

DOI: 10.11766/trxb201906030237

张宇婷, 肖海兵, 聂小东, 李忠武, 邓楚雄, 周咪, 刘俊宇. 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, LI Zhongwu, DENG Chuxiong, ZHOU Mi, LIU Junyu. 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.

基于文献计量分析的近 30 年国内外土壤侵蚀研究进展^{*}

张宇婷¹, 肖海兵², 聂小东¹, 李忠武^{1†}, 邓楚雄¹, 周咪¹, 刘俊宇¹

(1. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 通过文献计量学可视化分析方法客观评价土壤侵蚀研究发展进程, 了解国内外土壤侵蚀研究发展前沿, 从而推动我国土壤侵蚀研究的发展。采用 CiteSpace 软件和文献计量学方法, 以 Web of Science 数据库核心合集和中国知网 (CNKI) 数据库核心期刊为数据源, 分析了近 30 年国内外土壤侵蚀研究的发展历程。研究发现国际土壤侵蚀研究在 1992—2000 年间以土壤侵蚀与土地生产力关系及评价方法的研究为重点, 进而发展为注重气候变化与侵蚀的相互影响、土壤侵蚀量的精确估算以及大尺度宏观侵蚀研究; 而我国土壤侵蚀研究受国家政策导向明显, 在 1992—2000 年间是以经济效益为重点的土壤侵蚀治理研究; 逐渐发展为结合 GIS 和遥感, 以生态建设和可持续发展为核心的问题导向研究; 近十年来, 土壤侵蚀研究以 RUSLE 等模型研究为主, 更注重土地利用、坡度等影响因素和土壤侵蚀关系的研究。最后, 通过对比分析近 30 年国内外土壤侵蚀研究的热点和前沿, 提出我国土壤侵蚀研究今后的发展方向。

关键词: 土壤侵蚀; CiteSpace; 网络图谱分析; 文献计量分析

中图分类号: S157 文献标志码: A

Evolution of Research on Soil Erosion at Home and Abroad in the Past 30 Years—Based on Bibliometric Analysis

ZHANG Yuting¹, XIAO Haibing², NIE Xiaodong¹, LI Zhongwu^{1†}, DENG Chuxiong¹, ZHOU Mi¹, LIU Junyu¹

(1. College of Resources and Environmental Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 2. College of Resources and Environmental Science, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The use of visualized bibliometric analysis helps evaluate objectively advancement of the research on soil erosion, which in turn promotes knowledge about frontiers of the research at home and abroad, thus pushing the research fast forwards in China. With the aid of the CiteSpace software, bibliometric analysis was performed of the data cited from the Web of Science and CNKI (China National Knowledge Infrastructure) for history of the advancement of the researches on soil erosion, both at home and abroad in the recent three decades. For the convenience of analysis, the time period set for the study was divided into three phases (1992—2000, 2001—2009 and 2010—2018). It was found that the researches on soil erosion the world over focused

* 国家重点研发计划项目 (2017YFC0505401) 和国家自然科学基金项目 (41807069) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0505401) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41807069)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lzw17002@hunnu.edu.cn

作者简介: 张宇婷 (1995—), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与碳循环方面研究。E-mail: zyt_hunnu@163.com

收稿日期: 2019-06-03; 收到修改稿日期: 2019-08-29; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-10-29

firstly on relationship between soil erosion and land productivity and its evaluation methods and then turned towards interactions between climate change and soil erosion, accurate estimation of soil erosion, as well as large scale macroscopic research on soil erosion during the phase of 1992—2000. As the research in the country was getting more and more policy-oriented, the phase of 2001—2009 witnessed foci of the research being shifted to laws of soil and water conservation and economic benefits-pivoted soil erosion control, and gradually towards ecological construction and sustainable development as the core issues and application of GIS and remote-sensing to the researches in this field. In the last phase of 2010—2018, eyes of the researcher focused on RUSLE and other models, especially for relationship of soil erosion with land use, slope and some other influencing factors. Finally, based on comparison between the three phases in focus and frontier of the soil erosion researches at home and abroad, the paper put forth directions for future researches on soil erosion in China.

Key words: Soil erosion; CiteSpace; Network map analysis; Bibliometric analysis

随着经济社会和城市化建设的快速发展，人类对水土资源不合理开发利用造成了严重的水土流失，不仅导致土壤质量下降、生态环境恶化，还严重威胁了区域农业经济的可持续发展。据估算，全球水土流失面积约 1 643 万 km²，占地表总面积的 10.95%^[1-3]。中国是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一。根据 2002 年全国土壤侵蚀遥感调查成果，全国轻度以上土壤侵蚀面积约 482.5 万 km²，占国土面积的 50.78%，涉及全国各个省、市、自治区^[4]。因此，进行土壤侵蚀研究是合理实施水土保持措施和土地资源管理的重要前提，具有重要的现实意义。

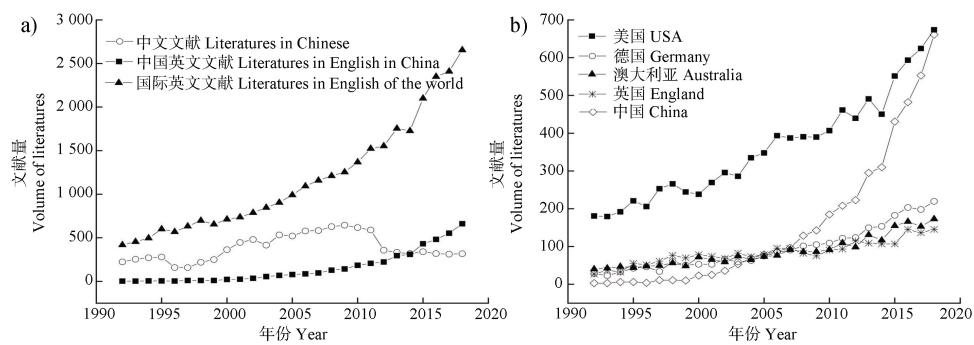
在新时期全国生态文明建设事业开展过程中，土壤侵蚀引起的生态环境问题愈加受到广泛关注与高度重视。目前针对土壤侵蚀相关研究的综述较多，其中国内外学者就侵蚀性的概念、评价方法，耕作制度、降雨、植被、土壤性质等与侵蚀的关系，侵蚀对农业生产、环境质量以及生态系统的影响等方面展开评述^[5-8]；国内对土壤侵蚀研究综述多集中在土壤侵蚀预测模型^[9-10]、森林植被等影响因子的侵蚀机理^[11]、特定区域或地形地貌的侵蚀研究^[12]以及可持续性土地管理等方面。众多学者从不同研究尺度、不同地区、不同角度等方面对土壤侵蚀研究做出了较全面的综合论述^[13-15]。传统文献综述主要针对土壤侵蚀的具体研究内容展开论述，未能全面反映土壤侵蚀学科的发展历程。鉴于此，本文期望借助 CiteSpace 软件的可视化分析方法，结合文献计量学分析，从宏观发展角度出发，系统归纳总结近 30 年来国内外土壤侵蚀研究不同时期发展过程、研究热点及研究成果，科学、客观、定量地描述土壤侵蚀学科的发展历程，对比国内外土壤侵蚀研究的异

