文情况可知(表 1),我国 2010—2019 年在坡面侵蚀过程与机理研究领域共发表 SCI 论文 1 515 篇,世界排名第二;SCI 论文篇均被引约 8 次,排名第四十;高被引 SCI 论文数量为 9 篇,排名第八。总体而言,虽然我国 SCI 发文数量较多,但高质量 SCI 论文仍然较少,主要研究成果集中在坡面侵蚀形态演变的临界条件、陡坡坡面流挟沙力方程、陡坡侵蚀的泥沙分选机理和坡面水土保持措施分类系统四个方面。坡面在降雨径流作用下,发生溅蚀、片蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀、切沟侵蚀等,不同侵蚀过程交互作用导致侵蚀形态发生演变。借助 REE 示踪技术、三维激光扫描技术、激光雷达技术等,揭示了片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀演变过程^[28-29],探讨了侵蚀形态间发生演变的临界阈值^[30],明确了重力作用对细沟发育的重要性^[31],发展了沟蚀发育过程模型^[32-34]。我国 46%的坡耕地坡度大于 15°,陡坡是侵蚀的重要来源,因此我国在陡坡侵蚀研究方面成果突出:实现了坡面流挟沙力与水动力学参数关系的定量表征,构建了陡坡高含沙条件下的坡面流挟沙力方程^[6, 35-36];基于侵蚀泥沙颗粒分布特性,发现了陡坡侵蚀中细颗粒以悬移/跃移方式搬运,粗颗粒以滚动方式搬运,明确了滚动搬运在陡坡泥沙输移中的重要性,揭示了陡坡侵蚀的泥沙分

选机理^[8, 37]。同时,我国水土保持措施多样,在充分总结不同措施防蚀机理及其区域适宜性的基础上,提出了中国水土保持措施分类系统^[38],包括生物措施、工程措施和耕作措施 3 个一级类型,以及 32 个二级类型和 59 个三级类型,成为土壤侵蚀普查和防控的重要基础。

(2) 流域侵蚀产沙过程。近十年我国在流域侵蚀产沙过程研究领域发表 SCI 论文数量为 1 494 篇,居世界第二;SCI 论文引用量约为 11 次/篇,排名世界第三十四;高被引论文数量为 11 篇,排名第三(表 2)。相比坡面尺度的研究,我国在流域尺度的研究成果国际影响力更大,在流域侵蚀产沙主控因子识别、侵蚀过程降雨—径流—泥沙的滞后机理、水蚀区水保措施的适宜性和水土流失综合调控与治理范式方面取得重要进展。地形、土壤、植被、降雨等是影响流域侵蚀产沙的重要环境因子,鉴于各因子存在非线性复杂关系,我国学者综合运用非度量多维尺度和偏最小二乘回归,揭示了土地利用和景观格局对侵蚀产沙的重要贡献,辨识了景观多样性指数、聚集度、连结度、斑块密度等影响流域产沙的关键景观格局指数^[23, 39],实现了流域侵蚀产沙对环境因子响应的定量表征^[40-42];揭示了不同降雨下侵蚀“源汇”功能转化对降雨—径流—泥沙滞后的作用机制^[24, 43],建立了流域气候-人类活动-水沙过程复杂系统的解耦方法^[44-45],定量分离了气候变化和人类活动对土壤侵蚀的影响^[46]。在流域土壤侵蚀防控方面,基于我国主要水蚀区的土壤侵蚀特点,综合评估了耕作、生物、工程三大措施的防蚀机理,提出了东北黑土区、西北黄土区、西南紫色土区等水蚀区的土壤侵蚀综合调控与治理范式,成为全世界小流域综合治理的典范^[47]。

2 土壤侵蚀与水土保持研究的社会需求与面临的问题

2.1 社会需求

近十年来,全球土地利用变化导致土壤侵蚀总量增加 2.5%,土壤流失速率高于成土速率 1~2 个数量级,土壤侵蚀仍是土壤退化的主导因素^[48-49]。我国通过大规模实施生态工程,土壤侵蚀呈现出面积持续减少、强度明显下降等特点。联合国提出的 2030 年可持续发展目标(SDGs),强调严格控制土