同点，理清侵蚀发展脉络，提出当前我国土壤侵蚀发展存在的问题及未来发展方向。

1 数据来源与研究方法

学术界对于土壤侵蚀的研究历史悠久，早在 19 世纪 30 年代美国就颁布了《水土保持法》，为土壤侵蚀做出了系统定义^[16]。20 世纪 90 年代以来，国际上对土壤侵蚀研究的热度不断提高，相关文献数量呈喷井式增长（图 1）。国际土壤侵蚀研究的英文发文量在 1992—2018 年间整体呈快速增长状态。对比发文量前五的国家可以看出，美国、德国、澳大利亚、英国等发达国家在土壤侵蚀研究方面起步较早，美国发文量呈领先且快速发展状态；中国研究起步较晚，但后期发展态势良好。我国中文文献量在 2000 年以前呈波动缓慢上升状态，2001—2009 年稳定快速增长，2010 年后中文文献量有所下降。我国英文文献 1992—2000 年发展缓慢，但 2001 年后文献量显著增加。鉴于此，本文选取 1992—2018 年的中英文文献作为研究对象，以 Web of Science 数据库核心合集（选择 article 和 review 类型的文献）和中国知网（CNKI）数据库核心期刊作为数据源，分别以“soil erosion” or “soil loss” 和“土壤侵蚀”或“水土流失”为主题词，将 1992—2018 年分为 1992—2000、2001—2009、2010—2018 三个时间段进行检索，检索时间为 2019 年 1 月 11 日。经过筛选，删除与主题词无关的文献，最终得到英文文献 32 927 篇和中文文献 10 390 篇。

本文主要借助 CiteSpace 软件进行作者、国家、机构以及关键词的知识图谱分析。知识图谱是采用



注：a) 为国际土壤侵蚀研究年发文量及中国相关研究的中英文发文量变化曲线；b) 为国际土壤侵蚀研究各国家年发文量变化曲线
Note: a) stands for variation curves of the number of papers published yearly on soil erosion at home (both in Chinese and English) and abroad; and b) for variation curves of the number of papers published yearly on soil erosion in different countries

图 1 国际、国内土壤侵蚀研究年发表论文数量
Fig. 1 Number of papers published on soil erosion at home and abroad

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^[17]。相比于其他可视化软件，CiteSpace 具有知识导航的作用，可对特定知识领域数据及科技文本进行追踪、处理、计量，探测关键路径与知识拐点，分析科研领域研究脉络并探索学科最新动态^[18]。本文统一设置时间切片为 1 年，其他操作为默认设置，由此得到不同时段的关系图谱。其中，关键词的聚类视图主要体现聚类间的结构特征，突出关键节点和重要连线^[17]。节点的大小反映关键词的生命周期与影响力，节点的颜色层次代表不同的年份；节点之间的连线代表两个不同关键词共同出现的次数，连线越粗表明共同出现的次数越多。

2 国内土壤侵蚀研究发展

2.1 作者合作网络图谱特征

作者合作知识图谱可以展现在一定时间内引领某个研究领域的作者。图谱中共有 569 个节点，775 条连线，表明在 1992—2018 年间，研究土壤侵蚀的作者较多，团队内合作密切，但整体合作较少（图 2）。图中主要为四个合作紧密的科研团队，其中发文量最大的是以蔡强国（83 篇）为核心的科研团队，其次是李占斌（81 篇）、杨明义（40 篇）、刘普灵（42 篇）等，第三核心团队为李锐（49 篇）、杨勤科（80 篇）等，第四是郑粉莉（72 篇）等。此外，部分作者虽发文量不多，但与其他团队合作比较密切，如唐克丽、傅伯杰、张科利、刘宝元等。国内 10 390

篇文献中共有 569 位作者（图中所示为发文量大于 15 篇的作者），其中 33 位作者的发文量超过 20 篇，说明该领域核心作者较多。

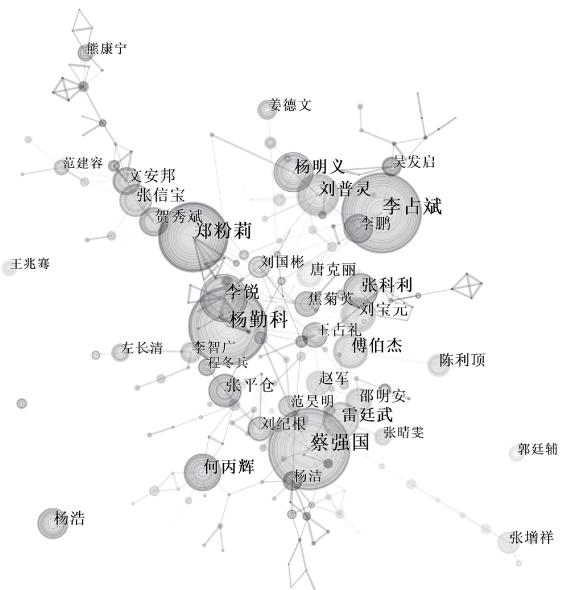


图 2 1992—2018 年土壤侵蚀国内作者合作知识图谱
Fig. 2 Knowledge map of co-authors of papers published on soil erosion in China during 1992—2018

2.2 机构合作网络图谱特征

研究机构的发文量从一定程度可以反映该研究机构的科研能力，通过统计分析，可以有效地衡量各研究机构的发展历程与研究成效^[19]。图谱中共有 342 个节点、449 条连线（图 3），发文量最多的是中国科学院水利部水土保持研究所（257 篇），其次



图 3 1992—2018 年土壤侵蚀国内研究机构合作知识图谱

Fig.3 Knowledge map of cooperative institutions in the research on soil erosion in China during 1992—2018

是中国科学院地理科学与资源研究所（184 篇）、西北农林科技大学资源环境学院（160 篇）等。图谱中所示研究机构为 1992—2018 年间发文量大于 60 篇的研究团体，其中，科研机构发文较多，大学相对较少，中国科学院水利部水土保持研究所与其他机构的合作次数最高，反映其在土壤侵蚀研究方面强大的科研能力。

2.3 研究热点网络图谱特征

国内近 30 年发表与土壤侵蚀研究有关的文献共检索到 10 390 篇，1992—2000 年、2001—2009 年、2010—2018 年三个时间段发文量分别占总数量的 20%、46%、34%。运用 CiteSpace 软件绘制的知识图谱可以较好地反映关键词在文献中出现的频次和关键词间的关联。关键词词频在一定程度上反映土壤侵蚀研究的主要热点领域：在过去的近 30 年间，关键词词频随着年限的增加逐渐升高，特别是 2001—2009 年间较前九年频次增加了 2 倍~3 倍，土壤侵蚀在此阶段的关注度上升趋势最为显著（表 1）。前十位均出现黄土高原、小流域、综合治理、生态环境、坡耕地等关键词，表明黄土高原一直是土壤侵蚀研究重点关注的区域，以坡耕地、小流域综合治理为

主要研究内容，以恢复生态环境为目的研究一直是侵蚀研究的热点；随着时间的推移，GIS、遥感、土地利用、RUSLE、USLE 等逐渐成为高频词，这些研究越来越受到重视。

2.3.1 1992—2000 年国内土壤侵蚀研究态势 根据图 4 聚类视图可将 1992—2000 年研究热点分为两大部分。第一部分为小流域综合治理：该时期土壤侵蚀的研究主要以小流域为单元，综合治理为原则，重视生态环境整治与农业自然资源合理利用的有机结合。研究主要集中在土壤侵蚀概念、成因分析及其危害和治理等理论方面。世界各地水土流失面积广阔，侵蚀原因千差万别，因地制宜地建立小流域综合治理模式，使我国水土保持发生深刻的变革，走出了一条具有中国特色的水土保持成功之路^[20]。

第二部分为水土保持法：八十年代以前，我国相关方面的研究过多重视生态效应，但在九十年代以来，我国大力倡导突出经济效益，注重提高农民收入，以经济效益带动生态效益、社会效益以及整个水土保持事业的发展^[21]。自 1991 年 6 月 29 日颁布《水土保持法》以来，大部分省、市积极学习，依据法律法规开展水土流失治理及水土保持监督的

表1 国内土壤侵蚀研究不同年限前10位高频关键词

Table 1 Top 10 high frequency keywords of the papers published on soil erosion in China relative to time period

1992—2000年	2001—2009年	2010—2018年
黄土高原 Loess plateau (77)	生态环境 Ecological environment (191)	GIS (135)
小流域 Watershed (73)	黄土高原 Loess plateau (186)	坡耕地 Sloping farmland (132)
综合治理 Comprehensive regulation (68)	生态建设 Ecological construction (174)	黄土高原 Loess plateau (106)
水土流失面积 Soil erosion area (64)	综合治理 Comprehensive regulation (169)	土地利用 Land use (99)
水土保持法	GIS (166)	遥感 Remote sensing (82)
Law of soil and water conservation (52)		
坡耕地 Sloping farmland (50)	小流域 Watershed (141)	小流域 Watershed (80)
生态环境 Ecological environment (48)	遥感 Remote sensing (107)	径流 Runoff (74)
防治对策 Countermeasure (42)	坡耕地 Sloping farmland (102)	综合治理 Comprehensive regulation (66)
水土保持监督 Administration on soil erosion conservation (30)	可持续发展 Sustainable development (93)	坡度 Slope gradient (65)
水土保持措施	对策 Countermeasure (90)	生态环境 Ecological environment (65)
Soil and water conservation measures (27)		

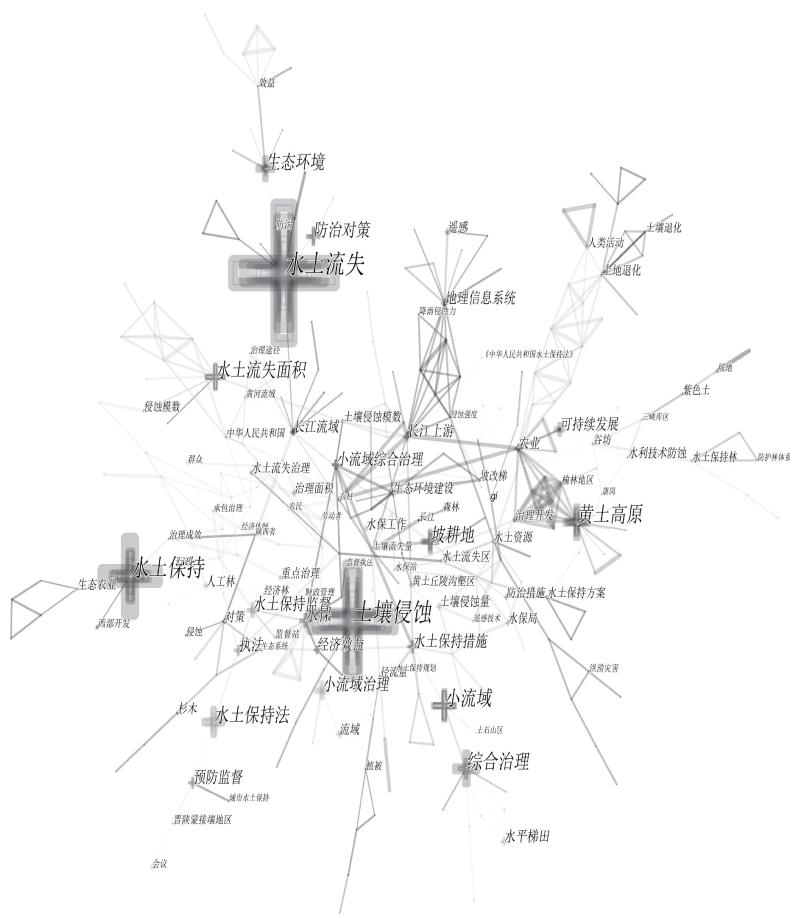


图4 1992—2000年土壤侵蚀关键词国内文献聚类视图

Fig. 4 Clustering map of keywords of the papers on soil erosion based on the Chinese literature of the period of 1992—2000

研究大量涌现，对推进水土保持措施的监督和实施具有重要意义。这与图中所示的关键词表达一致。

2.3.2 2001—2009年国内土壤侵蚀研究态势 2001—2009年研究热点较上一时期增加了不少新的研究热点（图5），如“淤地坝”、“生态清洁小流域”、“农业非点源污染”等。该时期的研究共分为三大部分。第一部分为淤地坝：它是具有拦泥保土、淤地造田等综合功能的水土保持工程中的重要措施^[22]，实施的典型

区域是黄土高原。2003年黄河水利委员会推动实施《黄土高原地区水土保持淤地坝规划》以来，至2010年，全国治理小流域3250条，新建骨干淤地坝、中型淤地坝268座。淤地坝建设是该时期水土流失综合治理的重要工程之一^[23]。与上一阶段相比，该时期小流域综合治理在农、林、牧结构优化和工程、植被、农业技术措施配置等方面做了大量研究^[24-26]，形成以小流域为单元的综合防治体系^[27]。