表 1 近十年“坡面侵蚀过程与机理”方向发表 SCI 论文数及被引频次 TOP10 国家

排序 Ranking	SCI 论文数量 (篇) Number of total articles	SCI 论文篇均被引 (次/篇) Average number of citations per articles					高被引 SCI 论文数量 (篇) Number of highly cited articles				
		2010—2019		2010—2014		2015—2019	2010—2019		2010—2014		2015—2019
		国别 (地区) Country/region		国别 (地区) Country/region		国别 (地区) Country/region	国别 (地区) Country/region		国别 (地区) Country/region		国别 (地区) Country/region
	6 981	3 055	3 926	11.43	18.92	5.61	58	22	36	世界	
1	1 996	932	1 064	21.56	30.13	13.00	17	7	10	美国	
2	1 515	476	1 039	19.32	30.99	8.78	17	2	15	西班牙	
3	605	264	341	19.13	30.66	12.10	15	3	12	荷兰	
4	537	255	282	18.65	28.66	11.09	14	4	10	德国	
5	470	222	248	18.48	25.26	11.35	10	6	4	英国	
6	465	206	259	18.25	28.38	9.47	10	6	4	法国	
7	383	141	242	17.34	23.97	12.06	10	3	7	意大利	
8	343	155	188	16.16	26.04	7.31	9	3	6	中国	
9	331	142	189	15.16	25.20	9.31	8	2	6	瑞士	
10	301	114	187	7.76 (40)*	15.28 (25)	4.31 (45)	7	2	5	澳大利亚	

表 2 近十年“流域侵蚀产沙过程”方向发表 SCI 论文数及被引频次 TOP10 国家

Table 2 Top 10 productive and most-cited countries of watershed soil erosion and sediment yield during last decade

排序 Ranking	SCI 论文数量 (篇)				SCI 论文篇均被引 (次/篇)				高被引 SCI 论文数量 (篇)			
	Number of total articles				Average number of citations per articles				Number of highly cited articles			
	2010—2019	2010—2014	2015—2019	2010—2014	2015—2019	2010—2019	2010—2014	2015—2019	2010—2019	2010—2014	2015—2019	
国别 (地区) Country/region	国别 (地区) Country/region				国别 (地区) Country/region				国别 (地区) Country/region			
	世界	7 866	3 466	4 400	世界	12.50	20.76	7.35	世界	54	24	30
1	美国	2 094	930	1 164	威尔士	30.14	45.95	8.53	美国	19	12	7
2	中国	1 494	540	954	立陶宛	27.18	70.00	11.13	英国	11	6	5
3	英国	654	309	345	冰岛	26.91	36.52	2.00	中国	11	5	6
4	德国	629	292	337	卢森堡	20.73	29.14	6.00	西班牙	10	1	9
5	法国	579	274	305	苏格兰	19.74	31.09	8.88	德国	6	2	4
6	澳大利亚	478	204	274	比利时	19.00	31.27	8.50	伊朗	5	0	5
7	西班牙	460	192	268	瑞士	18.50	30.63	7.16	意大利	5	2	3
8	意大利	438	190	248	新加坡	18.26	30.00	8.87	威尔士	4	4	0
9	加拿大	404	177	227	英国	18.12	28.10	11.12	荷兰	3	0	3
10	印度	322	139	183	中国 (34)*	11.45 (34)	21.54 (27)	6.74 (28)	比利时	2	1	1

地退化以保障粮食安全，关注水土保持生态系统服务以促进陆地生态系统可持续发展。可见，传统的以保障粮食安全为目标的土壤侵蚀防治依旧是研究重点，同时提出了以生态功能提升为目标的土壤侵蚀防治新需求。因此，土壤侵蚀治理重心应从综合治理转向生态调控，以提升生态功能为主，寻求土壤侵蚀防治与农业高效生产、环境可持续发展的协同途径，为国家生态文明建设提供科学依据^[4, 33, 47]。