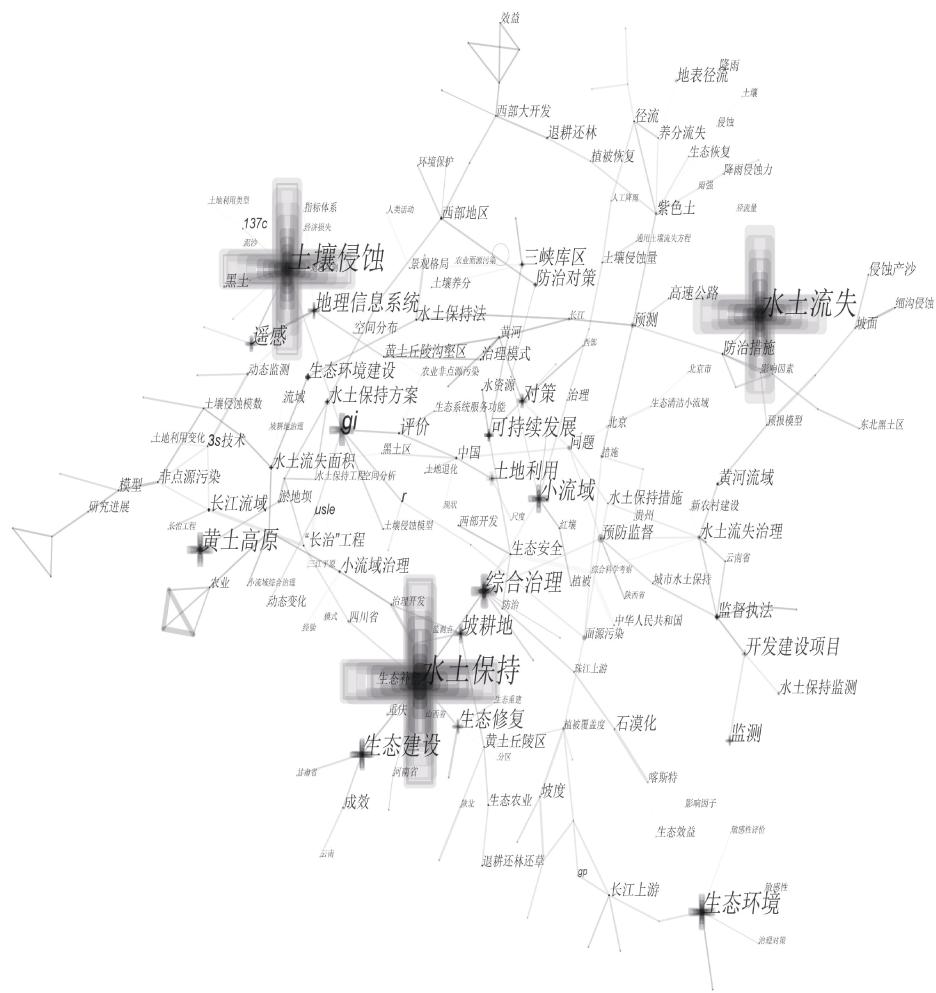


图5 2001—2009年土壤侵蚀关键词国内文献聚类视图

Fig. 5 Clustering map of keywords of the papers on soil erosion based on the Chinese literature of the period of 2001—2009

第二部分为生态建设与退耕还林：其中，生态修复包含禁封治理、生态重建、分区等，说明该时期水土保持的研究进入一个重要阶段。1999年，在中央提出的“退耕还林（草），封山绿化，个体承包，以粮代赈”16字政策措施的指导下^[28]，研究者们针对林草植被不同部位、植被类型及嵌套方式等与土壤侵蚀控制机理的关系方面展开了

大量研究，从多个角度论述了植被对减少土壤侵蚀的重要作用，并提出要加大退耕还林还草力度，进一步提高植被覆盖率，从而保护土地资源与生态环境^[29-31]。

第三部分为“3S”技术与监督、评价：该时期以遥感图像为信息源、以GIS为载体^[32]，结合DEM数字高程数据，调查土壤侵蚀状况并进行动态监测

及预报预测，建立水土保持效益监测站和评价体系；此外，“3S”技术与土壤侵蚀模型结合，成为当前和今后土壤侵蚀模型研究的重点^[33]。

2.3.3 2010—2018年国内土壤侵蚀研究态势 图6聚类视图可以看出2010—2018年研究热点与上一时期相似程度较高，研究热点变化不大。该时期研

究共分为两大部分。第一部分为坡耕地：与之关联度较高的有“黄土坡地”、“生态效益”、“景观格局”等高频词；表明该时期研究者在坡面或小流域尺度上进行土壤侵蚀与养分及土壤有机碳的流失的关系研究较多，在红壤和黑土区的侵蚀研究也在进一步加强^[34-36]。



图6 2010—2018年土壤侵蚀关键词国内文献聚类视图

Fig. 6 Clustering map of keywords of the papers on soil erosion based on the Chinese literature of the period of 2010—2018

第二部分为生态文明建设与景观格局：与之关联度较高的有“生态环境”、“评价指标”、“生态效益”等高频词；党的十八大以来，党中央高度重视生态文明建设，提出了一系列新理念新思想新战略。侵蚀研究工作也从流域治理逐渐转移到生态景观优化配置，侵蚀治理的重点正逐步向生态功能提升与民生改善的综合治理模式转移^[1]。在不同尺度上进行水土流失过程与景观格局相互关系的研究^[37]，将是今后水土流失治理又一新的热点研究方向。这与图中关键词表达一致。

第三部分为模型及模拟试验：在过去的几十年中，通用土壤流失方程经过众多学者与专家的不断探索、实践、发展和完善，现已成为计算土壤侵蚀量的基本工具，越来越受到人们的关注^[38]。除此之外，径流小区、坡面以及小流域尺度上的野外模拟试验研究也在土壤侵蚀机理、定量评价以及侵蚀动力研究中发挥重要作用^[39-40]。利用侵蚀模型、模拟实验并结合“3S”技术和计算机技术，从宏观估算检测到微观测量检验，我国学者在找寻适合我国的通用水土流失方程的研究中一直在不断地努力^[41-42]。

3 国际土壤侵蚀研究发展

3.1 国家合作图谱网络特征

国际土壤侵蚀相关文献众多, 图谱中共有 102 个节点, 1 029 条连线(图 7)。图中发文量最大的国家是美国(5 763 篇), 中介中心性为 0.19, 较多的发文量和较大的中心性表明美国在该领域的研究深度和与其他国家合作密度以及在国际上的影响力; 其次是中国(2 678 篇)、德国(1 400 篇)、英国(1 333 篇)、澳大利亚(1 319 篇)、西班牙(1 299 篇)等, 这些国家的发文量均超过 1 000 篇, 表明其对土壤侵蚀研究的重视程度。此外, 法国(942 篇)和荷兰(775 篇)的中介中心性均大于 0.1, 表明这两个国家对外合作具有较高的活跃性。

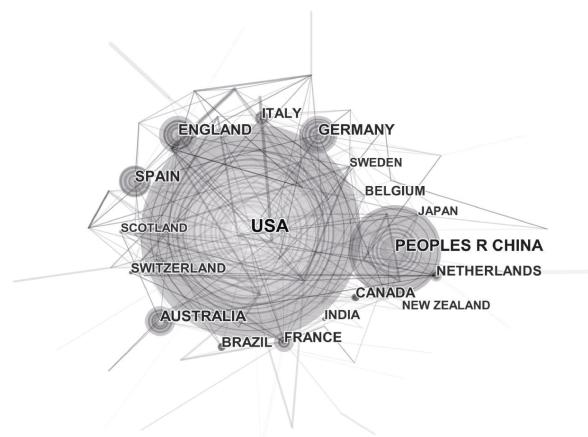


图 7 1992—2018 年土壤侵蚀国家合作知识图谱

Fig. 7 Knowledge map of cooperative countries in the researches on soil erosion based on the international literature of the period of 1992—2018

3.2 机构合作网络图谱

图谱中共有 205 个节点、713 条连线(图 8), 其中发文量最多的是中国科学院(1 304 篇); 其次是美国农业部农业研究局(908 篇), 具有研究机构中最大中介中心性 0.56, 表明其强大的科研影响力; 中心性大于 0.1 的机构还有荷兰瓦格宁根大学(215 篇)、澳大利亚联邦科学与工业研究组织(95 篇)。结合上文国家合作网络分析发现, 国家发文量多少和影响力的强弱, 很大程度上取决于国家重点研究机构的科研能力。在图谱中(发文量大于 180 篇)所示科研团队中, 整体而言, 大学的总发文量较多, 但科研机构的发文量和影响力仍在大学之上。

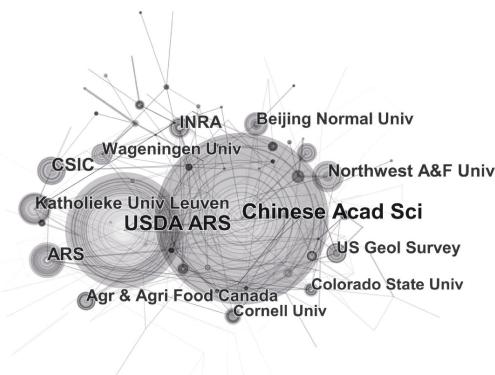


图 8 1992—2018 年土壤侵蚀国际研究机构合作知识图谱

Fig. 8 Knowledge map of cooperative institutions in the world in the researches on soil erosion based on the international literature of the period of 1992—2018

3.3 研究热点网络图谱

近 30 年共检索到 32 927 篇国际英文文献, 1992—2000、2001—2009、2010—2018 年间的发文量分别占总文献量的 15%、32%、53%, 整体呈快速发展趋势。近 30 年不同年限出现频次较高的关键词有 runoff、nitrogen、organic matter、model 等, 表明国际上一直注重利用模型研究土壤侵蚀及其径流, 并且关注侵蚀过程中氮和有机质的研究, 随着时间的推移, management、climate change、land use change、dynamics、impact 等逐渐成为高频词(表 2), 表明土壤侵蚀在发展过程中对侵蚀过程、土地利用管理以及与全球气候变化的关系研究等方面得到加强。

3.3.1 1992—2000 年国际土壤侵蚀研究态势 图 9 聚类视图可以看出 1992—2000 年研究热点可分为三大部分。第一部分为土壤侵蚀机理与定量分析: 该时期注重土壤侵蚀机理的研究, 包括土壤持水性、土壤结构稳定性、土壤结皮、土壤侵蚀的判定等多方面的研究^[43-45]。在土壤侵蚀的定量研究方面,¹³⁷Cs 法作为估算侵蚀量的新技术, 其估算结果与 USLE 所得侵蚀量一致^[46]; 此外, 通过建立、优化模型进行的定量研究更加深入, 如美国农业研究机构于 1996 年中后期发行出应用范围由原二维扩展至三维的 RUSLE 2.0^[47], 以及具有连续模拟土壤侵蚀过程的欧洲土壤侵蚀模型(EUROSEM)^[48]等。

第二部分为氮、磷、碳的损失与径流: 该时期学术界尝试利用各种手段研究农业非点源径流和侵蚀造成的氮、磷、碳的损失, 如室内模拟分析、田间试验分析和参数模型构建等^[49-52]。

表2 国际土壤侵蚀研究不同年限前10位高频关键词

Table 2 Top 10 high frequency keywords of the papers published on soil erosion in the world relative to time period

1992—2000年	2001—2009年	2010—2018年
runoff (362)	runoff (984)	runoff (1112)
nitrogen (347)	nitrogen (821)	management (890)
tillage (188)	management (628)	climate change (832)
model (188)	model (569)	nitrogen (746)
infiltration (161)	organic matter (541)	model (740)
organic matter (158)	dynamics (459)	land use change (732)
sediment (151)	carbon (457)	organic matter (706)
system (150)	sediment (455)	impact (683)
carbon (148)	tillage (437)	dynamics (551)
rainfall (142)	phosphorus (427)	catchment (527)

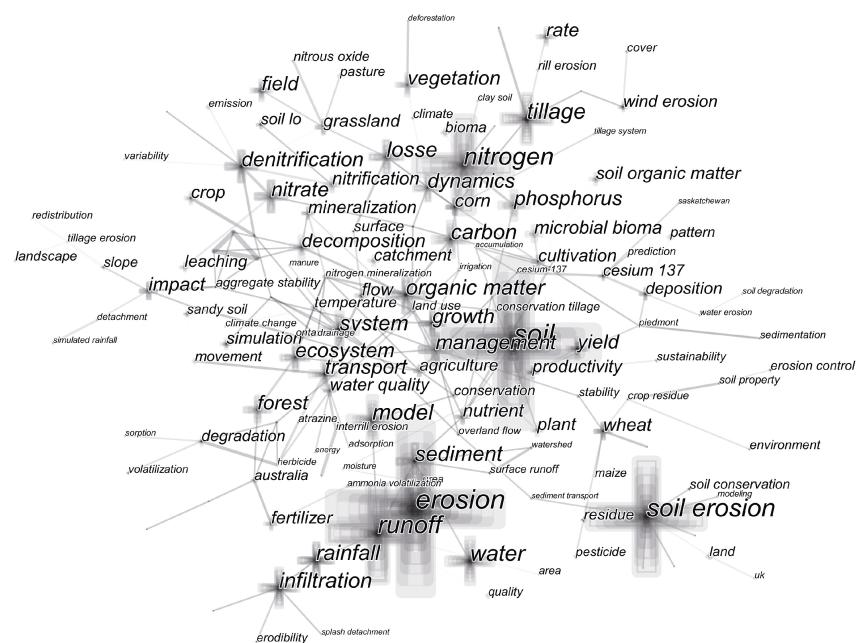


图9 1992—2000年土壤侵蚀关键词国际文献聚类视图

Fig. 9 Clustering map of keywords of the papers published on soil erosion based on the international literature of the period 1992—2000

第三部分为耕作系统与侵蚀：该时期针对侵蚀严重影响农业可持续发展和降低土地生产力，造成人均粮食生产力与世界人口粮食需求力不平衡的问题。国际上围绕侵蚀与土地生产力关系进行了大量研究，包括不同耕作方式对土壤物理性质的影响、化肥和农药产生的污染及不合理的耕作造成侵蚀等方面的研究^[53]，并总结出三类侵蚀对农业生产力影响的评价方法：土壤质量评价法、经济评价法和知

识调查法^[54]。

3.3.2 2001—2009年国际土壤侵蚀研究态势

图10聚类视图可以看出2001—2009年增加了不少新的研究热点，共可分为三大部分。第一部分为管理和水质：该时期注重不同土地管理方法和水质污染与土壤侵蚀的关系等方面的研究。2001年就有学者提出侵蚀引起土壤碳动态变化和非点源水污染造成严重的环境影响^[55]；2004年也有学者提出侵蚀降低

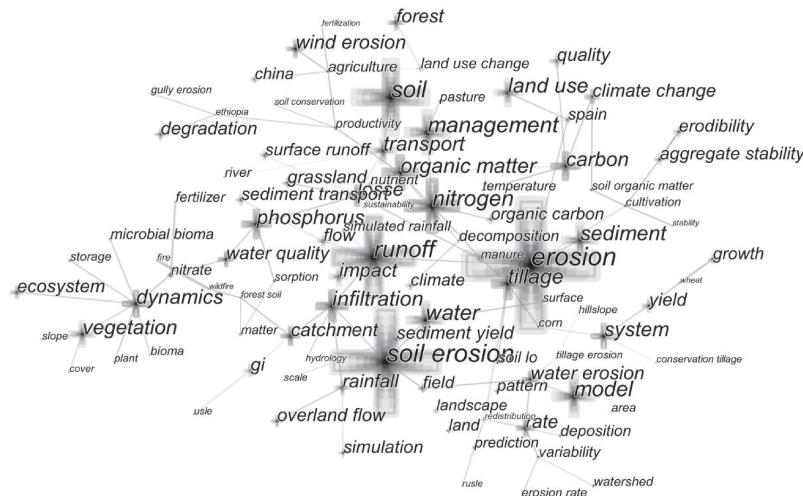


图 10 2001—2009 年土壤侵蚀关键词国际文献聚类视图

Fig. 10 Clustering map of keywords of the papers published on soil erosion based on the international literature of the period of 2001—2009