2.2 面临的问题

在新侵蚀环境与社会需求下，本学科面临诸多问题。侵蚀过程与机理方面：试验技术手段限制导致薄层水流流速、流量等难以准确测定，水分入渗、蒸散等难以适时确定；流域景观异质性引起的坡面侵蚀与流域产沙间非线性变化规律和作用机制仍不清楚；针对我国复杂侵蚀环境下的土壤侵蚀过程及相应机制尚不明晰^[50-52]。水土保持措施配置方面：水土保持防蚀理论滞后于实践；规模化农业开发中生态、生产与生活功能协同运行机制不完善；植被地下部分对侵蚀的调控机理仍不明确，植被重建过程中物种的选择、配置仍是难点；水保措施防蚀效果的变化规律及其影响因素仍不清楚^[4, 53]。区域或全球尺度侵蚀现状评估方面：不同尺度下选择的方法与数据及其理论基础缺少标准与规范；提高评价精度的技术与方法体系不健全^[54-55]。

3 土壤侵蚀与水土保持科学研究的重点领域

3.1 水文过程与侵蚀产沙机理

降雨和径流为侵蚀产沙过程提供了能量与载体。因此，对坡面-流域尺度上的水文过程及其机制的深入认识，有助于理解侵蚀产沙机理。降雨产流水文过程及机制经由产流阈值、可变源区发展至新近提出的水文连通性，侵蚀产沙过程相应地从泥沙输移比、侵蚀源与沉积汇提升至坡面与沟道连续系统等方面予以解析与模拟^[56-57]，关注的重点从将坡面或流域作为一个黑箱、“坡面+沟道”模式发展至完整的流域系统。基于水文连通性的侵蚀产沙机理，强调在土壤颗粒或团聚体尺度上分离出的泥沙，以径流为载体，跨越土体、坡面、流域等多个尺度，形成流域产沙的完整过程^[58]。重点研究：不同尺度

下水文过程与侵蚀—搬运—沉积的级联效应；水文连通性对流域侵蚀产沙影响机理及其过程模拟。

3.2 土壤侵蚀过程及其定量模拟

土壤侵蚀过程具有独特的水/土界面物理化学相互作用机制，以及侵蚀地表形态和环境要素协同演化规律。目前虽然对植被截留、土壤入渗、地表产汇流、侵蚀输沙、搬运沉积等物理过程进行了表达，但植被截留、土壤入渗过程表达的适用范围受植被类型、土壤环境等因素的限制；坡面薄层流特性定量表征及动力过程的解析，仍主要沿用明渠水力学等邻近学科的理论与方法；风沙两相流的相互作用机制及其传输过程，主要依赖经典力学和流体力学予以解析与模拟，学科理论体系尚不完善。重点研究：含沙水流的水动力学关键参数与临界条件，风沙流动力学特征及沙粒运动过程与机制，重力侵蚀与崩岗发生的力学机制与条件；高海拔寒区融水侵蚀机理与过程模拟，多重外力复合侵蚀过程与模拟；流域侵蚀—输移—产沙系统中的泥沙汇集传递过程及其机制等。

3.3 全球变化下土壤侵蚀演变及其灾变机理

气候变化改变了降水、温度的时空格局，并使地表覆被与人类活动发生响应^[59]。变化的降水特性和地表覆被格局，在时空耦合过程中增加了土壤侵蚀过程的不确定性和灾变风险；土地利用格局优化、退化生态系统恢复重建等应对气候变化的人类活动，则可通过改变陆面的土壤、地理与生态过程作用于土壤侵蚀过程。同时，侵蚀泥沙搬运过程可使全球生源要素（C、N、P、S）循环发生变化，进而影响全球气候变化。土壤侵蚀过程与全球气候变化存在互馈机制。重点研究：极端气候事件对侵蚀过程影响机制及其不确定性；全球变化情势下土壤侵蚀灾变阈值及调控对策；土壤侵蚀对碳“源”、“汇”时空格局的影响；气候变化下土壤侵蚀发生发展趋势的情景模拟。