了农场土壤的生产力，并且由于水道中沉积物和农业化学品的积累而导致水质问题^[56]。可见，水质问题和人类健康越来越受到大家的关注。

第二部分为 GIS 与模型:该时期学者们利用 GIS 和遥感技术,结合 USLE 或 RUSLE 模型,对全球或区域尺度进行土壤侵蚀宏观格局和发展趋势分析以及对土壤侵蚀的时空尺度特征与尺度效应进行了大量研究^[57-62]。

第三部分为土地利用和气候变化：该时期土壤侵蚀与土地利用关系的研究逐渐增多，研究表明全球气候变化导致持续干旱或极端天气出现频率增

加，在一定程度加剧了土壤侵蚀。而植被覆盖、土地利用类型和土地利用强度是控制陆地径流和地表侵蚀强度和频率的关键因素^[56]。因此，气候变化和土地利用成为这一时期新的研究热点。

3.3.3 2010—2018年国际土壤侵蚀研究态势

2010—2018 年关于土壤侵蚀的现有研究可分为以下四大部分（图 11）。第一部分为生态系统服务与土地利用变化：该时期学科间的交叉和融合趋势加强，在土壤侵蚀研究中开始注重土地利用引起的土壤生物多样性的变化与生态系统服务关系问题的研究^[63-65]。

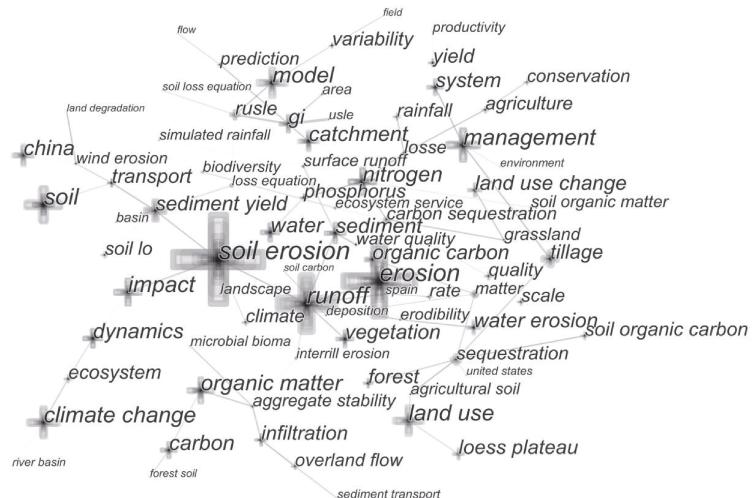


图 11 2010—2018 年土壤侵蚀关键词国际文献聚类视图

Fig. 11 Clustering map of keywords of the papers on soil erosion based on the international literature of the period of 2010—2018

第二部分为土壤侵蚀模型及修正: 虽然该时期的研究热点与2001—2009年高度相似,但在相关研究层次及内容方面有所不同。近年来,人们除了致力于研究估算精度更高、普适性更强的土壤侵蚀模型^[8]之外,更加注重研究面向过程的不同空间尺度土壤侵蚀模型;还开拓了如BP神经网络等其他领域的模型在侵蚀模型中的应用^[66],这将是未来土壤侵蚀模型研究的重点方向之一。

第三部分为环境与管理:由耕地引起的土壤侵蚀进而导致水质下降和其他环境问题逐渐被人们所重视,相关研究和解决思路日益增多。有学者指出保护性耕作和参与式管理是控制土壤侵蚀的有效措施^[67-68]。

第四部分为侵蚀与土壤有机碳:关于土壤侵蚀在全球碳循环中作用的研究是近年来国内外研究的热点之一。在气候变化的研究背景下,土壤侵蚀作为“碳源”还是“碳汇”的角色定性问题仍然缺乏统一的认识及系统的理论解释^[69],需要研究者进一步深入探索。

4 结论与展望

1992—2018年来,国际土壤侵蚀研究文献数量呈快速增长趋势,特别是2010—2018年的发文量占近30年总量的53%。文献计量分析的结果表明,国际上在土壤侵蚀研究中美国发文量最大且与其他国家合作密切,中国科学院在研究机构中发文量最大,但美国农业部中介性最高,结合国家和机构合作图谱,美国在国际土壤侵蚀研究方面展现出强大的科研能力和影响力。国际上土壤侵蚀发展主要受科学发展本身和社会需求的驱动,对土壤侵蚀过程机理、影响因素等进行了大量研究,建立了较完备的土壤侵蚀基础数据库,并且在土壤侵蚀模型的研究方面取得了丰硕的成果,如通用土壤流失方程USLE及其修正版RUSLE、欧洲土壤侵蚀模型EUROSEM、水力侵蚀预报模型WEPP以及分布式土壤侵蚀模型SHE等。侵蚀研究突出耕作系统、气候变化、生态系统服务等与人类生活密切相关的研究,创新性强,且具有引领作用。

总体而言,我国土壤侵蚀和水土保持方面的研究在理论上已相对成熟,形成了相对完整的土壤侵蚀研究学科体系,并且出现一批积极活跃的作者和

研究机构。随着研究的深入,国内外均重视土壤侵蚀过程和机理对土壤侵蚀模型的进一步修正研究;学科间的交叉研究也越来越密切。近30年在侵蚀研究方面总体上呈稳定增长趋势,近年来在国际上的发文量显著增加,但结合文献计量分析,我国土壤侵蚀研究与国际土壤侵蚀的发展脉络存在差异,在研究方法和手段上受国外影响较大,创新性不够。我国土壤侵蚀研究受国家政策导向明显,研究内容也主要围绕土壤侵蚀问题严重地区,在水土保持措施对于生态环境问题的影响方面关注不够。侵蚀研究在过程和机理方面还不够深入,影响因子及其侵蚀模型还没有统一标准,研究过程中数据资料的共享性较差;在侵蚀治理方面虽然取得了不少研究成果,但对于侵蚀状况的时空差异性还缺乏系统研究。当前的侵蚀研究主要注重土壤侵蚀本身,对于土壤侵蚀与人类活动的关系、土壤侵蚀对人类健康的影响、土壤侵蚀与生态系统服务的相互作用机理等方面的研究较少。今后应更加注重气候变化对人类福祉的影响,尤其从生态系统角度探讨土壤侵蚀与气候变化、生态环境质量、生态系统服务等交互关系的研究。土壤侵蚀的治理需从不同利益相关者的角度出发,构建生态安全、生产高效、生活幸福为一体的“三生”格局,实现土地资源数量和质量的优化配置,为保障人类的可持续性生计提供参考。

参考文献 (References)

- [1] 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.]
- [2] Eswaran H, Lal R, Reich P F. Land degradation: An overview[M]//Response to Land Degradation. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2019: 20—35.
- [3] Pimentel D. World soil erosion and conservation[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993: 349.
- [4] Zhao X L, Zhang Z X, Zhou Q B, et al. Soil erosion actuality and its synthesis prevention countermeasures in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(1): 40—43, 46. [赵晓丽, 张增祥, 周全斌, 等. 中国土壤侵蚀现状及综合防治对策研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 40—43, 46.]
- [5] Lal R. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 1998, 17(4): 319—464.

- [6] Pimentel D, Kounang N. Ecology of soil erosion in ecosystems[J]. *Ecosystems*, 1998, 1 (5): 416—426.
- [7] Durán Zuazo V H , Rodríguez Pleguezuelo C R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers:A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28 (1): 65—86.
- [8] Kinnell P I A. Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models : A review[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 385 (1/4): 384—397.
- [9] Zhang G H. Research situation and prospect of the soil erosion model[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13 (3): 389—396. [张光辉. 土壤侵蚀模型研究现状与展望[J]. 水科学进展, 2002, 13 (3): 389—396.]
- [10] Li H W, Zheng J Y, Peng Q W, et al. Review of research progress in soil erosion prediction model on foreign[J]. *China Population,Resources and Environment*, 2016, 26 (S1): 183—185. [李宏伟, 郑钧潔, 彭庆卫, 等. 国外土壤侵蚀预报模型研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26 (S1): 183—185.]
- [11] Zhang X, Li P, Li Z B, et al. Prevention and control of grass strips distribution on soil and water loss and its optimal configuration of slope-gully system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35 (7): 122—128. [张霞, 李鹏, 李占斌, 等. 坡面草带分布对坡沟水土流失的防控作用及其优化配置[J]. 农业工程学报, 2019, 35 (7): 122—128.]
- [12] Ma Q H, Zhang K L. Progresses and prospects of the research on soil erosion in Karst area of southwest China[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33 (11): 1130—1141. [马芊红, 张科利. 西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33 (11): 1130—1141.]
- [13] Zheng F L, Liu F, Yang Q K, et al. Review of research progress in soil erosion prediction model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21 (6): 16—18, 32. [郑粉莉, 刘峰, 杨勤科, 等. 土壤侵蚀预报模型研究进展[J]. 水土保持通报, 2001, 21 (6): 16—18, 32.]
- [14] Wu F Q, Lin Q T, Lu P, et al. Research progress of soil erosion influence factors C in sloping field in China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13 (6): 1—11, 159. [吴发启, 林青涛, 路陪, 等. 我国坡地土壤侵蚀影响因子C的研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13 (6): 1—11, 159.]
- [15] Li Z B, Zhu B B, Li P. Advancement in study on soil erosion and soil and water conservation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (5): 802—809. [李占斌, 朱冰冰, 李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展[J]. 土壤学报, 2008, 45 (5): 802—809.]
- [16] Nan Q J, Hua L. Recent progress of the soil erosion in the world[J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2003, 24 (2): 86—95. [南秋菊, 华珞. 国内外土壤侵蚀研究进展[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2003, 24 (2): 86—95.]
- [17] Chen Y, Chen C M, Liu Z Y, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33 (2): 242—253. [陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33 (2): 242—253.]
- [18] Chen Y, Ma Z H, Gu J L, et al. Environmental cost research:Cooperation, evolution, hotspot and prospect[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33 (6): 11—22. [陈昱, 马子涵, 古清灵, 等. 环境成本研究:合作、演进、热点及展望—基于 CitespaceV 的可视化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33 (6): 11—22.]
- [19] Cao D N, Zhong Q, Qin J H, et al. Literature review on the role of root in soil erosion control based on the knowledge map[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16 (6): 124—135. [曹丹妮, 钟琦, 秦嘉惠, 等. 基于知识图谱的根系对土壤侵蚀阻控作用的研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16 (6): 124—135.]
- [20] Duan Q F. Comprehensive harness and development of small watershed is the effective way to speed up ecological environment construction[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2000 (6): 16—18, 48. [段巧甫. 小流域综合治理开发是加快生态环境建设的有效途径[J]. 中国水土保持, 2000 (6): 16—18, 48.]
- [21] Zhang Y. Present situation and control measures of soil and water loss in China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1993, 13 (1): 7—10, 23. [张岳. 我国水土流失现状及其防治对策[J]. 水土保持通报, 1993, 13 (1): 7—10, 23.]
- [22] Li M. Function of warping dams in prevention and management of soil and water loss in the middle Yellow River[J]. *Yellow River*, 2003, 25 (12): 25—26, 46. [李敏. 淤地坝在黄河中游水土流失防治中的作用[J]. 人民黄河, 2003, 25 (12): 25—26, 46.]
- [23] Liu Z. Overview of warping dams planning for soil and water conservation in Loess Plateau region[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2003 (12): 8—10. [刘震. 黄土高原地区水土保持淤地坝规划概述[J]. 中国水土保持, 2003 (12): 8—10.]
- [24] Zhang F, Yu X X, Sun L D. Optimum structure and disposition of vegetation measures of soil and water conservation in small watershed[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27 (3): 175—179. [张富, 余新晓, 孙兰东. 小流域水土保持植物措施对位配置研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27 (3): 175—179.]
- [25] Zhao M H, Zhang Y, Cao S X, et al. Selection of suitable plant species and their spatial arrangement model in different soils of loess hilly area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16 (3): 43—46. [赵麦换, 张翼, 曹世雄, 等. 黄土丘陵区不同土壤地类造林树种选择与配置技术研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16 (3): 43—46.]