3.4 社会经济系统——土壤侵蚀的互馈过程机理

土壤侵蚀受自然和社会经济两个方面因素的共同作用，而社会经济活动及政策对土壤侵蚀具有加剧与控制的双重作用。但自然要素构成的生态网络与社会经济资本、信息等构成的社会网络存在空间上的错位^[60]。由于社会—生态网络空间错位，土壤侵蚀驱动因素的非线性作用更为复杂，水土资源利用和水土流失治理出现市场失灵。客观上需要政府

从全社会的利益出发,在资源配置和利益分配上起到协调作用。重点研究:社会—生态网络结构与功能;农业与非农产业发展对土壤侵蚀的驱动机制与作用路径;社会—生态网络空间错位对水土流失治理的影响机理;水土保持成本与效益的空间异置与利益权衡。

3.5 以生态功能提升为主的土壤侵蚀防治

在生态文明建设背景下,提升生态功能已成为继流域综合治理之后土壤侵蚀防治的新需求。其注重生态系统的整体性与长期性,统筹流域及区域的空间分异与功能分区,基于生态系统的功能与服务,融合使用包括综合治理在内多种土壤侵蚀防治措施、高效农业技术与流域及区域管理策略,对侵蚀泥沙的物质流、能量流与功能流进行生态调控,实现农业生产的高效和环境的可持续^[4]。重点研究:以生态系统服务功能提升为核心的多尺度土壤允许流失量阈值确定;水土保持措施布局整体性优化;土壤多样性对水土保持措施配置的影响机理;水土保持与生态系统功能的权衡与协同机制;土壤侵蚀防治过程中物质、能量和信息流演变规律及模拟。

3.6 土壤侵蚀研究新技术与新方法

试验技术与方法的进步可为土壤侵蚀过程与动力机制研究、侵蚀模型建立与验证提供精确数据与稳健算法。目前试验设备、观测技术与数据处理方法受到诸多限制。人工模拟降雨的雨滴滴谱、终点速度与天然降雨具有一定差异;坡面薄层水流的三维、非均匀与非恒定性,不同于所借鉴的明渠水动力学条件^[18-9, 35];缺少从土壤结构稳定性等物理化学层面表征土壤抗蚀性的参数与方法;生物标志物、氢氧同位素、核素示踪及红外光谱等用于识别径流与泥沙来源具有时效性或非稳定性局限^[61]。重点研究:薄层水流流速、水深等参数测量技术与设备的研发;土壤结构力学性质测量仪器与方法的改进及其对侵蚀过程量化;径流泥沙来源示踪、低空无人飞行器遥感监测、人工智能与机器学习等技术在土壤侵蚀研究中的应用;区域与全球尺度水土流失动态监测的大数据分析与云网络服务平台建设。

4 结论与展望

近 10 年国际上对土壤侵蚀与水土保持研究,重点关注水蚀与风蚀动力机制、坡面侵蚀-流域产沙

过程与物质迁移响应、气候变化与土壤侵蚀互馈机制,以及新方法新技术的建立与应用。我国针对陡坡侵蚀与流域景观破碎的复杂侵蚀环境,识别出了坡面与流域侵蚀产沙主控因子,阐明了土壤分离与输沙过程的动力机制与滞后机理,凝练了主要水蚀区水土流失综合调控与治理范式。目前传统的以保障粮食安全为目标的土壤侵蚀防治依旧是研究重点,同时提出了以生态功能提升为目标的土壤侵蚀防治新热点。

基于试验技术手段限制产流产沙过程准确测定、坡面侵蚀与流域产沙间非线性关系、水土保持防蚀理论研究落后于实践、区域或全球尺度侵蚀评估缺少数据与方法支持等问题,提出了本学科应注重以下研究内容:流域侵蚀产沙过程的级联效应,及其对水文连通性的响应与模拟;水蚀、风蚀、重力侵蚀、融水侵蚀及复合侵蚀过程中的动力学机制,特别是水蚀过程中径流携沙汇集传递过程与机理;全球变化对土壤侵蚀过程与碳“源汇”时空格局的影响与模拟,以及土壤侵蚀灾变阈值与调控对策;农业与非农产业发展过程中土壤侵蚀变化机制、社会—生态网络结构空间错位对水土流失治理成本与效益的影响机理;基于生态系统服务功能提升,确定多尺度土壤允许流失量阈值、优化布局水土保持措施配置、明确物质、能量和信息流演变规律及模拟;研发土壤侵蚀过程监测设备、发展复合指纹示踪与机器学习等技术与方法、注重大数据分析与云网络服务平台建设。

参考文献 (References)

- [1] Morgan R P C. Soil erosion & conservation [M]. 3rd ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005.
- [2] Leng S Y, Feng R G, Li R, et al. Key research issues of soil erosion and conservation in China[J]. Journal of Soil Water and Conservation, 2004, 18 (1): 1—6, 26. [冷疏影, 冯仁国, 李锐, 等. 土壤侵蚀与水土保持科学重点研究领域与问题[J]. 水土保持学报, 2004, 18 (1): 1—6, 26.]
- [3] Shi Z H, Song C Q. Water erosion processes: A historical review[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30 (5): 1—10. [史志华, 宋长青. 土壤水蚀过程研究回顾[J]. 水土保持学报, 2016, 30 (5): 1—10.]
- [4] Shi Z H, Wang L, Liu Q J, et al. Soil erosion: From comprehensive control to ecological regulation[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33 (2): 198—205. [史志华, 王玲, 刘前进, 等. 土壤侵蚀: 从

- 综合治理到生态调控[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33 (2): 198—205.]
- [5] Zhao R Y, Xu L M. The knowledge map of the evolution and research frontiers of the bibliometrics[J]. *Journal of Library Science in China*, 2010, 36 (5): 60—68. [赵蓉英, 许丽敏. 文献计量学发展演进与研究前沿的知识图谱探析[J]. *中国图书馆学报*, 2010, 36(5): 60—68.]
- [6] Zhang G H, Shen R C, Luo R T, et al. Effects of sediment load on hydraulics of overland flow on steep slopes[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35 (15): 1811—1819.
- [7] Shi P, Schulin R. Erosion-induced losses of carbon, nitrogen, phosphorus and heavy metals from agricultural soils of contrasting organic matter management[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 210—218.
- [8] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 454/455: 123—130.
- [9] Wang L, Shi Z H, Wang J, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 512: 168—176.
- [10] Worrall F, Burt T P, Howden N J K. The fluvial flux of particulate organic matter from the UK: The emission factor of soil erosion[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41 (1): 61—71.
- [11] Berhe A A, Harden J W, Torn M S, et al. Linking soil organic matter dynamics and erosion-induced terrestrial carbon sequestration at different landform positions[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, 113 (G4): <https://doi.org/10.1029/2008jg000751>.
- [12] Mullan D. Soil erosion under the impacts of future climate change: Assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems[J]. *Catena*, 2013, 109: 234—246.
- [13] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' program: A synthesis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20 (11): 3544—3556.
- [14] Panebianco J E, Buschiazzo D E, Zobeck T M. Comparison of different mass transport calculation methods for wind erosion quantification purposes[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35 (13): 1548—1555.
- [15] Youssef F, Visser S M, Karssenberg D, et al. The effect of vegetation patterns on wind-blown mass transport at the regional scale: A wind tunnel experiment[J]. *Geomorphology*, 2012, 159/160: 178—188.
- [16] Munson S M, Belnap J, Okin G S. Responses of wind erosion to climate-induced vegetation changes on the Colorado Plateau[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108 (10): 3854—3859.
- [17] Wang Z T, Lai Z P, Qu J J. Inverted relief landforms in the Kumtagh Desert of northwestern China: A mechanism to estimate wind erosion rates[J]. *Geological Journal*, 2017, 52 (1): 131—140.
- [18] Bangash R F, Passuello A, Sanchez-Canales M, et al. Ecosystem services in Mediterranean river basin: Climate change impact on water provisioning and erosion control[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 458/459/460: 246—255.
- [19] Lu X X, Ran L S, Liu S, et al. Sediment loads response to climate change: A preliminary study of eight large Chinese Rivers[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2013, 28 (1): 1—14.
- [20] Bracken L J, Wainwright J, Ali G A, et al. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 119: 17—34.
- [21] Ran L S, Lu X X, Xu J C. Effects of vegetation restoration on soil conservation and sediment loads in China: A critical review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2013, 43 (13): 1384—1415.
- [22] Fiener P, Auerswald K, van Oost K. Spatio-temporal patterns in land use and management affecting surface runoff response of agricultural catchments—A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 106 (1/2): 92—104.
- [23] Shi Z H, Ai L, Li X, et al. Partial least-squares regression for linking land-cover patterns to soil erosion and sediment yield in watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 498: 165—176.
- [24] Fang N F, Shi Z H, Li L, et al. Rainfall, runoff, and suspended sediment delivery relationships in a small agricultural watershed of the Three Gorges area, China[J]. *Geomorphology*, 2011, 135 (1/2): 158—166.
- [25] Chen F X, Fang N F, Wang Y X, et al. Biomarkers in sedimentary sequences: Indicators to track sediment sources over decadal timescales[J]. *Geomorphology*, 2017, 278: 1—11.
- [26] Vercruyse K, Grabowski R C, Rickson R J. Suspended sediment transport dynamics in Rivers: Multi-scale drivers of temporal variation[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 166: 38—52.
- [27] Croke J, Todd P, Thompson C, et al. The use of multi temporal LiDAR to assess basin-scale erosion and deposition following the catastrophic January 2011 Lockyer flood, SE Queensland, Australia[J]. *Geomorphology*, 2013, 184: 111—126.
- [28] Zhang P, Sun W Y, Tang H W, et al. Advances in morphological evolution and quantitative study of rill on