- [26] Zeng Y Q, Lu X S. Current advance and benefits of tree-grass complex system researches[J]. Pratacultural Science, 2008, 25 (3): 33—36. [曾艳琼, 卢欣石. 林草复合生态系统的研究现状及效益分析[J]. 草业科学, 2008, 25 (3): 33—36.]
- [27] Cai G J, Zhang R Z, Chai C S. Evaluation of comprehensive management benefits of Anjiagou small watershed in Dingxi, Gansu[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18 (6): 23—30. [蔡国军, 张仁陟, 柴春山. 安家沟小流域综合治理效益评价[J]. 草业学报, 2009, 18 (6): 23—30.]
- [28] Du J N. Analysis on governmental behavior during ecology-based cropland-conversion in northwest China[J]. Ecological Economy, 2008, 24 (7): 77—80. [杜君楠. 西北地区生态退耕过程中的政府行为分析[J]. 生态经济, 2008, 24 (7): 77—80.]
- [29] Liu D H, Li Y. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17 (3): 34—37, 117. [刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17 (3): 34—37, 117.]
- [30] Sun X H, Zhang D M, Yao X Y, et al. Research on different vegetation landscape type and soil erosion in Yimeng mountain areas[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15 (6): 6—9. [孙希华, 张代民, 姚孝友, 等. 沂蒙山区不同植被景观类型与土壤侵蚀研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15 (6): 6—9.]
- [31] Wen Y F, Bi Y F, Dong Y F. Benefit of forage on water and soil conservation in Jinsha valley[J]. Soils, 2006, 38 (4): 489—493. [文亦芾, 毕玉芬, 董亚芳. 金沙江流域退耕还草地水土保持效益分析研究[J]. 土壤, 2006, 38 (4): 489—493.]
- [32] Xue L H, Yang L Z. Research progress on remote sensing of soil erosion in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18 (3): 186—189. [薛利红, 杨林章. 遥感技术在我国土壤侵蚀中的研究进展[J]. 水土保持学报, 2004, 18 (3): 186—189.]
- [33] Luo Z J, Zhang J. Research situation and prospect of soil erosion model in the world[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35 (27): 8574—8576. [罗志军, 张俊. 土壤侵蚀模型的研究现状与展望[J]. 安徽农业科学, 2007, 35 (27): 8574—8576.]
- [34] Nie X D, Li Z W, Wang X Y, et al. Effect of rainfall intensity on soil loss from slope farmland of red soil and organic carbon enrichment in sediment[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (5): 900—908. [聂小东, 李忠武, 王晓燕, 等. 雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究[J]. 土壤学报, 2013, 50 (5): 900—908.]
- [35] Zhang X, Li Z W, Shen W P, et al. Characteristics of loss of organic carbon in red soil and their quantitative relationships with sediment and runoff generation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (3): 465—473. [张雪, 李忠武, 申卫平, 等. 红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流流失量的定量关系[J]. 土壤学报, 2012, 49 (3): 465—473.]
- [36] Zhao P Z, Chen X W, Wang E H. Responses of accumulation-loss patterns for soil organic carbon and its fractions to tillage and water erosion in black soil area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28 (11): 3634—3642. [赵鹏志, 陈祥伟, 王恩姬. 黑土坡耕地有机碳及其组分累积-损耗格局对耕作侵蚀与水蚀的响应[J]. 应用生态学报, 2017, 28 (11): 3634—3642.]
- [37] 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.]
- [38] Zhang Y L, Zhang H. Advance in researches in Universal Soil Loss Equation [J]. Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi, 2013(2): 12—15. [张艳灵, 张红. 通用土壤流失方程研究进展[J]. 山西水土保持科技, 2013 (2): 12—15.]
- [39] Ma L, Bu Z H, Liang W G, et al. Method for quantitative monitoring of soil erosion based on USLE principle and 3S technology and its application[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56 (3): 602—614. [马力, 卜兆宏, 梁文广, 等. 基于USLE原理和3S技术的水土流失定量监测方法及其应用研究[J]. 土壤学报, 2019, 56 (3): 602—614.]
- [40] Cao Z H, Zhao Q H, Zuo X Y, et al. Runoff and sediment yielding characteristics of riparian slopes along the lower reaches of the Yellow River and their relationships with flowlength[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55 (6): 1389—1400. [曹梓豪, 赵清贺, 左宪禹, 等. 黄河下游河岸坡面产流产沙特征及其与汇流路径长度关系[J]. 土壤学报, 2018, 55 (6): 1389—1400.]
- [41] He W C, Zhao S M, Wang R B, et al. Research on soil erosion risk based on GIS and CSLE in Shanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23 (3): 58—64. [何维灿, 赵尚民, 王睿博, 等. 基于GIS和CSLE的山西省土壤侵蚀风险研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23 (3): 58—64.]
- [42] Zhou L, Li Y J, Sun Y J. Determination of units for various factors of Revised Universal Soil Loss Equation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38 (1): 169—174. [周来, 李艳洁, 孙玉军. 修正的通用土壤流失方程中各因子单位的确定[J]. 水土保持通报, 2018, 38 (1): 169—174.]
- [43] Lowery B, Swan J, Schumacher T, et al. Physical properties of selected soils by erosion class[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 50 (3): 306—311.
- [44] Warkentin B P. The changing concept of soil quality[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 50 (3): 226—228.
- [45] Halvorson J J, Smith J L, Papendick R I. Issues of scale for evaluating soil quality[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1997, 52 (1): 26—30.

- [46] Soileau J M, Hajek B F, Touchton J T, et al. ^{137}Cs determines soil erosion and sediment deposition in small catchments[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 1993(2): 61—65. [Soileau J M, Hajek B F, Touchton J T, 等. 用 ^{137}Cs 确定小流域土壤侵蚀和泥沙沉积[J]. 水土保持科技情报, 1993(2): 61—65.]
- [47] Shao S D, Wang L X, Zhou J X. Recent progress of the soil erosion on foreign[J]. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 2000(1): 32—36. [邵颂东, 王礼先, 周金星. 国外土壤侵蚀研究的新进展[J]. 水土保持科技情报, 2000(1): 32—36.]
- [48] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23(6): 527—544.
- [49] Turtola E, Paajanen A. Influence of improved subsurface drainage on phosphorus losses and nitrogen leaching from a heavy clay soil[J]. *Agricultural Water Management*, 1995, 28(4): 295—310.
- [50] Sims J T, Simard R R, Joern B C. Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(2): 277—293.
- [51] Gregorich E G, Greer K J, Anderson D W, et al. Carbon distribution and losses: Erosion and deposition effects[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47(3/4): 291—302.
- [52] Lemunyon J L, Gilbert R G. The concept and need for a phosphorus assessment tool[J]. *Journal of Production Agriculture*, 1993, 6(4): 483—486.
- [53] Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits[J]. *Science*, 1995, 267(5201): 1117—1123.
- [54] Lal R. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1998, 17(4): 319—464.
- [55] Lal R. Soil degradation by erosion[J]. *Land Degradation & Development*, 2001, 12(6): 519—539.
- [56] Nearing M A, Pruski F F, O'neal M R. Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 59(1): 43—50.
- [57] Reich P, Eswaran H, Beinroth F. Global dimensions of vulnerability to wind and water erosion[J]. *Purdue University and USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory*, 1999: 838—846.
- [58] Yue Y, Ni J R, Ciais P, et al. Lateral transport of soil carbon and land-atmosphere CO_2 flux induced by water erosion in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(24): 6617—6622.
- [59] Yang D W, Kanae S, Oki T, et al. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes[J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(14): 2913—2928.
- [60] Le Bissonnais Y, Montier C, Jamagne M, et al. Mapping erosion risk for cultivated soil in France[J]. *Catena*, 2002, 46(2/3): 207—220.
- [61] Gobin A, Govers G, Kirkby M. *Pan-European soil erosion assessment and maps*[M]//*Soil Erosion in Europe*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2006: 659—674.
- [62] Zhang X Y, Drake N A, Wainwright J W. Scaling land surface parameters for global-scale soil erosion estimation[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(9): 1180—1189.
- [63] Wagg C, Bender S F, Widmer F, et al. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(14): 5266—5270.
- [64] de Vries F T, Thébaud E, Liiri M, et al. Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(35): 14296—14301.
- [65] Tsiafouli M A, Thébaud E, Sgardelis S P, et al. Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(2): 973—985.
- [66] Caro A, Legarda F, Romero L, et al. Map on predicted deposition of Cs-137 in Spanish soils from geostatistical analyses[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013, 115: 53—59.
- [67] Lanzanova M E, Eltz F L F, da Silveira Nicoloso R, et al. Residual effect of soil tillage on water erosion from a Typic Paleudalf under long-term no-tillage and cropping systems[J]. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 2013, 37(6): 1689—1698.
- [68] Xu X Z, Xu Y, Chen S C, et al. Soil loss and conservation in the black soil region of Northeast China: A retrospective study[J]. *Environmental Science & Policy*, 2010, 13(8): 793—800.
- [69] Doetterl S, Berhe A A, Nadeu E, et al. Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 154: 102—122.

(责任编辑: 檀满枝)