- hillslope[J]. *Journal of Sediment Research*, 2017, 42(1): 68—72. [张攀, 孙维营, 唐洪武, 等. 坡面细沟侵蚀形态演变与量化研究评述[J]. *泥沙研究*, 2017, 42(1): 68—72.]
- [29] He J J, Li X J, Jia L J, et al. Experimental study of rill evolution processes and relationships between runoff and erosion on clay loam and loess[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(5): 1716—1725.
- [30] Zhang Y D, Wu S F, Feng H, et al. Experimental study of rill dynamic development process and its critical dynamic conditions on loess slope[J]. *Journal of Sediment Research*, 2013, 38(2): 25—32. [张永东, 吴淑芳, 冯浩, 等. 黄土陡坡细沟侵蚀动态发育过程及其发生临界动力条件试验研究[J]. *泥沙研究*, 2013, 38(2): 25—32.]
- [31] Han P, Ni J R, Hou K B, et al. Numerical modeling of gravitational erosion in rill systems[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2011, 26(4): 403—415.
- [32] Zheng F L, Xu X M, Qin C. A review of gully erosion process research[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 48—59, 116. [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, 116.]
- [33] Li R. Research into soil erosion processes and control in major water erosion regions of China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(5): 1—6. [李锐. 中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(5): 1—6.]
- [34] Ma X L, Zhang K D, Yang F, et al. Influencing factor analysis of rill erosion section morphology development on slope and its dynamic characteristic experiment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(4): 209—216. [马小玲, 张宽地, 杨帆, 等. 坡面细沟侵蚀断面形态发育影响因素分析及动力特性试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(4): 209—216.]
- [35] Zhang G H. Several understandings for sediment transport capacity by overland flow[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(2): 151—158. [张光辉. 对坡面径流挟沙力研究的几点认识[J]. *水科学进展*, 2018, 29(2): 151—158.]
- [36] Zhang G H, Wang L L, Tang K M, et al. Effects of sediment size on transport capacity of overland flow on steep slopes[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2011, 56(7): 1289—1299.
- [37] Wang L, Fang N F, Yue Z J, et al. Raindrop size and flow depth control sediment sorting in shallow flows on steep slopes[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(12): 9978—9995.
- [38] Liu B Y, Liu Y N, Zhang K L, et al. Classification for soil conservation practices in China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2): 80—84. [刘宝元, 刘瑛娜, 张科利, 等. 中国水土保持措施分类[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 80—84.]
- [39] Shi Z H, Huang X D, Ai L, et al. Quantitative analysis of factors controlling sediment yield in mountainous watersheds[J]. *Geomorphology*, 2014, 226: 193—201.
- [40] Liu Y. Effectiveness of landscape metrics in coupling soil erosion with landscape pattern[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(15): 4923—4935. [刘宇. 景观指数耦合景观格局与土壤侵蚀的有效性[J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 4923—4935.]
- [41] Gao G Y, Fu B J, Lü Y H, et al. The effect of land cover pattern on hillslope soil and water loss in the arid and semi-arid region: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 12—22. [高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 12—22.]
- [42] Yan B, Fang N F, Zhang P C, et al. Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: An assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 484: 26—37.
- [43] Huang X, Fang N F, Zhu T X, et al. Hydrological response of a large-scale mountainous watershed to rainstorm spatial patterns and reforestation in subtropical China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 1083—1093.
- [44] Miao C Y, Ni J R, Borthwick A G L, et al. A preliminary estimate of human and natural contributions to the changes in water discharge and sediment load in the Yellow River[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 76(3/4): 196—205.
- [45] Huang X, Fang N F, Shi Z H, et al. Decoupling the effects of vegetation dynamics and climate variability on watershed hydrological characteristics on a monthly scale from subtropical China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 279: 14—24.
- [46] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38—41.
- [47] Cai Q G, Zhu A X, Bi H X. Comprehensive regulation and control paradigm of soil and water loss in Chinese main water erosion areas[M]. Beijing: Science Press, 2012. [蔡强国, 朱阿兴, 毕华兴. 中国主要水蚀区水土流失综合调控与治理范式[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.]
- [48] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, et al. Soil and human security in the 21st century[J]. *Science*, 2015, 348(6235): 1261071.
- [49] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1—13.

- [50] Poesen J. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43 (1): 64—84.
- [51] Fressard M, Cossart E. A graph theory tool for assessing structural sediment connectivity : Development and application in the Mercurey vineyards (France) [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651 : 2566—2584.
- [52] Gao G Y, Fu B J, Zhang J J, et al. Multiscale temporal variability of flow-sediment relationships during the 1950s-2014 in the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 609—619.
- [53] Omidvar E, Hajizadeh Z, Ghasemieh H. Sediment yield, runoff and hydraulic characteristics in straw and rock fragment covers[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 194: 104324.
- [54] Batista P V G, Davies J, Silva M L N, et al. On the evaluation of soil erosion models : Are we doing enough?[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 197: 102898.
- [55] Xiong M Q, Sun R H, Chen L D. A global comparison of soil erosion associated with land use and climate type[J]. *Geoderma*, 2019, 343: 31—39.
- [56] de Vente J, Poesen J, Verstraeten G, et al. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand?[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 127: 16—29.
- [57] Liu J T, Han X L, Liu J L, et al. Understanding of critical zone structures and hydrological connectivity: A review[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30 (1): 112—122. [刘金涛, 韩小乐, 刘建立, 等. 山坡表层关键带结构与水文连通性研究进展[J]. *水科学进展*, 2019, 30 (1): 112—122.]
- [58] Keesstra S, Nunes J P, Saco P, et al. The way forward: Can connectivity be useful to design better measuring and modelling schemes for water and sediment dynamics?[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644 : 1557—1572.
- [59] Li Z Y, Fang H Y. Impacts of climate change on water erosion: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 163: 94—117.
- [60] Sayles J S, Baggio J A. Social-ecological network analysis of scale mismatches in estuary watershed restoration[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114 (10) : E1776-E1785. <https://doi.org/10.1073/pnas.1604405114>.
- [61] Collins A L, Williams L J, Zhang Y S, et al. Sources of sediment-bound organic matter infiltrating spawning gravels during the incubation and emergence life stages of salmonids[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 196: 76—93.

(责任编辑：檀满枝)